دوره‌ی ۴۱
شماره‌ی ۱
دو فصلنامه
تابستان
۱۴۰۴

مهندسی صنایع و مدیریت

شریف

مقالات پژوهشی:

- تأثیر قابلیت‌های بازاریابی در عملکرد صادراتی با توجه به نقش مزیت رقابتی با استفاده از روش معادله‌های ساختاری (موردمطالعه: شرکت‌های صادراتی صنایع غذایی در استان تهران)
  طاها کشاورز و محمدرضا عموزاده
- طراحی سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مدیریت سبد سهام با بهره‌گیری از روش‌های علم داده (بازار بورس اوراق بهادار تهران)
  نوید جواهری، نجمه نشاط و عباسعلی جعفری ندوشن
- مکان‌یابی دکل‌های مخابراتی برای پوشش‌دهی شبکه‌ی موبایل با درنظرگرفتن معیارهای توسعه‌ی پایدار و با به‌کارگیری GIS و روش BWM (مطالعه‌ی موردی: شهرستان ارومیه)
  روناک عباسی قاسملوئی، سعید فضایلی و رضا بابازاده
- بررسی سرمایه‌گذاری کلان‌داده در یک زنجیره‌ی تأمین سبز سه‌سطحی: رویکرد نظریه بازی
  زهرا اسماعیلی، ناصر ملاوردی و سروش صفرزاده
- تحلیل ارزش طول عمر مشتریان با رویکرد خوشه‌بندی مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی SOM و زنجیره‌ی مارکوف (مطالعه‌ی موردی: بانک دیجیتال پاسارگاد)
  مارال میرزایی مرادی، حسین رضوی حاجی آقا ، حنان عموزاد مهدیرجی و علی عالیخانی
- روشی نوین برای طراحی فرمولاسیون لعاب با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی
  حسین شمس شمیرانی و حمیدرضا زاهدی نیستانی
- بررسی عملکرد دو مدل پیش‌بینی قیمت سهام مبتنی بر شبکه‌ی عصبی حافظه‌ی کوتاه‌مدت طولانی و با دو رویکرد متفاوت انتخاب ویژگی و تجزیه‌ی سری زمانی
  کیوان حقیقی نائینی و محمدعلی رستگار
- توسعه و ارزیابی مدل‌های جدید برای مسئله‌ی گشت آزاد وسائط نقلیه
  حامد منشادیان، محسن صادق عمل نیک و سیدعلی ترابی
- یک رویکرد نظریه‌ی بازی برای قیمت‌گذاری رایانش ابری و تعیین سطح امنیت شرکت‌های ارائه‌دهنده‌ی امنیت
  مهدیه صادقیان، مرتضی راستی برزکی و حسین خسروشاهی

یادداشت فنی:

- مکان‌یابی هاب با رویکرد پشتیبان‌گیری و لحاظ محدودیت ظرفیت تحت شرایط وقوع بحران
  حسن زیارتی، علی شاهنده و محمد رئیسی نافچی
- بهینه‌سازی تخصیص تخت بیمارستانی با رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی فازی
  سارا متولی حقیقی و علی قربانیان

مهندسی صنایع و مدیریت شریف
Industrial Engineering & Management SHARIF
I
1

Industrial Engineering & Management

Sharif

Volume 41
Number 1
Semiannually
Summer
2025

1

ISSN 2676-4741

ARTICLES:

- The Impact of Marketing Capabilities on Export Performance by Considering the Role of Competitive Advantage Using the Structural Equations Method (Case Study: Food Export Companies in Tehran Province)
  Taha Keshavarz and Mohammad Reza Amuzadeh
- Designing a Decision Support System for Portfolio Management Using Data Science Methods (Tehran Stock Exchange)
  Navid Javaheri, Najmeh Neshat and Abbass Ali Jafari Nodushan
- Locating Telecommunications Masts for Mobile Network Coverage Considering Sustainable Development Indices by Using GIS and BWM Technique: Case Study of Urmia
  Ronak Abbasi Ghasemloei, Saeed Fazayeli and Reza Babazadehounty
- Investigating Big Data Investment in a Three-Level Green Supply Chain: A Game Theoretic Approach
  Zahra Esmaeeli, Naser Mollaverdi and Soroush Safarzadeh
- Analysis of Customers' Lifetime Value with a Clustering Approach Based on Som Artificial Neural Networks and Markov Chain (Case Study: Pasargad Digital Bank)
  Maral Mirzaei Moradi, Hossein Razavi Haji Agha, Hanan Amouzad Mehdirji and Ali Alikhani
- A Novel Method for Designing Glaze Formulation Using Mathematical Programming
  Hossein Shams Shemirani and Hamid Reza Zahedi Neiestani
- Investigating the Performance of Two Stock Price Forecasting Models, Based on a Long Short-Term Memory Neural Network and with Two Different Approaches of Feature Selection and Time Series Analysis
  Keyvan Haghighi Naeini and Mohammad Ali Rastegar
- Developing and Assessing New Models for the Free Patrol Vehicle Routing Problem
  Hamed Manshadian, Mohsen Sadegh Amalnick and Seyed Ali Torabi
- Game-Theoretic Approach for Pricing Cloud Computing and Determining the Security Level of Security Provider Companies
  Mahdie Sadeghian, Morteza Rasti-Barzoki and Hossein Khosroshahi

RESEARCH NOTES:

- Hub Location with the Backup Approach by Considering the Capacity Constraint in Critical Situations
  Hasan Ziarati, Ali Shahandeh Nookabadi and Mohammad Reisi-Nafchi
- Optimization of Hospital Bed Allocation by a Hybrid Simulation-MCDM Approach
  Sara Motevali Haghighi and Ali Ghorbanian

به نام خدا

مهندسی صنایع و مدیریت

شریف

دوره‌ی ۴۱

شماره‌ی ۱

تابستان

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

ویرایش: رزیتا رستخیز پایدار

صفحه‌آرایی و امور گرافیکی: غزل احمدی میرقائد و راضیه قربانی

امور اجرایی: شیما آل اسداله و مریم پورابراهیمی باوفا

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 و پژوهشی شریف

تلفن: ۶۶۱۶۴۰۹۳–۶۶۰۰۵۴۱۹

نمابر: ۶۶۰۱۲۹۸۳

نشانی‌سایت: http:// journal.sharif.ir

رایانامه: pajouhesh@sharif.edu

هیأت مشاوران

مطالب این شماره

مقالات پژوهشی:

۱ **تأثیر قابلیت‌های بازاریابی در عملکرد صادراتی با توجه به نقش مزیت رقابتی با استفاده از روش معادله‌های ساختاری (موردمطالعه: شرکت‌های صادراتی صنایع غذایی در استان تهران)**
طاها کشاورز و محمدرضا عموزاده

۱۲ **طراحی سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مدیریت سبد سهام با بهره‌گیری از روش‌های علم داده (بازار بورس اوراق بهادار تهران)**
نوید جواهری، نجمه نشاط و عباسعلی جعفری ندوشن

۲۸ **مکان‌یابی دکل‌های مخابراتی برای پوشش‌دهی شبکه‌ی موبایل با درنظرگرفتن معیارهای توسعه‌ی پایدار و با به‌کارگیری GIS و روش BWM (مطالعه‌ی موردی: شهرستان ارومیه)**
روناک عباسی قاسملوئی، سعید فضایلی و رضا بابازاده

۳۹ **بررسی سرمایه‌گذاری کلان‌داده در یک زنجیره‌ی تأمین سبز سه‌سطحی: رویکرد نظریه بازی**
زهرا اسماعیلی، ناصر ملاوردی و سروش صفرزاده

۵۷ **تحلیل ارزش طول عمر مشتریان با رویکرد خوشه‌بندی مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی SOM و زنجیره‌ی مارکوف (مطالعه‌ی موردی: بانک دیجیتال پاسارگاد)**
مارال میرزایی مرادی، حسین رضوی حاجی آقا، حنان عموزاد مهدیرجی و علی عالیخانی

۷۳ **روشی نوین برای طراحی فرمولاسیون لعاب با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی**
حسین شمس شمیرانی و حمیدرضا زاهدی نیستانی

۸۶ **بررسی عملکرد دو مدل پیش‌بینی قیمت سهام مبتنی بر شبکه‌ی عصبی حافظه‌ی کوتاه‌مدت طولانی و با دو رویکرد متفاوت انتخاب ویژگی و تجزیه‌ی سری زمانی**
کیوان حقیقی نائینی و محمدعلی رستگار

۹۸ **توسعه و ارزیابی مدل‌های جدید برای مسئله‌ی گشت آزاد وسائط نقلیه**
حامد منشادیان، محسن صادق عمل نیک و سیدعلی ترابی

۱۰۹ **یک رویکرد نظریه‌ی بازی برای قیمت‌گذاری رایانش ابری و تعیین سطح امنیت شرکت‌های ارائه‌دهنده‌ی امنیت**
مهدیه صادقیان، مرتضی راستی برزکی و حسین خسروشاهی

یادداشت فنی:

۱۲۲ **مکان‌یابی هاب با رویکرد پشتیبان‌گیری و لحاظ محدودیت ظرفیت تحت شرایط وقوع بحران**
حسن زیارتی، علی شاهنده و محمد رئیسی نافچی

۱۳۸ **بهینه‌سازی تخصیص تخت بیمارستانی با رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی فازی**
سارا متولی حقیقی و علی قربانیان

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2025), 41(1), 1-11

Sharif University of Technology

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

Research Article

The Impact of Marketing Capabilities on Export Performance by Considering the Role of Competitive Advantage Using the Structural Equations Method (Case Study: Food Export Companies in Tehran Province)

Taha Keshavarz * and Mohammad Reza Amuzadeh

Department of Industrial Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
* corresponding author: (taha_keshavarz@semnan.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:06 March 2023

Revised:14 May 2023

Accepted:12 Jul 2023

Keywords:

Marketing capabilities,
export performance,
competitive advantage,
structural equations,
food industry export companies.

Abstract

The purpose of this study is to investigate the impact of marketing capabilities on export performance by considering the role of competitive advantage in food industry export companies. The research is classified as applied from the point of view of purpose and descriptive from the point of view of method and nature. Most of the previous studies in the field of export performance have examined the relationship between capabilities and performance, but not much research has been done on marketing capabilities and their impact on competitive advantage. Another category that plays an important role in export performance and is closely related to marketing communications is distribution channels in foreign markets. Based on this, deciding on the method of transferring the goods to the place of purchase or consumption is one of the important decisions faced by managers of export companies; Because finding a suitable distribution channel in international markets is so complicated. In this study, the statistical population is food industry export companies in Tehran province and the respondents to the questionnaire are CEOs and senior managers of the commercial and export departments of these companies. After collecting the questionnaires, the data is analyzed by SPSS, and SmartPLS softwares. The validity of the questionnaire has been examined through content and structure validity, as well as its reliability through Cronbach's alpha test and composite reliability. The results show that the questions have high reliability. In terms of structure validity, which was analyzed by SmartPLS software, it is determined that all the questions have good validity. Finally, the results of data analysis and hypothesis testing show that: marketing intelligence, pricing, marketing communications, distribution, and innovation have an impact on competitive advantage. Also, the results show that competitive advantage affects export performance. Meanwhile, the mediating role of competitive advantage in the relationship between the mentioned components and export performance is confirmed. According to the relationships between research variables, better planning can be done to improve export performance and gain a competitive advantage.

Funding

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

To Cite this article:

Keshavarz, T. and Amuzadeh, M.R. 2025. The Impact of marketing capabilities on export performance by considering the role of competitive advantage using the structural equations method (case study: food export companies in Tehran province), Sharif Industrial Engineering and Management Journal, 41(1), 1-11.
https://doi.org/ 10.24200/j65.2023.61972.2346

مجله علمی مهندسی صنایع و مدیریت شریف

https://sjie.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

تأثیر قابلیت‌های بازاریابی در عملکرد صادراتی با توجه به نقش مزیت رقابتی با استفاده از روش معادله‌های ساختاری (موردمطالعه: شرکت‌های صادراتی صنایع غذایی در استان تهران)

طاها کشاورز و محمدرضا عموزاده

گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه سمنان، سمنان.

*نویسنده مسئول (taha_keshavarz@semnan.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۱/۱۲/۱۵

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۲/۰۲/۲۴

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۲/۰۴/۲۱

واژگان کلیدی:

قابلیت‌های بازاریابی،

عملکرد صادراتی،

مزیت رقابتی،

معادله‌های ساختاری،

شرکت‌های صادراتی صنایع غذایی.

چکیده

امروزه صادرات به یک مقوله‌ی بسیار مهم در حوزه‌ی بازاریابی تبدیل شده است و لازم است عوامل مؤثر در ارتقاء صادرات شناسایی شوند. هدف پژوهش حاضر، بررسی تأثیر قابلیت‌های بازاریابی در عملکرد صادراتی با توجه به نقش مزیت رقابتی در شرکت‌های صنایع غذایی است. جامعه‌ی آماری، شرکت‌های صنایع غذایی در استان تهران و پاسخگویان به پرسش‌نامه، مدیران عامل و مدیران ارشد بخش‌های بازرگانی و صادرات شرکت‌های مذکور بوده‌اند. روایی پرسش‌نامه از طریق روایی محتوا و سازه و همچنین پایایی آن از طریق آزمون آلفای کرونباخ بررسی شده است. درنهایت، نتایج حاصل از تجزیه‌وتحلیل داده‌ها و آزمون فرضیه‌ها نشان داده‌اند که هوش بازار، قیمت‌گذاری، ارتباط‌های بازاریابی، توزیع، و نوآوری در مزیت رقابتی مؤثرند. همچنین نتایج نشان می‌دهند مزیت رقابتی، مؤلفه‌ای تأثیرگذار در تعیین عملکرد صادراتی شرکت‌های صنایع غذایی است. با توجه به روابط بین متغیرهای پژوهش می‌توان برنامه‌ریزی بهتری جهت بهبود عملکرد صادراتی و کسب مزیت رقابتی داشت.

۱. مقدمه

صادرات معمول‌ترین راه پیشروی شرکت‌ها برای شروع فعالیت‌های بازاریابی در خارج از کشور است؛ که یکی از مهم‌ترین دلایلش این است که صادرات در مقایسه با سایر روش‌های بین‌المللی‌شدن به منابع کمتری نیاز دارد. کشورهای مختلف، شرکت‌های خود را به صادرات تشویق می‌کنند؛ زیرا صادرات، اشتغال را در داخل کشور افزایش، وضعیت رقابتی را توسعه، و درآمدهای ارزی را بهبود می‌بخشد. امروزه صادرات به یک مقوله‌ی بسیار مهم در حوزه‌ی بازاریابی تبدیل شده است و در این راه باید عواملی که منجر به ارتقاء اثربخشی صادرات می‌شوند، شناسایی شوند تا از این طریق بتوان به تسهیل صادرات کمک کرد.[۱] اگرچه در رابطه با اهمیت صادرات در رونق اقتصادی کشورهای مختلف، اختلاف نظری وجود ندارد؛ با این حال، سؤال مهم این است که چه عواملی در عملکرد صادراتی شرکت تأثیرگذارند؟ از جمله عوامل مذکور، هوش بازار است. هوش بازار، مجموعه‌ای از فعالیت‌ها را توضیح می‌دهد که با استفاده از منابع اطلاعاتی موجود، نمایی از بازار ارائه می‌کند که شرکت به کمک آن درک می‌کند چه اتفاق‌هایی در بازار رخ می‌دهند، رقبا چه کارهایی انجام می‌دهند، مشتری‌ها یا مصرف‌کنندگان چه کاری انجام می‌دهند، و پتانسیل‌های احتمالی بازار برای محصولات یا خدمات جدید، با توجه به فعالیت‌ها و پاسخ‌های پیشین چیست؟[۲]

از سوی دیگر، شواهد زیادی وجود دارند که نشان می‌دهند نوآوری محصول، علاوه‌بر اهمیتی که در بازارهای داخلی دارد، به عنوان یک عامل مؤثر در عملکرد صادراتی نیز عمل می‌کند. علت اهمیت نوآوری آن است که تقاضای مشتریان به شکل مستمر در حال تغییر است، لذا در چنین شرایطی اکتفا به طرح‌های قدیمی محصول‌ها، دیگر پاسخگو نیست.[۳]

به‌علاوه، قیمت به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های آمیخته‌ی بازاریابی، نقش مؤثری در بهبود عملکرد صادراتی شرکت‌ها دارد. افزایش سطح رقابت در بازارهای جهانی باعث شده است که حتی شرکت‌ها و برندهای شناخته‌شده نیز برای حفظ جایگاه رقابتی خود قیمت‌گذاری محصولات را به شکلی انجام دهند که مشتریان خود را حفظ کنند.[۴]

ارتباط‌های بازاریابی از جمله قابلیت‌های مهم شرکت‌ها هستند، که می‌توانند میزان نفوذ یک شرکت صادراتی در بازارهای خارجی را بهبود بخشند. اگرچه ارتباط‌ها، همواره عاملی مهم در حوزه‌ی بازاریابی در نظر گرفته می‌شوند، با این حال اهمیت شبکه‌های ارتباطی در بازارهای بین‌المللی به مراتب بیش از بازارهای داخلی است.[۵] مقوله‌ی دیگری که نقش مهمی در عملکرد صادراتی ایفا می‌کند و ارتباط نزدیکی با ارتباط‌های بازاریابی دارد، کانال‌های توزیع در

استناد به این مقاله

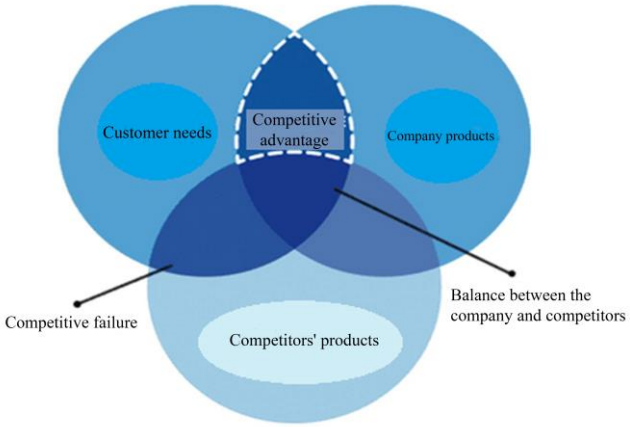
:کشاورز، طاها، عموزاده و محمدرضا، ۱۴۰۴. تأثیر قابلیت‌های بازاریابی در عملکرد صادراتی با توجه به نقش مزیت رقابتی با استفاده از روش معادله‌های ساختاری (موردمطالعه: شرکت‌های صادراتی صنایع غذایی در استان تهران). مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۴۱(۱)، صص.۱-۱۱. https://doi.org/10.24200/j65.2023.61972.2346

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

بازارهای خارجی است. بر این اساس، تصمیم‌گیری درخصوص شیوه‌ی انتقال کالا به محل خرید یا مصرف، از جمله تصمیم‌های مهمی است که مدیران شرکت‌های صادراتی با آن مواجه هستند؛ چرا که پیداکردن یک کانال توزیع مناسب در بازارهای بین‌المللی، کار بسیار پیچیده‌ای است.[۶]

تأثیرگذاری هر یک از عوامل ذکرشده در صادرات شرکت از مسیر "مزیت رقابتی" عبور می‌کند؛ بدین معنی که کلیه‌ی فعالیت‌های انجام‌شده جهت تنوع بخشیدن و نوآوری در محصول، استفاده از راهبردهای مناسب قیمت‌گذاری، انتخاب کانال توزیع مناسب، و غیره همگی با این هدف انجام می‌شوند که شرکت بتواند به مزیت رقابتی بالایی دست یابد. بر این اساس می‌توان استنباط کرد که مزیت رقابتی، یک متغیر میانجی بسیار مهم در فعالیت‌های صادراتی شرکت‌ها به‌شمار می‌رود.[۷] در شکل ۱، مفهوم مزیت رقابتی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، مزیت رقابتی به بخشی از خدمات و محصول‌های شرکت اطلاق می‌شود که به‌صورت اختصاصی توسط شرکت برای برآورد نیازهای مشتریان ارائه می‌شوند. اغلب مطالعات پیشین در حوزه‌ی عملکرد صادراتی به بررسی رابطه بین قابلیت‌ها و عملکرد پرداخته‌اند، اما پژوهش‌های زیادی راجع به قابلیت‌های بازاریابی و تأثیر آن‌ها در مزیت رقابتی انجام نشده‌اند. علاوه‌بر این، مطالعات پیشین راجع به عملکرد صادرات بین‌المللی، نتایج ضد و نقیضی را راجع به تأثیر قابلیت‌های بازاریابی در عملکرد صادراتی گزارش کرده‌اند. محیط بین‌المللی بسیار پیچیده است، لذا باید رابطه بین قابلیت‌های بازاریابی و عملکرد صادراتی به‌صورت گام به گام بررسی شود. این مسئله تا حد زیادی در پژوهش‌های پیشین نادیده گرفته شده است. بنابراین به‌درستی مشخص نشده است که نتایج متناقض مذکور ناشی از کمبود قابلیت‌های بازاریابی است یا در اثر عوامل دیگری به‌وجود آمده است.[۳]

با توجه به اینکه عملکرد صادراتی و مزیت رقابتی، دو مفهوم مجزا هستند و در مطالعات پیشین نیز تمرکز اصلی پژوهشگران بر رابطه بین قابلیت‌ها و عملکرد صادراتی بوده است، لذا لازم است نقش مزیت رقابتی در تعیین عملکرد صادراتی شرکت با دقت بیشتری بررسی شود. در واقع به‌نظر می‌رسد نتایج متناقض قبلی راجع به رابطه بین قابلیت‌های بازاریابی و عملکرد صادراتی ناشی از نادیده‌گرفتن متغیرهای میانجی مانند مزیت رقابتی باشد. بنابراین، در پژوهش حاضر، نقش میانجی مزیت رقابتی در رابطه بین قابلیت‌های بازاریابی و عملکرد صادراتی بررسی شده است. توسعه‌ی فعالیت‌های صادراتی به‌خصوص در حوزه‌ی محصول‌های غیرنفتی، یکی از راهکارهای بسیار مهم جهت رشد اقتصادی



شکل ۱. مفهوم مزیت رقابتی.

جامعه به‌حساب می‌آید. از میان محصول‌های غیرنفتی، محصول‌های غذایی یکی از پتانسیل‌های صادراتی کشور را تشکیل می‌دهند. افزایش صادرات مواد غذایی به‌عنوان یکی از اقلام صادرات غیرنفتی به‌دلیل لزوم خروج از اقتصاد تک‌محصولی، ورود به بازار اقتصاد جهانی، استفاده از پتانسیل‌های کشور در تولید مواد غذایی، عضویت در سازمان تجارت جهانی، و ایجاد تنوع در اقلام صادراتی، یکی از ارکان ضروری توسعه‌ی اقتصادی کشور به‌شمار می‌رود.[۸]

با توجه به شکاف پژوهشی موجود در زمینه‌ی بررسی نقش مزیت رقابتی در تعیین عملکرد صادراتی شرکت‌ها و همچنین اهمیت صنایع غذایی به‌عنوان عاملی تأثیرگذار در رشد صادرات کشور، شناسایی عوامل مؤثر در عملکرد صادراتی شرکت‌های غذایی، بسیار مهم است. بنابراین، مطالعه‌ی حاضر با هدف بررسی تأثیر قابلیت‌های بازاریابی، شامل: قابلیت‌های هوش بازار، نوآوری در محصول، قیمت‌گذاری، قابلیت ارتباط‌های بازاریابی، و قابلیت توزیع در عملکرد صادراتی با توجه به تقش مزیت رقابتی انجام می‌شود. این تذکر لازم است که نوآوری پژوهش حاضر در ادغام دو مدل در زمینه‌ی اثر قابلیت‌های بازاریابی در عملکرد صادارتی با توجه به نقش میانجی مزیت رقابتی بوده است. همچنین مزیت دیگر پژوهش حاضر، مطالعه‌ی همزمان قابلیت‌های متعدد بازاریابی در یک مدل است. در پژوهش حاضر، متغیر قابلیت توزیع به مدل اصلی پژوهش که از فالاهات[1] و همکاران (۲۰۲۰)،[۳] اقتباس شده است، اضافه شده است.

۲. مروری بر پیشینه‌ی پژوهش

داشتن راهبردهای متفاوت برای بازارهای مختلف باعث صرفه‌جویی در تلاش و منابع و تضمین درجه‌ی بالایی از سازگاری بین کلیه‌ی مارک‌های تجاری و فعالیت‌ها می‌شود. با این حال، برای دستیابی به این امر، شرکت‌ها باید قابلیت‌های بازاریابی خاصی داشته باشند. نقش قابلیت‌های بازاریابی در دستیابی به موفقیت شرکت در بازار و حوزه‌ی مالی بسیار زیاد است.[۹] قابلیت‌های بازاریابی، همچنین شامل مهارت‌ها و شایستگی‌های شرکت در رابطه با جمع‌آوری اطلاعات بازار، به اشتراک‌گذاری، و انتشار آن در سازمان است. توسعه‌ی موفقیت‌آمیز محصول‌های جدید و ارتباط با مشتری و توسعه‌ی روابط تأمین‌کننده از جمله قابلیت‌های بازاریابی است، که اهمیت آن در مطالعات مختلف به اثبات رسیده است. برای دستیابی به موفقیت اخیر، شرکت‌ها براساس دانش بازار خود عمل می‌کنند و این انتشار دانش بازار به‌ویژه با قابلیت شرکت در بهره‌برداری از فرصت‌های جدید بازار و عملکرد نوآوری به‌طورکلی ارتباط معناداری دارد. بنابراین، عملکرد نوآوری، نماد موفقیت تلاش‌های شرکت در توسعه‌ی توانایی بازاریابی است. علاوه‌بر این، موفقیت قابلیت بازاریابی در بازار جهانی، نشان‌دهنده‌ی قابلیت جذب ارزش از نظر نوآوری است. بنابراین، بنگاه‌ها تشویق می‌شوند که در وهله‌ی اول، برای دستیابی به موفقیت، در نوآوری سرمایه‌گذاری کنند. همان‌طور که ذکر شد، قابلیت بازاریابی یک عامل تعیین‌کننده در موفقیت شرکت‌های نوظهور برای ورود به بازارهای جهانی است.[۱۰] قابلیت‌های بازاریابی همچنین با تأثیر در تصمیم شرکت برای انتخاب راهبرد ورود به بازارهای جدید، از جمله تعامل بیشتر منابع در بازارهای خارجی، به گسترش سرمایه‌گذاری‌های جدید بین‌المللی کمک می‌کنند. در بسیاری از مطالعات، به آثار فوری منابع بازاریابی در عملکرد شرکت نیز تأکید شده است. این مطالعات نشان می‌دهند که چگونه قابلیت‌های فروش و نظارت بر عملکرد از طریق داشبورد بازاریابی، موفقیت

[1] Falahat

جدول ۱. ابعاد قابلیت بازاریابی.

Reference	Definition	Aspects	#
Ahmadi, et al. [2]	Market intelligence involves collecting information about a company's market in the areas of trends, competitors, and customers, in order to analyze and make accurate and confident decisions in determining strategy in areas such as market opportunity, market penetration strategy, and market development.	Market intelligence	1
Palma, et al. [11]	Price is one of the elements of the marketing and refers to the amount of money paid to receive a product or service. Pricing refers to a company's strategy for setting a price for each of its products.	Pricing	2
Falahat, et al. [3]	Product innovation involves minor or fundamental changes in the products offered by a company to meet changing customer demands.	Product Innovation	3
Li, et al. [12]	Marketing communications include all the relationships that an exporting company establishes with other partners and business intermediaries in international markets. These relationships are often formed in the form of a communication network.	Marketing Communication	4
Martinez, et al. [9]	Distribution is one of the components of the marketing, which in its simplest form is responsible for transporting the product from the place of production to the customer's place of purchase.	Distribution	5

شرکت در بین رقبا را تعیین می‌کند. مطالعات نشان‌دهنده‌ی ارزش بالای قابلیت‌های بازاریابی بر بهبود عملکرد است. هنوز هم پیشنهاد می‌شود که درک کافی از قابلیت‌های بازاریابی منجر به نتایج مثبت سازمانی بسیار زیادی می‌شود.[۷] ابعاد قابلیت بازاریابی در جدول ۱ ارائه شده است.

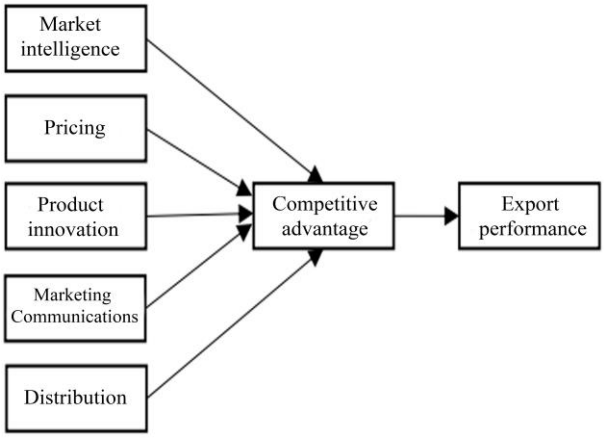
احمدی و همکاران (۲۰۱۸)،[۲] فقط به بررسی تأثیر نوآوری باز در عملکرد شرکت به کمک تحلیل مسیر و همبستگی پرداخته‌اند. پالما و همکاران (۲۰۱۸)،[۱۱] ارتباط بین راهبردهای پایدار و عملکرد صادراتی را به کمک تحلیل یک و دو متغیره مطالعه کرده‌اند. اثر چهار قابلیت بازاریابی مهم، شامل: هوش بازار، نوآوری محصول، قیمت‌گذاری، و ارتباط‌های بازاریابی در مزیت رقابتی و عملکرد صادراتی شرکت‌های کوچک و متوسط توسط فالاهات و همکاران (۲۰۲۰)،[۳] بررسی شده است. آن‌ها از روش معادله‌های ساختاری برای تأیید یا رد فرضیه‌ها استفاده کرده‌اند. نتایج ایشان اثر معنادار هر چهار قابلیت اشاره‌شده در مزیت رقابتی و در نتیجه عملکرد صادراتی شرکت‌ها را نشان می‌دهد. لی و همکاران (۲۰۱۹)،[۱۲] ارتباط‌های بازاریابی را در بین‌المللی‌سازی شرکت‌های چینی مطالعه کرده‌اند. نقش قابلیت توزیع بر عملکرد صادراتی شرکت‌ها نیز توسط مارتینز[۲] و همکاران (۲۰۲۰)،[۹] بررسی شده است.

کریستا[۳] و همکاران (۲۰۲۱)،[۱۳] اثر نوآوری محصول در عملکرد شرکت‌های تجاری طی دوره‌ی همه‌گیری ویروس کرونا را مطالعه کرده‌اند. نقش میانجی قابلیت نوآوری بین چابکی راهبرد و عملکرد سازمانی توسط الطویل[۴] و همکاران (۲۰۲۱)،[۱۴] بررسی شده است. گومز-پرادو[۵] و همکاران (۲۰۲۲)،[۱۵] اثر قابلیت هوش بازار، نوآوری محصول، و قیمت‌گذاری را با درنظرگرفتن مزیت رقابتی به‌عنوان متغیر میانجی در عملکرد بین‌المللی استارت‌آپ‌ها تجزیه‌وتحلیل کرده‌اند. سپس با استفاده از روش معادله‌های ساختاری برای تأیید یا رد فرضیه‌ها نتیجه گرفته‌اند که مزیت رقابتی به‌عنوان میانجی بین قابلیت قیمت‌گذاری و عملکرد بین‌المللی استارت‌آپ‌ها عمل نمی‌کند.

ماتا[۶] و همکاران (۲۰۲۱)،[۱۶] اثر کمک‌های مالی و بازاریابی دولت در عملکرد صادراتی شرکت‌های تازه‌تأسیس را مطالعه کرده و نتیجه گرفته‌اند که کمک‌های بازاریابی منجر به بهبود مزیت رقابتی و عملکرد صادراتی شرکت‌های تازه‌تأسیس می‌شود. در مقابل، کمک‌های مالی اثری در مزیت رقابتی و عملکرد صادراتی ندارند. اثر ارتباط‌های بازاریابی در عملکرد شرکت‌ها توسط منساه[۷] و همکاران (۲۰۲۲)،[۱۷] بررسی شده است. همچنین، اکبر و همکاران (۲۰۲۲)،[۱۸] طی یک نوشتار مروری، ارتباط بین نوآوری و بین‌المللی‌شدن شرکت‌های تجاری کوچک و متوسط را بررسی و تجزیه‌وتحلیل کرده‌اند.

اگرچه مطالعات زیادی با استفاده از رویکرد قابلیت‌های پویا در رابطه با عملکرد صادراتی انجام شده است؛ اما در هر یک از آن‌ها، یک یا تعداد محدودی از قابلیت‌های پویا در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر سعی شده است تعداد بیشتری از قابلیت‌های پویا (قابلیت هوش بازار، نوآوری در محصول، قیمت‌گذاری، قابلیت ارتباط‌های بازاریابی، و قابلیت توزیع) لحاظ شود. از سوی دیگر در پژوهش حاضر، علاوه‌بر تئوری قابلیت‌های پویا، از تئوری مزیت رقابتی نیز استفاده شده است. بدین منظور، متغیر مزیت رقابتی به‌عنوان متغیر میانجی در نظر گرفته شده است. در واقع، مدل مفهومی پژوهش حاضر تلفیقی از دو مدل ارائه‌شده توسط فالاهات و همکاران (۲۰۲۰)،[۳] و تان و همکاران (۲۰۱۵)،[۶] است. در این راستا، متغیرهای هوش بازار، نوآوری محصول، و قیمت‌گذاری از مدل فالاهات و همکاران (۲۰۲۰)،[۳] و متغیر قابلیت توزیع از

[2] Martinez
[3] Christa
[4] AlTaweel
[5] Gómez-Prado
[6] Mata
[7] Mensah



شکل ۲. مدل مفهومی پژوهش حاضر.

نوشتار تان و همکاران (۲۰۱۵)،[۶] اخذ شده است. متغیرهای عملکرد صادراتی، مزیت رقابتی و ارتباط‌های بازاریابی نیز در هر دو مدل مشترک است. بدین ترتیب مدل مفهومی نهایی پژوهش حاضر در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

برای تحلیل کمّی مدل مفهومی ارائه‌شده از روش معادله‌های ساختاری استفاده شده است. روش معادله‌های ساختاری، یک روش کارآمد برای مدل‌سازی آماری و آزمودن پدیده‌های پیچیده است. در واقع، مدل‌سازی معادله‌های ساختاری، روشی برای تأیید یا رد مدل‌های نظری به‌صورت کمّی است.[۳] در ادامه، ابتدا در بخش ۳ به بیان فرضیه‌های پژوهش پرداخته شده است. سپس بخش ۴، به بیان روش پژوهش استفاده‌شده در پژوهش حاضر و بخش ۵، به ذکر یافته‌ها و نتایج پژوهش اختصاص یافته‌اند. درنهایت در بخش ۶، نتیجه‌گیری و پیشنهادهای مطالعات آتی بیان شده است.

۳. فرضیه‌های پژوهش

فرضیه‌های بررسی‌شده در پژوهش حاضر به این شرح هستند:

- هوش بازار، تأثیر معناداری در مزیت رقابتی در شرکت‌های صادراتی دارد.
- نوآوری در محصول، تأثیر معناداری در مزیت رقابتی در شرکت‌های صادراتی دارد.
- قیمت‌گذاری، تأثیر معناداری در مزیت رقابتی در شرکت‌های صادراتی دارد.
- ارتباط‌های بازاریابی، تأثیر معناداری در مزیت رقابتی در شرکت‌های صادراتی دارد.
- قابلیت توزیع، تأثیر معناداری در مزیت رقابتی در شرکت‌های صادراتی دارد.
- مزیت رقابتی، تأثیر معناداری در عملکرد صادراتی دارد.
- مزیت رقابتی، نقش میانجی در تأثیر قابلیت هوش بازار در عملکرد صادراتی ایفا می‌کند.
- مزیت رقابتی، نقش میانجی در تأثیر قابلیت نوآوری در محصول در عملکرد صادراتی ایفا می‌کند.
- مزیت رقابتی، نقش میانجی در تأثیر قابلیت قیمت‌گذاری در عملکرد صادراتی ایفا می‌کند.
- مزیت رقابتی، نقش میانجی در تأثیر قابلیت ارتباط‌های بازاریابی در عملکرد صادراتی ایفا می‌کند.
- مزیت رقابتی نقش میانجی در تأثیر قابلیت توزیع در عملکرد صادراتی ایفا می‌کند.

۴. روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف کاربردی و از نظر روش و ماهیت در زمره‌ی پژوهش‌های توصیفی- پیمایشی است. جامعه‌ی آماری پژوهش حاضر، شرکت‌های صادراتی صنایع غذایی در استان تهران و پاسخگویان به پرسشنامه، مدیران عامل و مدیران ارشد بخش بازرگانی و صادرات شرکت‌های مذکور بوده‌اند، که در هر شرکت، یک نفر از آنان به پرسشنامه پاسخ داده است. با مراجعه به سایت‌های مختلف و فهرست شرکت‌های موجود در سازمان توسعه و تجارت، تعداد شرکت‌های در دسترس ۱۳۰ شرکت تعیین شد، که با توجه به فرمول کوکران (رابطه‌ی ۱)، ۹۷ شرکت به عنوان نمونه‌ی آماری انتخاب شدند. در پژوهش حاضر، برای انتخاب شرکت‌ها از روش نمونه‌گیری تصادفی ساده و جهت پاسخگویی به سؤال‌های پرسشنامه در شرکت‌های مذکور، روش نمونه‌گیری در دسترس استفاده شده است.

$$n = \frac{N Z^2 pq}{Nd^2 + Z^2 pq} = \frac{(130)(1.96)^2(0.5)(0.5)}{(130)(0.05)^2 + (1.96)^2(0.5)(0.5)} \approx 97 \qquad (۱)$$

که در آن، N نشان‌دهنده‌ی حجم جامعه آماری است. در سطح معناداری ۵٪، Z معادل نقطه‌ی ۵٪ خطا در توزیع نرمال استاندارد و p درصد توزیع صفت مطالعه‌شده در جامعه‌ی آماری و q مکمل آن است، که در صورت نامشخص‌بودن برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شوند. مقدار d نیز تفاضل نسبت واقعی صفت در جامعه با مقدار تخمین آن است، که معمولاً برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته می‌شود. همچنین این تذکر لازم است که داده‌های موردنیاز در پژوهش حاضر از طریق پرسشنامه‌ی فالاهات و همکاران (۲۰۲۰)،[۳] و براساس مقیاس پنج گزینه‌ای طیف لیکرت جمع‌آوری شده‌اند. شکل کلی و نحوه‌ی امتیازدهی طیف لیکرت در جدول ۲ ارائه و همچنین در جدول ۳، مؤلفه‌ها و تعداد سؤال‌های پرسشنامه ارائه شده‌اند.

از ضریب آلفای کرونباخ نیز برای بررسی پایایی پرسشنامه‌ها استفاده شده است. ضریب آلفای کرونباخ با استفاده از نرم‌افزار SPSS محاسبه شده است، که برای

جدول ۲. نحوه‌ی امتیازدهی به پاسخ‌ها در طیف لیکرت.

Strongly agree	Agree	Neutral	Disagree	Strongly disagree	Response
5	4	3	2	1	Score

جدول ۳. مؤلفه‌ها و تعداد سؤال‌های پرسشنامه.

#Question	Variables	
1-5	Market intelligence	Marketing capabilities
6-9	Pricing	
10-12	Product Innovation	
13-16	Marketing Communication	
17-20	Distribution	
21-30	Competitive advantage	
31-36	Export performance	

تک تک متغیرها بالای ۰/۷ است. بر همین اساس، پرسشنامه‌ی ذکرشده، پایایی قابل قبولی دارد. برای بررسی روایی پرسشنامه نیز از روش روایی محتوا و تحلیل عاملی تأییدی استفاده شده است. بدین صورت که برای سنجش روایی محتوا، پرسشنامه به تعدادی از صاحب‌نظران و اساتید مدیریت و بازاریابی داده شد و از آن‌ها در مورد پرسش‌ها و ارزیابی فرضیه‌ها نظرخواهی شد که به اتفاق پرسشنامه را تأیید کردند. شایان ذکر است که جهت بررسی فرضیه‌های پژوهش و تأیید و یا عدم تأییدشان از مدل‌یابی معادله‌های ساختاری و نرم‌افزار SmartPLS استفاده شده است. مدل‌یابی معادله‌های ساختاری به روش PLS، شامل دو مرحله‌ی آزمون مدل اندازه‌گیری و آزمون مدل ساختاری است. آزمون مدل اندازه‌گیری شامل بررسی تحلیل عاملی تأییدی پرسشنامه و به‌طورکلی روایی شاخص‌هاست و آزمون مدل ساختاری جهت بررسی فرضیه‌های پژوهش به‌کار می‌رود. این تذکر لازم است که دلیل استفاده از نرم‌افزار SmartPLS، حجم نمونه‌ی کوچک (۹۷ شرکت) و نیز عدم حساسیت نرم‌افزار مذکور به نرمال‌بودن یا نرمال‌نبودن داده‌هاست.

۵. یافته‌ها و نتایج

۱.۵. آمار توصیفی جامعه و متغیرهای پژوهش

در جدول‌های ۴ و ۵ به ترتیب توزیع فراوانی افراد پاسخ‌دهنده از نظر تحصیلات و سابقه‌ی کار ارائه شده‌اند.

برای واضح‌ترشدن، اطلاعات اخیر در شکل‌های ۳ و ۴ به صورت نمودارهای دایره‌ای نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که مشخص است، تحصیلات بیشتر افراد پاسخ‌دهنده، لیسانس و فوق لیسانس بوده و بیشتر افراد سابقه‌ی کاری بین ۶ تا ۱۵ سال داشته‌اند.

در جدول ۶، مقدار شاخص‌های مرکزی و پراکندگی متغیرهای موردنظر در

پژوهش حاضر ارائه شده است. شاخص‌های مرکزی، مقدار متوسط توزیع نمرات و شاخص‌های پراکندگی، چگونگی گسترش و پراکندگی مقادیر یک توزیع را نشان می‌دهند. انحراف معیار به پراکنش پاسخگویان در اطراف میانگین اشاره دارد. هر چه مقدار انحراف معیار بیشتر باشد، پراکندگی نمرات از میانگین هم بیشتر است، یعنی گروه موردمطالعه از لحاظ ویژگی مورد سنجش نامتجانس‌تر است و برعکس. با توجه به جدول ۶، از بین متغیرهای پژوهش، متغیر قابلیت توزیع دارای بیشترین میانگین (۳/۵۷) بوده است. در ارتباط با میزان پراکندگی نیز، متغیر قابلیت هوش بازار، بیشترین انحراف معیار (۰/۸۲۸) را داشته است.

۲.۵. نتایج تحلیل عاملی تأییدی

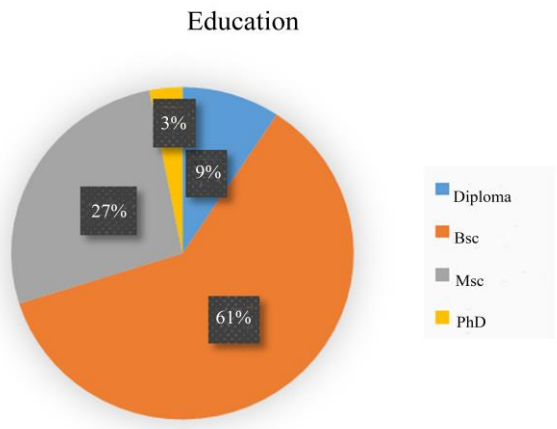
در انجام تحلیل عاملی تأییدی باید از این مسئله اطمینان حاصل شود که آیا می‌توان داده‌های موجود را برای تحلیل استفاده کرد یا نه. به‌عبارت دیگر، آیا داده‌های موردنظر برای تحلیل عاملی مناسب هستند یا خیر؟ بدین منظور از شاخص KMO و آزمون بارتلت استفاده شده است. شاخص KMO، معیاری برای اندازه‌گیری کفایت نمونه‌گیری است و از تقسیم مجموع همبستگی‌های غیرقطری متغیرها بر مجموع همبستگی‌های غیرقطری و همبستگی‌های تفکیکی غیرقطری متغیرها به‌دست می‌آید. هر چه شاخص KMO به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده‌ی کوچک‌بودن همبستگی تفکیکی متغیرها به نسبت همبستگی آن‌هاست و این بدان معناست که نمونه‌گیری مناسبی از متغیرها انجام شده است. آزمون بارتلت برای بررسی فرضیه‌ی همسانی واریانس نمونه‌های تصادفی از آماره‌ی مربع کای استفاده می‌کند. شایان ذکر است کهاین

جدول ۴. توزیع فراوانی افراد پاسخ‌دهنده از نظر تحصیلات.

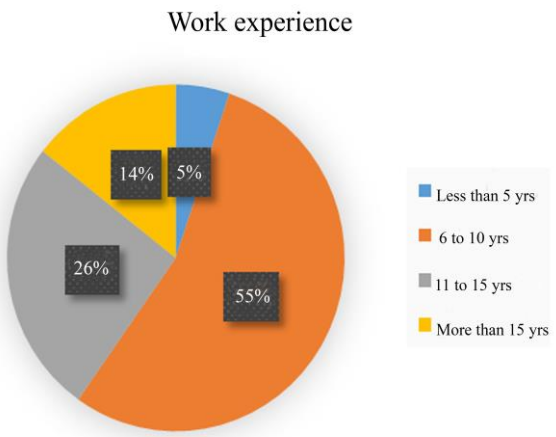
Cumulative (%)	Frequency (%)	Frequency	Education
9	9	9	Diploma
70	61	59	Bsc
97	27	26	Msc
100	3	3	PhD
	100	97	Total

جدول ۵. توزیع فراوانی افراد پاسخ‌دهنده از نظر سابقه‌ی کار.

Cumulative (%)	Frequency (%)	Frequency	Work experience
5	5	5	< 5 yrs
60	55	53	6 to 10 yrs
86	26	25	11 to 15 yrs
100	14	14	> 15 yrs
	100	97	Total



شکل ۳. وضعیت افراد پاسخ‌دهنده از نظر تحصیلات.



شکل ۴. وضعیت افراد پاسخ‌دهنده از نظر سابقه‌ی کار.

جدول ۶. آمار توصیفی متغیرهای پژوهش.

Dispersion indices		Central indices		Variables
Variance	std	Median	Mean	
0.686	0.828	3.40	3.41	Market intelligence
0.656	0.810	3.25	3.30	Pricing
0.522	0.722	3.33	3.23	Product Innovation
0.417	0.645	3.50	3.54	Marketing Communication
0.469	0.685	3.50	3.57	Distribution
0.476	0.690	3.30	3.24	Competitive advantage
0.329	0.574	3.17	3.26	Export performance

جدول ۷. آزمون KMO و بارتلت برای سؤال‌های پرسشنامه‌ها.

0.769	**KMO test**	
6306.584	χ^2 statistic	**Bartlett Test**
325	Df	
0.001	Sig	

آزمون به نرمال‌بودن جوامع حساس است. بررسی داده‌های پژوهش حاضر، نشانگر نرمال‌بودن داده‌ها و در نتیجه معتبربودن نتایج آزمون بارتلت است. براساس دو آزمون اخیر، داده‌ها زمانی برای تحلیل عاملی مناسب هستند که شاخص KMO بیشتر از (۰/۶) و نزدیک به ۱ و سطح معناداری آزمون بارتلت (Sig) کمتر از (۰/۰۵) باشد. با توجه به جدول ۷، شاخص KMO در پژوهش حاضر بالاتر از مقدار ۰/۶ و سطح معناداری آزمون بارتلت کمتر از ۰/۰۵ بوده است، که نشانگر کافی‌بودن نمونه‌ی انتخابی برای اجرای تحلیل عاملی است.

در جدول ۸، مقادیر بار عاملی، آماره‌ی معناداری جهت بررسی تحلیل عاملی تأییدی و نیز مقادیر آلفای کرونباخ، پایایی اشتراکی، و پایایی ترکیبی ارائه شده‌اند.

از آنجا که مقدار بار عاملی استاندارد تمامی گویه‌ها بیشتر از ۰/۵ و مقدار بوت استراپینگ (آماره‌ی t) در تمامی موارد از مقدار بحرانی ۱/۹۶ بزرگ‌تر بوده است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت هر متغیر اصلی به درستی سنجش شده است. همچنین با توجه به اینکه پایایی اشتراکی از ۰/۵ بزرگ‌تر و نیز پایایی ترکیبی از پایایی اشتراکی بزرگ‌تر است، می‌توان نتیجه گرفت که شرط برخورداری از روایی همگرا نیز وجود دارد.

۵.۳. نتایج بررسی فرضیه‌های پژوهش

مقادیر ضرایب مسیر و معناداری ضرایب مسیر (آماره‌ی t) برای بررسی فرضیه‌های پژوهش در جدول‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده‌اند. قدرت رابطه بین عامل (متغیر پنهان) و متغیر قابل‌مشاهده، به وسیله‌ی ضریب مسیر نشان داده می‌شود. ضریب مسیر مقداری بین ۰ و ۱ دارد. اگر ضریب مسیر کمتر از ۰/۳ باشد، رابطه ضعیف و اگر ضریب مسیر بین ۰/۳ تا ۰/۶ قابل قبول، و اگر بزرگ‌تر از ۰/۶ باشد، بسیار مطلوب است.

زمانی که همبستگی متغیرها شناسایی شد، باید آزمون معناداری صورت گیرد. جهت بررسی معناداربودن رابطه‌ی بین متغیرها از آماره‌ی آزمون t (t-value) استفاده شده است. چون معناداری در سطح خطای ۰/۰۵ بررسی شده است؛ بنابراین، اگر مقدار مشاهده‌شده برای آماره‌ی آزمون t از ۱/۹۶ کوچک‌تر باشد، رابطه معنادار نیست. از آنجا که مقادیر آماره‌ی آزمون در ستون سوم جدول ۹، همگی بزرگ‌تر از ۱/۹۶ هستند، لذا می‌توان نتیجه گرفت که متغیرهای بررسی‌شده، تأثیر معناداری در مزیت رقابتی شرکت‌های صادراتی داشته‌اند. همچنین بررسی مقادیر ضریب مسیر در ستون دوم جدول ۹ حاکی از آن است که قابلیت توزیع با ضریب مسیر ۰/۴۳۷ بیشترین تأثیر را در مزیت رقابتی ایجاد کرده است. نتایج همچنین نشانگر تأثیر معنادار و قابل توجه مزیت رقابتی در عملکرد صادراتی شرکت‌های مذکور هستند.

مقادیر آماره‌ی t و سطح معناداری در جدول ۱۰، حاکی از آن است که متغیرهای بررسی‌شده در پژوهش حاضر با درنظرگرفتن مزیت رقابتی به‌عنوان متغیر میانجی، تأثیر معناداری در عملکرد صادراتی شرکت‌های صنایع غذایی دارند. همچنین مقدار اثر غیرمستقیم، که از حاصل‌ضرب مقادیر ضریب مسیر طی مسیرهای مختلف به‌دست می‌آید، شدت اثر هر متغیر مستقل در عملکرد صادراتی با درنظرگرفتن مزیت رقابتی به عنوان متغیر میانجی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که کمترین تأثیر مربوط به قابلیت هوش بازار و بیشترین تأثیر مربوط به قابلیت توزیع است. در شکل ۵، مدل معادله‌های ساختاری فرضیه‌های پژوهش مشاهده می‌شود.

با توجه به تجزیه‌وتحلیل داده‌های پژوهش در فرضیه‌ی اول مبنی بر تأثیر قابلیت هوش بازار در مزیت رقابتی، فرضیه‌ی اول تأیید و با توجه به ضریب مسیر به‌دست‌آمده، تأثیر آن به‌صورت مثبت بوده است. به عبارتی، با توجه به ضریب مسیر به‌دست‌آمده به ازاء هر واحد افزایش (بهبود) هوش بازار، مزیت رقابتی ۰/۲۴۲ افزایش پیدا کرده است. لذا می‌توان استدلال کرد اگر شرکتی اطلاعات مناسبی راجع به شرایط کسب و کار و بازار، روندها، راهبردهای رقبا و مشتریان داشته باشد، تصمیم‌گیری دقیق و مطمئنی در تعیین راهبردهای خود خواهد داشت و به کسب مزیت رقابتی دست پیدا خواهد کرد. نتیجه‌ی به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر، با نتایج پژوهش فالاهات و همکاران (۲۰۲۰)،[۳] کریستا و همکاران (۲۰۲۱)،[۱۳] و الطویل و همکاران (۲۰۲۱)،[۱۴] مطابقت و همخوانی دارد. تحلیل نتایج در فرضیه‌ی دوم مبنی بر تأثیر قابلیت نوآوری در مزیت رقابتی، حاکی از تأیید فرضیه‌ی دوم است. با توجه به ضریب مسیر

جدول ۸. مقادیر بارعاملی، آماره‌ی معناداری، و آلفای کرونباخ جهت بررسی تحلیل عاملی تأییدی.

Cronbach's alpha	Combined reliability	Shared reliability	Statistical significance	Factor Loading	Item	#
0.901	0.927	0.717	15.596	0.814	Q1	Market intelligence
			39.668	0.880	Q2	
			12.718	0.760	Q3	
			39.183	0.867	Q4	
			44.380	0.905	Q5	
0.850	0.899	0.691	15.626	0.796	Q6	Pricing
			19.635	0.872	Q7	
			14.980	0.795	Q8	
			43.383	0.893	Q9	
0.818	0.891	0.733	26.550	0.806	Q10	Product Innovation
			17.819	0.839	Q11	
			47.673	0.919	Q12	
0.904	0.933	0.778	52.283	0.911	Q13	Marketing Communication
			23.311	0.796	Q14	
			64.713	0.929	Q15	
			44.643	0.888	Q16	
0.850	0.901	0.700	45.213	0.908	Q17	Distribution
			8.069	0.629	Q18	
			46.590	0.899	Q19	
			45.536	0.879	Q20	
0.934	0.944	0.628	25.951	0.843	Q21	Competitive advantage
			32.215	0.832	Q22	
			26.121	0.812	Q23	
			24.440	0.815	Q24	
			7.157	0.636	Q25	
			20.444	0.819	Q26	
			34.756	0.861	Q27	
			14.310	0.734	Q28	
			7.461	0.643	Q29	
			40.795	0.889	Q30	
0.860	0.895	0.588	27.182	0.844	Q31	Export performance
			18.691	0.793	Q32	
			23.364	0.730	Q33	
			20.941	0.818	Q34	
			17.614	0.753	Q35	
			8.477	0.648	Q36	

به‌دست‌آمده به ازاء هر واحد افزایش (بهبود) نوآوری، مزیت رقابتی ۰/۲۷۶ افزایش پیدا کرده است. لذا با توجه به شاخص‌های مطالعه‌شده در پژوهش حاضر می‌توان استدلال کرد اگر شرکتی توانایی اصلاح محصولات متناسب با سلیقه و خواسته‌های بازارهای صادراتی و توانایی مدیریت موفقیت‌آمیز توسعه‌ی محصول جدید برای بازارهای صادراتی را داشته باشد، می‌تواند به کسب مزیت رقابتی امیدوارتر باشد. نتیجه‌ی به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر با نتایج پژوهش فالاهات و همکاران (۲۰۲۰)،[۳] و گومز- پرادو و همکاران (۲۰۲۲)،[۱۵] مطابقت و همخوانی دارد.

فرضیه‌ی سوم مبنی بر تأثیر قیمت در مزیت رقابتی نیز تأیید شده و با توجه به ضریب مسیر به‌دست‌آمده، تأثیر آن به‌صورت مثبت بوده است. نتایج نشان می‌دهند که به ازاء هر واحد بهبود شرایط قیمت‌گذاری، مزیت رقابتی ۰/۳۲۴ افزایش پیدا کرده است. لذا با توجه به شاخص‌های مطالعه‌شده در پژوهش حاضر، می‌توان استدلال کرد اگر شرکتی توانایی تنظیم قیمت‌ها در بازارهای صادراتی و توانایی پاسخگویی سریع به اقدام‌های قیمت‌گذاری رقبا در صادرات را داشته باشد و از طرفی، درک درستی از خواسته‌های مشتریان و ملاحظات قیمتی آن‌ها داشته باشد، می‌تواند به کسب مزیت رقابتی دست پیدا کند. نتیجه‌ی به‌دست‌آمده در پژوهش‌حاضر با نتایج پژوهش فالاهات و همکاران (۲۰۲۰)،[۳] مطابقت و همخوانی دارد.

بررسی نتایج در مورد فرضیه‌ی چهارم یعنی تأثیر قابلیت ارتباط‌های بازاریابی در مزیت رقابتی، نشانگر تأثیر معنادار آن است. با توجه به ضریب مسیر به‌دست‌آمده، به ازاء هر واحد افزایش (بهبود) قابلیت ارتباط‌های بازاریابی، مزیت رقابتی ۰/۲۶۱ افزایش پیدا کرده است. ارتباط‌های بازاریابی یک فعالیت بازاریابی برای شرکت‌ها برای دستیابی، حفظ و ارتقاء روابط مؤثر با مشتریان است و با توجه به اینکه شواهد به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که هزینه‌های نگهداری مشتری قدیمی بسیار کمتر از هزینه‌ی توسعه‌ی مشتری جدید و حفظ رابطه با مصرف‌کنندگان قدیمی از توسعه‌ی مشتری‌های جدید اقتصادی‌تر

جدول ۹. نتایج حاصل از ارزیابی مدل ساختاری برای بررسی فرضیه‌های پژوهش (روابط مستقیم).

Result	t-) Significance (value	(β) Path coefficient	Path
Accept	2.259	0.242	Market intelligence capability has a significant impact on competitive advantage in exporting companies.
Accept	2.647	0.276	Product innovation capability has a significant impact on competitive advantage in exporting companies.
Accept	2.925	0.324	Pricing capability has a significant impact on competitive advantage in exporting companies.
Accept	2.522	0.261	Marketing communications capability has a significant impact on competitive advantage in exporting companies.
Accept	3.812	0.437	Distributability has a significant impact on competitive advantage in exporting companies.
Accept	28.998	0.789	Competitive advantage has a significant impact on export performance in exporting companies.

جدول ۱۰. نتایج حاصل از ارزیابی مدل ساختاریبرای بررسی فرضیه‌های پژوهش (روابط غیرمستقیم).

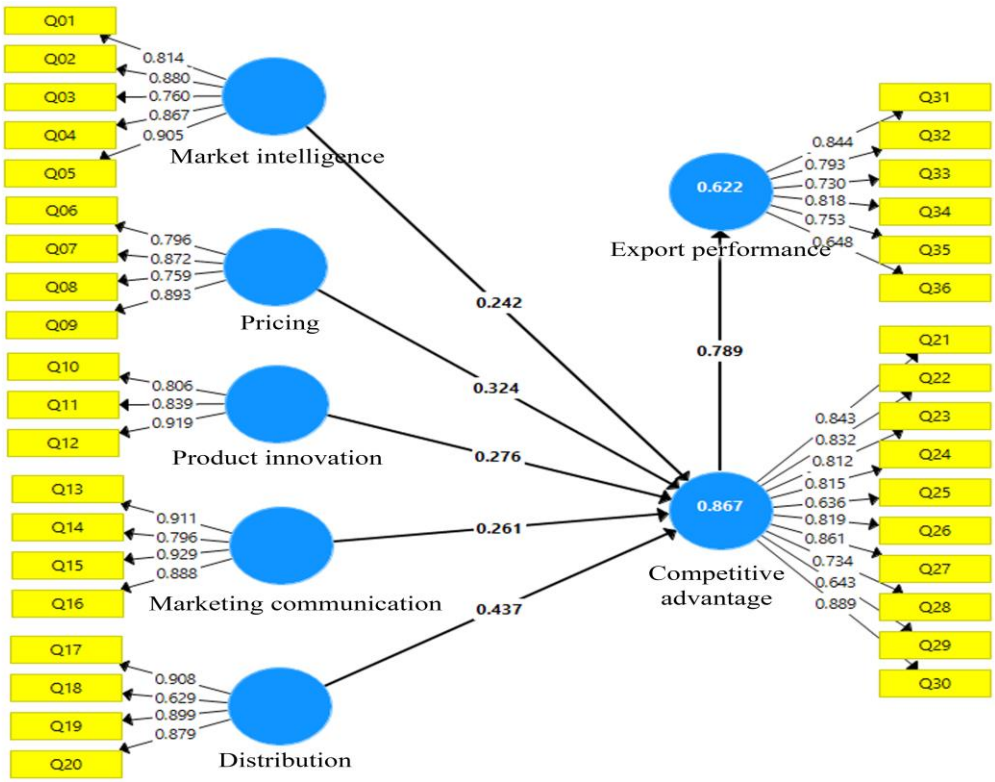
Sig	t-value	Bootstrap		Indirect effect	Path		
		Low	Up		Dependent variable	Mediating variable	Independent variable
0.025	2.250	0.034	0.367	0.191	Export perf	Competitive adv	Market intelligence
0.006	2.777	0.078	0.383	0.218	Export perf	Competitive adv	Product Innovation
0.008	2.655	0.094	0.485	0.255	Export perf	Competitive adv	Pricing
0.005	2.505	0.041	0.326	0.206	Export perf	Competitive adv	Marketing Communication
0.000	3.789	0.145	0.516	0.345	Export perf	Competitive adv	Distribution

است، توجه ویژه به مسئله‌ی مذکور می‌تواند موفقیت شرکت را به همراه داشته باشد. بنابراین می‌توان استدلال کرد اگر شرکتی توانایی راه‌اندازی، مدیریت، و توسعه‌ی برنامه‌های ارتباطی بازاریابی صادراتی مؤثر را داشته باشد، می‌تواند امیدوارتر به کسب مزیت رقابتی باشد. نتیجه‌ی به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر با نتایج پژوهش فالاهات و همکاران (۲۰۲۰)،[۳] و تان[۸] و همکاران (۲۰۱۵)،[۶] مطابقت و همخوانی دارد.

با توجه به تجزیه‌وتحلیل داده‌های پژوهش در فرضیه‌ی پنجم مبنی بر تأثیر قابلیت توزیع در مزیت رقابتی، فرضیه‌ی پنجم تأیید شده است. ضریب مسیر به‌دست‌آمده (۰/۴۳۷) نیز تأثیر قابل توجه قابلیت توزیع در مزیت رقابتی را نشان می‌دهد. لذا اگر سفارش‌ها به‌صورت دقیق و سریع انجام شود و کانال‌های توزیع و نمایندگی‌های فروش مطلوب باشند، سطح مزیت رقابتی بهبود خواهد یافت. نتیجه‌ی به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر با نتایج پژوهش تان و همکاران (۲۰۱۵)،[۶] مطابقت و همخوانی دارد.

درنهایت، تحلیل نتایج مرتبط با فرضیه‌ی ششم در مورد تأثیر مزیت رقابتی در عملکرد صادراتی، فرضیه‌ی ششم نیز تأیید شده است. با توجه به ضریب مسیر به‌دست‌آمده به ازاء هر واحد افزایش (بهبود) مزیت رقابتی، عملکرد صادراتی ۰/۷۸۹ افزایش پیدا کرده است. لذا می‌توان استدلال کرد اگر کیفیت محصولات ارائه‌شده به بازار مطلوب باشد، از نظر برند، بسته‌بندی، و طراحی منحصر به فرد باشد، پشتیبانی فنی و خدمات پس از فروش مناسبی داشته باشد، ماحصل عوامل مذکور، رضایت مشتری و درنهایت بهبود عملکرد صادرات است. نتیجه‌ی به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر با نتایج پژوهش فالاهات و همکاران (۲۰۲۰)،[۳] و تان و همکاران (۲۰۱۵)،[۶] مطابقت و همخوانی دارد. به‌علاوه، نتیجه‌ی حاصل از تجزیه‌وتحلیل مرتبط با میانجی‌گری مزیت رقابتی در تأثیر ابعاد قابلیت بازاریابی در عملکرد صادراتی مؤید میانجی‌گری مزیت رقابتی است. به‌عبارت دیگر، قابلیت‌های بازاریابی هم مستقیماً و هم غیرمستقیم (از طریق مزیت رقابتی) در عملکرد صادراتی تأثیر دارند.

[8] Tan



شکل ۵. ضرایب مسیر استاندارد فرضیه‌های پژوهش.

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر قابلیت‌های بازاریابی در عملکرد صادراتی شرکت‌های صنایع غذایی تجزیه‌وتحلیل شده است. نتایج حاکی از آن است که ابعاد مختلف قابلیت‌های بازاریابی، تأثیر معناداری در عملکرد صادراتی دارند. همچنین نقش مزیت رقابتی به‌عنوان متغیر میانجی مابین ابعاد قابلیت‌های بازاریابی و عملکرد صادراتی تأیید شده است. نتایج همچنین نشان داد که قابلیت توزیع بیشترین تأثیر را در مزیت رقابتی و در نتیجه در عملکرد صادراتی شرکت‌ها داشته است. در نتیجه، از دیدگاه مدیریتی و سیاست‌گذاری لازم است شرکت‌های مذکور توجه ویژه‌ای به ابعاد مختلف قابلیت‌های بازاریابی به‌خصوص قابلیت‌های توزیع داشته باشند. به‌طورکلی نتایج به‌دست‌آمده با نتایج پژوهش‌های پیشین مطابقت و همخوانی دارد و شرکت‌های صنایع غذایی جهت کسب مزیت رقابتی باید به روابط بین متغیرهای مطالعه‌شده توجه داشته باشند. لذا، آن‌ها با توجه به روابط بین متغیرهای مدل مفهومی پژوهش می‌توانند تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی بهتری جهت کسب مزیت رقابتی داشته باشند و افزایش فروش و درنهایت بهبود عملکرد صادراتی را مشاهده کنند. در ارتباط با محدودیت‌های پژوهش شایان ذکر است با توجه به اینکه پژوهش حاضر در شرکت‌های صنایع غذایی انجام شده است، لذا تعمیم نتایج آن به سایر شرکت‌ها الزاماً منطقی نیست. همچنین یافتن افراد مناسبی که حاضر به همکاری جهت پُرکردن پرسشنامه باشند، از چالش‌های پژوهش حاضر بوده است. برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود نقش عوامل تعدیل‌گری، از قبیل: ظرفیت جذب دانش، شدت رقابت، آشفتگی بازار، و غیره در ارتباط بین متغیرهای پژوهش بررسی شوند. همچنین شناسایی و رتبه‌بندی عوامل مؤثر در عملکرد صادراتی، از طریق روش‌هایی مانند روش تحلیل سلسله مراتبی می‌تواند گزینه‌ی دیگری جهت توسعه‌ی پژوهش حاضر باشد.

References - منابع

1. Peluffo, A., 2016. The role of investments in export growth. *Small Business Economics*, *47*(1), *pp.* 115-137. https://doi.org/10.1007/s11187-016-9714-0.
2. Ahmadi, Z., Shafiei, M., and Vakil, Y., 2018. The impact of open innovation on company innovative performance with the emphasis on moderating role of market turbulence (Case study: Small and medium-sized manufacturing companies in Semnan city). *Industrial Technology Development*, *16*(32), *pp.* 73-92. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26765403.1397.16.32.6.4. [In Persian].
3. Falahat, M., Ramayah, T., Soto-Acosta, P., and Lee, Y., 2020. SMEs internationalization: The role of product innovation, market intelligence, pricing and marketing communication capabilities as drivers of SMEs' international performance. *Technological Forecasting and Social Change*, 152. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.119908.

4. Lei, S. S. I., Nicolau, J. L., and Wang, D., 2019. The impact of distribution channels on budget hotel performance. *International Journal of Hospitality Management*, 81, *pp.* 141-149. https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2019.03.005.

5. Mahmoud, M. A., Adams, M., Abubakari, A., Commey, N. O., and Kastner, A. N. A., 2020. Social media resources and export performance: The role of trust and commitment. *International Marketing Review*, *37*(2), *pp.* 273-297. https://doi.org/10.1108/imr-02-2019-0084.

6. Tan, Q., and Sousa, C. M., 2015. Leveraging marketing capabilities into competitive advantage and export performance. *International Marketing Review*, *32*(1), *pp.* 78-102. https://doi.org/10.1108/IMR-12-2013-0279.

7. Yasa, N., Giantari, I. G. A. K., Setini, M., and Rahmayanti, P., 2020. The role of competitive advantage in mediating the effect of promotional strategy on marketing performance. *Management Science Letters*, *10*(12), *pp.* 2845-2848. http://dx.doi.org/10.5267/j.msl.2020.4.024.

8. Aghamousa, M., Sardari, and A., Karampour, A., 2020. To Recognize the Limiting Factors Affecting the Export of Technology-Based Goods. *Business strategies*, *12*(6), *pp.* 41-56. [In Persian].

9. Martinez, A. M., and Gonzalez, P. G., 2020. Influence of Market Philosophy Management on Export Performance in Regional Markets: Empirical Study from North America. *Journal of Strategic Management*, *4*(1), *pp.* 52-66.

10. Efrat, K., Hughes, P., Nemkova, E., Souchon, A. L., and Sy-Changco, J., 2018. Leveraging of Dynamic export capabilities for competitive advantage and performance consequences: Evidence from China. *Journal of Business Research*, 84, *pp.* 114-124. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2017.11.018.

11. Palma, E. P., Gomes, C. M., Kruglianskas, I., Kneipp, J. M., da Rosa, L. A. B., and Frizzo, K., 2018. Relationship between sustainable strategies and export performance: An analysis of companies in the Brazilian gems and jewelry industry. *Environmental Quality Management*, *27*(4), *pp.* 97-106. https://doi.org/10.1002/tqem.21557.

12. Li, J., Liu, B., and Qian, G., 2019. The belt and road initiative, cultural friction and ethnicity: Their effects on the export performance of SMEs in China. *Journal of World Business*, *54*(4), *pp.* 350-359. https://doi.org/10.1016/j.jwb.2019.04.004.

13. Christa, U. and Kristinae, V., 2021. The effect of product innovation on business performance during COVID 19 pandemic. *Uncertain Supply Chain Management*, *9*(1), *pp.* 151-158. http://dx.doi.org/10.5267/j.uscm.2020.10.006.

14. AlTaweel, I. R., Al-Hawary, S. I., 2021. The Mediating Role of Innovation Capability on the Relationship between Strategic Agility and Organizational Performance. *Sustainability*, *13*(14), 7564. https://doi.org/10.3390/su13147564.

15. Gómez-Prado, R., Alvarez-Risco, A., Cuya-Velásquez, B. B., Anderson-Seminario, M. de las M., Del-Aguila-Arcentales, S., and Yáñez, J. A., 2022. Product Innovation, Market Intelligence and Pricing Capability as a Competitive Advantage in the International Performance of Startups: Case of Peru. *Sustainability*, *14*(17), 10703. https://doi.org/10.3390/su141710703.

16. Mata, M. N., Falahat, M., Correia, A. B., and Rita, J. X., 2021. Impact of Institutional Support on Export Performance. *Economies*, *9*(3). https://doi.org/10.3390/economies9030101.

17. Mensah, K., Amenuvor, F.E., 2022. The influence of marketing communications strategy on consumer purchasing behaviour in the financial services industry in an emerging economy. *J Financ Serv Mark*, 27, *pp.* 190–205. https://doi.org/10.1057/s41264-021-00121-0.

18. Akbar, Y., Balzano, M., and Bortoluzzi, G., 2022. The relationship between innovation and internationalization of SMEs: A review of theoretical perspectives. *Research Handbook on Innovation in International Business*, *pp.* 6-33. https://doi.org/10.4337/9781800882942.00008.

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2025), 41(1), 12-27

Sharif University of Technology

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

Research Article

Designing a Decision Support System for Portfolio Management using Data Science Methods (Tehran Stock Exchange)

Navid Javaheri, Najmeh Neshat * and Abbass Ali Jafari Nodushan

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Meybod University, Meybod, Iran.
* corresponding author: (neshat@meybod.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:22 November 2024

Revised:02 April 2024

Accepted:24 Jun 2024

Keywords:

Portfolio management,
modeling,
data science,
classification,
clustering,
segmentation.

Abstract

Increasing profitability and reducing risk always requires choosing a smart investment path while taking advantage of data analysis; Therefore, it is necessary to provide a technique in the form of a decision support system for stock portfolio management while better understanding the position of data science. In this research, while combining data science methods with the Markowitz model, classification and forecasting models have also been created. Detecting financial fraud of companies is also effective; Hierarchical and Cummins algorithms have also been used in order to cluster active companies in the Tehran Stock Exchange. In terms of data classification, the linear support vector machine classification algorithm has been identified with 70% accuracy in comparison with the decision tree, Nyobies, nearest neighbour, and multilayer perceptron algorithms, and in terms of building prediction models, the decision tree with the minimum amount of error, in comparison with Nyobies algorithms, is the closest Neighbor, multilayer perceptron has been identified. The primary data in the current research includes twenty titles of financial indicators and daily data of stock prices of companies in the Python programming space. It was concluded that choosing stocks from among the clusters formed by different stocks of companies will reduce the risk of diversifying the stock portfolio. The mentioned system will be able to generalize as a comprehensive model for data in different time intervals and the indicators desired by the analyst, thus helping investors in a fast and accurate analytical way. The performance of the final technique will be such that the investor first selects several desired companies according to the heard, analysis, and news; It predicts the price performance of companies; Then, it separates the companies that have succeeded in accepting the condition by using the clustering model and separates the portfolio of various stocks. It forms according to the amount of risk and expected return. Importantly, as mentioned, the presented classification and forecasting models, in addition to being used in the formation and management of the stock portfolio, will be able to be effective in predicting the possible fraud of companies.

Funding

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

To Cite this article:

Javaheri, N., Neshat, N. and Jafari Nadoushan, A.A. 2025. Designing a decision support system for portfolio management using data science methods (Tehran stock exchange), Sharif Industrial Engineering and Management Journal, 41(1), 12-27. https://doi.org/10.24200/j65.2024.63158.2375

مجله‌ی علمی مهندسی صنایع و مدیریت شریف، دوره‌ی ۴۱، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۴، صص.۱۲-۲۷.

مجله علمی مهندسی صنایع و مدیریت شریف

https://sjie.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

طراحی سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مدیریت سبد سهام با بهره‌گیری از روش‌های علم داده (بازار بورس اوراق بهادار تهران)

نوید جواهری، نجمه نشاط * و عباسعلی جعفری ندوشن

گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی فنی مهندسی، دانشگاه میبد، یزد.

*نویسنده مسئول (neshat@meybod.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۰۹/۰۱

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۱/۱۴

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۴/۰۴

واژگان کلیدی:

مدیریت سبد سهام،

مدل‌سازی،

علم داده،

طبقه‌بندی،

خوشه‌بندی،

بخش‌بندی.

چکیده

افزایش سودآوری و کاهش میزان ریسک، مستلزم انتخاب مسیر هوشمند سرمایه‌گذاری ضمن بهره‌گیری از تحلیل داده است؛ لذا امروزه ارائه‌ی روشی در قالب سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مدیریت سبد سهام، ضمن درک بهتر جایگاه علم داده، ضروری است؛ لذا در پژوهش حاضر، علاوه‌بر دستیابی به این مهم، ضمن ترکیب روش‌های علم داده با مدل مارکویتز، مدل‌های طبقه‌بندی و پیش‌بینی نیز ایجاد شده‌اند، که در تشخیص تقلب مالی شرکت‌ها مؤثر هستند. همچنین، به‌منظور خوشه‌بندی شرکت‌های فعال در بورس اوراق بهادار تهران، الگوریتم‌های سلسله‌مراتبی و کامینز استفاده شده‌اند. درخصوص طبقه‌بندی داده‌ها، الگوریتم طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان خطی با دقت ۷۰٪ در مقایسه با الگوریتم‌های درخت تصمیم، نایوبیز، نزدیک‌ترین همسایه، و پرسپترون چندلایه و درخصوص ساخت مدل‌های پیش‌بینی، درخت تصمیم با کمینه‌ی میزان خطا، در مقایسه با الگوریتم‌های نایوبیز، نزدیک‌ترین همسایه، پرسپترون چندلایه شناسایی شده‌اند. داده‌های اولیه در پژوهش حاضر، شامل ۲۰ عنوان شاخص مالی و داده‌های روزانه‌ی قیمت سهام شرکت‌ها در فضای برنامه‌نویسی پایتون بوده‌اند.

۱. مقدمه

در بسیاری از سازمان‌ها، مانند بانک‌ها، سازمان‌های مالیاتی و مؤسسات بزرگ حسابداری و حسابرسی داده‌های مالی جمع‌آوری می‌شوند و «با افزایش حجم داده‌های ذخیره‌شده در سازمان‌ها، پایگاه‌های داده و سایر مخازن اطلاعاتی، ساخت ابزارهایی برای تجزیه‌وتحلیل و استخراج دانش معنادار از چنین حجم وسیعی از داده‌ها بسیار حیاتی می‌شود».[۱] حال بازارهای مالی به‌عنوان موتور محرک اقتصاد هر کشور، به ویژه بازار مبادله‌ی سهام شرکت‌ها، باید به سرعت با دانش و ابزار جدید تطبیق یابند؛ چرا که در مواجه با حجم انبوه داده در بازارهای مالی در قالب کلان‌داده‌ها، سرعت و دقت، هر چه بیشتر نقش کلیدی ایفاء می‌کنند و دستیابی به این مهم با استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل داده ممکن است. داده‌کاوی به‌عنوان زیرمجموعه‌ای از علم داده[1]، برای مدیریت داده‌های گسترده و افزایش کارایی شرکت و بینش تجاری در تجارت مالی بسیار مهم است؛[۲] در حقیقت «استفاده از روش‌های داده کاوی[2] بر روی داده‌های مالی می‌تواند به حل چالش‌های طبقه‌بندی و پیش‌بینی کمک کند و در عین حال فرآیند تصمیم‌گیری را برای افراد دخیل در امور مالی هر کشوری آسان‌تر سازد».[۳] بنابراین، بررسی الگوریتم‌های داده کاوی و ارائه‌ی یک الگو برای تحلیلگران بازارهای مالی، با توجه به اهمیت تحلیل اطلاعات و سرعت تولید داده در بازارهای مالی، بسیار حائز اهمیت است. بازارهای مالی ایران نیز از این قاعده مثتثنی نیستند. بنابراین، این پرسش ضروری است که چه میزان تحلیل اطلاعات بازارهای مالی، همچون تحلیل اطلاعات سهام شرکت‌ها، با استفاده از ابزارهای نوین مانند زبان برنامه‌نویسی پایتون، همانند کشورهای پیشرفته در کشور ما نیز در حال انجام است؟ پس از بررسی پاسخ پرسش مذکور، باید به دنبال ایجاد یا بهبود مسیری با هدف تسریع در فرآیند تحلیل بازارهای مالی بر آمد و تا حد امکان به گسترش مرزهای دانش در این زمینه پرداخت. به همین علت، در طی پژوهش حاضر، این مهم در قالب طراحی و پیاده‌سازی سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مدیریت سبد سهام با استفاده از ابزارهای علم داده با یک رویکرد ترکیبی نوین از مطرح‌ترین الگوریتم‌های داده کاوی، هدف پژوهش بوده است؛ بنابراین، هدف اصلی از پژوهش حاضر، ادغام دانش فراگرفته‌شده در مهندسی مالی با تجربه‌ی متخصصان علم داده، به‌منظور ایجاد الگویی با بیشینه‌ی سرعت پیاده‌سازی و دریافت خروجی با کمینه‌ی خطاست؛ که برای

[1] Data science

[2] Data mining

استناد به این مقاله:

جواهری، نوید، نشاط، نجمه و جعفری ندوشن، عباسعلی. ۱۴۰۴. طراحی سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مدیریت سبد سهام با بهره‌گیری از روش‌های علم داده (بازار بورس اوراق بهادار تهران). مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۴۱(۱)، صص.۱۲-۲۷. https://doi.org/10.24200/j65.2024.63158.2375

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

تحلیلگران و سرمایه‌گذاران در بازارهای مالی که همواره بازده و ریسک را توأمان در نظر می‌گیرند و به دنبال کسب بیشترین بازده و تحمل کمترین ریسک به هنگام تشکیل سبد سهام هستند، راهگشا خواهد بود.[۴] بنابراین در پژوهش حاضر، با توجه به اهمیت مبحث مدیریت سبد سهام به‌عنوان یکی از زمینه‌های اصلی و تأثیرگذار در مهندسی مالی براساس پیشینه‌ی پژوهش‌های صورت‌پذیرفته، یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری در مدیریت سبد سهام با بهره‌گیری از ابزارهای علم داده در قالب ترکیب الگوریتم‌های مطرح در این زمینه، شامل: بخش‌بندی، طبقه‌بندی، پیش‌بینی، و مدل مارکویتز ارائه شده است. در حقیقت، روشی در قالب یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری[۳] در حل مسائل مدیریت سبد سهام با ترکیبی از روش‌های داده کاوی ارائه شده و این مهم در شرایطی بوده است که نیاز به تحلیل حجم زیادی از اطلاعات در ابعاد بسیار بالا در قالب کلان‌داده‌ها و اخذ خروجی در مدت زمان محدود وجود دارد. مهم آنکه رویه‌ی در نظر گرفته‌شده به گونه‌ای است که تحلیلگر قادر خواهد بود با درنظرگرفتن جامعه‌ی آماری و شاخص‌های موردنظر خود، اقدام به حل مسائل طبقه‌بندی، خوشه‌بندی، یا پیش‌بینی کند. از ویژگی‌های برجسته‌ی روش پیشنهادی، قابلیت تعمیم‌دهی آن است، زیرا امکان تنظیم پارامترهای مدل بر حسب فرض‌های مسئله‌ی موردنظر در مدل‌های نهایی فراهم شده است. در پژوهش حاضر، ابتدا مروری بر پژوهش‌های پیشین صورت گرفته و خلاصه‌ای از آن‌ها به شکل کاربردی در جهت کمک به درک جایگاه علم داده و تعیین جزییات مسئله‌ی اصلی ارائه شده است. در گام بعدی، به بررسی مبانی نظری موردنیاز پرداخته شده است، سپس داده‌های موردنیاز به‌منظور پیاده‌سازی الگوریتم‌ها با هدف ساخت مدل‌های نهایی جمع‌آوری و گام‌های پیش‌پردازش داده برای داده‌های مذکور اجرا شده است. در گام بعدی، به پیاده‌سازی و سنجش مدل‌های خوشه‌بندی، طبقه‌بندی، و پیش‌بینی پرداخته شده و مدل‌های موردنظر هدف اصلی پژوهش، ایجاد، ترکیب، و سنجیده شده‌اند. در آخرین مرحله، نیز تفسیری در قالب تحلیل خروجی مدل‌های ساخته‌شده، به‌منظور روشن‌ترشدن کاربرد سیستم ایجادشده ارائه شده است.

۲. مبانی نظری

۱.۲. مدیریت سبد سهام یا مدیریت پرتفوی

لغت پرتفوی[۴]، به بیان ساده به مجموعه‌ای از دارایی‌ها گفته می‌شود، که توسط سرمایه‌گذار برای سرمایه‌گذاری تشکیل می‌شود؛ که در آن، سرمایه‌گذار یک فرد یا یک مؤسسه است. از نظر تکنیکی، پرتفوی در برگیرنده‌ی مجموعه‌ای از دارایی‌های واقعی و مالی سرمایه‌گذاری‌شده‌ی یک سرمایه‌گذار است. پرتفویی ایده‌آل است که با فرض یکسان‌بودن بازده بین تمامی پرتفوهای موردانتظار، واریانس یا ریسک آن از همه کمتر باشد، یا از بین تمامی پرتفوهایی با واریانس یا ریسک مشابه، بیشترین بازده را داشته باشد. مارکویتز[۵] به‌صورت کمّی نشان داد که چرا و چگونه تنوع‌سازی پرتفوی می‌تواند باعث کاهش ریسک پرتفوی شود. ایشان در مسئله‌ی انتخاب پرتفوی استاندارد خود، معتقد است که سرمایه‌گذاران انتخاب‌های خود را براساس دو معیار بازدهی و ریسک انجام می‌دهند. در مدل مذکور، بازدهی پرتفو معادل میانگین وزنی بازدهی اجزاء پرتفوی و ریسک آن برابر با انحراف معیار بازدهی دارایی‌های موجود است. وزن کارای پرتفوها، مجموعه‌ای از پرتفوهاست که در هر سطح از ریسک، بیشترین بازدهی را ارائه می‌کنند. به بیان مدل مارکویتز، تشکیل یک پرتفوی متنوع، میزان ریسک را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. فرضیه‌های مدل مارکویتز عبارت‌اند از:

۱) سرمایه‌گذاران ریسک‌گریز هستند و مطلوبیت موردانتظار، افزایشی است؛ ۲) سرمایه‌گذاران پرتفو را براساس میانگین و واریانس موردانتظار عایدی انتخاب می‌کنند؛ ۳) هر سرمایه‌گذاری تا بی‌نهایت قابل تقسیم است؛ و ۴) سرمایه‌گذاران افق زمانی یک دوره‌ای دارند و این دوره برای همه مشابه است.[۴] بنابراین، می‌توان گفت بازده یک سبد، بازده وزنی سهام پایه است. براساس مدل مارکویتز، اگر σ_p ریسک پرتفوی و n تعداد سهام پایه باشد، آنگاه رابطه‌ی ۱ برقرار است:

$$\sigma_p^2 = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} w_i w_j \sigma_{ij} \qquad (۱)$$

که در آن، σij برابر با کوواریانس بین قیمت سهم i و j و همچنین Wi و Wj وزن تخصیص داده‌شده به سهم i و j هستند. وزن تخصیص داده‌شده در تابع ۱، در حقیقت وزن هر سهم در خوشه است، که به صورت رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$W_j = \frac{M_j}{\sum M_j} \qquad (۲)$$

که در آن، Mj ارزش بازار سهم j است. به بیان ساده‌تر، بازدهی هر خوشه برابر با میانگین موزون بازدهی سهام موجود در آن خوشه است، که وزن هر سهم، ارزش بازار آن سهم در آن خوشه است.[۴]

۲.۲. علم داده و داده کاوی

علم داده مبتنی بر تحلیل داده‌ها و شامل علوم گوناگونی همچون تحلیل کلان داده‌ها، داده کاوی و ... است. همچنین به زیردسته‌هایی از جمله: هوش مصنوعی (AI)[۶]، یادگیری ماشین (ML)[۷]، داده کاوی، یادگیری عمیق[۸]، و ... تقسیم‌بندی می‌شود؛ همچنین داده کاوی به عنوان فرآیند کشف دانش[۹] یا فرآیند کشف داده[۱۰] نیز شناخته می‌شود؛ فرآیندی است که مستلزم مطالعه و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها از منابع مختلف، ارزیابی و ترکیب آن‌ها به اطلاعات مفیدتر و مهم‌تر است. داده کاوی به‌منظور پیش‌بینی، محبوب‌ترین نوع داده کاوی با بیشترین خروجی برای فعالیت‌های تجاری است.[۲] روش‌های اصلی داده کاوی در پژوهشی به ۶ گروه اصلی تقسیم‌بندی شده‌اند، که عبارت‌اند از: ۱) طبقه‌بندی، ۲) پیش‌بینی، ۳) خوشه‌بندی، ۴) تجزیه‌وتحلیل توالی، ۵) تشخیص داده‌های پرت، و ۶) متن‌کاوی؛ که از میان آن‌ها، خوشه‌بندی از جمله روش‌هایی است که به‌طورگسترده و فشرده توسط بسیاری از پژوهشگران داده کاوی مطالعه شده است.[۵] روش‌های داده کاوی در پژوهش حاضر نیز به ۳ دسته‌ی کلی: ۱) بخش‌بندی یا خوشه‌بندی، ۲) طبقه‌بندی، و ۳) پیش‌بینی تقسیم‌بندی شده‌اند. داده کاوی عمدتاً برای اهداف تجاری استفاده و در قالب ارائه‌ی روش مطرح می‌شود. خروجی آن به‌عنوان یک الگو قابل استخراج است و نوع داده‌ها در آن عموماً ساختاریافته است؛ این در حالی است که علم داده، عمدتاً برای اهداف علمی استفاده می‌شود و همواره به عنوان یک رشته مطرح است. نوع داده‌ها در علم داده می‌تواند به شکل ساختاریافته، نیمه‌ساختاریافته، و یا بدون

[3] Decision support system
[4] Portfolio
[5] Markowitz
[6] Artificial Intelligence
[7] Machine Learning
[8] Deep learning
[9] knowledge discovery
[10] Data discovery

ساختار باشد.[۶] زرندی و کاظمی (۲۰۰۸)، [۷] فرآیند کشف دانش از طریق داده کاوی را به ۴ عنوان تقسیم‌بندی کرده‌اند:

۱) انتخاب، ۲) پیش‌پردازش، ۳) داده کاوی، و ۴.) تفسیر. دستگیر (۲۰۱۹)،[۹] نیز مراحل اخیر را به ۹ مرحله تقسیم‌بندی کرده است: ۱) شناسایی هدف، ۲) انتخاب داده‌ها، ۳) آماده‌سازی داده‌ها، ۴) ارزیابی داده‌ها، ۵) قالب‌بندی پاسخ، ۶) انتخاب ابزار، ۷) الگوسازی، ۸) اعتبارسازی یافته‌ها، و ۹) ارائه‌ی نتایج.[۸] با توجه به مرور ادبیات و با هدف تلخیص و ترکیب ادبیات مروری گوناگون و با بررسی تجربه‌ی خبرگان در این زمینه، در پژوهش حاضر، مراحل داده کاوی در قالب ۵ مفهوم مستقل با توجه به مباحث کتاب راهنمای علم داده‌ی پایتون[۱۱] بررسی شده است.

۳.۲. سنجش خطای مدل‌ها

مرحله‌ی کنونی، شامل سنجش مدل‌ها و الگوهای ساخته‌شده است، که به وسیله‌ی شاخص‌های اندازه‌گیری خطا، همچون مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)[۱۲]، میانگین قدرمطلق خطا (MAE)[۱۳]، ضریب تعیین[۱۴]، میانیگن مربعات خطا (MSE)،[۱۵] و ماتریس اغتشاش[۱۶] الگوهای ساخته‌شده ارزیابی شده‌اند. در ادامه، توابع شاخص‌های مذکور به جهت یادآوری، در روابط ۳ الی ۵ ارائه شده‌اند:

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[y_t - \hat{y}\right] \quad (۳)$$

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_t - \hat{y})^2 , RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_t - \hat{y})^2} \quad (۴)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_t - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^{N}(y_t - \bar{y})^2} \quad (۵)$$

که در آن‌ها، $\hat{y}$ برابر با مقدار پیش‌بینی‌شده از y یا مقادیر ستون هدف و $\bar{y}$ برابر با میانگین مقادیر ستون هدف یا مقادیری است، که قرار بر پیش‌بینی آن‌هاست. همچنین ماتریس آشفتگی نیز که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، چهار معیار موردنظر خود را در قالب چهار نسبت از طریق مقایسه‌ی برچسب طبقه‌های پیش‌بینی‌شده با برچسب طبقه‌های حقیقی محاسبه می‌کند، که در پژوهش حاضر از معیار دقت[۱۷]، که ترکیبی از سه معیار دیگر است، استفاده شده است.

		Ground truth	
		+	-
Predicted	+	True Positive (TP)	False Positive (FP)
	-	False Negetive (FN)	True Negetive (TN)

طبقه های پیش بینی شده

طبقه های حقیقی

شکل ۱. ماتریس آشفتگی.

در ماتریس آشفتگی، مقدار ضریب خطای معیار دقت مطابق رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود:

$$accuracy = \frac{(TP+TN)}{TP+FP+TN+FN} \quad (۶)$$

۴.۲. الگوریتم درخت تصمیم[۱۸]

ساختار درخت تصمیم شبیه به ساختار یک فلوچارت است. درخت تصمیم، یک شیوه‌ی طبقه‌بندی یا پیش‌بینی است، که بالاترین گره در درخت، ریشه است و برگ‌ها، نشان‌دهنده‌ی دسته‌ها و توزیع دسته‌ها هستند. هر آزمون آزمایشی بر یک گره، یک ویژگی را مشخص می‌کند و هر شاخه‌ای که از آن گره خارج شود، نتیجه‌ی آزمون اخیر را نشان می‌دهد.[۱۰] در روش مذکور برخلاف شبکه‌های عصبی، الزامی برای عددی‌بودن داده‌ها در درخت تصمیم وجود ندارد.[۱۱]

۵.۲. نایو بیز[۱۹]

نایو بیز، شیوه و روشی از خانواده‌ی روش‌های طبقه‌بندی برمبنای احتمال به‌کارگیری قضیه‌ی بیز و فرض استقلال بین متغیرهاست. اگر مشاهده‌ها و داده‌ها از نوع پیوسته باشند، از مدل احتمالی با توزیع گاوسی یا نرمال برای متغیر داده‌های جمع‌آوری‌شده می‌توان استفاده کرد.[۱۲]

۶.۲. نزدیک‌ترین همسایه[۲۰]

روش نزدیک‌ترین همسایه، به‌عنوان یکی از ساده‌ترین روش‌های طبقه‌بندی به‌عنوان طبقه‌بندی‌کننده‌ی تنبل[۲۱] نیز شناخته می‌شود، زیرا مرحله‌ای خاص جهت یادگیری ندارد و به‌هنگام طبقه‌بندی از تمامی داده‌ها برای یادگیری استفاده می‌کند. روش مذکور متعلق به کلاس یادگیری مبتنی بر نمونه است و در آن، طبقه‌بندی فقط با نگاه‌کردن به K نزدیک‌ترین مثال‌ها در مجموعه داده‌های آموزشی (عموماً از نظر معیار فاصله‌ی اقلیدسی[۲۲] یا براساس انوع دیگری از معیارهای فاصله همچون همینگ[۲۳] یا منهتن[۲۴]) در مورد داده‌ای که طبقه‌بندی برای آن در حال پیاده‌سازی است، انجام می‌شود؛ سپس با توجه به نمونه‌های مشابه K، محبوب‌ترین هدف (براساس رأی بیشینه) به‌عنوان برچسب طبقه‌بندی انتخاب می‌شود.[۱۳]

۷.۲. ماشین بردار پشتیبان[۲۵]

یک روش یادگیری با نظارت[۲۶] است، که برای طبقه‌بندی استفاده می‌شود؛ و مشابه شبکه‌های عصبی قادر است تقریبی با درجه‌ی دقت مطلوب برای هر تابع چندمتغیره به‌دست آورد. بنابراین به‌منظور مدل‌سازی سیستم‌ها و فرآیندهای غیرخطی و پیچیده، از جمله شناسایی فعالیت‌های مرتبط با تقلب مالی، بسیار مفید است.[۹]

۸.۲. پرسپترون چندلایه[۲۷]

به‌منظور حل بسیاری از مسائل ریاضی، که براساس معادله‌های پیچیده‌ی غیرخطی حل می‌شوند، یک شبکه‌ی عصبی پرسپترون چندلایه می‌تواند به

11 Python Data Science Handbook [Book]
12 Root Mean Square Error
13 Mean Absolute Error
14 R^2
15 Mean Squared Error
16 Confusion Matrix
17 Accuracy
18 Decision tree
19 Naive Bayes
20 Nearest Neighbor
21 Lazy Classifiers
22 Euclidean
23 Hamming
24 Manhattan
25 Support vector machines
26 Supervised Learning
27 Multiluyer perceptron

سادگی با تعریف اوزان و توابع مناسب استفاده شود. یک پرسپترون چندلایه، از سه نوع لایه تشکیل می‌شود: ۱) لایه‌ی ورودی[۲۸]، ۲) لایه‌های میانی یا پنهان[۲۹]، و ۳) لایه‌ی خروجی[۳۰]. نرون‌ها عناصر تشکیل‌دهنده‌ی لایه‌ها در شبکه‌های عصبی هستند. عناصر هر لایه با تمام عناصر لایه‌های دیگر در ارتباط است، ولی با دیگر عناصر همان لایه ارتباطی ندارد. موضوع اصلی موردبحث در شبکه‌ها، تعیین تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نورون‌های هر لایه است. در مدل مذکور، ورودی‌هایی وارد نورون می‌شوند که با x_i و به شکل خلاصه با بردار x نمایش داده می‌شوند. هر یک از ورودی‌های نورون به یکی از سیگنال‌های ورودی متعلق است، که هر سیگنال در وزن متناظر w_i ضرب و مقادیر حاصل در داخل نورون با هم جمع و مقدار خروجی (مطابق رابطه‌ی ۷) محاسبه می‌شود:[۱۴]

$$NET = X_1W_1 + X_2W_2 + \ldots + X_nW_n = \sum X_i.W_i \qquad (۷)$$

۹.۲. نسبت‌های مالی

نسبت‌های مالی، مقادیر عددی هستند که به‌منظور بررسی وضعیت شرکت‌ها از صورت‌های مالی آن‌ها، مانند: صورت سود و زیان، ترازنامه، صورت جریان نقدینگی، و ... استخراج می‌شوند. نسبت‌های مالی به بیان روابط بین اقلام موجود در صورت‌های مالی شرکت‌ها می‌پردازند و همواره به‌عنوان یکی از متداول‌ترین گزینه‌ها برای تحلیل‌های مالی در نظر گرفته می‌شوند. در پژوهش حاضر، از بیان مبانی نظری مربوط به نسبت‌های مالی، به‌منظور جلوگیری از تکرار بیان مباحث خودداری شده است.

۱۰.۲. بازده سهام

اگر اطلاعات مربوط به جریان‌های نقدینیگی (سود نقدی، مزایای حق‌تقدم، و سهام‌جایزه) در دسترس نباشند و در تابع اخیر، ارقام مذکور وارد نشود، خروجی کسر عبارت از بازده قیمت سهام است، که در پژوهش حاضر با توجه به کمبود اطلاعات، این مقدار محاسبه شده است. به عبارتی ساده‌تر، بازده کل سهام برابر با مجموع بازده نقدی و بازده قیمت است.[۱۵]

حال این تذکر لازم است که سؤال و هدف ابتدایی پژوهش حاضر آن است که چه میزان می‌توان به بهبود درک جایگاه الگوریتم‌های داده کاوی با دیدگاه مالی در بستر علم داده، ضمن مطالعه‌ی پژوهش‌های پیشین پرداخت؛ که به این منظور، به مرور دقیق پژوهش‌های پیشین پرداخته شده است. در پایان نیز شکافی در قالب سؤال اصلی پژوهش شناسایی شده است، که عبارت از نحوه‌ی ارائه‌ی سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری در تشکیل سبد سرمایه‌گذاری، شامل سهام شرکت‌های فعال در بازار بورس اوراق بهادار تهران با توجه به بازده قیمت هر سهم و هر خوشه با بهره‌گیری از الگوریتم‌های داده کاوی ضمن ترکیب با مدل مارکویتز است؛ که در همین راستا، چالشی با هدف نحوه‌ی به‌کارگیری الگوریتم‌های خوشه‌بندی، طبقه‌بندی، و پیش‌بینی برای پژوهشگران پژوهش حاضر در مسیر تشکیل سبد سهام ایجاد شده است، که طی مسیر پژوهش، سؤال‌های ذکرشده، بررسی و پیاده‌سازی شده‌اند.

۳. پیشینه‌ی پژوهش

۱.۳. پیشینه‌ی پژوهش‌های داخلی

در زمینه‌ی خوشه‌بندی شرکت‌های فعال در بازار سهام، عباسی و نیکبخت (۲۰۱۸)،[۱۶] با استفاده از داده‌های موجود در صورت‌های مالی شرکت‌های پذیرفته‌شده در بورس اوراق بهادار تهران، با استفاده از روش خوشه‌بندی C-means به بخش‌بندی شرکت‌های مذکور پرداخته و نشان داده‌اند که بخش بزرگی از آن‌ها در سبد سهام ترکیبی قرار گرفته‌اند، در حالی که تمایل رفتاری آن‌ها به سهام رشدی بوده است. در پژوهش اخیر، از طریق مطالعه‌ی کتب و نوشتارهای بین‌المللی و درنهایت مشورت با پژوهشگران، شاخص‌های انتخابی برای بخش‌بندی سهام شرکت‌ها انتخاب شده‌اند، که عبارت‌اند از: نسبت قیمت به درآمد هر سهم (P/E)[۳۱]، نسبت قیمت به ارزش دفتری (P/B)[۳۲]، شاخص ریسک سیستماتیک (β)[۳۳]، سود هر سهم (EPS)[۳۴]، سود تقسیمی، مومنتوم[۳۵]، نرخ رشد ۵ ساله‌ی درآمد هر سهم، میزان تغییر ۵ ساله نسبت قیمت به درآمد هر سهم، بازده حقوق صاحبان سهام (ROE)[۳۶]، نسبت بدهی به حقوق صاحبان سهام (D/E)[۳۷]، نسبت قیمت سهام به فروش (P/S)[۳۸]. سلطانی‌نژاد (۲۰۱۵)،[۱۷] نیز به دنبال حذف نویز اطلاعات ماتریس ضرایب همبستگی از طریق روش‌های خوشه‌بندی به‌منظور بهینه‌سازی سبد سرمایه‌گذاری بوده است؛ به این منظور از دو روش خوشه‌بندی اتصال واحد و اتصال میانگین و براساس بازده روزانه‌ی ۸۰ شرکت بورس اوراق بهادار تهران در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۵ تا اسفند ۱۳۹۲ استفاده کرده و دریافته است که درنهایت، ریسک کمتری به سرمایه‌گذار تحمیل می‌شود و همچنین با هدف تحلیل حساسیت نتایج دو روش، یک بررسی بوت استرپینگ[۳۹] در تعداد سهام و افق‌های زمانی مختلف انجام شده است، که در بیشتر حالت‌ها، بهبود عملکرد سبد سرمایه‌گذاری مشاهده شده است. همچنین صیادی و امیدی (۲۰۲۰)،[۱۸] ترکیبی از روش‌های خوشه‌بندی و پیش‌بینی را استفاده کرده‌اند، به صورتی که یک مدل بهینه‌سازی پرتفوی مبتنی بر پیش‌بینی، برای بررسی نتایج وضعیت پرتفوی در بورس اوراق بهادار تهران ایجاد شده است. بدین منظور، ابتدا از روش داده کاوی برای پیش‌بینی فرآورده‌های نفتی و صنایع شیمیایی با استفاده از داده‌های خوشه‌بندی بازار سهام استفاده شده است. در گامی دیگر، نیز به منظور تخمین هر شاخص صنعت با استفاده از تابع پایه‌ی شعاعی و شبکه‌ی عصبی پرسپترون چندلایه، از عوامل مؤثری مانند: قیمت نفت خام، نرخ ارز، نرخ بهره جهانی، قیمت طلا، و شاخص S&P ۵۰۰ استفاده شده است. درنهایت، با مقایسه‌ی نسبت‌های اعتبارسنجی در یک بازار صعودی با استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی K-means، شبکه‌ی عصبی و فازی، بهترین الگوریتم برای پیش‌بینی شاخص‌ها برای هر صنعت شناسایی شده و نتایج نشان داده است که الگوریتم پرسپترون چندلایه، بالاترین دقت را داشته و بهترین

[28] Input Layer
[29] Hidden Layer
[30] Output Layer
[31] Price to Earning
[32] Price to Book value
[33] Systematic risk
[34] Earning Per Share

[۳۵] در بازار بدین معناست که یک روند قیمتی تمایل دارد باقی بماند تا زمانی که یک نیروی خارجی مانع آن شود. در پژوهش مذکور شاخص مومنتوم درصد تغییر قیمت در ۱۲ ماه سال موردنظر پژوهش است.

[36] Return On Equity
[37] Debt to Equitu
[38] Price to Sales ratio
[39] Spring Boot

گزینه برای وضعیت پرتفوی بوده است؛ با این حال، الگوریتم فازی C-means بهترین خوشه‌ها را تولید کرده است. نتایج عملی نشان داد که سهام نفت سپاهان و پتروشیمی خارگ، مهم‌ترین سهام در کوتاه‌مدت بوده و سهام پتروشیمی خارگ، پتروشیمی فن‌آوران، و پالایش نفت تهران سهم بیشتری در سبد سهام در میان‌مدت یا بلندمدت داشته‌اند. زمانی و همکارش (۲۰۲۳)، پس از مطالعه‌ی نوشتارهای بین‌المللی و بررسی شاخص‌های گوناگون و مشورت با اساتید و صاحب نظران در زمینه‌های مالی و حسابداری، ۵ شاخص نهایی برای خوشه‌بندی انتخاب کرده‌اند، که عبارت‌اند از: ۱) نسبت قیمت به درآمد هر سهم، ۲) شاخص ریسک سیستماتیک، ۳) سود هر سهم، ۴) بازده[40]، و ۵) نسبت ارزش بازار به ارزش دفتری (M/B)[41]، که به منظور قابل انجام‌بودن عمل خوشه‌بندی و محاسبه‌ی فاصله‌ی درست میان سهام، داده‌ها را براساس شاخص‌های اصلی نسبت قیمت به درآمد هر سهم و نسبت ارزش بازار به ارزش دفتری فیلتر کرده و فقط سهام حاوی ویژگی‌های اخیر برای خوشه‌بندی را در نظر گرفته‌اند.[۴] در سایر پژوهش‌ها در این زمینه نیز می‌توان به پژوهش صادقی آرانی و همکارش (۲۰۱۹) اشاره کرد، که در آن از ۵ نسبت مالی آلتمن، که از سایت مرکز بورس اوراق بهادار تهران استخراج شده‌اند، به این شرح استفاده شده است: ۱) نسبت سرمایه در گردش به کل دارایی‌ها، ۲) نسبت سود قبل از مالیات به کل دارایی‌ها، ۳) نسبت سود انباشته به کل دارایی‌ها، ۴) نسبت ارزش بازار سهام به ارزش دفتری کل بدهی‌ها، و ۵) نسبت فروش کل به کل دارایی‌ها. نتیجه‌ی نهایی بیان کرده است که روش‌های فرا ابتکاری در مقایسه با روش‌های معمول، کاراتر عمل کرده و به بهینه‌ی سراسری منجر شده‌اند؛ همچنین نتایج به‌دست‌آمده با نتایج حاصل از تفکیک شرکت‌های عضو بورس بهادار تهران با استفاده از روش تعیین ورشکستگی آلتمن مقایسه و توسط روش مذکور نیز تأیید شده است.[۱۹] دستگیر و شفیعی (۲۰۱۹)، پیش‌بینی ورشکستگی را مشهورترین موضوع در زمینه‌ی کاربرد روش‌های داده کاوی در حل مسائل مالی دانسته و از بین روش‌های موجود در داده کاوی نیز شبکه‌ی عصبی بیشترین استفاده را به خود اختصاص داده است.[۸] محمودی و همکاران (۲۰۲۰)، عملکرد پنج مدل محبوب آماری و یادگیری ماشین را با هدف تشخیص تقلب صورت‌های مالی در مقایسه با یکدیگر بررسی کرده‌اند. اهداف پژوهش اخیر شرکت‌هایی بوده‌اند که بین سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۶ صورت‌های مالی متقلبانه و غیرمتقلبانه را تجربه کرده‌اند. نتایج ایشان نشان داده است که شبکه‌ی عصبی مصنوعی[42] نسبت به شبکه‌ی بیزی[43]، تحلیل تشخیصی[44]، رگرسیون لجستیک[45]، و ماشین‌بردار پشتیبان عملکرد بهتری داشته‌اند. هدف ایشان، ارائه‌ی یک مدل کمّی برای شناسایی گزارشگری مالی متقلبانه در شرکت‌های ایرانی با استفاده از الگوریتم‌های طبقه‌بندی و شناسایی شرکت‌هایی بوده است، که برای پنهان‌کردن اطلاعات و یا ارائه‌ی اطلاعات نادرست در پرونده‌های سالانه با اوراق بهادار و بورس تهران تلاش کرده‌اند. به بیان پژوهش اخیر، از میان ۱۹ عامل پیش‌بینی‌کننده‌ی بررسی‌شده، فقط ۹ عامل پیش‌بینی‌کننده به‌طورپیوسته توسط الگوریتم‌های طبقه‌بندی مختلف انتخاب و استفاده شده‌اند، که عبارت‌اند از: ۱) بهره‌وری کارکنان، ۲) حساب‌های دریافتی به فروش، ۳) بدهی به حقوق صاحبان سهام، ۴) موجودی به فروش، ۵) فروش به کل دارایی‌ها، ۶) بازده حقوق صاحبان سهام، ۷) بازده فروش، ۸) بدهی‌ها به هزینه‌های بهره، و ۹) دارایی‌ها به بدهی‌ها. یافته‌های پژوهش اخیر، تقلب در صورت‌های مالی را گسترش داده و توانسته است توسط متخصصان و تنظیم‌کننده‌ها برای بهبود مدل‌های ریسک تقلب استفاده شود. نرم‌افزار استفاده‌شده‌ی ایشان، IBM SPSS Modeler ۱۸ بوده است.[۱۴]

نتایج حاصل از پژوهش عباسی و همکاران (۲۰۱۹) نیز نشان داده است که توانگری مالی با دقت قابل‌قبولی، پیش‌بینی‌پذیر بوده و مدل استخراج‌شده با استفاده از درخت تصمیم، دقت و قابلیت بسیار بالایی در تخمین داشته است. از میان ۴ مدلی که در پژوهش اخیر استفاده شده‌اند (درخت تصمیم، نایو بیز، شبکه‌ی عصبی، و نزدیک‌ترین همسایه)، درخت تصمیم بالاترین دقت و کمترین مقدار خطا را داشته است. همچنین متغیرهای تصمیم به‌خوبی متغیر هدف را تعیین کرده‌اند. بدترین عملکرد نیز مربوط به مدل نایو بیز شناسایی شده است.[۲۰]

۲.۳. پیشینه‌ی پژوهش‌های خارجی

ناندا[46] و همکاران (۲۰۱۰)، در نوشتاری با عنوان «خوشه‌بندی داده‌های بازار سهام هند جهت مدیریت پرتفو» از داده کاوی برای طبقه‌بندی سهام در خوشه‌های مختلف استفاده کرده و پس از طبقه‌بندی، سهام موردنظر برای پرتفوها از بین خوشه‌های مذکور انتخاب شده است. روش مذکور منجر به کاهش ریسک متنوع‌سازی سبد سهام شده و نتایج نشان داده است که روش تحلیلی K-means، خوشه‌های متراکم‌تری نسبت به روش‌های SOM[۴۷] و فازی ایجاد می‌کند. شاخص‌های موردنظر برای خوشه‌بندی در پژوهش مذکور عبارت بوده‌اند از: نسبت قیمت به درآمد هر سهم، نسبت قیمت به ارزش دفتری، نسبت قیمت به سود نقدی هر سهم (P/C EPS)[۴۸]، ارزش شرکت به سود شاخص عملکرد با توجه به سرمایه بازار (EV/ EBIDTA)[۴۹].[۲۰] حال مهم آن است که اگرچه روبرویی با کلان‌داده‌ها دانش بیشتری را نیازمند است، ولی مزایایی نیز دارد. رازین[50] (۲۰۱۵)، در نوشتار خود به این نتیجه رسیده است که "کلان‌داده‌ها از پنج طریق باعث تغییر امور مالی می‌شوند: ۱) ایجاد شفافیت، ۲) تجزیه‌وتحلیل ریسک، ۳) تجارت الگوریتمی، ۴) استفاده از داده‌های مصرف‌کننده، و ۵) تغییر فرهنگ.[۲۱] هاری‌هاران[51] (۲۰۱۸)، در پژوهش خود بر روی استفاده از داده کاوی در پیش‌بینی سهام، مدیریت پرتفوی، تحلیل ریسک سرمایه‌گذاری، همچنین پیش‌بینی ورشکستگی و نرخ ارز خارجی و شناسایی تقلب مالی متمرکز شده است.[۳] دایبولد[52] و همکاران (۲۰۱۹) بیان کرده‌اند که اگرچه فضای اقتصادی مدرن امروز، غرق در داده‌های بزرگ است، با این حال تحلیل یا اصلاً بررسی نشده‌اند؛ به همین منظور ایشان در پژوهش خود، پژوهش‌های جدید اقتصادسنجی را در مورد داده‌های بزرگ و مدل‌سازی سری‌های زمانی ارائه کرده‌اند. به شکل خلاصه آن‌ها معتقد بوده‌اند که کلان‌داده در تحلیل‌های اقتصادی و مدل‌سازی اقتصادی تأثیر بسزایی دارد.[۲۲] مجومدار

[40] Return
[41] Market value/Book value
[42] Artificial Neural Network
[43] Bayesian network
[44] Discriminant Analysis
[45] logistic
[46] Nanda

[۴۷] نگاشت خود سازمانده

[48] Price to Cash EPS
[49] Enterprise Value to Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization
[50] Razin
[51] Hariharan
[52] Diebold

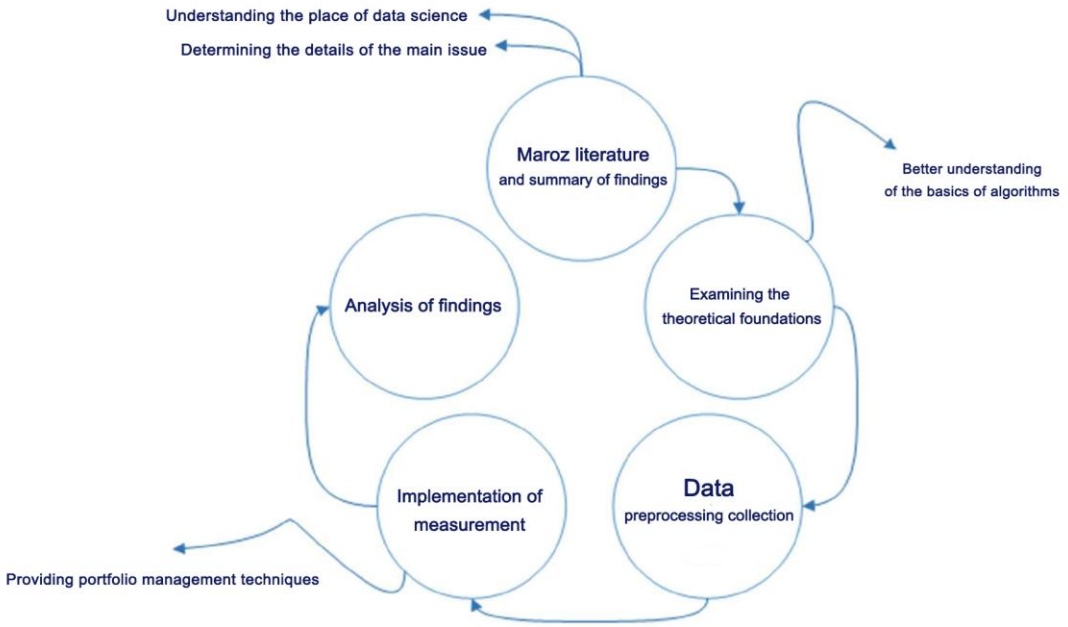
و لاها [۵۳] (۲۰۲۰)، نیز به خوشه‌بندی و طبقه‌بندی سری‌های زمانی با استفاده از تحلیل داده‌های توپولوژیکی با کاربردهای مالی پرداخته‌اند.[۲۳] گودل[۵۴] و همکاران (۲۰۲۱)، در بازنگری کاملی بر نوشتارهای ارائه‌شده در امور مالی دریافته‌اند که مباحثی در هر دو گروه هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در ۳ دسته مطرح هستند: ۱) ساخت پرتفوی، ارزش‌گذاری و رفتار سرمایه‌گذار، ۲) تقلب و ناتوانی مالی، ۳) پیش‌بینی و برنامه‌ریزی. در پژوهش مذکور نوشتارهایی معرفی شده‌اند که به بررسی شناسایی تقلب مالی با استفاده از روش‌های داده کاوی پرداخته‌اند، که با توجه به تعدد آن‌ها، از بیان جزئیات‌شان در مرور پیشینه‌ی حاضر خودداری شده است: در گام اول، معماری یک سیستم مدیریت مالی هوشمند کاملاً بررسی شده و معماری جدیدی از یک سیستم پشتیبانی مدیریت مالی هوشمند مبتنی بر داده کاوی توسعه یافته است؛ در گام دوم، به تعریف و ساختار انبار داده و داده کاوی و همچنین نحوه‌ی استفاده از راهبرد و فناوری داده کاوی در مدیریت مالی پرداخته شده است. به عقیده‌ی ایشان، داده‌کاوی در ارتباط با فناوری و توسعه‌ی یک الگوریتم داده کاوی هوشمند در حال بررسی است؛ نقص‌های الگوریتم داده کاوی هوشمند از طریق تجزیه‌وتحلیل و خلاصه‌سازی الگوریتم کشف و درنهایت یک الگوریتم بهبودیافته برای رفع ایرادها پیشنهاد شده است. در گام بعدی، آزمایش‌های مرتبط بر روی الگوریتم بهبودیافته انجام شده و آزمایش‌ها نشان داده‌اند که الگوریتم مذکور مزایای خاصی داشته‌اند. سپس چهارچوب طراحی اولیه برای مدیریت مالی هوشمند ایجاد و کاربرد یک مدل داده کاوی در سیستم پشتیبانی تصمیم معرفی شده است.[۲۵] همچنین، کیانو[۵۵] (۲۰۲۴) در پژوهش خود بیان کرده است که پیشرفت‌های تکنولوژیکی منجر به دیجیتالی‌شدن اقتصاد شده است، از همین رو یک مدل یادگیری ماشین با استفاده از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی قیمت بیت‌کوین ارائه کرده است، که در مسیر آن، اطلاعات قیمت پایانی ۶۰ روز رمز ارز بیت‌کوین به‌منظور پیش‌بینی روز ۶۱ اُم جمع‌آوری شده است، نتیجه آنکه انجام یک مطالعه‌ی عمیق در مورد همبستگی بین ارزهای رمزنگاری‌شده، تجزیه‌وتحلیل را برای هدایت خواندن به این چارچوب مرتبط با پیش‌بینی برای یک سناریوی پیچیده‌ی مالی تقویت می‌کند.[۳۰] دودک[۵۶] و همکاران (۲۰۲۴)، در نوشتار خود، ۱۲ روش پیش‌بینی نوسان‌های ارزهای دیجیتال را به شکل جامع مطالعه کرده و دریافته‌اند که بهترین روش واحد برای پیش‌بینی یک ارز دیجیتال وجود ندارد و مدل‌های مختلف بسته به ارز دیجیتال خاص، انتخاب متریک خطا، و افق پیش‌بینی، عملکرد بهتری دارند؛ ولی مدل‌های خطی ساده نیز می‌توانند به‌خوبی مدل‌های پیچیده عمل کنند.[۳۱]

با توجه به خلاصه‌ی ارائه‌شده‌ی پژوهش‌های مروری توسط نویسندگان پژوهش حاضر، روند کلی مدل‌سازی و شاخص‌های موردنیاز در پژوهش حاضر شناسایی شده است، که موارد مذکور در بخش‌های بعدی مطرح شده‌اند.

۴. روش‌شناسی پژوهش

فرآیند کلی اجرای پژوهش در شکل ۲، جهت درک بهتر مسیر، مشاهده می‌شود.

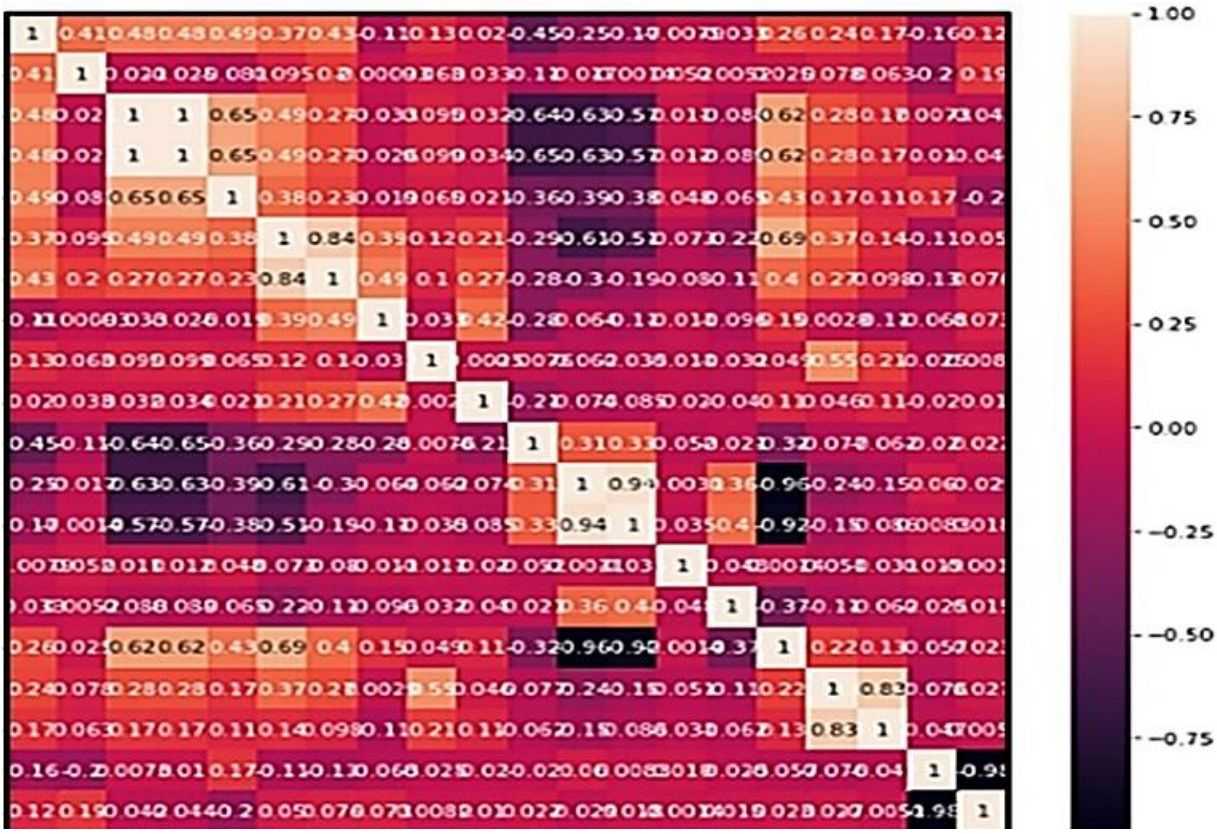
در مرحله‌ی جمع‌آوری داده‌ها به‌عنوان اولین گام اجرایی، داده‌های مربوط به ۱۸ نسبت مالی شرکت‌های فعال در بازار بورس اوراق بهادار تهران تهیه شده است؛ که از میان آن‌ها، ۹ نسبت از مرور ادبیات پژوهش استخراج شده است. این تذکر لازم است که از میان تمامی نسبت‌های مالی شناسایی‌شده در مرور ادبیات، با توجه به عدم امکان استخراج داده و عدم امکان محاسبه‌ی نسبت‌ها برای تعداد بالای شرکت‌های موردنظر در بازه‌ی زمانی انجام پژوهش (بدون بهره‌گیری از نرم‌افزارهای بانک استخراج داده)، ۹ نسبت مالی نهایی مذکور گزینش شده‌اند، و ۹ نسبت دیگر نیز به جهت برخورداری پژوهش حاضر از نوآوری لازم نسبت به پژوهش‌های پیشین، در پژوهش حاضر در نظر گرفته شده‌اند. نسبت‌های مذکور در حقیقت نسبت‌هایی هستند که همواره در منابع آموزشی علمی مرورشده توسط پژوهشگران، به چشم می‌خورند. تعداد



شکل ۲. نمودار فرآیند اجرای پژوهش.

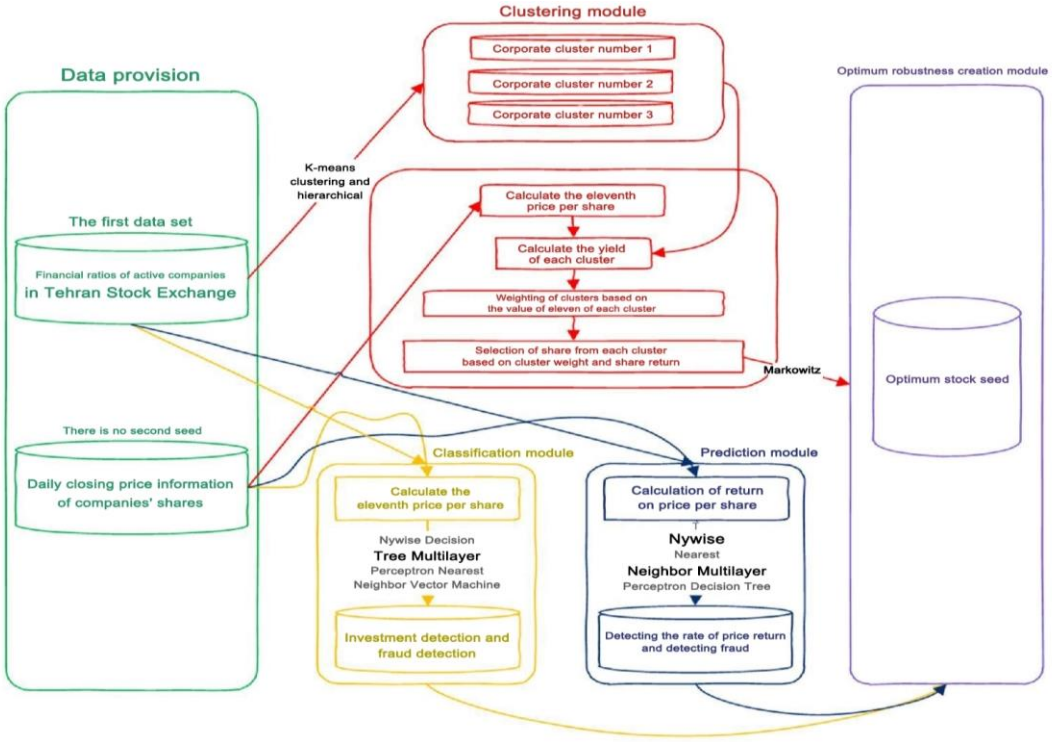
53 Majumdar, & Laha
54 Goodell
55 Ciano
56 Dudek

شرکت‌های موردنظر پژوهش حاضر نیز با توجه به اینکه ۸۹۲ نماد فعال در قالب ۵۵۸ شرکت در بازار بورس تهران موجود است، با استفاده از وبسایت "شرکت مدیریت فناوری بورس تهران ۴۱" اسامی ۸۹۲ نماد بازار بورس اوراق بهادار تهران در قالب "فهرست همه‌ی نمادهای بازار عادی" استخراج شده است، ضمن بهره‌گیری از جدول مورگان فریمن، تعداد نمونه‌ی موردنیاز، ۲۲۶/۴۴ شرکت محاسبه شده است، که با توجه به کمینه‌ی تعداد به‌دست‌آمده و پس از بررسی داده‌های خام در مرحله‌ی پیش‌پردازش، ۲۷۱ شرکت در پژوهش حاضر بررسی شده‌اند. با توجه به توضیحات اخیر، نسبت‌های موردنظر پژوهش حاضر به این شرح هستند: سود انباشته به دارایی‌ها، سود قبل از بهره و مالیات به دارایی، گردش دارایی‌ها،[۱۹] بازده دارایی‌ها،[۴ و ۲۶-۲۷] بدهی به حقوق صاحبان سهام،[۱۶] حاشیه‌ی سود خالص و نسبت بدهی،[۲۶] گردش دارایی‌های ثابت و نسبت جاری،[۲۷] و سایر نسبت‌های مالی مطرح، شامل: حاشیه‌ی سود عملیاتی، حاشیه‌ی سود قبل از مالیات، گردش حساب‌های دریافتی، دوره‌ی وصول مطالبات، جمع بدهی‌ها به جمع دارایی‌ها، نسبت بدهی‌های بلندمدت، نسبت نقدینگی، نسبت جریان نقد سرمایه‌گذاری به درآمد، نسبت جریان نقد تأمین مالی به درآمد؛ نسبت‌های مالی مذکور از طریق نرم‌افزار "بورس ویو[۵۷]" در سال مالی ۱۳۹۹ استخراج شده‌اند، که درخصوص این دسته داده‌ها، داده‌ی استخراجی شامل ۱۸ نسبت مالی در ستون و ۲۷۱ عنوان شرکت در سطر بوده است. به‌منظور جمع‌آوری داده‌ها، ابتدا اطلاعات ۴۹۹ شرکت با سال مالی منتهی به برج‌های متفاوت استخراج شده‌اند. سپس نسبت‌های موجود برای ۳۰۶ شرکت با سال مالی منتهی به برج ۱۲ سال ۱۳۹۹ و شامل ۳۷ عنوان نسبت مالی گردآوری شده‌اند. درنهایت، با توجه به فقدان اطلاعات کامل برای شرکت‌ها و یا نسبت‌های مالی، داده‌هایی شامل ۲۷۶ شرکت و ۱۸ نسبت مالی فراهم شده‌اند، که پس از گردآوری دسته‌ی دوم داده‌ها نیز ۵ شرکت حذف و درنهایت اطلاعات ۲۷۱ شرکت باقی مانده است. دسته‌ی دوم داده‌ها مربوط به داده‌های قیمت پایانی روزانه‌ی سهام شرکت‌های فعال در بازار بورس اوراق بهادار تهران بوده است، که از طریق وبسایت "مرکز پردازش اطلاعات مالی ایران[۴۳]"، در بازه‌ی زمانی فروردین ۱۳۹۹ تا فروردین ۱۴۰۰ استخراج شده‌اند. درخصوص دسته‌ی اخیر، داده‌ی نهایی شامل ۲۷۱ عنوان شرکت به همراه قیمت پایانی در هر روز، قیمت روز قبل و تاریخ بوده است. درنهایت، با استفاده از قیمت پایانی روزانه و قیمت روز قبل هر سهم، بازده قیمت روزانه‌ی سهام شرکت‌ها و درنهایت میانگین بازده قیمت سالانه‌ی شرکت‌ها براساس مبانی نظری مذکور محاسبه شده است. دلیل انتخاب سال مالی ۱۳۹۹ برای هر دو دسته داده، وجود بیشینه‌ی اطلاعات لازم نسبت به سال‌های دیگر مالی شرکت‌ها بوده است. حال اولین گام پس از تهیه‌ی داده، شناسایی و اصلاح داده‌های پرت و یا از دست‌رفته یا ناموجود به وسیله‌ی توابع گوناگون است، که درخصوص داده‌های پژوهش حاضر، با توجه به حساسیت اعداد (نسبت‌های مالی) و عدم امکان حذف یا درج اعداد جایگزین با داده‌های خالی توسط تحلیلگر، تصمیم بر آن شد تا شرکت‌هایی که برای برخی نسبت‌های مالی خارج از داده هستند و یا نسبت‌هایی که برای عمده‌ی شرکت‌ها مقداری ناموجود دارند، از مجموعه‌ی داده‌های اولیه حذف شوند. گام بعدی، بررسی همبستگی بین معیارها، شاخص‌ها، و متغیرها بوده است، که در ماتریس خروجی شکل ۳، قطر اصلی نشانگر همبستگی یک شاخص با خود و برابر با ۱، و سایر سلول‌ها نیز هر چقدر رنگ روشن‌تری به خود اختصاص داده باشند، همبستگی بیشتری با شاخص متناظر در سلول خود دارند. همبستگی نامتعارف فقط برای دو شاخص (حاشیه‌ی سود قبل از مالیات) و (حاشیه‌ی سود خالص)



شکل ۳. ماتریس همبستگی بین شاخص‌ها.

[57] bourseview.com



شکل ۴. نمودار روش‌شناسی پژوهش.

مشاهده شده است، که با توجه به تعاریف متفاوت دو شاخص مذکور، می‌توان این همبستگی را نادیده گرفت و فقط شباهت عددی موجب این همبستگی شده است.

در گام بعد، نسبت به بی‌مقیاس‌سازی داده‌ها اقدام شده است. هدف بی‌مقیاس‌سازی در حقیقت یکسان‌سازی داده‌ها به شکلی است که بتوان تمامی داده‌ها را یکجا و با یک دید تفسیری مطالعه کرد؛ که این مهم از دو طریق در پژوهش حاضر انجام شده است (نرمال‌سازی و استانداردسازی)، که استانداردسازی روش بهتری نسبت به نرمال‌سازی برای داده‌های موردنظر پژوهش حاضر، شناسایی و صورت پذیرفته است.

در شکل ۴، الگوریتم‌ها و مراحل کلی پژوهش مشاهده می‌شوند.

۵. پیاده‌سازی و اجرا

۱.۵. خوشه‌بندی شرکت‌ها

در اولین گام از ارائه‌ی مدل‌ها، شرکت‌های فعال در بازار سهام موردنظر پژوهش حاضر براساس نسبت‌های مالی برگزیده‌ی مذکور در بخش چهار، خوشه‌بندی شده‌اند، تا شرکت‌هایی با رفتار مالی گوناگون تفکیک شوند. سپس ضمن محاسبه‌ی بازده و وزن کسب‌شده‌ی هر خوشه براساس بازده، از هر خوشه، تعدادی سهام با بازده بیشتر استخراج شده است.

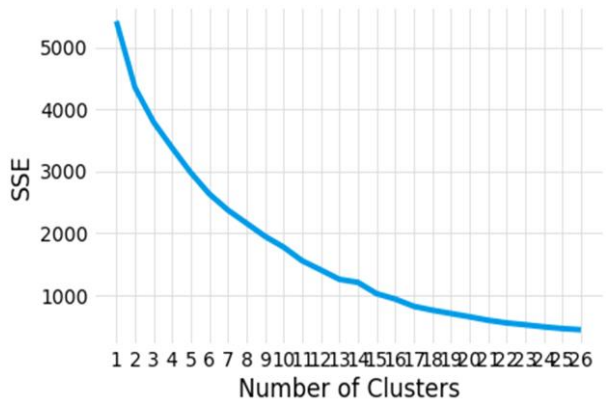
خروجی خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی نشان می‌دهد که شرکت‌های فعال در بازار سهام را می‌توان براساس رفتار مالی آن‌ها، براساس شاخص‌های موردنظر پژوهش حاضر، به ۲ خوشه تقسیم‌بندی کرد. نکته‌ی حائز اهمیت آن است که در روش خوشه‌بندی مذکور، تعداد خروجی لزوماً تعداد بهینه‌ی اصلی نیست و فقط یک تحلیل بر هر نوع داده صورت گرفته است. از سوی دیگر، به‌منظور تشخیص تعداد خوشه‌ها در الگوریتم کامینز از طریق روش آرنج، با توجه به آنکه ۲۷۰ شرکت، موردنظر پژوهش حاضر بوده‌اند، فرض اولیه بر آن شد که بیشینه‌ی ۲۷ خوشه‌ی نهایی به‌منظور خوشه‌بندی شرکت‌ها در نظر گرفته شود؛ بدیهی است که این رقم، خارج از تصور به‌منظور خوشه‌بندی شرکت‌های فعال در بازار بورس اوراق بهادار تهران بوده است. در روش پیشنهادی الگوریتم از ۱ خوشه تا ۲۷ خوشه، داده‌ها براساس روش خوشه‌بندی کامینز خوشه‌بندی و سپس مقدار خطای «مجموع مربعات خطا» برای هر بار فرآیند اجرای الگوریتم محاسبه شده است؛ که نمودار خروجی آن در شکل ۵ (SSE)[58] مشاهده می‌شود.

مطابق شکل ۶، محور افقی بیانگر تعداد خوشه‌ها و محور عمودی بیانگر مقدار خطاست، که با کمی دقت برداشت خواهد شد که پس از ۱۰ یا ۱۱ خوشه، مقدار خطا تغییر خاصی نکرده است؛ در نتیجه مقدار k در روش ذکرشده برابر با ۱۰ یا ۱۱ است. لذا، به جهت افزایش اعتبار تحلیل، مقدار تشخیصی داده توسط نرم‌افزار نیز با دو مقدار ۱۰ و ۱۱ تعیین شده است، که این مقادیر در تکرارهای گوناگون به‌دست آمده است. همچنین به‌منظور تشخیص تعداد خوشه‌ها در روش پیشنهادی از طریق روش ضریب نیم‌رخ، همانند روش آرنج، ۲۷ مرتبه خوشه‌بندی انجام و هر بار مقدار ضریب نیم‌رخ ثبت شده است. مقدار این ضریب بین ۱- تا ۱+ متغیر بوده است، که این مقدار هر چقدر به ۱ نزدیک‌تر باشد، خوشه‌بندی بهتری صورت پذیرفته است.

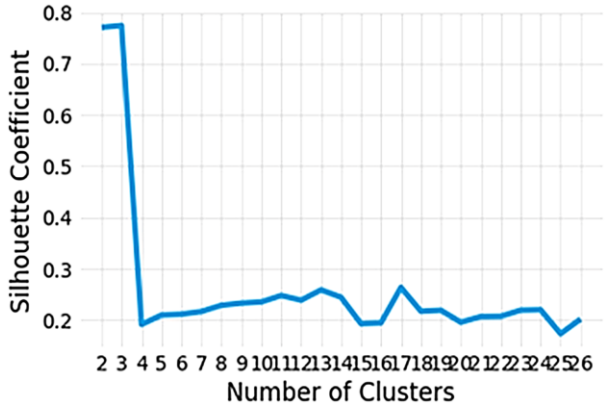
مطابق نمودار اخیر، محور افقی بیانگر تعداد خوشه‌ها و محور عمودی بیانگر مقدار ضریب نیم‌رخ است و با توجه به آنچه گفته شد، ضریب نیم‌رخ به ازاء مقادیر نزدیک‌تر به ۱ نشان می‌دهد که تعداد خوشه‌ی بهینه برای داده‌ی موردنظر مساوی ۳ است. این تذکر لازم است که مقدار ضریب نیم‌رخ به‌دست‌آمده به ازاء ۲ و ۳ خوشه در تکرار این روش، بسیار نزدیک به هم بوده و هر دو عدد مذکور می‌توانند تعداد خوشه‌ی مناسب در روش کامینز باشند. بنابراین، چهار مقدار ۲، ۳، ۱۰، و ۱۱ برای تعیین تعداد کامینز به‌عنوان K

[58] Sum of Squares due to Error

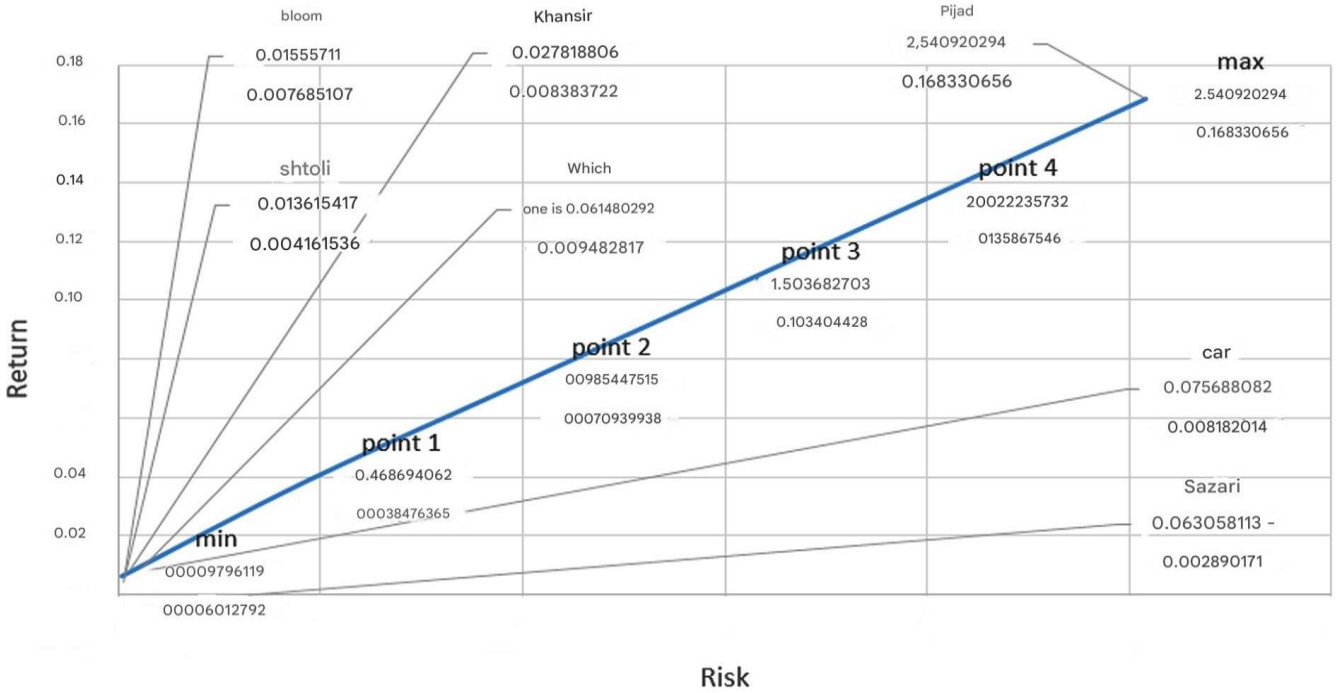
اولیه‌ی موردنیاز، شناسایی شد. مهم آنکه عدم حذف داده‌های پرت در داده‌های موردتحلیل پژوهش حاضر در گام پیش‌پردازش به‌دلیل مذکور (عدم امکان حذف و یا ایجاد داده‌های جدید تصادفی برای نسبت‌های مالی)، منجر به ایجاد رقمی بزرگ (۱۰ و ۱۱) در روش آرنج شده است. با توجه به تعداد خوشه‌های معقول موردانتظار برای شرکت‌های فعال در بورس و همچنین محدودیت در پیش‌پردازش کامل داده‌ها، به‌نظر می‌رسد از میان اعداد مذکور، ۲ یا ۳ خوشه، عدد مناسبی برای خوشه‌بندی باشد. به‌منظور سنجش الگوریتم ضریب نیم‌رخ، پیاده‌سازی و خوشه‌بندی با روش کامینز مجدداً به صورت دستی انجام شده است. همچنین خروجی براساس ضریب نیم‌رخ ثبت شده است، که نتایج نشان می‌دهند خوشه‌بندی به ازاء ۳ خوشه و ۱۰۰ مرتبه تکرار، نتیجه‌ی بهتری را در مقایسه با تعداد خوشه‌های ذکرشده‌ی دیگر ارائه داده است؛در نتیجه راستی‌آزمایی نمودار SSE تأیید می‌شود. با توجه به خروجی بخش حاضر، سهام مربوط به هر خوشه در نرم‌افزار اکسل مشخص شده است. در گام بعد، وزن هر سهم در هر خوشه با توجه به مباحث نظری اشاره‌شده در این خصوص، با توجه به وزن‌های کسب‌شده‌ی خوشه‌ها و میانگین بازده قیمت سالانه‌ی سهام شرکت‌ها، ۷ سهم شامل: پیزد، کدما، خودرو، خنصیر، ساذری، شکف، و شتولی انتخاب شده‌اند. در آخرین مرحله از این گام، در نرم‌افزار اکسل، ضمن بهره‌گیری از روش مارکویتز، ۶ سبد سرمایه با درنظرگرفتن مقادیر ریسک و بازده گوناگون بین دو نقطه با بیشینه و کمینه‌ی بازده تشکیل شد، که از بیان جزئیات گام کنونی و فرمول‌های تدوین‌شده در نرم‌افزار اکسل به جهت جلوگیری از نشر مطالب تکراری خودداری شده است. بدیهی است با تغییر مقدار گام‌ها بین دو نقطه‌ی کمینه و بیشینه، می‌توان تعداد نقطه‌ی بیشتری را به‌عنوان سبدهای سرمایه با مقادیر بازده و ریسک گوناگون تشکیل داد. در پژوهش حاضر، گام‌ها به نحوی تعیین شده‌اند تا ۴ نقطه‌ی میانی ایجاد شود. در شکل ۷، نمودار مقادیر مربوط به ریسک و بازده هر سبد و هر سهم مشخص شده است؛ به‌گونه‌ای که در آن خط آبی‌رنگ، نشان‌دهنده‌ی مقادیر مربوط به ریسک و بازده ۶ سبد مذکور است و نقاط مربوط به ریسک و بازده هر سهم نیز به‌صورت جداگانه مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، از بین سهام شرکت‌های منتخب، هرگاه تصمیم به خرید تک‌سهمی در مقایسه با ریسک و بازده سبد تشکیل شده باشد، سهام شرکت‌های پیزد و با اختلاف زیاد کدما، نسبت به سهام سایر شرکت‌ها ارجحیت بیشتری داشته‌اند، بنابراین در سبد نیز ارزش بیشتری داشته‌اند.



شکل ۵. نمودار SSE.



شکل ۶. نمودار ضریب نیم‌رخ.



شکل ۷. نمودار سبدهای گوناگون به ازاء ریسک و بازده موردانتظار متفاوت + ریسک و بازده هر سهم.

۲.۵. ماژول طبقه‌بندی

در این گام از پژوهش، ماژولی ارائه شده است که ارتباط میان نسبت‌های مالی و مقدار میانگین بازده قیمت سالانه‌ی یک شرکت را شناسایی و در صورت اجرای مدل، به سرمایه‌گذار در جهت تصمیم‌گیری به جهت خرید یا عدم خرید به‌عنوان یکی از عوامل مدیریت سبد خرید، کمک شایانی می‌کند. همچنین مدل ذکرشده در تشخیص تقلب شرکت‌ها نیز مؤثر خواهد بود. به‌منظور آنکه نرم‌افزار قادر باشد هر ردیف داده را به گروه مناسب یا نامناسب نسبت دهد، نیاز به ستون جدیدی با عنوان ستون هدف است، لذا لازم است که سرمایه‌گذار تصمیم‌گیری کند که میزان بازده قیمت موردانتظار چقدر باشد تا سهمی مناسب سرمایه‌گذاری شود؛ به همین علت باید بررسی شود حد میانی بازده قیمت سهام در داده‌های موجود چقدر است تا ستون هدفی با مقادیر برابر به ازاء دو برچسب، موجود باشد. این مقدار ممکن است نزدیک به بازده موردانتظار سرمایه‌گذار باشد و یا به‌دلیل کمبود اطلاعات در پایگاه‌های داده، همچون پژوهش حاضر، مقداری کمتر از مقدار موردانتظار عموم سرمایه‌گذاران داشته باشد. به این منظور، جدول ۱، با هدف مکان‌یابی نقطه‌ی میانه‌ی بازده سهام تشکیل شده است.

جدول اخیر نشان می‌دهد که مقدار بازده ۰/۳٪، مقداری است که به ازاء آن، ۱۳۴ سهم بازدهی بیشتر از مقدار نقطه‌ی میانه و ۱۳۷ سهم بازدهی کمتر از آن داشته‌اند؛ بنابراین شرکت‌هایی که بازده بیشتر دارند، برچسب ۱ و شرکت‌هایی که بازده کمتر دارند، برچسب ۰ دریافت کرده‌اند. مهم آنکه با درنظرگرفتن بازده ۰/۳٪، مقادیر ستون هدف مقداری متوازن خواهند داشت و بنابراین به‌علت حساسیت داده‌های نسبت‌ها، نیازی به شبیه‌سازی داده‌ها به‌منظور ایجاد داده‌ای متوازن نخواهد بود. در مرحله‌ی بعد، داده‌ها با روش استانداردسازی (SS)[۵۹]، بی‌مقیاس شده‌اند؛ اگرچه در ادامه در پرسپترون چندلایه، نیاز به بی‌مقیاس‌سازی با روش نرمال‌سازی (MMS)[۶۰] است، که جداگانه صورت پذیرفته است. حال باید آخرین مرحله‌ی قبل از پیاده‌سازی الگوریتم‌های طبقه‌بندی با عنوان تقسیم به داده‌های آموزش و آزمون صورت پذیرد؛ به این منظور ۳۰٪ داده‌ها به‌صورت تصادفی و توسط نرم‌افزار به‌عنوان داده‌ی آزمون و مابقی به عنوان داده‌ی آموزش در نظر گرفته شده‌اند. در مرحله‌ی بعد نیز به مدل‌سازی پرداخته شده است، که نتایج آن در ادامه ارائه شده است. مهم آنکه محاسبه‌ی میزان امتیاز مدل در تمامی الگوریتم‌ها ضمن بهره‌گیری از ماژول کراس[۶۱] و همچنین مقدار ضریب خطای معیار ماتریس آشفتگی، که پیشتر در مبانی نظری تشریح شده است، صورت پذیرفته و با توجه به حجم مطالب، مطالعه درخصوص نحوه‌ی تنظیم معیارهای برنامه‌نویسی به مخاطب واگذار و نوشتار واندرپلاس[۶۲] (۲۰۱۶)،[۹] برای مطالعه پیشنهاد شده است.

جدول ۱. مکان‌یابی نقطه‌ی میانه‌ی بازده سهام به ازاء مقادیر مختلف بازده.

Not ok	ok	Rate of Return
266	5	>0.05
265	6	>0.01
222	49	>0.005
182	89	>0.004
137	134	>0.003
92	176	>0.002

در مرحله‌ی اول، طبقه‌بندی با الگوریتم درخت تصمیم با معیار آنتروپی[۶۳] صورت پذیرفته است، که در این مرحله پس از بررسی ۳۰ خروجی، امتیاز مدل برابر با ۰/۶ بوده است. در مرحله‌ی دوم، طبقه‌بندی با الگوریتم درخت تصمیم با معیار جینی[۶۴] انجام شده است، که امتیاز مدل ساخته‌شده توسط درخت تصمیم در این مرحله نیز پس از بررسی ۳۰ خروجی برابر با ۰/۵۴ بوده است. در مرحله‌ی سوم، طبقه‌بندی با الگوریتم گوسین نایو بیز صورت پذیرفته است، که در آن هم از روش cross با ۳۰ مرتبه تکرار با امتیاز خروجی برابر با ۰/۵ و در مرحله‌ی بعدی، طبقه‌بندی با الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه، متغیری با عنوان «وزن‌ها[۶۵]» وجود دارد، که در پژوهش حاضر دو مقدار «یکنواخت[۶۶]» در مرحله‌ی چهارم و «فاصله[۶۷]» در مرحله‌ی پنجم برای پارامتر ذکرشده در نظر گرفته شده است. الگوریتم با دریافت مقدار یکنواخت، برای تمامی نقاط در یک محل وزن برابری را در نظر می‌گیرد و با دریافت مقدار فاصله، برای همسایگان نزدیک‌تر، مقدار وزن بیشتری در مقایسه با همسایگان دورتر در نظر خواهد گرفت.[۲۸] خروجی در مراحل چهارم و پنجم پس از ۳۰ بار تکرار مدل برابر با ۰/۶۷ و ۰/۶۵ بوده است، که مقادیر اخیر برتری مقدار فاصله را بر مقدار یکنواخت نشان می‌دهند. در مرحله‌ی بعد، در الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، متغیری با عنوان «کرنل[۶۸]» به منظور چندمنظوره‌سازی الگوریتم وجود دارد؛ که امکان ایجاد هسته‌های سفارشی را علاوه‌بر هسته‌های مشترک فراهم می‌کند و به سه شکل (خطی[۶۹]، غیرخطی[۷۰]، چندجمله‌ای[۷۱]) قابل تنظیم است.[۲۸] در پژوهش حاضر، هر سه نوع هسته‌های مشترک در مرحله‌های ۶ الی ۸ در نظر گرفته شده است، تا فقط بهترین نوع هسته به تشخیص نرم‌افزار براساس میزان دقت خروجی محاسبه شود. بدیهی است مخاطب پژوهش حاضر قادر خواهد بود از تنظیم متغیرها به شکل دقیق‌تر در هر کدام از الگوریتم‌ها به جهت دریافت خروجی بهتر استفاده کند. مهم آنکه تعداد تکرار الگوریتم cross باید بررسی شود و براساس مقدار خروجی، بهترین تعداد تکرار تشخیص داده شود. درنهایت، بهترین خروجی حاصل پس از ۱۰ بار تکرار براساس هسته‌ی خطی برابر با ۰/۶۷ بوده است. به‌منظور مدل‌سازی پرسپترون چندلایه، دو متغیر «فعال‌سازی[۷۲]» و «حل‌کننده[۷۳]» به‌منظور تغییر از حالت پیش‌فرض قابل بررسی هستند. متغیر فعال‌سازی با مقدار identity[۷۴] هم علاوه‌بر مقدار

[59] Standard Scaler
[60] Min Max Scaler
[61] cross
[62] VanderPlas
[63] entropy
[64] gini
[65] weights
[66] uniform
[67] distance
[68] kernel
[69] Linear
[70] rbf
[71] poly
[72] Activation
[73] Solver
[۷۴] فعال‌سازی بدون عملیات، مفید برای پیاده‌سازی گلوگاه خطی، $f(x) = x$ را بر می‌گرداند.

پیش‌فرض که عبارت است از relu[۷۵] به ترتیب در مراحل دهم و نهم و متغیر حل‌کننده با مقدار lbfgs[۷۶] جایگزین با مقدار اصلی بررسی شده‌اند. متغیر «max_iter» هم تعداد تکرار شبکه را مشخص می‌کند، که می‌توان شبکه را تا ۱۵۰۰۰ بار تکرار کند. همچنین عملکرد الگوریتم اخیر با روش بی‌مقیاس‌سازی به روش استانداردسازی در مقایسه با روش بی‌مقیاس‌سازی به روش نرمال‌سازی در یازدهمین مرحله‌ی مدل‌سازی بررسی شده است؛ ولی همان‌طور که موردانتظار بود، در روش استانداردسازی، خروجی بهتری نسبت به روش نرمال‌سازی اتخاذ شده است.

درنهایت، مقایسه‌ی نتایج امتیاز خروجی مدل‌های اخیر نشان می‌دهد که الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در مرحله‌ی ششم، با اختلاف قابل‌توجهی نسبت به سایر الگوریتم‌ها توانسته است مقادیر ستون هدف را از منظر طبقه‌بندی پیش‌بینی کند. لازم به یادآوری است که هرگاه در هر کدام از الگوریتم‌های بررسی‌شده، تنظیم متغیر دقیق‌تری صورت پذیرد، مدل ساخته‌شده، میزان دقت بیشتری خواهد داشت.

۳.۵. ماژول پیش‌بینی

در پژوهش حاضر، به فراخور مسئله و هدف اصلی پژوهش (ماژول تشخیص میزان بازده قیمت و شناسایی تقلب)، به بررسی الگوریتم‌های پیش‌بینی مذکور پرداخته شده است. همچنین درنهایت، برترین الگوریتم در این زمینه با توجه به معیارهای سنجش مدل‌های پیش‌بینی انتخاب شده است. در مرحله‌ی اول، پیش‌بینی با الگوریتم درخت تصمیم صورت پذیرفته است، که در جدول ۲، مقادیر ارزیابی مدل به ازاء دفعات تکرار ۵، ۱۰، و ۱۵ مرتبه برای دو الگوریتم درخت تصمیم با داده‌های بی‌مقیاس‌شده به دو روش استانداردسازی (dfSS)[۷۷] و نرمال‌سازی (dfMMS)[۷۸] مشاهده می‌شود. استفاده از داده‌های نرمال، فقط جهت اطلاع مخاطب در نظر گرفته شده است و با توجه به دلیل مذکور در بخش‌های قبل، در پژوهش حاضر توجیح علمی ندارد. درنهایت مشاهده شده است که با اختلاف بسیار کمی، خروجی اخذشده با هر دو نوع داده، تقریباً یکسان بوده است.

در مورد الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه، مشابه با الگوریتم قبلی، مقادیر اخذشده از خروجی دو مدل ساخته‌شده با داده‌ی بی‌مقیاس‌شده به روش استانداردسازی در جدول ۳ ارائه شده است. مقایسه نشان می‌دهد که مدل ساخته‌شده با عنوان KNR ۱ نسبت به مدل با عنوان KNR ۲ برتری دارد.

در مورد الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، از آنجا که الگوریتم حاضر با سه نوع هسته‌ی سفارشی قادر به تحلیل داده است، سه مدل با هسته‌ی خطی، چندجمله‌ای، و غیرخطی همچون الگوریتم طبقه‌بندی به ترتیب ایجاد و هر مدل با معیارهای خطای الگوریتم‌های پیش‌بینی اخیر سنجیده شده است. مقایسه‌ی خروجی مقادیر مختلف خطا در جدول ۴ ارائه شده است، که سومین مدل یا مدل با هسته‌ی سفارشی غیرخطی، بهترین نتیجه را از بین سه مدل ساخته‌شده ارائه داده است. درخصوص الگوریتم پرسپترون چندلایه نیز نتایج در جدول ۵ ارائه شده است.

درنهایت، در آخرین گام از ایجاد مدل‌های پیش‌بینی، برترین مدل‌های هر الگوریتم با یکدیگر مقایسه شده‌اند، تا بهترین مدل پیش‌بینی تشخیص داده

جدول ۲. مقایسه‌ی مقادیر خطا با دو روش بی‌مقیاس‌سازی با الگوریتم پیش‌بینی درخت تصمیم.

	x	index	cv=5	cv=10	cv=15
DTR1	dfSS	MSE	-0.14	-0.14	-
		MAE	-0.03	-0.06	-
		RMSE	-0.22	-0.16	-0.13
		r2	-193	-244	-
DTR2	dfMMS	MSE	-0.14	-0.14	-
		MAE	-0.06	-0.08	-
		RMSE	-0.2	-0.16	-0.13
		r2	-193	-200	-

جدول ۳. مدل برتر با توجه به هر معیار ارزیابی.

	x	index	cv=5	cv=10	cv=15	result
KNR1	dfSS	MSE	-0.1585	-0.154	-0.154	7
		MAE	-0.0522	-0.0486	-0.0484	5
		RMSE	-0.2999	-0.2201	0.1808	5
		r2	-2866	-2576	-2517	5
KNR2	dfSS	MSE	-0.1602	-0.1548	-0.1547	8
		MAE	-0.053	-0.049	-0.048	5
		RMSE	-0.3063	-0.2219	-0.1824	5
		r2	-3289	-2871	-2753	5

جدول ۴. مقایسه‌ی مقادیر خطای مدل‌های ایجادشده با الگوریتم پیش‌بینی ماشین بردار پشتیبان.

	x	index	cv=5	cv=10	cv=15
SVR1	dfSS	MSE	-0.1494	-0.1476	-0.1475
		MAE	-0.0923	-0.094	_
		RMSE	-0.2604	-0.2091	-0.1858
		r2	-643	-1473	_
SVR2	dfSS	MSE	-0.1607	-0.1599	-0.1567
		MAE	-0.1121	-0.1178	_
		RMSE	-0.2854	-0.2338	-0.2093
		r2	-689	-1925	_
SVR3	dfSS	MSE	-0.1469	-0.1463	-0.146
		MAE	-0.089	-0.086	-0.0851
		RMSE	-0.2381	-0.1906	-0.1679
		r2	-377	-675	_

[۷۵] تابع واحد خطی اصلاح شده $f(x)=\max(0, x)$ را بر می‌گرداند.

[۷۶] یک بهینه‌ساز در خانواده روش های شبه نیوتنی است.

[77] df Standard Scaler

[78] df Minmax Scale

جدول ۵. مقادیر مختلف خطا به ازاء دفعات مختلف تکرار الگوریتم پیش‌بینی پرسپترون چندلایه.

	x	index	cv=5	cv=10	cv=15
MLP	dfSS	MSE	-5.92	-7.82	_
		MAE	-0.63	-0.6736	_
		RMSE	-2.35	-1.92	-1.61
		r2	-515784	-888587	_

جدول ۶. جدول خلاصه‌ی مقایسه‌ی خروجی مدل‌های پیش‌بینی.

	DTR1	KNR1	SVR3	MLP	The best model
MSE	-0.14	-0.154	-0.146	-5.92	DTR1
MAE	-0.03	-0.0484	-0.851	-0.63	DTR1
RMSE	-0.13	0.1808	-0.1679	-1.61	DTR1
r2	-193	-2517	-377	-515784	DTR1

شود. مقایسه‌ی نتایج خروجی مدل‌های اخیر مطابق جدول ۶ نشان می‌دهد که الگوریتم درخت‌تصمیم توانسته است با کمینه‌ی مقادیر خطا، بهترین مدل را از میان سایر الگوریتم‌ها ارائه دهد. مهم آنکه مقدار خطای الگوریتم درخت تصمیم جزء کمینه‌ی مقادیر ممکن خطا یا مقداری بسیار نزدیک به صفر برای سه معیار اول و مقداری بسیار نزدیک‌تر به ۱ در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها برای معیار آخر بوده است.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در پژوهش حاضر، ابتدا پس از مرور منابعی در زمینه‌ی کاربرد علم داده در حل مسائل مالی، جایگاه علم داده در حل این‌گونه مسائل تبیین شده است. خروجی بخش کنونی، رهنمودی در جهت تشخیص موضوع اصلی پژوهش حاضر ایجاد کرده است. این موضوع به نحوی شناسایی شده است که یکی از نیازهای مهم تحلیلگران مالی در سطوح مختلف اعم از دانشجویان این رشته و همچنین افراد متخصص با بهره‌گیری از شیوه‌های علم داده در قالب سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری در مدیریت سبد سهام مرتفع شود. از این رو، ۶ سبد سهام با ترکیب ۷ سهم منتخب با درنظرگرفتن مقادیر مختلف بازده و ریسک ضمن ترکیب "ماژول خوشه‌بندی" مذکور و مدل مارکویتز ایجاد شده است؛ در این مسیر، تعداد زیادی از شرکت‌های فعال در نظر گرفته‌شده در بازار بورس اوراق بهادار تهران در کمترین زمان ممکن از نظر رفتار بنیادین تحلیل و در خوشه‌های مجزا تفکیک شده‌اند. از سویی دیگر، وزن خوشه‌ها با توجه به بازده قیمت سالانه‌ی هر خوشه محاسبه شده است. سپس از هر خوشه متناسب با اوزان کسب‌شده، سهمی برگزیده شده است که از نظر بازده قیمت سالانه، وزن بیشتری نسبت به سایر سهام شرکت‌ها داشته است. بنابراین دو مزیت نوین با ارائه‌ی روش ساخته‌شده ایجاد شده است، که عبارت‌اند از: ۱) ایجاد خوشه‌های تفکیکی که منجر به ایجاد خوشه‌هایی متشکل از سهام شرکت‌ها با رفتار یکسان از منظر شاخص‌های مالی در هر خوشه شده است؛ که بدیهی است تحلیل رفتار مذکور با توجه به تعدد شرکت‌ها برای یک تحلیلگر با روش‌های مرسوم قبلی بسیار پیچیده و زمان‌بر است. از سویی دیگر، تعداد شرکت‌های در نظر گرفته‌شده در پژوهش حاضر، تحلیل دقیق‌تری را نسبت به پژوهش‌های پیشین ایجاد کرده است. ۲) در مسیر خوشه‌بندی، سهم یک شرکت فقط براساس میزان بازده انتخاب نشده و تنوع رفتاری شرکت‌ها نیز در مسیر انتخاب سهام به منظور تشکیل سبد در نظر گرفته شده است؛ که این مهم، تنوع لازم سهام در مدل مارکویتز را بهبود بخشیده است. در بخش ایجاد "ماژول طبقه‌بندی" نیز از میان ۱۱ مدل نهایی، برترین مدل با عنوان "مدل ماشین بردار پشتیبان خطی" براساس بهترین عملکرد معیار سنجش (خروجی ماتریس آشفتگی) با مقدار ۶۷٪ تطبیق با داده‌های واقعی یا با ۶۷٪ دقت پیش‌بینی شناسایی شده است. مدل ساخته‌شده قادر است با دریافت مقادیر شاخص‌های مالی یک شرکت در قالب نسبت‌های مالی، مقدار بازده قیمت سهام شرکت را به صورت «پذیرش شرط» یا «عدم پذیرش شرط»، که شرط همان مقدار موردانتظار بازده قیمت سرمایه‌گذار است، پیش‌بینی کند. مدل پیشنهادی در برخی گام‌های کشف تقلب به‌هنگام حسابرسی شرکت‌ها در قالب کلان مؤثر است؛ به‌صورتی که اگر عدم تطابق بین مقدار بازده قیمت سهم شرکتی با خروجی مدل مذکور مشاهده شود، با ۶۷٪ اطمینان می‌توان بیان کرد که در صورت‌های مالی شرکت موردنظر، تقلبی صورت پذیرفته است، که این مهم نیازمند حسابرسی جزئی‌تر صورت‌های مالی شرکت خواهد شد. درخصوص ایجاد "ماژول پیش‌بینی" نیز، از میان ۷ مدل نهایی، برترین مدل با عنوان «مدل پیش‌بینی درخت تصمیم» براساس کمترین میزان خطا از منظر ۴ معیار خطا شناسایی شده است. مدل ساخته‌شده قادر است با دریافت مقادیر نسبت‌های مالی یک شرکت، مقدار بازده قیمت سهام شرکت را پیش‌بینی کند، که این مهم نیز در شناسایی تقلب شرکت‌ها بسیار مؤثر خواهد بود و نسبت به مدل طبقه‌بندی ارائه‌شده، مقدار قابل تأمل‌تری را منعکس می‌کند. همچنین به هنگام تشکیل سبد سرمایه، سرمایه گذار قادر خواهد بود در کنار بررسی داده‌های نسبت‌های مالی یک شرکت، مقدار بازده قیمت را به سرعت و بدون نیاز به داده‌های تاریخی شاخص قیمت سهام پیش‌بینی کند؛ که در این مسیر، مشابه با نوشتار جیانسی (۲۰۰۷)،[۲۹] نتیجه‌گیری شد که استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای داده‌های عظیم، منجر به افزایش کارایی در مسیر طبقه‌بندی خواهد شد. همچنین مشابه با پژوهش ناندا و همکارانش (۲۰۱۰)،[۱۵] که قبلاً به آن پرداخته شده است، نتیجه‌گیری شد که انتخاب سهام از بین خوشه‌های تشکیل‌شده از سهام گوناگون شرکت‌ها، موجب کاهش ریسک متنوع‌سازی سبد سهام خواهد شد. از سویی دیگر، مشابه با پژوهش دودک و همکاران (۲۰۲۴)،[۳۱] نتیجه‌گیری شده است که هیچ‌گاه بهترین روش واحد برای پیش‌بینی نوسان‌ها وجود ندارد و همان‌طور که پیشتر نیز بیان شد، لازم است تنظیم معیارها متناسب با افق پیش‌بینی صورت پذیرد.

درنهایت، به‌عنوان هدف اصلی پژوهش، از ترکیب سه ماژول ارائه‌شده، روشی در قالب یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری در مدیریت سبد سهام برای تحلیلگران در سطوح مختلف علمی فراهم شده است. علاوه‌بر آنکه هر یک از سه گام طی‌شده، خود به تنهایی یک ماژول در مدیریت سبد سهام به شمار می‌روند، سیستم مذکور قادر خواهد بود به‌عنوان یک مدل جامع برای داده‌هایی در فواصل زمانی گوناگون و شاخص‌های موردنظر تحلیلگر، قابلیت تعمیم‌دهی داشته باشد و بدین صورت سرمایه‌گذاران را در مسیر تحلیلی سریع و با دقت کافی، یاری کند. عملکرد روش نهایی این‌گونه است که سرمایه‌گذار ابتدا تعدادی از شرکت‌های موردنظر خود را با توجه به شنیده‌ها، تحلیل‌ها، و اخبار انتخاب می‌کند؛ بعد با بهره‌گیری از مدل پیش‌بینی مذکور و داده‌های تاریخی نسبت‌های مالی، بازده قیمت شرکت‌ها را پیش‌بینی می‌کند. سپس با استفاده از مدل طبقه‌بندی مذکور، نسبت به حفظ یا حذف سهم شرکت‌ها با توجه به

طبقه‌ی پیش‌بینی‌شده، اقدام می‌کند و در آخرین مرحله، شرکت‌هایی که موفق به پذیرش شرط شده‌اند را با استفاده از مدل خوشه‌بندی، تفکیک می‌کند و سبد سهام متنوعی را با توجه به میزان ریسک و بازده موردانتظار خود تشکیل می‌دهد. مهم آنکه، همان‌طورکه گفته شد، مدل‌های طبقه‌بندی و پیش‌بینی ارائه‌شده در کنار کاربرد در تشکیل و مدیریت سبد سهام قادر خواهند بود در مبحث پیش‌بینی تقلب احتمالی شرکت‌ها نیز مؤثر واقع شوند. طی انجام پژوهش حاضر، محدودیت‌های نیز وجود داشت که عبارت‌اند از:

۱) به‌منظور بررسی پژوهش‌ها، محدودیت تاریخی در نظر گرفته نشده است؛ چرا که در صورت فیلترکردن تاریخ مطالعات، احتمال از دست‌رفتن پژوهش‌هایی با موضوعات خاص وجود دارد؛ ۲) مبانی نظری مالی در پژوهش حاضر با توجه به مخاطب هدف، فقط به‌صورت یادآوری مباحث پایه و یا تشریح کامل مباحث تخصصی بوده است؛ ۳) با توجه به فراوانی مباحث مبانی نظری در زمینه‌ی علم داده و داده کاوی، گزیده‌ای از مبانی به شکل کاربردی برای درک بهتر روند اجرای الگوریتم‌ها ارائه و مطالعه درخصوص مابقی مبانی به خواننده واگذار شده است؛ ۴) با توجه به نقص منابع داده و نبود برخی اطلاعات، فقط شرکت‌هایی در نظر گرفته شده‌اند که تمامی اطلاعات موردنیاز پژوهش جاری برای آن‌ها موجود بوده است؛ ۵) با توجه به گستردگی معیارهای موجود در هر الگوریتم، برخی از آن‌ها به‌منظور جلوگیری از تکرار مطالب در طول تدوین متن پژوهش، هم‌زمان با تشریح مراحل پیاده‌سازی به شکل مختصر تشریح شده‌اند. همچنین در ادامه، به‌منظور بهبود مدل‌های ساخته‌شده در پژوهش حاضر، گزینه‌هایی به پژوهشگران آتی پیشنهاد شده است تا در آینده به آن‌ها پرداخته شود: ۱) با بهره‌گیری از داده‌های سایر متغیرهای مالی (همچون سایر نسبت‌های مالی، و ...) با فرض موجودبودن اطلاعات موردنیاز، به بهبود کیفیت خوشه‌بندی شرکت‌های فعال در بازار سهام نسبت به پژوهش حاضر پرداخته شود. ۲) ضمن محاسبه‌ی بازده کل سهام شرکت‌های فعال در بازار سهام (جمع بازده قیمت و بازده نقدی)، نسبت به بهینه‌سازی کیفیت داده‌های اولیه‌ی ستون هدف در مسیر مدل‌سازی و در نتیجه بهبود خروجی مدل‌های طبقه‌بندی و پیش‌بینی ایجادشده در پژوهش حاضر اقدام شود. ۳) ضمن بهره‌گیری از دانش برنامه‌نویسی پایتون، به وسیله‌ی تنظیم دقیق‌تر پارامترها در هر الگوریتم، به بهینه‌سازی مسیر مدل‌سازی پرداخته شود. ۴) مدل‌های ایجادشده در بستر زبان برنامه‌نویسی، در قالب نرم‌افزارهایی که استفاده از آن برای کاربر ساده است، پیاده‌سازی و تصویرسازی شوند. ۵) در مسیر پیش‌پردازش داده‌های خام، داده‌های از دست‌رفته و یا پرت، شناسایی و نسبت به جایگزینی آن‌ها اقدام شود و نتایج با مسیر اصلی در پژوهش حاضر مقایسه شود. ۶) با استناد به پژوهش حاضر، مدلی مشابه متشکل از ماژول‌هایی پیشرفته‌تر در بستر بانک‌های اطلاعاتی آنلاین ایجاد شود تا پژوهشگران آتی قادر به استفاده‌ی سریع‌تر از ماژول‌ها باشند. ۷) ماژول‌های ساخته‌شده در پژوهش حاضر با داده‌های سایر کشورها استفاده شود، تا راستی‌آزمایی عملکرد ماژول‌ها در شرایط گوناگون مدیریتی سنجیده شود.

References - منابع

1. Pyle, D., 2003. *Business Modeling and Data Mining*. Elsevier Press, Netherlands. https://doi.org/10.1016/B978-1-55860-653-1.X5000-3.
2. Dean, J., 2014. *Big Data, Data Mining, and Machine Learning: Value Creation for Business Leaders and Practitioners*. John Wiley & Sons Press, United States. ISBN: 978-1-118-69178-6. https://www.nrigroupindia.com/e-book
3. Kunnathuvalappil Hariharan, N., 2018. Applications of data mining in finance. *J. of Innovations in Engineering Research and Technology*, *5*(2), pp.72-77. https://www.researchgate.net/publication/354224201_APP LICATIONS_OF_DATA_MINING_IN_FINANCE.
4. Zamani, M., Pakmaram, A., Rezaei, N. and Abdi, R., 2023. The role of information behavior in financial reporting (With an emphasis on information entropy theory). *J. of Nonlinear Analysis and Applications*, *15*(4), pp. 293-309. https://doi.org/10.22075/IJNAA.2022.28778.3985. [In Persian].
5. Abdullah, Z. and Hamdan, A., 2015. Hierarchical clustering algorithms in data mining. *J. of Computer and Information Engineering*, *9*(10), pp.2194-2199. https:doi.org/10.5281/zenodo.1109341
6. Nokart., 2021. *The Difference Between Data Science And Data Mining*. from Nokartohttps://nokarto.com/. [In Persian].
7. Fazel Zarandi, M. and Kazemi, A., 2008. Application of rough set theory in data mining for decision support systems (DSSs). *QIAU*, (1), pp. 25-34. https://civilica.com/doc/790867/ [In Persian].
8. Dastgir, Sh., 2019. Data mining technology, a new approach in the financial field. *Auditing Knowledge*, *11*(4), 0-0.
9. VanderPlas, J., 2016. *Python data science handbook: Essential tools for working with data*. "O'Reilly Media, Inc." .https://www.oreilly.com/library/view/python-data-science/9781491912126/

10. Zhang, C.W. and Wang, Y.B., 2010. Research on the application of distributed data mining in anti-money laundering monitoring system. *In 2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control*, pp. 133-135). IEEE.

11. Han, J., Kamber, M. and Pei, J., 2012. Data Mining: concepts and techniques, 3rd Edn, Data Transformation by Normalization, *Elsevier*, ISBN 978-0-12-381479-1.

12. Paikari, E., 2023. Bug report quality prediction and the impact of including videos on the bug reporting process, *University of California, Irvine*. https://escholarship.org/uc/item/9tn4t5gs [In Persian]

13. Boschetti, A. and Massaron, L., 2015. *Python Data Science Essentials*. Packt Publishing Ltd. 3rd Edn, Retrieved May 17, 2022, from https://www.oreilly.com/library/view/python-data-science/9781789537864/

14. Mahmoudi, L., Razvian, M.T., Ghorchi, M. and Ostadtaghizadeh, A., 2020.Application of multilayer perceptron (MLP) neural network model in urban vulnerability zoning with emphasis on earthquake (a case study on municipal district 20 in Tehran), *J. of Natural Environmental Hazards*, *9*(24), pp.129-150. http://doi.org/10.22111/JNEH.2020.31217.1551. [In Persian].

15. Nanda, S.R., Mahanty, B. and Tiwari, M.K., 2010. Clustering Indian stock market data for portfolio management. *Expert Systems with Applications*, *37*(12), pp.8793-8798., *37*(12), https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.06.026

16. Abbasi, A. and Nikbakht, M., 2018. Identification and clustering outsourcing risks of aviation part-manufacturing projects in aviation industries organization using k-means method. *J. of Modern Processes in Manufacturing and Production*, *7*(4), pp.1730. https://civilica.com/doc/1146207/ [In Persian].

17. Soltani Nejad. D., 2015. Optimizing the investment portfolio using clustering methods: comprehensive humanities portal. *J. of Asset Management and Financing*. *4*(4), pp.1-16. [In Persian].

18. Sayadi, M. and Omidi, M., 2020. Prediction-based portfolio optimization model for Iran's oil-dependent stocks using data mining methods. *Iranian Journal of Economic Studies*, *8*(1), pp.207-234. https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2019.04.017

19. Sadeghi Arani, Z. and Mohgar, A., 2019.Presenting a hybrid clustering model of Tehran Stock Exchange member companies: meta-heuristic algorithms approach. *Farda Management Scientific Research Journal*, *18*(59), pp.18-3. https://www.sid.ir/paper/386061/en [In Persian]

20. Abbasi, I., Dehekhani, H., Khozin, A. and Bazadeh, F., 2019. Designing a smart model for predicting financial wealth in insurance companies (data mining approach). *J. of Investment Science*, *9*(34), pp.211-229.[In Persian].

21. Razin, A., 2015. *Big buzz about big data: Five Ways Big Data Is Changing Finance*, Forbes. https://www.forbes.com/sites/elyrazin/2015/12/03/big-buzz-about-big-data-5-ways-big-data-is-changing-finance/

22. Diebold, F. X., Ghysels, E., Mykland, P. and Zhang, L., 2019. Big data in dynamic predictive econometric modelling. *J. of Econometrics, 212*(1), pp.1-3. https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2019.04.017

23. Majumdar, S. and Laha, A. K., 2020. Clustering and classification of time series using topological data analysis with applications to finance. *Expert Systems with Applications*, 162, pp.113868. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113868

24. Goodell, J. W., Kumar, S., Lim, W. M. and Pattnaik, D., 2021. Artificial intelligence and machine learning in finance: Identifying foundations, themes, and research clusters from bibliometric analysis. *J. of Behavioral and Experimental Finance*, 32, pp.100577. https://doi.org/10.1016/j.jbef.2021.100577

25. Lai, M., 2022. *Smart financial management system based on data mining and man-machine management*. Wireless communications and mobile computing, 1, p.2717982. https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2022/2717982

26. Karami, A. and Moradi. M., 2006. Investigation of linear and non-linear relationships between financial ratios and stock returns in Tehran Stock Exchange. *Accounting and Auditing Reviews*. *3*(2), pp.84-102. https://doi.org/10.1108/eb043404

27. Namazi, M. and Rostami, N., 2006. The relationship between financial ratios and stock returns in Tehran Stock Exchange Market. *The Accounting and Auditing Review*, *13*(44), pp.105-127.

28. Crammer, K. and Singer, Y., 2022. *Support vector machines.* Retrieved September 27, 2022, from https://scikitlearn/stable/modules/svm.html

29. Jayanthi, M. K., 2009. Object oriented analysis and design of learning objects and applications of agent based reusable learning objects in e-Learning system design. *Computer Science and Engineering*: *King*

Khalid University. https://www.researchgate.net/publication/344672573_Object_Oriented_Analysis_and_Design_of_Learning_Objects_Application_of_Agent_Based_Reusable_Learning_objects_in_e-Learning_System_Design

30. Ciano, T., 2024. Bitcoin price prediction and machine learning features: New financial scenarios, Reference Module in Social Sciences, *Elsevier*, ISBN 9780443157851, From https://doi.org/10.1016/B978-0-44-313776-1.00194-X.

31. Dudek, G., Fiszeder, P., Kobus, P. and Orzeszko, W., 2024. Forecasting cryptocurrencies volatility using statistical and machine learning methods: A comparative study, *Applied Soft Computing*, 151, pp.111132. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.111132.

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2025), 41(1), 28-38

Sharif University of Technology

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

Research Article

Locating Telecommunications Masts for Mobile Network Coverage Considering Sustainable Development Indices by Using GIS and BWM Technique: Case Study of Urmia County

Ronak Abbasi Ghasemloei, Saeed Fazayeli * and Reza Babazadeh

Department of Industrial Engineering, Technical and Engineering Faculty, Urmia University, Iran
* corresponding author: (s.fazayeli@urmia.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:3 January 2024

Revised:22 September 2024

Accepted:8 October 2024

Keywords:

Telecommunication towers, mobile phone network coverage, sustainable development, geographic information system, multi-criteria decision making.

Abstract

Optimum location for the establishment of mobile phone towers with the aim of covering all demand with high signal quality and low cost is an important challenge for telecommunications companies. Therefore, if a proper decision is not taken, it may lead to environmental damage, economic problems, and user dissatisfaction. Therefore, operators of telecommunication networks should plan for the optimal location of mobile telephone towers in order to achieve the goals of sustainable social, economic, and environmental development. The purpose of this research is to show how to use ArcGis10.8 software tools and the best-worst technique for the optimal location of mobile phone towers using sustainable development criteria. These criteria are: distance from the fault, distance from historical and cultural places, distance from parks, distance from the river, distance from medical centers (hospitals and clinics), distance or proximity from rural areas, proximity to the main road, distance from residential areas, distance from schools and educational centers, height, land slope, and slope direction. The innovations used in this research include the use of multi-criteria spatial modeling, including the best-worst technique and its integration with geographic information system techniques for locating mobile phone towers and investigating the optimal location for their deployment. along with the application of new criteria of sustainable development, which was done for the first time in Urmia city. The weights of the criteria were obtained by the best-worst technique, and the data required for weighting were collected by interviewing experts who were experts of the telecommunications company. The data related to each quality was entered into the ArcGis10.8 software, and various processing and fuzzy overlay operations were performed to prepare the optimal final map. The general results obtained showed that it is not possible to use the masts in a wide area from the west of the county, and the best points go towards the eastern areas near Lake Urmia, which can be due to the selection of the criteria.

Funding

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

To Cite this article:

Abbasi Ghasemloei, R., Fazayeli, S. and Babazadeh, R. 2025. Locating telecommunications masts for mobile network coverage considering sustainable development indices by using GIS and BWM technique: case study of urmia county, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, 41(1), 28-38. https://doi.org/10.24200/j65.2024.63622.2384

مجله علمی مهندسی صنایع و مدیریت شریف

https://sjie.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

مکان‌یابی دکل‌های مخابراتی برای پوشش‌دهی شبکه‌ی موبایل با درنظرگرفتن معیارهای توسعه‌ی پایدار و با به‌کارگیری GIS و روش BWM (مطالعه‌ی موردی: شهرستان ارومیه)

روناک عباسی قاسملوئی، سعید فضایلی* و رضا بابازاده

گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

*نویسنده مسئول (s.fazayeli@urmia.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۱۰/۱۳

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۷/۱۷

واژگان کلیدی:

دکل‌های مخابراتی،

پوشش شبکه‌ی تلفن همراه،

توسعه‌ی پایدار،

سیستم اطلاعات جغرافیایی،

تصمیم‌گیری چندمعیاره.

چکیده

مکان‌یابی بهینه جهت استقرار دکل‌های مخابراتی تلفن همراه با هدف پوشش‌دهی تمام تقاضاها با کیفیت سیگنال بالا و هزینه‌ی کم، یک چالش مهم برای شرکت‌های مخابراتی است. از این رو، اگر تصمیم مناسبی گرفته نشود، ممکن است منجر به آسیب‌های زیست‌محیطی، مشکلات اقتصادی، و عدم رضایت کاربران شود. بنابراین، اپراتورهای شبکه‌های مخابراتی باید برنامه‌ریزی برای مکان‌یابی بهینه‌ی دکل‌های مخابراتی تلفن همراه در جهت دستیابی به اهداف توسعه‌ی پایدار را در دستور کار خود قرار دهند. هدف از پژوهش حاضر، نشان‌دادن چگونگی استفاده از ابزارهای نرم‌افزار ArcGis ۱۰/۸ و تعیین وزن معیارها با روش بهترین-بدترین جهت مکان‌یابی بهینه‌ی دکل‌های مخابراتی تلفن همراه با استفاده از معیارهای توسعه‌ی پایدار است. نتایج کلی نشان داده است که در محدوده‌ی وسیعی از غرب شهرستان ارومیه، امکان به‌کارگیری دکل‌ها وجود ندارد و بهترین نقاط به سمت مناطق شرقی نزدیک دریاچه‌ی ارومیه پیش می‌رود، که این امر می‌تواند به‌دلیل انتخاب معیارها باشد.

۱. مقدمه

مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات[1] ، یکی از تصمیم‌های اساسی و برجسته‌ی هر سازمان است، که تأثیر زیادی در تصمیم‌های تاکتیکی و عملیاتی آن در زمینه های صنعت، خدمات، سیاست، تجارت، و اقتصاد دارد. این موضوع با هدف بهبود کیفیت خدمات، افزایش دامنه‌ی پوشش، کاهش زمان انتظار و هزینه‌ها، بهینه‌سازی حمل‌ونقل، و همچنین جلوگیری از مواجهه با تسهیلات خطرناک مطرح می‌شود.[۱] مکان‌یابی بهینه‌ی دکل‌های مخابراتی، یکی از مسائل کلیدی در زمینه‌ی مکان‌یابی تسهیلات است، که هدف آن ارائه‌ی خدمات و پوشش‌دهی به کاربران تلفن همراه در مناطق شهری و روستایی است. این فرآیند به افزایش تعداد کاربران یاری رسانده و متخصصان را به گسترش فعالیت‌های خود در برنامه‌ریزی شبکه‌های تلفن همراه و تعیین توزیع بهینه‌ی مکان برای برج‌ها ترغیب کرده است.[۲] افزایش روزافزون نیاز به بخش ارتباط‌ها از راه دور در این دوران، به نوعی به توسعه در نوآوری و پیشرفت‌های تکنولوژیکی در صنعت منجر شده است. یکی از اصلی‌ترین ابزارهای ارتباطی در این زمینه، تلفن همراه به شمار می‌رود.[۳] سیستم‌های تلفن همراه، خدمات مخابراتی را از طریق ایستگاه‌های پایه‌ی فرستنده و گیرنده[2] ارائه می‌دهند، که ارتباط‌های رادیویی را با ایستگاه‌های تلفن همراه مدیریت می‌کنند. فرآیند مکان‌یابی دکل‌های مخابراتی، شامل: برنامه‌ریزی سیستم و انتخاب مکان‌های بهینه برای نصب آنتن‌هاست و همچنین تنظیم پارامترهایی، مانند: توان انتشار، ارتفاع آنتن، شیب، و جهت آن را در بر می‌گیرد. هدف اقدام‌های اخیر، تخصیص بسامد مناسب برای پوشش‌دهی و تضمین ظرفیت کافی برای هر شبکه‌ی سلولی است.[۴] اتحادیه‌ی بین‌المللی مخابرات[3]، کیفیت خدمات را با توجه به میزان رضایت‌مندی کاربران از سرویس‌های خدماتی طبق استاندارد جهانی تعیین می‌کند. در مسئله‌ی برنامه‌ریزی شبکه‌های مخابراتی، کارشناسان مرتبط با برنامه‌ریزی برای تعیین مجموعه‌ی مکان‌های بهینه جهت تعیین محل سایت-های سرویس‌دهی، یک منطقه‌ی جغرافیایی را برای پوشش‌دهی کل در نظر می‌گیرند.[۵] همچنین باید دستورالعمل‌هایی در ارتباط با استانداردهای برنامه-ریزی‌شده‌ی دکل‌های مخابراتی اتخاذ شود. استانداردهای مربوط به حفظ سلامتی افراد در برابر امواج مغناطیسی، ارتفاع قابل قبول برای دکل‌ها در مناطق مختلفی از نقاط منطقه‌ی موردمطالعه، موقعیت مناسب آنتن‌ها، نزدیکی

[1] Facility Location Problems

[2] Base Tranceiver Station

[3] International Telecommunication

استناد به این مقاله:

عباسی قاسملوئی، روناک، فضایلی، سعید و بابازاده، رضا، ۱۴۰۴. مکان‌یابی دکل‌های مخابراتی برای پوشش‌دهی شبکه‌ی موبایل با درنظرگرفتن معیارهای توسعه‌ی پایدار و با به‌کارگیری GIS و روش BWM (مطالعه‌ی موردی: شهرستان ارومیه). مهندسی صنایع و مدیریت شریف ، ۴۱(۱)، صص.۲۸-۳۸. https://doi.org/10.24200/j65.2024.63622.2384

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

دکل‌ها به خطوط برق، نزدیکی به مراکز آموزشی و بهداشتی، و سایر امکانات در سراسر منطقه فراهم شود.[۶] برقراری و نگهداری از شبکه‌های مخابراتی، کار آسانی نیست. به‌ویژه در انتخاب مکان مناسب برای دکل‌های مخابراتی، که باید پوشش‌دهی با کیفیت و هزینه‌ی کم را فراهم کند. تصمیم‌های نادرست می‌تواند به آسیب‌های زیست‌محیطی، مسائل بهداشتی، مشکلات اقتصادی، و نارضایتی کاربران منجر شود. بنابراین، اپراتورهای شبکه‌های مخابراتی باید به برنامه‌ریزی برای مکان‌یابی بهینه‌ی دکل‌ها توجه کنند تا به اهداف توسعه‌ی پایدار اجتماعی، اقتصادی، و زیست‌محیطی دست یابند.[۷] برای تبدیل اقتصاد جهانی و ایجاد یک جامعه‌ی دیجیتال با هدف توسعه‌ی پایدار و رشد اقتصادی، لازم است به اهداف توسعه‌ی پایدار سازمان ملل دست یافت. این امر با افزایش دسترسی به فناوری اطلاعات و ارتباطات و فراهم‌کردن دسترسی جهانی و مقرون به صرفه‌ی اینترنت در کشورهای در حال توسعه امکان‌پذیر است.[۸]

در پژوهش حاضر، هدف اصلی تعیین بهترین مکان‌ها برای استقرار دکل‌های مخابراتی در سطح شهرستان ارومیه است؛ لذا به بررسی پژوهش‌های صورت‌گرفته در این زمینه پرداخته شده است. ایده‌ی پژوهش حاضر، بیشتر برمبنای ۴ پژوهش پیش رو است:

مجتبی‌حبوبه (۱۳۹۶)، در پژوهشی در زمینه‌ی مکان‌یابی دکل‌های مخابراتی برای تعیین مکان بهینه و پوشش نقاط کور با استفاده از به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره، معیارهای مؤثر در پژوهش اخیر را توسط روش سلسله‌مراتبی فازی[۴] وزن‌دهی کرده است. سپس در مراحل بعد، همه‌ی معیارها را در محیط GIS تجزیه‌وتحلیل و نقشه نهایی را تهیه کرده و دریافته است که کاربرد روش مذکور، مناطقی از محدوده‌ی موردمطالعه را در سطح بالای عضویت فازی جهت استقرار دکل قرار می‌دهد.[۹] محمدی و همکاران (۱۳۹۹)، به پژوهشی با هدف پایش سلامت شهروندان با رویکرد مکان‌یابی بهینه‌ی دکل‌های مخابراتی تلفن همراه و استفاده از وزن‌دهی معیارها توسط روش تحلیل سلسله‌مراتبی و کاربرد منطق فازی در GIS پرداختند و دریافتند که برخی دکل‌ها در مناطق با مطلوبیت کم و خیلی کم قرار دارند. همچنین، نقاط جدید پیشنهادی برای جابجایی دکل‌ها مشخص شد که باید در مناطق با مطلوبیت متوسط به بالا قرار گیرند، تا تشعشع‌های مضر برای سلامت شهروندان کاهش یابد.[۱۰] مالودیانتو و پرانتا[۴] (۲۰۱۹)،[۱۱] در بررسی ترتیب مکان و تعداد ایستگاه‌های پایه، طی فرایند سلسله‌مراتبی براساس معیارهای تراکم جمعیت، به طرح‌های فضایی و فاصله برای ۵ سال آینده پرداختند و نتایجی با بهره‌گیری از نقشه‌ی دیجیتال در GIS ارائه کردند. درنهایت، پیش‌بینی‌هایشان نشان‌دهنده‌ی ساخت ۲۳ برج جدید در منطقه‌ی موردبررسی بوده است.[۱۱] تایال[۵] و همکاران (۲۰۲۳)،[۱۲] رویکرد مدل‌سازی چندمرحله‌ای را با استفاده از جعبه‌ابزار تحلیل فضایی و منطق فازی برای شناسایی مکان‌های مناسب ایستگاه‌های فرستنده و گیرنده‌ی پایه‌جدید توسعه داده‌اند. مدل مذکور شامل ۹ پارامتر تصمیم‌گیری بوده و از GIS به عنوان ابزاری برای ترکیب معیارهای اخیر در یک نقشه‌ی واحد استفاده شده است. درنهایت، ۹ سایت جدید بهینه‌سازی‌شده برای ایستگاه‌ها پیشنهاد کردند، که پوشش شبکه‌ای را برای ۲۲ روستا فراهم کرده و نزدیکی به جاده‌ها و مکان‌های توریستی را کاهش داده است.[۱۲] اکبرپور و همکاران (۱۳۹۷)، پژوهشی با عنوان معرفی مدلی برای تقویت و پوشش‌دهی دکل‌های موبایل به‌منظور پابرجابودن در زمان حوادث طبیعی انجام دادند و برای حل مدل مذکور از نرم‌افزار LINGO ۹/۰ استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که مدل پیشنهادی، سیستم مخابراتی را در برابر بدترین حالت تخریب پشتیبانی می‌کند و تعداد کاربران بعد از وقوع سوانح و خرابی تسهیلات را بیشینه می‌سازد.[۱۳] توحیدی نصب و همکاران (۱۳۹۸)، نیز برای مکان‌یابی پوشش آنتن‌ها و دکل‌های مخابراتی به ارائه‌ی مدل‌های بهینه‌سازی از نوع چندجمله‌ای غیرقطعی (NP)[۶] به‌صورت فازی همراه با مسائل چندهدفه پرداختند و با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، پیشنهاد کردند که از الگوریتم‌های ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGAII)[۷] و رتبه‌بندی نامغلوب (NRGA)[۸] و عمگرهای مناسب برای کارایی بالای آن در شاخص کیفیت استفاده شود.[۱۴] حمیدرضا ملکی و الهه کریم دهکردی (۲۰۱۶)،[۱۵] مدلی جهت بیشینه‌ساختن پوشش خدمات قبل و بعد بلایای طبیعی در نظر گرفته‌اند؛ که در آن از نظریه‌های مجموعه‌ی فازی و برنامه‌ریزی فازی برای تبدیل مسئله‌ی برنامه‌ریزی چندهدفه به مسئله‌ی برنامه‌ریزی تک‌هدفه استفاده شده است. سپس دو الگوریتم فراابتکاری بر روی نمونه‌ای از مسئله‌ی مذکور را با هم مقایسه کردند و دریافتند که الگوریتم ژنتیک بهتر از الگوریتم گرسپ[۹] عمل می‌کند.[۱۵] گودرزیان و همکاران (۲۰۲۲)،[۱۶] از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی با استفاده از اعداد صحیح و مختلط برای بهینه‌سازی و تخصیص ایده‌آل دکل‌های مخابراتی پایه در شرایط بحرانی در مناطق مختلف استفاده کردند. ایشان برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، روش LP را برای مسائل کوچک و الگوریتم شبیه‌سازی برای مسائل بزرگ به‌کار برده‌اند. تنظیم پارامترهای الگوریتم با استفاده از روش تاگوچی صورت گرفته و مدل در یک مطالعه‌ی موردی به اجرا درآمده است تا کارایی آن به نمایش گذاشته شود. در پایان، شبکه‌ی بهینه‌ی معرفی‌شده در مطالعه‌ی موردی توضیح داده شده است.[۱۶] محرم و سویانتو (۲۰۲۰)،[۱۷] در مطالعه‌یی با استفاده از روش طراحی شبیه‌سازی بهینه‌سازی مکان ایستگاه‌های گیرنده- فرستنده‌ی پایه با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب (FA)[۱۰] با هدف بهینه‌سازی منطقه‌ی پوشش و ترافیک به ارزش تناسب ۹۷/۷۳٪ دست یافتند و تعداد ایستگاه‌ها را ۵۰٪ کاهش دادند. این نتیجه با مدل الگوریتم کرم شب‌تاب تکاملی (HEFA)[۱۱] ترکیبی، که میانگین تناسب ۹۸/۶۲٪ داشته است، قابل مقایسه است. در آینده، می‌توان به بررسی موارد مهم‌تری از قرارگیری ایستگاه‌های پایه برای ارزیابی جامع‌تر عملکرد الگوریتم اخیر پرداخت.[۱۷] صفوانی و همکاران (۲۰۲۱)،[۱۸] روش خوشه‌بندی فازی و جستجوی هارمونی را به‌عنوان روشی برای بهینه‌سازی مکان‌های بالقوه‌ی برج‌های جدید تلفن همراه برای ۵ سال آینده ارائه داده‌اند. نتایج شبیه‌سازی ایشان نشان داده است که به ۲۱ برج جدید اضافی نیاز است، که در مجموع به ۹۵ برج در سال ۲۰۲۴ (۷۴ برج موجود) می‌رسد. همچنین، روش‌های جستجوی هارمونی به بهینه‌سازی خدمات پوشش مناطق برج‌های جدید در منطقه‌ی موردمطالعه کمک می‌کنند، به‌طوری که برج‌ها در شعاعی بین ۶۰۰ تا ۹۰۰ متر و با ارتفاعی بین ۲۵ تا ۵۰ متر قرار می‌گیرند.[۱۸] هیروشی دلپریا و همکاران (۲۰۲۲)،[۳] مدلی برای توسعه و ارتقاء شبکه‌ی مخابراتی در سریلانکا با هدف تراکم جمعیت برج‌های سیگنال با استفاده از برنامه‌ریزی خطی

[4] Mauludiyanto & Pranata
[5] Tayal
[6] Non Deterministice Polynomail
[7] Genetic Algoritm Of Non-Dominant Sorting
[8] Non-Dominant Rankig Genetic Algoritm
[9] Grasp Algoritm
[10] Firefly Algorithm
[11] Hybrid evolutionary firefly algorithm

راهبردی و مفاهیم نظریه‌ی گراف هیروشی ارائه کرده‌اند. مدل مذکور با هدف تقویت و توسعه‌ی شبکه‌ی ارتباط‌های محلی انجام شد و این نتیجه به‌دست آمد که جریان‌های ترافیک به ارائه‌ی بهترین انواع شبکه‌ها و بهینه‌سازی با استفاده از داده‌های موجود کمک کرده‌اند. المغتاوی[12] و همکاران (۲۰۲۴)،[۱۹] با یک روش کلاسیک، چالش موقعیت‌یابی ایستگاه‌های پایه در یک شبکه‌ی سلولی را بررسی کرده‌اند؛ که هدف آن ارائه‌ی خدمات به کاربران تلفن همراه در یک منطقه‌ی خاص با توجه به حرکات آن‌ها بوده است. ایشان یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را طراحی کردند تا مکان‌های بهینه‌ی ایستگاه‌های پایه در زمان‌های مختلف را با کمینه‌ی هزینه‌ی کل شبکه تعیین کنند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده است که مدل مذکور توانسته است مکان‌های بهینه را شناسایی کند و در عین حال محدودیت‌های ظرفیت و کیفیت خدمات را با کمینه‌ی هزینه مد نظر قرار دهد.

۲. روش انجام پژوهش

در مطالعه‌ی حاضر، برای بررسی ویژگی‌های جغرافیایی از نرم‌افزار ۱۰/۸ ArcGisاستفاده شده است. ابتدا، معیارهای توسعه‌ی پایدار از طریق مصاحبه با کارشناسان شرکت ارتباطات زیرساخت ارومیه و نوشتارهای علمی جمع‌آوری و نقشه‌ای (لایه)[13] از آن‌ها تهیه شده است. سپس با استفاده از پرسش‌نامه‌ی روش بهترین- بدترین (BWM)[14] کارشناسان به معیارها امتیاز داده و سپس داده‌های مذکور به‌صورت مدل خطی در نرم‌افزار LINGO۱۴/۰ پیاده‌سازی شده‌اند. وزن‌های به‌دست‌آمده به‌عنوان ورودی GIS در مرحله‌ی هم‌پوشانی با منطق فازی استفاده شده‌اند، تا نقشه‌ی نهایی و مناسب‌ترین مکان برای احداث دکل مخابراتی تعیین شود. در حقیقت، یکی از مزایای استفاده از GIS نسبت به سایر روش‌های مکان‌یابی، فراهم‌کردن پشتیبانی برای تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر داده‌های جغرافیایی است. همچنین، روش بهترین- بدترین (BWM)، امکان تعیین رتبه‌بندی مشخص بین آیتم‌ها را فراهم می‌آورد و به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا تمایز واقعی‌تری بین بهترین و بدترین گزینه‌ها قائل شوند. ترکیب دو روش مذکور، ابزاری کارآمد برای تجزیه‌وتحلیل ایجاد می‌کند، که امکان ساخت پایگاه داده‌ای جامع، به‌صورت نقشه‌برداری و الفبایی را فراهم می‌آورد. این پایگاه داده می‌تواند با روش‌های چندمعیاره، مسائل را ساده‌تر کند و استفاده از معیارهای مختلف را ترویج دهد.

۱.۲. معیارهای پژوهش

با توجه به آنالیز انجام‌شده توسط کارشناسان شرکت ارتباطات زیرساخت شهرستان ارومیه در زمینه‌ی احداث دکل‌های تلفن همراه برای انتخاب معیارهای توسعه‌ی پایدار، ۱۲ مورد از شاخص‌های مؤثر در رابطه با شرایط منطقه‌ی موردمطالعه انتخاب شده است، که در جدول ۱ به آن‌ها اشاره شده است.

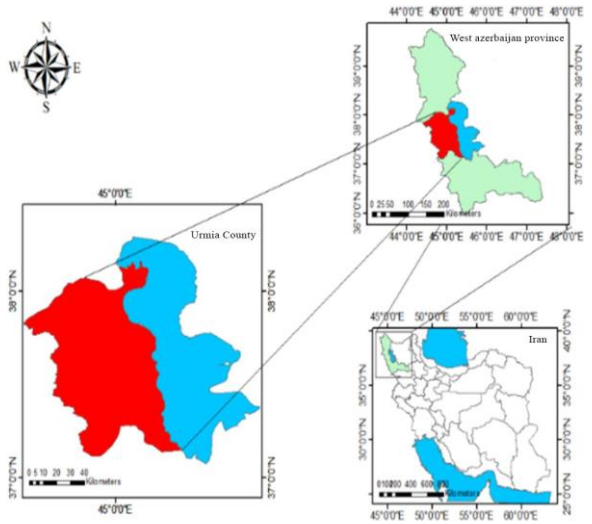
۲.۲. محدوده‌ی مطالعاتی پژوهش

محدوده‌ی موردمطالعه، شهرستان ارومیه مرکز استان آذربایجان‌غربی بوده است، که از سمت شمال به شهرستان سلماس و از جنوب به شهرستان‌های نقده، اشنویه، از شرق به دریاچه‌ی ارومیه، و از سمت غرب به مرز ایران و ترکیه محدود شده است. شهرستان ارومیه با مساحتی بالغ بر۵۲۲۱ کیلومترمربع، حدود ۱۴٪ از مساحت استان را شامل می‌شود. طبق سرشماری نفوس و مسکن

[12] Almoghathawi
[13] Shape File

جدول ۱. معیارهای پژوهش.

Criterion name	Criterion type
Fault	Life environmental
Historical cultural sites	
Park	
River	
Hospital	
Rural	Economic
Road	
Aspect-Slope- Dem	Technical
Residential areas	Social
School	



شکل ۱. محدوده‌ی مطالعاتی شهرستان ارومیه.

در سال ۱۳۹۵ با جمعیتی بالغ بر ۱,۰۴۰,۰۰۰ نفر در استان آذربایجان‌غربی در شمال غرب ایران واقع شده است. در شکل ۱، موقعیت محدوده‌ی موردمطالعه مشاهده می‌شود.[۲۰]

۳.۲. روش بهترین- بدترین (BWM)

رضایی (۲۰۱۵)، روش بهترین- بدترین را به‌عنوان یک روش جدید تصمیم‌گیری چندمعیاره معرفی کرده است، که نیاز به مقایسه‌های دو به دو را کاهش می‌دهد. در روش BWM، تصمیم‌گیرنده ابتدا بهترین و بدترین معیارها را شناسایی می‌کند. بهترین معیار به‌عنوان مهم‌ترین و بدترین معیار به‌عنوان کم‌اهمیت‌ترین معیار تعریف می‌شود. همچنین، یک مدل ریاضی کمینه- بیشینه برای تعیین وزن‌های بهینه‌ی معیارها با توجه به مقایسه‌های جفتی ارائه شده است.[۲۱]

۴.۲. مراحل روش بهترین- بدترین (BWM)

- مرحله‌ی اول: تعیین مجموعه‌ای از معیارهای تصمیم

در مرحله‌ی اول، معیارهای $(c_1,..,c_n)$ در نظر گرفته می‌شود، که برای برای رسیدن به یک تصمیم استفاده شود.

- مرحله‌ی دوم: تعیین بهترین و بدترین معیار

بهترین معیار (مطلوب‌ترین و مهم‌ترین) و بدترین معیار به عنوان کم اهمیت- ترین معیار انتخاب می‌شود.

[14] Best-Worst Method

– مرحله‌ی سوم: مقایسه‌های زوجی بین بهترین معیار با سایر معیار

در مرحله‌ی کنونی، بهترین معیار نسبت به بقیه‌ی معیارها با استفاده از یک عدد بین ۱ تا ۹، بهترین بردار بین همه‌ی معیارها تعیین می‌شود.

$$A_B = \left(a_{B1}, a_{B2}, \ldots, a_{Bn}\right)$$

که در آن، a_{bj} اهمیت بهترین معیار را نسبت به معیار j نشان می‌دهد. واضح است که $a_{bb} = 1$ است.

– مرحله‌ی چهارم: تعیین مقایسه‌های زوجی بین سایر معیارها نسبت به بدترین معیار

در این مرحله نیز اهمیت همه‌ی معیارها بر روی بدترین معیار با استفاده از یک عدد بین ۱ تا ۹ تعیین می‌شود. در نتیجه، بر $A_B = \left(a_{1w}, a_{2w}, \ldots, a_{nw}\right)$ به بدترین حالت ممکن است که در آن a_{jw} اولویت معیار j را نسبت به بدترین معیار w نشان می‌دهد.

– مرحله‌ی پنجم: تعیین وزن بهینه‌ی معیارها از طریق روش‌های بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی خطی

وزن بهینه‌ی معیارها برای معیارهای $\left(w_1^*, w_2^*, \ldots, w_n^*\right)$، وزنی است که که در آن، برای هر کدام، جفت $a_{jw} = \frac{w_j}{w_w}, a_{Bj} = \frac{w_B}{w_j}$ $\frac{w_j}{w_w}, \frac{w_B}{w_j}$ برقرار است، که برای برآورده‌ساختن شرایط مذکور برای همه‌ی j ها باید راه‌حلی پیدا کرد که در آن بیشینه‌ی اختلاف مطلق $\left|\frac{w_B}{w_j} - a_{Bj}\right|, \left|\frac{w_j}{w_w} - a_{jw}\right|$ برای همه‌ی j ها، کمینه شود. با درنظرگرفتن شرایط غیرمنفی برای وزن‌ها، مسئله به صورت رابطه‌ی ۱ خواهد شد:

$$\min \max \left\{ \left|\frac{w_B}{w_j} - a_{Bj}\right|, \left|\frac{w_j}{w_w} - a_{jw}\right| \right\} \quad \begin{array}{l} s.t. \\ \sum_j w_j = 11 \\ w_j \geq 0 \ \ for\ all\ \ j \end{array} \qquad (۱)$$

مسئله‌ی ۱ را می‌توان به مسئله‌ی ۲ انتقال داد، که مدل بهینه‌سازی غیرخطی روش بهترین- بدترین را تشکیل می‌دهد و در نرم‌افزارهای بهینه‌سازی LINGO ۱۴/۰ و GAMS Win۳۲ ۲۴/۱/۲ پیاده‌سازی می‌شود:

$$\begin{array}{l} \min \xi \\ s.t \\ \left|\frac{w_B}{w_j} - a_{Bj}\right| \leq \xi \\ \left|\frac{w_j}{w_w} - a_{jw}\right| \leq \xi \\ for\ \ all\ \ j \end{array} \quad \begin{array}{l} s.t. \\ \sum_j w_j = 1 \\ w_j \geq 0 \ \ for\ all\ \ j \end{array} \qquad (۲)$$

– نرخ ناسازگاری (IR)[15] در روش بهترین- بدترین، فرمولی برای محاسبه‌ی نرخ ناسازگاری و ارزیابی اعتبار مقایسه‌ها ارائه شده است؛ که در آن، ابتدا میزان سازگاری معیارها با استفاده از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$\text{نرخ سازگاری} = \frac{\xi^*}{\text{شاخص سازگاری}} \qquad (۳)$$

با استفاده از شاخص سازگاری و رابطه‌ی آن، مقدار نرخ ناسازگاری را می‌توان محاسبه کرد (جدول ۲):

جدول ۲. محاسبه‌ی میزان شاخص سازگاری.

a_{BW}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Compatibility index	0.00	0.44	1.00	1.63	2.30	3,00	3.73	4.47	5.23

نرخ سازگاری در بازه‌ی (۰،۱) قرار دارد و نزدیک‌تربودن به صفر، نشانگر ناسازگاری بالاتر است. هر چه مقایسه‌ها به ۱ نزدیک‌تر باشد، ثبات و سازگاری بیشتری دارند. روابط مذکور، یک مدل غیرخطی بوده است، که جعفر رضایی (۲۰۱۵)،[۲۲] آن را به یک مدل خطی به همراه با محاسبه‌ی اوزان شاخص‌ها تبدیل کرده است. یکی از مزیت‌های مدل خطی اخیر، محاسبه‌ی نرخ ناسازگاری بدون استفاده از شاخص سازگاری است. در واقع، مقدار ξ^L همان تابع هدف است. همچنین وزن‌های مدل، دقت بیشتری دارند. در نتیجه مدل خطی روش ذکرشده به صورت رابطه‌ی ۴ معرفی شده است:

$$\begin{array}{l} \min \xi^L \\ s.t. \\ \left|w_b - a_{bj} w_j\right| \leq \xi^L \\ \left|w_j - a_{jw} w_w\right| \leq \xi^L \\ for\ all\ \ j \\ \sum_j w_j = 1 \\ w_j \geq 0 for\ all\ \ j \end{array} \qquad (۴)$$

۵.۲. کاربرد منطق فازی در GIS

این روش به‌عنوان یک شیوه‌ی تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت شناخته می‌شود. استانداردسازی نقشه‌های عملیاتی با استفاده از منطق فازی در بازه‌ی (۰،۱) در محیط GIS صورت می‌گیرد. در این فرآیند، تابع عضویت تعریف‌شده به گونه‌ای است که مقادیر بالای عضویت، نشان‌دهنده‌ی تناسب بیشتر و مقادیر پایین‌تر، نشان‌دهنده‌ی تناسب کمتری برای دستیابی به نتایج مطلوب هستند.[۲۳] در ادامه، برخی توابع فازی استفاده‌شده برای معیارها معرفی شده‌اند:

۶.۲. معرفی توابع عضویت فازی مورداستفاده‌ی معیارها

– تابع عضویت فازی گوسی[16]: تابع ذکرشده مقادیر پیکسل‌ها را به‌صورت نرمال توزیع می‌کند، به‌طوری که بهترین ارزش برای توزیع نرمال برابر با ۱ است، که در مرکز نمودار قرار دارد و به‌تدریج به سمت مثبت و منفی کاهش می‌یابد.

[15] Incompatibility Rate

[16] Fuzzy Gaussian

تابع عضویت فازی کمینه[17]: تابع اخیر برای پیکسل‌هایی با ارزش کمتر مناسب است. هر چه فاصله از مقدار عددی تابع بهینه کمتر باشد، درجه‌ی مطلوبیت بیشتر می‌شود و هر چه از آن بزرگ‌تر شود، مطلوبیت کمتر می‌شود.

تابع عضویت فازی خطی[18]: در تابع عضویت فازی خطی، یک تابع خطی برای تعیین درجه‌ی عضویت بین مقادیر کمینه و بیشینه استفاده می‌شود. مقادیر زیر حد کمینه، هیچ درجه‌ی عضویتی ندارند؛ در حالی که مقادیر بالای حد بیشینه، درجه‌ی عضویت کامل (مقدار ۱) دریافت می‌کنند.[۲۴] همچنین پنج عملگر سودمند برای ترکیب داده‌های مکانی و مقادیر عضویت آن‌ها جهت تهیه‌ی نقشه‌ی نهایی استفاده شده است، که به ترتیب به آن‌ها اشاره شده است:[۲۵]

- **عملگر تلفیق فازی**[19]: این عملگر برای انجام عمل تلفیق از رابطه‌ی ۵ استفاده می‌کند:

$$\mu combine = Min(\mu a, \mu b, \mu c, ..) \quad (۵)$$

که در آن، مقادیر μa,μb,μc... به ترتیب مقادیر عضویت اشتراک برای نقشه-های a,b,c,.. در یک موقعیت به‌خصوص بر روی هر یک از نقشه‌ها را نشان می‌دهند.

- **عملگر اجتماع فازی**[20]: عملگر اجتماع فازی به صورت رابطه‌ی ۶ بیان می‌شود:

$$\mu combine = Max\ (\mu a, \mu b, \mu c, ..) \quad (۶)$$

که در آن، مقادیر بیشینه‌ی عضویت نقشه‌ها در هر موقعیت، مقادیر عضویت خروجی را کنترل می‌کنند.

- **عملگر ضرب جبری فازی**[21]: عملگر ضرب فازی نتیجه‌ی عمل تلفیق دو عملگر اخیر به‌صورت حاصل‌ضرب جبری (رابطه‌ی ۷) بیان می‌شود:

$$\mu combine = \prod_i^n \mu i \quad (۷)$$

عملگر جمع جبری فازی[20]: عملگر جمع جبری به صورت رابطه‌ی ۸ بیان می‌شود:

$$\mu combone = 1 - (\Pi(1 - \mu i)) \quad (۸)$$

که در آن، نسبت به عملگر ضرب جبری فازی، اثر افزایشی وجود دارد، که منجر به بالاترین مقدار عضویت در نتیجه می‌شود.

عملگر گاما فازی[21]: عملگر گاما، حاصل‌ضرب دو عملگر ضرب جبری و جمع جبری به صورت رابطه‌ی ۹ بیان می‌شود:

$$\mu combine = (\prod_{i=1}^n \mu 1 - \gamma) \times (1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu i)\gamma) \quad (۹)$$

که در آن، γ پارامتری است که مقدار عددی در محدوده‌ی ۰ و ۱ را نشان می‌دهد. در صورتی که مقادیر پارامتر γ به درستی انتخاب شود، مقادیری را در خروجی منعکس می‌کند، که باعث تصمیم‌گیری صحیح کارشناسان می‌شود.

۳. تجزیه‌وتحلیل یافته‌های پژوهش

۱.۳. تعیین وزن معیارها با استفاده از پرسش‌نامه و تشکیل مدل خطی

ابزار گردآوری داده‌ها در روش بهترین- بدترین، تهیه‌ی پرسش‌نامه‌ی استاندارد است. برای این کار ۱۵ پرسش‌نامه با داده‌های عددی مختلف مقایسه‌ی زوجی شده‌اند. درنهایت، پرسش‌نامه (جدول ۳) به‌عنوان پرسش‌نامه‌ی بهترین و بدترین معیار از نظر خبرگان تأیید شده است. خبرگان و کارشناسان که نظر تخصصی در مورد پرسش‌نامه داده‌اند، ۱۰ نفر با تخصص کارشناسی مخابرات ،کارشناسی ارشد برق گرایش مخابرات (میدان)، کارشناسی ارشد گرایش مخابرات (سیستم)، کارشناسی کامپیوتر (نرم‌افزار)، کارشناسی ارشد فناوری

جدول ۳. پرسش‌نامه‌ی روش بهترین- بدترین.

Worst criteria (Aspect)	Best criteria (Dem)	Code	Criterion name
7	2	W_{01}	Residential areas
7	2	W_{02}	Road
7	2	W_{03}	Rural
5	3	W_{04}	Historical cultural sites
5	3	W_{05}	Park
5	2	W_{06}	School
6	3	W_{07}	River
2	5	W_{08}	Slope
1	8	W_{09}	Aspect
8	1	W_{10}	Dem
6	2	W_{11}	Hospital
3	6	W_{12}	Fault

[17] Fuzzy Small
[18] Fuzzy Linear
[19] Fuzzy And
[20] Fuzzy OR
[21] Fuzzy Product

جدول ۴. نتایج پیاده‌سازی مدل خطی و محاسبه‌ی وزن معیارها.

Criteria weights	Code
0.105	W_{01}
0.105	W_{02}
0.105	W_{03}
0.070	W_{04}
0.070	W_{05}
0.105	W_{06}
0.070	W_{07}
0.040	W_{08}
0.017	W_{09}
0.175	W_{10}
0.105	W_{11}
0.034	W_{12}

اطلاعات، کارشناسی معماری، کارشناسی ارشد شهرسازی ،کارشناسی عمران زمین و مسکن، کارشناسی جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، و کارشناسی اقتصاد و توسعه بوده‌اند، که در سمت کارشناس بخش نصب و راه اندازی دکل‌های مخابراتی تلفن همراه در شرکت ارتباطات زیرساخت ارومیه حضور داشته‌اند.

معیار ارتفاع به‌عنوان بهترین و معیار شیب به عنوان بدترین معیار در هر بعد، توسط طیف ۹ انتخاب شده‌اند.

۲.۳. مدل خطی روش BWM

جواب بهینه و وزن معیارها براساس مدل خطی در رابطه‌ی ۱۰ در نرم‌افزار LINGO۱۴/۰ پیاده‌سازی و در جدول ۴ ارائه شد

$$
\begin{aligned}
& Min\, \xi_l \\
& s.t. \\
& |w_{10} - 2w_1| \le \xi_l \\
& |w_{10} - 2w_2| \le \xi_l \\
& |w_{10} - 2w_3| \le \xi_l \\
& |w_{10} - 3w_4| \le \xi_l \\
& |w_{10} - 3w_5| \le \xi_l \\
& |w_{10} - 2w_6| \le \xi_l \\
& |w_{10} - 3w_7| \le \xi_l \\
& |w_{10} - 5w_8| \le \xi_l \\
& |w_{10} - 8w_9| \le \xi_l \\
& |w_{10} - 2w_{11}| \le \xi_l \\
& |w_{10} - 6w_{12}| \le \xi_l \\
& |w_1 - 7w_9| \le \xi_l \\
& |w_2 - 7w_9| \le \xi_l \\
& |w_3 - 7w_9| \le \xi_l \\
& |w_4 - 5w_9| \le \xi_l \\
& |w_5 - 5w_9| \le \xi_l \\
& |w_6 - 5w_9| \le \xi_l \\
& |w_7 - 6w_9| \le \xi_l \\
& |w_8 - 2w_9| \le \xi_l \\
& |w_{10} - 8w_9| \le \xi_l \\
& |w_{11} - 6w_9| \le \xi_l \\
& |w_{12} - 3w_9| \le \xi_l \\
& w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 + w_7 + w_8 + \\
& w_9 + w_{10} + w_{11} + w_{12} = 1 \\
& w_1, .., w_{12} \ge 0 \\
& j = 1, 2, ..., 12 \qquad (۱۰)
\end{aligned}
$$

نرخ ناسازگاری در روش خطی برابر با مقدار تابع هدف است و خروجی نرم‌افزار نشان می‌دهد که این نرخ حدود ۰/۰۳۵ و کمتر از ۰/۱ است، که نشان‌دهنده‌ی سازگاری بالا در مقایسه‌های زوجی معیارهاست.

نرخ ناسازگاری = ξ^l = ۰/۰۳۵ < ۰/۱

۳.۳. تحلیل نقشه‌ی معیارها درنرم افزار GIS

در مرحله‌ی فراخوانی نقشه‌ی معیارها در نرم‌افزار GIS، استانداردسازی نقشه‌ها شامل پردازش‌هایی، نظیر: تنظیم سیستم مختصاتی نقشه‌ها براساس سیستم تصویر جهانی مرکاتور جانبی (UTM)[22] و اعمال فاصله‌ی اقلیدسی بر روی نقشه‌ها بوده است. این فرآیند منجر به تبدیل نقشه‌ها از حالت وکتوری[23] به حالت رستری[24] براساس لایه‌ی رقومی ارتفاع (DEM)[25] انجام شده است. همچنین، مرحله‌ی فازی‌سازی لایه‌های رستری از طریق تعریف توابع فازی برای معیارها با فواصل قراردادی انجام شده است. در جدول ۵، به معرفی نوع تابع عضویت فازی معیارها پرداخته شده است:

جدول ۵. معرفی توابع عضویت فازی معیارها.

Specified distances type	Membership function type	Criterion name
Decreasing linear	Small	Residential areas
Decreasing linear	Small	Road
Decreasing linear	Small	Rural
Decreasing linear	Small	Dem
Decreasing linear	Small	Slope
No change	Gaussian	Aspect
Incremental linear	Linear	Hospital
Incremental linear	Linear	School
Incremental linear	Linear	Historical cultural sites
Incremental linear	Linear	Park
Incremental linear	Linear	Fault
Incremental linear	Linear	River

[22] Universal Transverse Mercator
[23] Vector
[24] Raster
[25] Digital Elevation Model

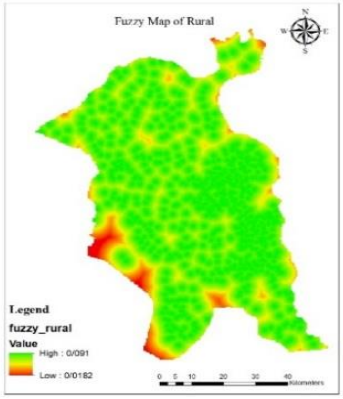
پس از تعیین نوع تابع برای هر یک از معیارها، نقشه‌های مربوطه با استفاده از دستور فازی‌سازی در نرم‌افزار ۱۰/۸ ArcGIS تهیه می‌شوند. شکل‌های ۲ الی ۱۳، نقشه‌های فازی هر معیار را در بازه‌ی ۰ تا ۱ نمایش می‌دهند. بر اساس شکل‌های ارائه‌شده، هر چه فاصله در نقشه‌ها به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، ارزش آن بیشتر و رنگ آن سبز خواهد بود. برعکس، هر چه فاصله به صفر نزدیک‌تر شود، ارزش آن کاهش یافته و رنگ آن قرمز شده است.

۴.۳ نقشه خروجی فازی معیارها در GIS

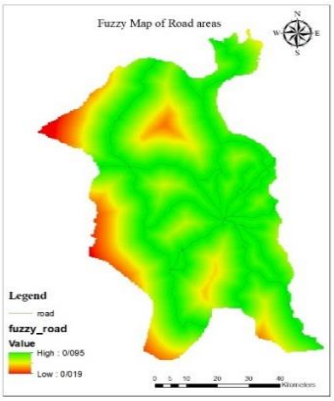
بعد از مرحله‌ی فازی‌سازی معیارها، هر یک از نقشه‌های اخیر، در وزن‌های خود که از طریق روش بهترین- بدترین محاسبه شده بود، ضرب شده‌اند.

۵.۳. عملیات هم‌پوشانی لایه‌های وزن‌دهی‌شده

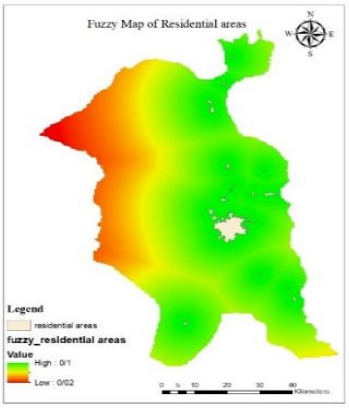
در آخرین مرحله از تهیه‌ی نقشه‌ی نهایی، عملیات هم‌پوشانی لایه‌های وزن‌دهی‌شده انجام می‌شود. در این مرحله، عملگر اجتماع فازی، پیکسل‌هایی با ارزش صفر را در نقشه‌ی نهایی به عنوان ۱ در نظر می‌گیرد، در حالی که عملگر اشتراک فازی فقط پیکسل‌هایی با ارزش ۱ را لحاظ می‌کند. عملگر جمع فازی به‌دلیل افزایش مقدار عضویت نهایی پیکسل‌ها، تعداد بیشتری را در کلاس "خیلی خوب" قرار می‌دهد و حساسیت کمتری در مکان‌یابی دارد. در مقابل، عملگر ضرب فازی با کاهش عضویت نهایی پیکسل‌ها، تعداد کمتری را در کلاس "خیلی خوب" قرار می‌دهد و ممکن است برخی مناطق مناسب را نادیده بگیرد.



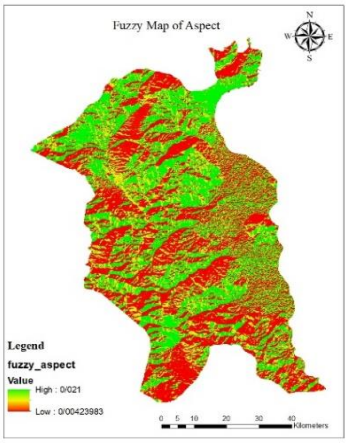
شکل ۲. نقشه‌ی فازی روستا.



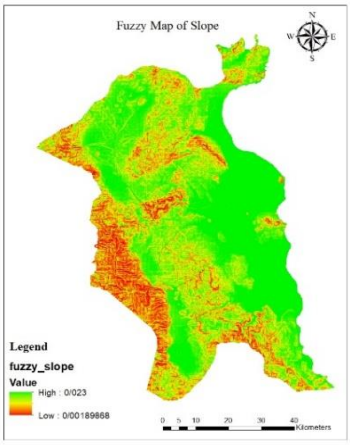
شکل ۳. نقشه‌ی فازی جاده‌ی اصلی.



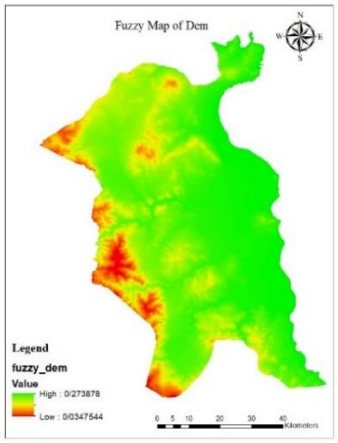
شکل ۴. نقشه‌ی فازی مناطق مسکونی.



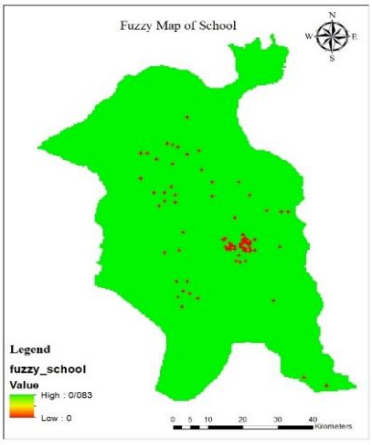
شکل ۵. نقشه‌ی فازی جهت شیب.



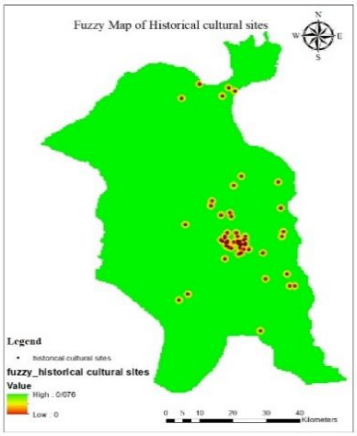
شکل ۶. نقشه‌ی فازی شیب.



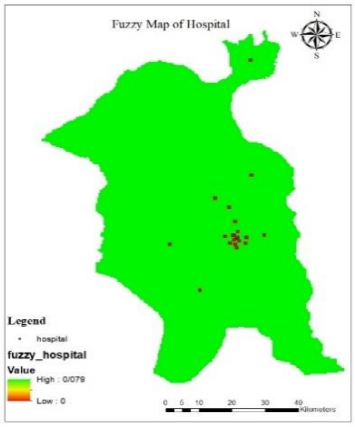
شکل ۷. نقشه‌ی فازی ارتفاع.



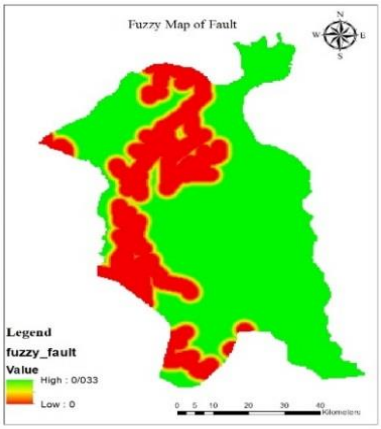
شکل ۸. نقشه‌ی فازی مراکز فرهنگی.



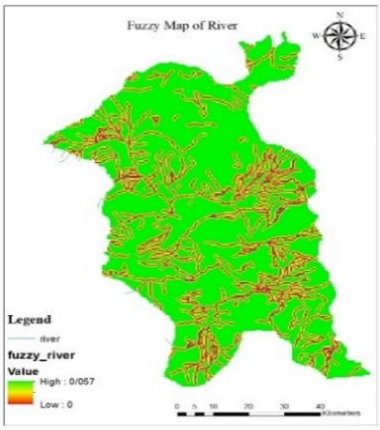
شکل ۹. نقشه‌ی فازی.



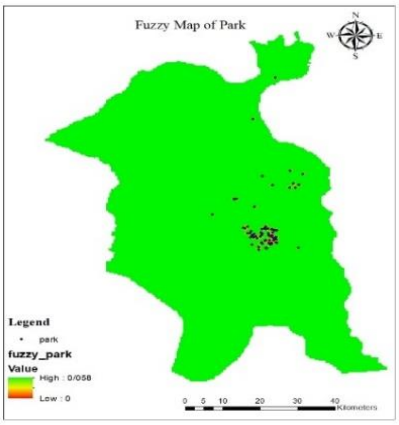
شکل ۱۰. نقشه‌ی فازی بیمارستان.



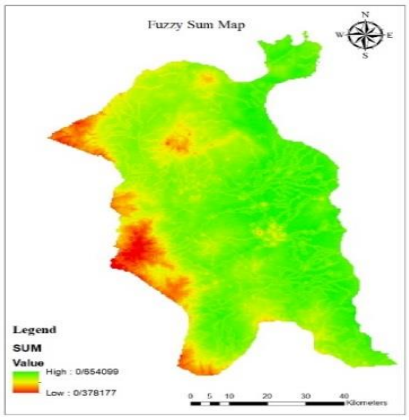
شکل ۱۱. نقشه فازی.



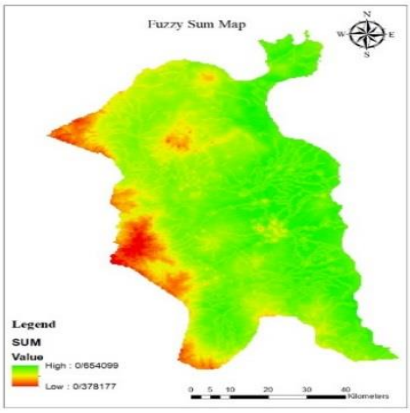
شکل ۱۲. نقشه فازی.



شکل ۱۳. نقشه فازی پارک.



شکل ۱۴. نقشه‌ی جمع فازی (Sum).



شکل ۱۵. نقشه‌ی ضرب فازی (Product).

در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، نقشه‌ی فازی دو عملگر جمع و ضرب فازی مشاهده می‌شود.

۶.۳ تحلیل نقشه نهایی عملگر گامای فازی

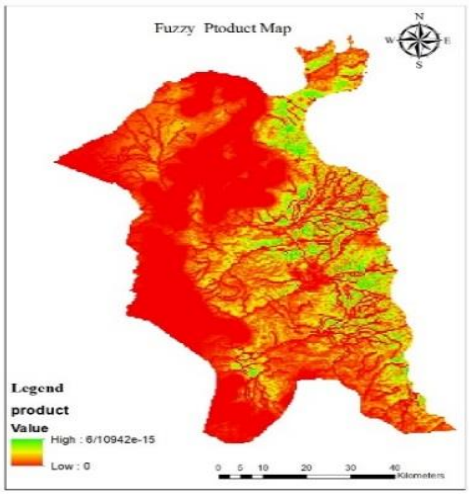
عملگر گاما به ترتیب برای اصلاح حساسیت بالا و پایین دو عملگر ضرب و جمع فازی و ایجاد سازگاری، بین گرایش‌های افزایشی و کاهشی آن‌ها در تعیین نقشه‌ی نهایی به‌کار گرفته می‌شود. گامای صفر معادل ضرب و گامای ۱، معادل جمع فازی است. از این رو نقشه‌ی نهایی گامای فازی ۰/۹ در شکل ۱۶ به‌عنوان نقشه‌ی بهینه دکل‌های مخابراتی تلفن همراه انتخاب شده است. در شکل ۱۶، نقشه‌ی مناطق مناسب برای احداث دکل‌های مخابراتی تلفن همراه به ۵ دسته با ارزش‌های بین ۰ و ۱ تقسیم شده‌اند. مناطق قرمز با ارزش صفر، نامناسب‌ترین و مناطق سبز با ارزش بین ۰/۰۲۵-۰/۲۲، مناسب‌ترین مناطق هستند که در کلاس فازی خیلی خوب (عدد ۱) قرار می‌گیرند.

در شکل ۱۷، نقشه‌ی بهینه‌ی نهایی دکل‌های مخابراتی تلفن همراه از طریق نرم‌افزار ArcGis و افزونه‌ی Google Earth تهیه شده است.

در ادامه، در شکل ۱۸، محدوده‌ی تحت پوشش دکل‌های مخابراتی در ۵ بخش مختلف شهرستان ارومیه با توجه به نقشه‌ی نهایی مشاهده می‌شود.

۴. نتایج

در پژوهش حاضر، تلفیق ابزارهای نرم‌افزار GIS با روش تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی BWM باعث شناسایی مکان‌های بهینه شده است. نتایج نشان



شکل ۱۶. نقشه‌ی طبقه‌بندی نهایی (Gamma0.9) .

داده‌اند که در بخش‌های غربی شهرستان ارومیه، امکان نصب دکل‌ها محدود است و بهترین نقاط، در مناطق شرقی نزدیک دریاچه‌ی ارومیه قرار دارند. نقشه‌ی نهایی در شکل ۱۸، مناطق بهینه را نشان می‌دهد، که بیشترین مناطق مناسب در شمال شرق، شرق، و جنوب ارومیه و همچنین در بخش‌های انزل و نازلو واقع شده‌اند. مناطق مذکور، ارتفاع و شیب کمتری دارند و در فاصله‌ی مناسبی از رودخانه‌ها و جاده‌ها قرار دارند. در مقابل، مناطق نامناسب عمدتاً در صومای و سیلوانه در محدوده‌ی گسل با ارتفاع‌ها و شیب‌های زیاد واقع شده‌اند.

هر چند با وجود روستاها در مناطق اخیر، شرکت‌های مخابراتی باید طبق برنامه-ریزی‌های سازمان مدیریت بحران، سیستم‌های مخابراتی مقاوم و پایدار را در آنجا ایجاد کنند. توصیه می‌شود که مدیران شرکت‌های فعال در حوزه‌ی ساخت و راه‌اندازی دکل‌های مخابراتی از روش‌های ارائه‌شده در پژوهش حاضر برای شناسایی مناسب‌ترین مکان‌ها جهت احداث دکل و پوشش‌دهی نقاط کور بهره‌برداری کنند. با این حال، در عمل بهتر است که تمامی معیارهای توسعه‌ی پایدار (اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی، و سیاسی) که برای احداث زیرساخت‌های حیاتی، مانند دکل‌های تلفن همراه ضروری هستند، به‌طور همزمان مدنظر قرار گیرند. پیشنهاد می‌شود که مدیران، استانداردها و معیارهای واضح در تعیین مکان دکل‌های مخابراتی را به‌صورت کلاس‌های آموزشی برای کارکنان تدوین کنند. همچنین، مدیران شرکت‌های مخابراتی باید با مقام‌های محلی و سازمان‌های مرتبط در ارتباط باشند، تا نیازها و محدودیت‌های محلی را که شامل تمامی عوامل زیست‌محیطی، کاربری اراضی، شهرسازی، تاریخ و فرهنگ، ایمنی و حمل و نقل می‌شود، بررسی و رعایت کنند.

References- منابع

1. Farahani, R.Z., Fallah, S., Ruiz, R., Hosseini, S. and Asgari, N., 2019. OR models in urban service facility location: A critical review of applications and future developments. *European journal of operational research*, *276*(1), pp.1-27. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.036.

2. Hoomod, H.K., Al-Mejibli, I. And IssaJabboory, A.,2017, March. Optimizing SOM for cell towers distribution. *In 2017Annual Conference on New Trends in Information & Communications Technology Applications (NTICT)* pp. 138-143. IEEE. doi:10.1109/NTICT.2017.7976136.

3. Dilpriya, T.A.H., Lanel, G.H.J. and Vidanage, B.V.N.C., 2022. A Strategy Strengthen and Enhance the Telecommunication Network in Sri Lanka by Using Concepts of Graph Theory and Linear Programming Models. *International Journal of Natural Sciences Research*,*10* (1), pp.1-20. doi:10.18488/63.v10i1.2913.

4. Dutta, M.A., 2012, March. Optimization problems and techniques. *In* 2012 2nd *National Conference on Computational Intelligence and Signal Processing (CISP)* (pp. 26 26).IEEE.doi: 10.1109/NCCISP.2012 6189674.

5. Kranda, Y. and Şamli, R., 2021. A hybrid algorithm for changepoint aware long- term seasonality detection of mobile network base stations. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi,* (27), pp.370-385. https://doi.org/10.31590/ejosat.931099.

6. Amponsah, E., Takyi, S.A., Asibey, M.O. and Amponsah, O., 2022. Assessing the level of compliance of telecommunication masts to locational planning standards towards harmonious an orderly city growth. *Cities & Health,* *6*(4), pp.777-790. https://doi.org/10.1080/23748834.2021.1956837.

7. Premarathne, B.M.N., Bamunusinghe, B.K.A.C. and Malavipathirana C.G., 2021. An Analysis of Suitable Location for Establishing Telecommunication Tower at Sir John Kotelawala Defence University, Southern Campus. http://ir.kdu.ac.lk/handle/345/5165.

8. Amadasun, K.N., Short, M., Shankar Priya, R. and Crosbie, T., 2021.Transitioning to Society 5.0 in Africa: Tools to support ICT infrastructure sharing. *Data*, *6*(7), p.69. https://doi.org/10.3390/data6070069.

9. Hobobeh, M. 2016. Locating telecommunication masts for radio network coverage (Mazandaran seashores), Master's thesis in the field of geography and urban planning, Mazandaran University. https://elmnet.ir/doc/11251375-94084. [In Persian].

10. Mohammadi, Sh., Heydari, M.T., Tahmasabi Moghadam, H., 2020. Environmental health monitoring with optimal location of mobile phone towers, case study: (Region 1 of Zanjan City Municipality):*Quarterly Journal of Geography and Urban-Regional Studies, 10th year, number 35*, pp. 142-127. doi: 10.22111/gaij.2020.5567.[In Persian].

11. Mauludiyanto, A. and Pranata, Y.D., 2019. Planning of number and location of new Base Transceiver Station (BTS) tower in mobile telecommunication system in jombang using analytical hierarchy process method and geographic information system approach. *JAREE (Journal on Advanced Research in Electrical Engineering)*, *3*(2). doi:10.12962/j25796216.v3.i2.87.

12. Tayal, S., Vijay, S. and Garg, P.K., 2023. Multistage Optimized Site Suitability Modeling for Base Transceiver Station Placement in Pithoragarh District of Uttarakhand Using Spatial Analyst and Fuzzy Logic Toolbox. *Journal of the Indian Society*

of Remote Sensing, *51*(4), pp.743-756. doi: 10.1007/s12524-022-01662-0.

13. Akbarpour, H., Bozorgi Amir, A.,Alinejad, N., Akbarpour, M.,2019. *strengthening and covering mobile masts in order to stand up during natural disasters. Industrial Management Studies, 17*(53), pp. 159-184. https://doi.org/10.22054/jims.2018.14541.1525. [In Persian].

14. Tawhidi Nasab, P., Sidboir, S., Tayibi Iraqi, M.E., 2015. Providing A direction model Location of telecommunication antennas considering capacity limitation and non-deterministic demand of subscribers.https://civilica.com/doc/566406. [In Persian].

15. Maleki, H.R. and Karimidehkordi, E., 2016. Mobile base stations location problem to fortification against natural disasters: A fuzzy approach. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 30*(3), pp.1421- 1427. https://doi.org/10.3233/IFS-152055.

16. Goodarzian, F., Bahrami, F. and Shishebori, D., 2022. A new location-allocation-problem for mobile telecommunication rigs model under crises and natural disasters: a real case study. *Journal of ambient intelligence and humanized computing*, pp.1-19. https://doi.org/10.1007/s12652-021-03461-w.

17. Muharram, M.F. and Suyanto, S., 2020, December. Firefly algorithm-based optimization of base transceiver station placement. *In 2020 3rd International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)*, pp. 467-470. IEEE. doi:10.1109/ISRITI51436.2020.9315462.

18. Safwani, E., Firdausi, A. and Hakim, G., 2021. Tower planning and arrangements mobile telecommunication district central Aceh with methode fuzzy clustering. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, *2*(1), pp.7-11. http://doi.org/10.18196/jrc.2144.

19. Almoghathawi, Y., Obaid, H.B. and Selim, S., 2024. Optimal location of base stations for cellular mobile network considering changes in users locations. *Journal of Engineering Research*.https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.04.020.

20. Iran Statistics Center.,2015**.** General Population and Housing Census.www.sarshomari95.ir.

21. Sadjadi, S. and Karimi, M., 2018. Best-worst multi-criteria decision-making method: A robust approach. *Decision Science Letters*, *7*(4), pp.323-340. doi: 10.5267/j.dsl.2018.3.003.

22. Rezaei, J., 2015. Best-worst multi-criteriadecision-making method. *Omega*, *53*, pp.49-57. https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009.

23. Valášková, K., Klieštik, T. and Mišánková, M., 2014, January. The role of fuzzy logic in decision making process. In 2014 2*nd international conference on management innovation and business innovation Vol. 44, No. 1,* pp. 143-148.doi: 10.5729/lnms.vol44.143.

24. Darag, A., Yazdani, S., and Dargahi, M.M., 2017. *Applied GIS training in physical development simulation Tehran*: Satellite Publications pp.153-156.https://www.ketabrah.ir/.[In Persian].

25. Fallah-Ghalhary, G.A., Mousavi-Baygi, M. and Nokhandan, M.H., 2009. Annual rainfall forecasting by using mamdani fuzzy inference system. *Research Journal of Environmental Sciences*, *3*(4), pp.400-413.doi: 10.3923/rjes.2009.400.413.

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2025), 41(1), 39-56

Sharif University of Technology

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

Research Article

Investigating Big Data Investment in a Three-Level Green Supply Chain: A Game Theoretic Approach

Zahra Esmaeeli [1], Naser Mollaverdi [1] and Soroush Safarzadeh*[2]

[1] Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
[2] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering Science, Quchan University of Technology, Quchan, Iran
* corresponding author: (s.safarzadeh@qiet.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:20 January 2024

Revised:8 June 2024

Accepted:24 June 2024

Keywords:

Metallic yield damper,
hysteresis behavior,
hourglass pin,
experimental study,
nonlinear behavior.

Abstract

In recent decades, the rapid and remarkable advancements in technology have sparked significant interest in the potential of big data and the extraction of valuable insights and information from it. This has led to a surge in the utilization of big data analytics across various industries, including supply chain management. In this paper, our focus is on evaluating the dynamics of a three-level supply chain, which encompasses a retailer, manufacturer, and supplier, within different power structures. Notably, the members of this supply chain have made substantial investments in big data analytics and are reaping the benefits of these investments accordingly.

In our quest to gain a deeper understanding of the feasibility conditions and factors that impact big data investment within different power structures, we have meticulously examined the problem model in two distinct cases: one with big data investment and another without it. Our findings reveal that the direct impact of investment efficiency and cost improvement coefficient plays a significant role in determining the feasible limits of big data investment for all members of the supply chain. Furthermore, our research demonstrates that big data investment has a positive and far-reaching effect on the equilibrium profit of members. This leads to an increase in the equilibrium price of products, as well as an enhancement in the equilibrium level of green innovation and product quality across all power structures.

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 that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors contribution statement

Zahra Esmaeeli: Conceptualization, Methodology, Software, Data curation, Writing - original draft, Visualization, Investigation.
Naser Mollaverdi: Supervision, Validation, Project administration.
Soroush Safarzadeh: Conceptualization, Methodology, Validation, Writing - review & editing.

To Cite this article:
Esmaeeli, Z., Mollaverdi, N. and Safarzadeh, S. 2025. Investigating big data investment in a three-level green supply chain: a game theoretic approach, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, 41(1), 39-56.
https://doi.org/ 10.24200/j65.2024.63579.2380

مجله علمی مهندسی صنایع و مدیریت شریف

https://sjie.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

بررسی سرمایه‌گذاری کلان‌داده در یک زنجیره‌ی تأمین سبز سه‌سطحی: رویکرد نظریه بازی

زهرا اسماعیلی [۱]، ناصر ملاوردی [۱] و سروش صفرزاده [۲*]

[۱] دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

[۲] گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی علوم فنی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران.

*نویسنده مسئول (s.safarzadeh@qiet.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۱۰/۳۰

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۳/۱۹

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۴/۰۴

واژگان کلیدی:

سرمایه‌گذاری کلان‌داده،

زنجیره‌ی تأمین سبز،

کیفیت محصول،

نوآوری سبز،

نظریه‌ی بازی.

چکیده

پیشرفت‌های شگرف تکنولوژی در دهه‌های اخیر توجه بسیاری را به سمت کلان‌داده‌ها و استخراج دانش و اطلاعات مفید از آن‌ها جلب کرده است. در پژوهش حاضر، یک زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی، شامل: خرده‌فروش، تولیدکننده، و تأمین‌کننده در ساختارهای مختلف قدرت ارزیابی شده است. اعضاء زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی در تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده سرمایه‌گذاری می‌کنند و متناسب با آن از مزایای آن بهره می‌برند. به‌منظور بررسی شرایط شدنی و عوامل تأثیرگذار در سرمایه‌گذاری کلان‌داده در ساختارهای مختلف قدرت، مدل مسئله در دو حالت سرمایه‌گذاری کلان‌داده و بدون آن بررسی شده است. نتایج حاکی از تأثیر مستقیم میزان کارایی سرمایه‌گذاری و ضریب بهبود هزینه در حدود شدنی سرمایه‌گذاری کلان‌داده برای کل اعضاء زنجیره است. همچنین یافته‌ها نشان می‌دهند که سرمایه‌گذاری کلان‌داده موجب بهبود سود تعادلی اعضا، افزایش قیمت تعادلی محصولات، افزایش سطح تعادلی نوآوری سبز و کیفیت محصولات در همه‌ی ساختارهای قدرت شده است.

۱. مقدمه

امروزه شرکت‌ها به لطف تحولات فناوری‌های دیجیتال، تقریباً با حجم عظیمی از داده‌ها در مورد مشتریان، تأمین‌کنندگان، بازارهای بالقوه و عملیات خود مواجه هستند و میلیون‌ها حسگر شبکه‌ای در دنیای فیزیکی در دستگاه‌هایی مانند:تلفن‌های همراه و خودروها و ... تعبیه شده‌اند، که می‌توان از داده‌های تولیدی آن‌ها استفاده کرد. استفاده از همه‌ی داده‌های مذکور ضروری است و می‌تواند مزیت رقابتی برای شرکت به ارمغان آورد. اکنون بخشی از هر سازمان و عملکرد اقتصاد جهانی را کلان‌داده‌هایی تشکیل می‌دهند که قابلیت جمع‌آوری، ذخیره، و تحلیل دارند. امکانات استفاده از کلان‌داده به سرعت در حال تکامل هستند؛ این پیشرفت‌ها ناشی از نوآوری در فناوری‌های اساسی، پلتفرم‌ها، قابلیت‌های تحلیلی برای مدیریت داده‌ها و تکامل رفتار در میان کاربرانی است که روز به روز بیشتر درگیر زندگی دیجیتالی می‌شوند. امروزه تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده به یک عامل مهم برای عملیات زنجیره‌ی تأمین تبدیل شده است. درک بهتر اولویت‌های مصرف‌کننده، پیش‌بینی دقیق نیازهای مشتریان، بهره‌وری و ارزیابی ریسک زنجیره تأمین، قابلیت ردیابی زنجیره تأمین، بهبود زمان واکنش و تحویل سفارش به چرخه، اندازه‌گیری و ارزیابی تأثیر مالی تصمیم‌های قبل از اجرا، مدیریت موجودی، توزیع و تدارک‌های بهتر، ایجاد پروفایل‌های جامع از تأمین‌کنندگان و فراهم‌ساختن فضای مذاکره‌های کارآمدتر با آنان و تسریع و تسهیل فرآیندهای مدیریت زنجیره تأمین سبز از جمله مواردی هستند که از طریق تجزیه‌وتحلیل داده‌های مرتبط با آن، فرصت‌هایی را برای مدیریت زنجیره تأمین فراهم کرده است.[۱] در دنیای واقعی نیز شرکت‌های بسیاری از مزایای تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده برای کسب و کار و زنجیره تأمین خود بهره گرفته‌اند؛ که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به: آمازون، نتفلیکس و گوگل اشاره کرد.[۲ و ۳] به‌عنوان مثال، آمازون از داده‌های مشتریان، سفارش‌ها، رفتار مشتریان، و سایر فعالیت‌های آنلاین برای بهبود تجربه‌ی خرید مشتریان استفاده می‌کند. این شرکت از الگوریتم‌های پیشرفته برای پیشنهاد محصولات، بهینه‌سازی موجودی، و بهبود فرآیندهای خود استفاده می‌کنند. شرکت‌های پیشرو لجستیک مانند شرکت پست ایالات متحده‌ی آمریکا (UPS)[۱] نیز گام‌هایی در زمینه‌ی کلان‌داده برداشته‌اند، تا رقابت خود را در مدیریت زنجیره تأمین و لجستیک جهانی افزایش دهند. بدین منظور گزارش شده است که شرکت UPS، سالانه ۱ میلیارد دلار برای تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده هزینه می‌کند تا تجارت حمل‌ونقل را تغییر دهد و هزینه های سوخت

[1] United Parcel Service

استناد به این مقاله:

اسماعیلی، زهرا، ملاوردی، ناصر و صفرزاده، سروش، ۱۴۰۴. بررسی سرمایه‌گذاری کلان‌داده در یک زنجیره‌ی تأمین سبز سه‌سطحی: رویکرد نظریه‌ی بازی. مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۴۱(۱)، صص. ۳۹-۵۶. https://doi.org/10.24200/j65.2024.63579.2380

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

و شرکت را کاهش دهد.[۴] شرکت والمارت نیز به‌عنوان یکی از شرکت‌های بزرگ دنیا، از طریق تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده به موفقیت چشمگیری در زنجیره تأمین دست یافته است؛ و از داده‌های فروش، موجودی، تقاضا، و عملکرد تأمین‌کنندگان برای بهینه‌سازی موجودی، پیش‌بینی تقاضا، و بهبود عملکرد زنجیره‌ی تأمین خود استفاده می‌کند.[۵]

در سال‌های اخیر، تشدید مشکلات زیست‌محیطی در سراسر جهان، توجه بیش از پیش سیاست‌گذاران و مردم را به مسائل زیست‌محیطی جلب کرده است. در این راستا، به فعالیت‌هایی که منجر به سبزسازی و پایداری عملیات زنجیره‌ی تأمین می‌شوند، بسیار توجه شده است؛ تا جایی که در بسیاری از کشورها، ایجاد و اجرای مدیریت زنجیره‌ی تأمین سبز، یکی از وظایف راهبردی توسعه‌ی شرکت‌هاست.[۶] در این بین، مطابق پژوهش‌های اخیر، کلان‌داده‌ها و تجزیه‌وتحلیل آن‌ها به‌عنوان یکی از ابزارهای صنعت نسل چهار می‌تواند در مدیریت زنجیره‌ی تأمین سبز مؤثر مواقع شود. بنابراین، استفاده از تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده در موفقیت برنامه‌ریزی راهبردی سازمان به‌منظور دستیابی به اهداف سبز و پایدار شرکت‌ها کمک‌کننده است. این مسئله در راستای اهداف توسعه‌ی پایدار سازمان ملل است، که خواستار جمع‌آوری، پردازش، و توزیع انواع داده‌ها برای سیاست‌گذاری، نظارت، و ارزیابی پیشرفت مؤثر است.[۷] به‌منظور تسهیل فرآیندهای زنجیره‌ی تأمین سبز به ویژه در اقتصادهای نوظهور مانند هند و چین، شرکت‌ها برای مدیریت مسائل محیطی درون و بین شرکتی به‌طورگسترده‌ای از فناوری‌های دیجیتال مانند حسگرها و دستگاه‌های تشخیص هوشمند استفاده می‌کنند. همچنین تجزیه‌وتحلیل لحظه‌ای داده‌های مصرف انرژی و داده‌های انتشار کربن در محیط کلان‌داده به‌صورت پویا امکان‌پذیر است، که این موضوع بهینه‌سازی فرآیندهای تولید با هدف صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش انتشار را پشتیبانی می‌کند.[۸] کلان‌داده‌ها می‌توانند به ایجاد بینش‌های جدیدی در زمینه‌ی مسائل زیست‌محیطی کمک کنند. به این صورت که با کمک تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده می‌توان بخش‌ها و اعضاء یک زنجیره‌ی تأمین را، که فعالیت‌های آن‌ها ناپایدار است، شناسایی کرد و اقدامات اصلاحی انجام داد. همچنین به‌طورکلی نتایج نشان می‌دهند که تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده، پایداری زنجیره‌ی تأمین تولید را افزایش می‌دهد.[۹]

با توجه به آنچه تاکنون درباره‌ی آن بحث شده است؛ استفاده از تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده در بازار رقابتی امروز بسیار مهم است و می‌تواند نقش اساسی در بهینه‌سازی فرایندهای زنجیره و کاهش آثار زیست‌محیطی آن داشته باشد. با این حال، شرکت‌های بسیاری در برنامه‌ریزی برای پیاده‌سازی آن با مشکل مواجه هستند. بنابراین هدف پژوهش حاضر، ارائه‌ی بینش‌های مدیریتی در زمینه‌ی سرمایه‌گذاری کلان‌داده و شرایط بهینه و شدنی سرمایه‌گذاری در ساختارهای مختلف قدرت زنجیره‌ی تأمین است.

تا جایی که بررسی‌ها نشان می‌دهند، مدل‌های ریاضی در نظر گرفته‌شده در پژوهش‌های پیشین کاملاً به ارزش افزوده‌ای که سرمایه‌گذاری کلان‌داده می‌تواند برای مشتریان و سازمان داشته باشد، نپرداخته‌اند. همچنین بیشتر مطالعات به بررسی زنجیره‌ی تأمین در دو سطح تولیدکننده و خرده‌فروش محدود شده‌اند. در حالی که افراد بیشتری در یک زنجیره‌ی تأمین کالا و خدمات دخیل هستند و این شرایط می‌تواند در سود اعضا و متغیرهای تصمیم آن‌ها تأثیرگذار باشد. لذا، پژوهش حاضر، یک زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی، شامل یک خرده‌فروش، یک تولیدکننده، و یک تأمین‌کننده‌ی سبز در محیط کلان‌داده را در نظر گرفته است. پژوهش حاضر به این سؤال‌ها پاسخ داده است:

- چگونه ساختارهای مختلف قدرت زنجیره‌ی تأمین در محیط کلان‌داده در متغیرهای تعادلی تصمیم و سود تعادلی اعضا تأثیر می‌گذارند؟
- شرایط شدنی سرمایه‌گذاری کلان‌داده در ساختارهای مختلف قدرت به چه صورت است؟
- چه عواملی سبب افزایش سرمایه‌گذاری کلان‌داده در زنجیره‌ی تأمین و چه عواملی تأثیر منفی در سرمایه‌گذاری کلان‌داده دارند؟

برای پاسخ‌گویی به سؤال‌های پژوهش، یک مسئله‌ی نظریه‌ی بازی در سه سطح خرده‌فروش، تولیدکننده، و تأمین‌کننده در شرایط سرمایه‌گذاری کلان‌داده در نظر گرفته شده است. علاوه‌بر این، به‌منظور بررسی شرایط شدنی سرمایه‌گذاری در ساختارهای مختلف قدرت، دو حالت سرمایه‌گذاری کلان‌داده و بدون سرمایه‌گذاری ارزیابی شده است. سپس، راه‌حل‌های بهینه با استفاده از تحلیل پارامتری و عددی به تفصیل تحلیل و پیشنهادهای مدیریتی متناسب با آن ارائه شده است. مطالعه‌ی حاضر به این شرح سازماندهی شده است:

در بخش دوم، آثار علمی و مشارکت های نوشتار حاضر و در بخش سوم، فرمول مسئله و سناریوها ارائه شده‌اند. در بخش چهارم، نتایج به‌دست‌آمده و تحلیل حساسیت یک مثال عددی با جزئیات توضیح داده شده است. نهایتاً، نتیجه‌گیری، بینش‌ها و پیشنهادهای مدیریتی در بخش پنجم جمع‌بندی شده‌اند.

۲. مرور ادبیات موضوع

استفاده‌ی نادرست و بی‌رویه از منابع طبیعی و ایجاد آلاینده‌ها و مواد شیمیایی خطرناک و در پی آن گرم‌ترشدن کره‌ی زمین، محیط‌زیست و آینده‌ی زندگی انسان و کره‌ی زمین را به شدت در معرض خطر قرار داده است. با افزایش آگاهی‌های زیست‌محیطی، بسیاری از مردم و سیاست‌گذاران در مورد مسئله‌ی اخیر نگران‌اند و قوانین و سیاست‌هایی نیز در این خصوص به‌وجود آمده است. توجه و سرمایه‌گذاری در نوآوری سبز نیز یکی از راه‌هایی است که علاوه‌بر اینکه عواقب زیست‌محیطی تولیدهای شرکت‌ها را به میزان کمینه می‌رساند، به واسطه‌ی نوآوری‌های صورت‌گرفته در فرآیندها و محصولات می‌تواند مشتریان بیشتری را جذب کند و رضایت هر چه بیشتر آن‌ها را در پی داشته باشد. در همین راستا، لی[1] و همکاران (۲۰۲۰)، با به‌کارگیری اصول چانه‌زنی بازی نش و تجزیه‌وتحلیل مدل بازی تکاملی، مکانیسم‌های شکل‌گیری و اجرای همکاری برای ایجاد نوآوری را بین سازنده و تأمین‌کننده بررسی کرده‌اند.[۱۰] ما[2] و همکاران (۲۰۱۹)، نیز به بررسی اولویت‌های شرکت‌ها برای نوآوری سبز طی یک بازی سه نفره در زنجیره تأمین پرداخته‌اند. سناریوی بازی به این صورت بوده است که در آن دولت یارانه‌هایی به ازاء قیمت، نوآوری، یا هر دو به تولیدکننده و خرده‌فروش ارائه کرده و سپس همکاری تولیدکننده و خرده‌فروش با استفاده از قراردادهای تقسیم درآمد و تقسیم هزینه ارزیابی شده است.[۱۱] در این بین، تأمین‌کنندگان نیز به‌عنوان یکی از اعضاء کلیدی زنجیره‌ی تأمین می‌توانند نقش مؤثری در اجرای پروژه‌های سبزسازی ایفا کنند. تعداد نمونه‌های زیادی وجود دارد که نشان می‌دهد شرکت‌هایی که عموماً خود در فعالیت‌های

[1] Li

[2] Ma

زیست‌محیطی فعال هستند، تأمین‌کنندگان خود را از نظر ابتکارهای پایداری ارزیابی می‌کنند.[۱۲ و ۱۳] سیورینگ و مولر[۳] (۲۰۰۸)، نیز آموزش کارکنان خریدار و تأمین‌کنندگان را به‌عنوان یک عامل حمایت‌کننده برای مدیریت زنجیره‌ی تأمین پایدار ارائه داده و مدیریت تأمین‌کننده را به‌عنوان راهی برای مدیریت ریسک‌های پایداری و عملکرد شناسایی کرده‌اند.[۱۴]

از سوی دیگر، مطابق برخی مطالعات پیشین، کلان‌داده‌ها و تجزیه‌وتحلیل آن به‌عنوان یکی از ابزارهای صنعت نسل چهار می‌تواند در مدیریت زنجیره‌ی تأمین سبز مؤثر مواقع شود. نیسار[۴] و همکاران (۲۰۲۲)، با دیدگاه کلان‌داده به بررسی عملکرد مدیریت زنجیره‌ی تأمین پایدار در دوران پس از کووید ۱۹ در اقتصادهای در حال ظهور پرداخته و دریافته‌اند که قابلیت‌های تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده‌ها به‌طور قابل‌توجهی به مدیریت ریسک زنجیره‌ی تأمین و توسعه‌ی محصول سبز نوآورانه کمک می‌کند؛ و درنهایت، نوآوری و عملکرد یادگیری را افزایش می‌دهد.[۱۵] الخطیب[۵] (۲۰۲۲) نیز با استفاده از روش معادلات ساختاری و تحلیل ۴۲۰ داده از بخش تولید مواد غذایی و نوشیدنی در اردن و تجزیه‌وتحلیل داده‌های آن، از یک رابطه‌ی مثبت بین قابلیت‌های تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده‌ها و عملکرد زنجیره تأمین سبز و همچنین اثر واسطه‌ای نوآوری سبز پشتیبانی کرده است.[۱۶] در راستای تأیید نقش تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده در زنجیره‌ی تأمین سبز، بگ[۶] و همکاران (۲۰۲۰) نیز در مطالعه‌ای به ارزیابی نقش قابلیت تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده به عنوان یک رویکرد تعالی عملیاتی در بهبود عملکرد زنجیره‌ی تأمین پایدار پرداخته و با استفاده از پاسخ‌های ۵۲۰ مدیر معدن در آفریقای جنوبی و مدل‌سازی معادله‌های ساختاری نشان داده‌اند که قابلیت‌های مدیریت تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده‌ها، تأثیر قوی و قابل‌توجهی در توسعه‌ی محصول سبز نوآورانه و نتایج زنجیره‌ی تأمین پایدار دارند.[۱۷]

وجود رقابت شدید در کسب و کارهای امروزی سبب شده است تا شرکت‌ها از هر فرصتی برای به‌دست‌آوردن مزیت رقابتی نسبت رقبا استفاده کنند. کیفیت محصول و تجربه‌ی مشتری از عوامل مهمی هستند که می‌توانند معادله‌های رقابتی بازار را تغییر دهند و بی‌توجهی به آن‌ها می‌تواند شرکت را از چرخه‌ی رقابت حذف کند. لذا، نوشتارهای متعددی به مسئله‌ی کیفیت محصولات از جمله کیفیت درک‌شده،[۱۸] و عوامل تأثیرگذار در کیفیت محصول،[۱۹] پرداخته‌اند. مطلق و همکاران (۲۰۱۹)، نیز در پژوهشی با رویکرد نظریه‌ی بازی، تصمیم‌های قیمت‌گذاری و بهبود کیفیت در زنجیره‌ی تلفن همراه را بررسی کرده‌اند.[۲۰] همچنین، شعله[۷] و همکاران (۲۰۱۹)، با درنظرگرفتن سطوح قیمت و کیفیت به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در یک زنجیره‌ی تأمین سه‌طبقه متشکل از: یک تأمین‌کننده، یک تولیدکننده، و یک خرده‌فروش، مسئله‌ی تبلیغات مشارکتی عمودی را بررسی کرده‌اند.[۲۱]

سرمایه‌گذاری در تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده نیز در بهبود تجربه‌ی مشتری،[۲۲] و کنترل و پیش‌بینی نقص‌های کیفی محصولات و در نتیجه ارتقاء کیفیت محصولات،[۲۳] می‌توانند مؤثر واقع شوند. در همین راستا، پژوهش‌هایی از تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده برای مدیریت تجربه‌ی مشتری استفاده کرده‌اند.[۲۴ و ۲۵] در دهه‌های اخیر و با افزایش اهمیت کلان‌داده‌ها در زنجیره‌ی تأمین، مطالعات بسیاری به حوزه‌ی مذکور روی آورده‌اند. ژانگ و همکاران، تحولات جاری کلان داده‌ها برای مدیریت زنجیره تأمین را در سراسر جهان از جمله آمریکای شمالی، اروپا و منطقه آسیا و اقیانوسیه مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند و چالش‌ها، فرصت‌ها و چشم‌انداز زنجیره تأمین در محیط کلان داده بررسی کرده‌اند..[۴] همچنین چارچوبی برای نحوه‌ی استفاده از کلان‌داده‌ها برای هدایت زنجیره‌ی تأمین ارائه شده است.[۲۶] لیو[۸] (۲۰۱۹)، قوانین قیمت‌گذاری و هماهنگی در یک زنجیره‌ی تأمین کم‌کربن را با درنظرگرفتن ورودی‌های کلان‌داده و تبلیغات هدفمند بحث و بررسی کرده است.[۲۷] راهبردهای‌های قیمت‌گذاری در یک زنجیره‌ی تأمین دوسطحی با درنظرگرفتن ورودی‌های درجه‌ی سبز محصول و تبلیغات هدفمند در عصر کلان‌داده نیز توسط لیو و همکارش (۲۰۱۷) ارزیابی شده است.[۲۸] همچنین لیو (۲۰۲۱)، قوانین قیمت‌گذاری در زنجیره‌ی تأمین سبز با ورودی‌های کلان‌داده و سرمایه‌گذاری پژوهش و توسعه‌ی درجه‌ی سبز محصولات را بررسی و مدل اشتراک هزینه را نیز به‌منظور کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری کلان‌داده و پژوهش و توسعه، تجزیه‌وتحلیل کرده است.[۶] چن[۹] (۲۰۲۱)، تجزیه‌وتحلیل راهبرد سفارشی‌سازی برای عملیات تجارت الکترونیک را براساس کلان‌داده‌ها بررسی کرده و به‌منظور بهبود کارایی سفارشی‌سازی و کاهش هزینه‌ی سفارشی‌سازی در محیط کلان‌داده، قرارداد اشتراک هزینه، مکانیسم قیمت‌گذاری، مدل هتلینگ، و ابزارهای نظریه‌ی بازی و روش‌های پژوهش را برای تجارت الکترونیک به‌کار برده است.[۲۹] سانگ[۱۰] و همکاران (۲۰۲۲)، با توسعه‌ی مدل‌های نظریه‌ی بازی، تأثیر سرمایه‌گذاری اعضاء زنجیره‌ی تأمین در خدمات کلان‌داده را در سود اعضا بررسی کرده و ساختار پژوهش ایشان، زنجیره‌ی تأمین دو کاناله‌ی متشکل از یک تولیدکننده و یک خرده‌فروش بوده است. ایشان، سرمایه‌گذاری خدمات کلان‌داده‌ی هر کدام از اعضا را بر یک کانال یا هر دو کانال ارزیابی و نتایج حاصل بر سود اعضا را تحلیل کرده و پیشنهادهای مدیریتی و روشنگری‌هایی ارائه داده‌اند.[۳۰] لیو و همکاران (۲۰۲۲)، در پژوهش دیگری قوانین قیمت‌گذاری در زنجیره‌ی تأمین سبز دو کاناله‌ی رقابتی را با ورودی‌های کلان‌داده و سرمایه‌گذاری پژوهش و توسعه، بررسی و تابع تقاضای بازار متناسب با دو کانال سنتی و آنلاین و وفاداری مشتریان به هر کانال را به روزرسانی کرده‌اند.[۳۱] همچنین، لیو و همکارانش (۲۰۲۰)، تصمیم سرمایه‌گذاری و هماهنگی زنجیره‌ی تأمین سبز کشاورزی را با درنظرگرفتن خدمات اطلاعاتی مبتنی بر بلاک چین و کلان‌داده و با استفاده از روش نظریه‌ی بازی بررسی و در این خصوص، قرارداد تقسیم هزینه و درآمد را برای هماهنگ‌کردن زنجیره‌ی تأمین ارزیابی کرده‌اند.[۳۲] هیو[۱۱] و همکاران (۲۰۲۲)، نیز با استفاده از نظریه‌ی بازی به بررسی تصمیم‌گیری‌ها و مسائل هماهنگی یک زنجیره‌ی تأمین سبز پرداخته‌اند، که در آن خرده‌فروش آنلاین، تبلیغات هدفمند کلان‌داده‌ها را انجام می‌داده است. ایشان یک مدل متمرکز و دو مدل بازی استکلبرگ به رهبری خرده‌فروشی آنلاین و تولیدکننده را بررسی و دو قرارداد قیمت عمده‌فروشی صفر و قیمت عمده‌فروشی حریصانه جهت ایجاد هماهنگی در زنجیره را ارزیابی کرده‌اند.[۳۳] درنهایت، خلاصه‌ای از ادبیات موضوع در جدول ۱ ارائه شده است.

[3] Seuring & Müller
[4] Nisar
[5] Al- Khatib
[6] Bag
[7] Shoeleh
[8] Liu
[9] Chen
[10] Song
[11] Hu

جدول ۱. جمع‌بندی ادبیات موضوع پژوهش حاضر.

Different power structures	Game Theory	Supply chain members			Customer experience	Product quality	Green innovation	Big data investment	Year	Paper
		Supplier	retailer	Manufacturer						
	✓		✓	✓				✓	2019	P. Liu
		✓		✓				✓	2021	S. Chen
							✓	✓	2022	Al-Khatib
	✓		✓	✓		✓			2019	Hosseini-Motlagh, et al
							✓	✓	2022	Nisar, et al
	✓		✓	✓				✓	2022	P. Liu & Zhang
			✓	✓				✓	2020	P. Liu, et al
✓	✓		✓	✓				✓	2022	Hu, et al
	✓		✓	✓				✓	2022	Song, et al
	✓	✓		✓			✓		2020	Li, et al
							✓	✓	2020	Bag, et al
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		Current research

بیشتر پژوهش‌های موجود در زمینه‌ی تأثیر کلان‌داده در زنجیره‌ی تأمین سبز به‌صورت کیفی و مفهومی ارائه شده‌اند. پژوهش‌های متمرکز بر قوانین قیمت‌گذاری زنجیره‌ی تأمین سبز در محیط کلان‌داده، سهم کمتری را به خود اختصاص داده و موارد نسبتاً کمی در مدل‌سازی مبحث سرمایه‌گذاری کلان‌داده در زنجیره‌ی تأمین سبز بررسی کرده‌اند و نحوه‌ی سرمایه‌گذاری، ساختار قدرت، و شرایط بهینه‌ی همکاری و هماهنگی در آن را به بحث گذاشته‌اند. مواردی هم که به مسئله‌ی مذکور پرداخته‌اند، به‌دلیل صرفه‌جویی در محاسبات و تحلیل راحت‌تر، عموماً زنجیره را در دو سطح تولیدکننده و خرده‌فروش بررسی و از بسیاری از عوامل اثرگذار در آن چشم‌پوشی کرده‌اند. درحالی که درنظرگرفتن زنجیره‌ی تأمین به‌صورت یک زنجیره‌ی دوسطحی توسط آگی[۱۲] و همکاران (۲۰۲۱)[۳۴] نیز به‌عنوان شکاف پژوهشی شناخته شده است. همچنین پژوهش‌هایی که با استفاده از ابزار نظریه‌ی بازی به بررسی سرمایه‌گذاری کلان‌داده در زنجیره‌ی تأمین پرداخته‌اند، کاملاً به ارزش افزوده‌ای که سرمایه‌گذاری مذکور می‌تواند برای مشتریان و سازمان داشته باشد، نپرداخته‌اند.

با توجه به مطالعات اخیر و اهمیت نقش تأمین‌کنندگان در زنجیره‌ی تأمین، در پژوهش حاضر یک زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی، شامل: یک خرده‌فروش، یک تولیدکننده، و یک تأمین‌کننده‌ی سبز در شرایط سرمایه‌گذاری کلان‌داده مدنظر بوده است؛ که تحت ساختارهای مختلف قدرت در زنجیره‌ی تأمین، سود تعادلی اعضا، و قیمت‌گذاری و شرایط سرمایه‌گذاری کلان‌داده بررسی شده‌اند. نوآوری‌های پژوهش حاضر با توجه به ادبیات موضوع به این شرح است:

۱- در پژوهش حاضر، با توجه به اهمیت نقش تأمین‌کننده در زنجیره‌ی تأمین و به‌خصوص فرآیندهای سبزسازی، یک زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی بررسی شده است.

۲- مطابق ادبیات موضوع، تأثیر سرمایه‌گذاری کلان‌داده در متغیرها و پارامترهایی که اصولاً تقاضا به آن حساس است، نظیر: کیفیت، نوآوری سبز، و تجربه‌ی مشتری از برند در نظر گرفته شده و تابع تقاضا مطابق آن به روز شده است.

۳- برای اولین بار در پژوهش حاضر، پارامتر حسن تجربه‌ی مشتری از برند به عنوان یکی از عوامل بهبودهنده‌ی تقاضا در نظر گرفته شده است.

٤- با توجه به نقش مؤثر رهبری زنجیره‌ی تأمین در سود تعادلی اعضا و مقادیر تعادلی متغیرهای هر سطح، بررسی ساختارهای مختلف قدرت و شرایط مؤثر در سرمایه‌گذاری کلان‌داده در آن‌ها بررسی شده است. در حالی که بیشتر پژوهش‌ها در حوزه‌ی مذکور، فقط به دو حالت متمرکز و غیرمتمرکز توجه داشته‌اند.

۳. تعریف مسئله

در بخش حاضر، ابتدا تعریف مسئله و مفروضات ارائه شده‌اند. سپس نمادهای استفاده‌شده در مطالعه‌ی حاضر تعریف و مدل‌سازی ریاضی تشریح شده است. در گام بعد نیز سناریوهای مختلف مسئله بررسی شده‌اند.

[12] Agi

۱.۳. بیان مسئله

در مسئله‌ی حاضر، یک زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی، شامل: یک خرده‌فروش، یک تولیدکننده، و یک تأمین‌کننده مدنظر بوده است. تأمین‌کننده، در نوآوری سبز و تولیدکننده، در کیفیت محصول سرمایه‌گذاری می‌کنند. همه‌ی اعضاء زنجیره در تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده سرمایه‌گذاری دارند و از مزایای آن بهره می‌برند. مزایای سرمایه‌گذاری کلان‌داده در پژوهش حاضر، شامل دو دسته‌ی بهبود در هزینه‌های نگهداری موجودی، تولید، و فروش،[۶ و ۳۵] هر یک از اعضا و بهبود تابع تقاضای کل زنجیره از طریق تأثیرگذاری مثبت در مؤلفه‌های مدنظر جامعه‌ی متقاضی بوده است. مشابه پژوهش لیو و همکارش (۲۰۱۸)،[۳۵] در مطالعه‌ی حاضر نیز اطلاعات کلان‌داده‌ی یک شرکت به اطلاعات کلان‌داده‌های داخلی و خارجی تقسیم شده است. مطابق ادبیات موضوع و با توجه به تأثیری که سرمایه‌گذاری مذکور در بهبود فرآیندها و برآورده‌سازی بهتر خواسته‌های مشتریان دارد، تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده از نوآوری سبز، بهبود کیفیت محصول، و حسن تجربه‌ی مشتری از برند پشتیبانی می‌کند. زنجیره‌ی تأمین مدنظر در مطالعه‌ی حاضر می‌تواند طیف گسترده‌ای از زنجیره‌های تأمین موجود در دنیای واقعی را شامل شود و اختصاص فقط یک زنجیره‌ی تأمین خاص مطرح نبوده است. زیرا تقریباً در همه‌ی زنجیره‌های تأمین می‌توان از سرمایه‌گذاری کلان‌داده استفاده کرد. همچنین موضوعاتی مانند کیفیت محصول و نوآوری سبز نیز در بسیاری از زنجیره‌های تأمین، اعم از مواد غذایی، دارویی، و خودروسازی می‌توانند موضوعیت داشته باشند.

۲.۳. مفروضات پژوهش

۱. تولیدکننده و تأمین‌کننده، سبز هستند. یعنی مسائل زیست‌محیطی برای آن‌ها اهمیت دارد و محصولات سازگار با محیط زیست‌تولید می‌کنند؛ به عبارتی، در تلاش‌اند تا فرایندهای تولید از لحاظ مصرف انرژی و انتشار کربن بهینه باشند و همچنین مواد مصرفی، کمترین آسیب به محیط‌زیست را داشته باشند.

۲. تولیدکننده و تأمین‌کننده و خرده‌فروش کاملاً منطقی و خنثی هستند. خنثی‌بودن به این معنا که ریسک‌پذیر یا ریسک‌گریز نیستند.

۳. تولیدکننده، ظرفیت تولید کافی دارد.

۴. تأمین‌کننده، ظرفیت کافی برای تولید مواد اولیه‌ی موردنیاز را دارد.

۵. فروش محصول انحصاری است.

۶. برای پیش‌بینی تقاضا و تولید محصولات موردنیاز مصرف‌کنندگان، لازم است اعضاء زنجیره، اطلاعات اولویت مصرف‌کننده را در اختیار داشته باشند.

۷. سرمایه‌گذاری کلان‌داده از سوی اعضاء زنجیره‌ی تأمین منجر به افزایش تقاضا از طریق تأثیرگذاری مثبت در مؤلفه‌های مد نظر جامعه و کاهش هزینه‌های داخلی هر کدام از اعضا می‌شود.

۸. توابع سرمایه‌گذاری نوآوری سبز و کیفیت محصول مطابق برخی پژوهش‌های پیشین،[۲۰ و ۳۶] به ترتیب به صورت $\frac{1}{2}hl_{ig}^2$ و $\frac{1}{2}z_1q_d^2$ بوده است.

۳.۳. پارامترها و متغیرهای مدل

پارامترها، متغیرهای تصمیم، و توابع استفاده‌شده در مدل به این شرح هستند:

- متغیرهای تصمیم

p : قیمت خرده‌فروشی (دلار)؛

W : قیمت عمده‌فروشی (دلار)؛

m : هزینه‌ی خرید قطعات یا مواد اولیه (دلار)؛

l_{ig} : سطح نوآوری سبز ($l_{ig} > 0$)؛

q_d : سطح کیفی محصولات ($q_d > 0$).

- پارامترهای مدل

a : پتانسیل بالقوه‌ی بازار (تعداد واحد محصول)؛

θ_0 : ضریب بهبود هزینه است، که با تجزیه‌وتحلیل اطلاعات کلان‌داده‌های داخلی و خارجی یک شرکت و استفاده از آن در برنامه‌ریزی امور می‌توان به کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی، نگهداری، و انبارداری شرکت و... کمک کرد. در اینجا $\theta_0 \in [0,1]$؛

θ_1 : ضریب کارایی تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده بر کیفیت محصولات $(0 < \theta_1 < 1)$؛

e : ضریب حساسیت قیمتی بر تقاضا ($e > 0$)؛

ϕ : ضریب حساسیت میزان کیفیت هر واحد محصول بر تقاضا ($\phi > 0$)؛

c_o : هزینه‌های صرف‌شده برای به‌دست‌آوردن کلان‌داده‌ی اولویت‌های مصرف‌کننده (دلار)؛

c_{td}, c_{tr}, c_{ts} : به ترتیب شامل مجموع هزینه‌های نگهداری موجودی، تولید و فروش تولیدکننده، مجموع هزینه‌های نگهداری موجودی و فروش خرده‌فروش، و مجموع هزینه‌های نگهداری موجودی، تولید و فروش تأمین‌کننده هستند (دلار)؛

c_{ir}, c_{id}, c_{is} : به ترتیب هزینه‌ی سرمایه‌گذاری کلان‌داده‌ی فرایندهای داخلی خرده‌فروش، تولیدکننده، و تأمین‌کننده هستند (دلار)؛

δ : سهم مواد یا قطعات اولیه از محصولات نهایی $(0 < \delta < 1)$؛

z_1 : ضریب هزینه‌ی سرمایه‌گذاری کیفیت ($z_1 > 0$)؛

h : ضریب هزینه‌ی نوآوری سبز ($h > 0$)؛

N_0 : موجودی دانش سازمان در حالت پایه $(N_0 > 0)$؛

γ : ضریب کارایی موجودی دانش سازمان $(0 < \gamma < 1)$؛

ضریب تأثیر موفقیت نوآوری سبز در تقاضا ($\lambda > 0$)؛

α_0 : میزان پاسخگویی به تقاضای ناهمگن در حالت بدون سرمایه‌گذاری کلان‌داده $(\alpha_0 > 0)$؛

s_0 : سرعت تحویل محصولات در حالت بدون سرمایه‌گذاری کلان‌داده $(s_0 > 0)$؛

μ : ضریب کارایی سرمایه‌گذاری کلان‌داده بر دانش سازمان ($0 < \mu < 1$)؛

ζ : ضریب تأثیرحسن تجربه‌ی مشتری در تقاضا ($\xi > 0$)؛

σ: ضریب کارایی سرمایه‌گذاری کلان‌داده بر میزان پاسخگویی به تقاضای ناهمگن $(0 < \sigma < 1)$؛

τ: ضریب کارایی سرمایه‌گذاری کلان‌داده بر سرعت پاسخگویی به تقاضا $(0 < \tau < 1)$؛

- متغیرهای وابسته

D: تقاضای کل (تعداد واحد محصول)؛

π_i: تابع سود هر یک از اعضا $i = [d, r, s]$، که در آن: r نشانگر خرده‌فروش، d تولیدکننده، و s تأمین‌کننده است (دلار).

β_1: ضریب بهبود سطح کیفیت محصولات تولیدکننده $(\beta_1 > 0)$؛

N_d: موجودی دانش سازمان در حالت سرمایه‌گذاری در تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده $(N_d > 0)$؛

v: میزان موفقیت نوآوری سبز $(v > 0)$؛

exc: حسن تجربه‌ی مشتری از برند $(exc > 0)$؛

α_d: میزان پاسخگویی به تقاضای ناهمگن در حالت سرمایه‌گذاری کلان‌داده $(\alpha_d > 0)$؛

s_d: سرعت تحویل محصولات در حالت سرمایه‌گذاری کلان‌داده $(s_d > 0)$.

۴.۳. مدل‌سازی مسئله

مدل‌سازی مسئله به شرح روابط ۱ الی ۱۰ است:

$$D = a - ep + \phi(\beta_1 + q_d) + \lambda v + \xi exc \quad (1)$$

رابطه‌ی ۱، بیانگر تقاضای کل زنجیره است؛ که در آن، تقاضا علاوه‌بر قیمت محصول (p)، به سطح نوآوری سبز(l_{ig})، کیفیت محصول (q_d)، و حسن تجربه‌ی مشتری از برند (exc) حساس است. متناسب با سرمایه‌گذاری کلان‌داده از سوی اعضاء زنجیره، بهبود در مؤلفه‌های موفقیت نوآوری سبز(v)، کیفیت محصول (β_1)، و حسن تجربه‌ی مشتری در نظر گرفته شده است. درنظرگرفتن این بهبود در نتیجه‌ی ارتقاء و بهبود فرآیندها و هدف‌گذاری دقیق‌تر مطابق خواست مشتریان بوده و با سایر سرمایه‌گذاری‌ها در زمینه‌ی نوآوری سبز و کیفیت محصول، که می‌تواند شامل استخدام نیروی متخصص، بهره‌گیری از تکنولوژی‌های نوین، استفاده از مواد اولیه‌ی مرغوب‌تر و...باشد، متفاوت است.

$$v = l_{ig} + \gamma N_d \quad (2)$$

مطابق رابطه‌ی ۲، در این مدل میزان موفقیت نوآوری سبز (v) به سطح نوآوری سبز(l_{ig}) حاصل از سرمایه‌گذاری در نوآوری سبز و دانش افزوده‌شده به سازمان به وسیله‌ی تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده‌ها (N_d) بستگی دارد.

$$N_d = N_0 + \mu(c_o + c_{is}) \quad (3)$$

طبق رابطه‌ی ۳، میزان دانشی که تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده‌ها در اختیار شرکت قرار می‌دهند (N_d)، به میزان و کارایی سرمایه‌گذاری در تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده بستگی دارد، که در آن μ بیانگر کارایی سرمایه‌گذاری کلان‌داده توسط تأمین‌کننده، و c_{is} و c_o به ترتیب بیانگر میزان سرمایه‌گذاری درکلان‌داده‌ی فرآیندهای داخلی و کلان‌داده‌ی اولویت‌های مشتریان از سوی تأمین‌کننده است.

$$exc = \alpha_d + s_d \quad (4)$$

رابطه‌ی ۴، نیز بیانگر حسن تجربه‌ی مشتری از برند (exc) است، که برابر با مجموع میزان پاسخگویی به تقاضای ناهمگن در محیط کلان‌داده (α_d) و سرعت پاسخگویی به تقاضا طی سرمایه‌گذاری کلان‌داده (s_d) است.

$$\alpha_d = \alpha_0 + \sigma(c_{is} + c_{id} + c_{ir} + c_o) \quad (5)$$

تأثیر مثبت سرمایه‌گذاری کلان‌داده در حسن تجربه‌ی مشتری از طریق اثرگذاری در دو مؤلفه‌ی میزان پاسخگویی به تقاضای ناهمگن (α_0) و سرعت پاسخگویی (s_0)، طبق رابطه‌های ۵ و ۶ در نظر گرفته شده است. به این صورت که با تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده‌ی مصرف‌کنندگان، اطلاعات نسبتاً دقیقی از اولویت‌ها و انتظارهای مصرف‌کنندگان در اختیار شرکت‌ها قرار می‌گیرد و به نوعی از دانش مشتری در طراحی و تولید محصولات استفاده می‌شود. بنابراین، در حالت سرمایه‌گذاری در کلان‌داده، میزان پاسخگویی به تقاضای ناهمگن مشتریان و سفارشی‌سازی محصولات و خدمات مطابق انتظارهای مصرف‌کنندگان افزایش می‌یابد. بنابراین طی رابطه‌ی ۵، میزان پاسخگویی به تقاضای ناهمگن مشتریان در حالت سرمایه‌گذاری کلان‌داده (α_d) تابعی از میزان پاسخگویی به تقاضای ناهمگن در حالت بدون سرمایه‌گذاری کلان‌داده (α_0) به‌علاوه‌ی مجموع سرمایه‌گذاری کلان‌داده‌ی کل اعضاء زنجیره‌ی تأمین ($c_{ir}, c_{id}, c_{is}\ c_o$)، ضرب در کارایی سرمایه‌گذاری مذکور برای بهبود پاسخگویی به تقاضای ناهمگن (σ) است.

$$s_d = s_0 + \tau(c_{is} + c_{id} + c_{ir} + c_o) \quad (6)$$

از سوی دیگر، با سرمایه‌گذاری در تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده، بینش مناسبی از کاستی‌ها و خلأهای موجود در فرآیندها و پیش‌بینی تقاضا به واسطه‌ی آگاهی از اولویت‌های مصرف‌کنندگان به‌وجود می‌آید، که این مسئله سبب آمادگی هر چه بیشتر شرکت‌ها برای پاسخگویی به تقاضا و افزایش سرعت پاسخگویی در دوره‌های مختلف می‌شود. بنابراین، در رابطه‌ی ۶، سرعت پاسخگویی به تقاضا در حالت سرمایه‌گذاری کلان‌داده (s_d) برابر با سرعت پاسخگویی در حالت بدون سرمایه‌گذاری (s_0) به‌علاوه‌ی میزان سرمایه‌گذاری کلان‌داده‌ی کل اعضا ($c_{ir}, c_{id}, c_{is}\ c_o$)، ضرب در میزان کارایی سرمایه‌گذاری ذکرشده برای بهبود سرعت پاسخگویی (τ) است. در رابطه‌های ۵ و ۶، تأثیر سرمایه‌گذاری کلان‌داده‌ی کل اعضاء زنجیره در مؤلفه‌ها در نظر گرفته شده است. زیرا اعضاء زنجیره‌ی تأمین، مانند یک سیستم با هم کار می‌کنند و نقص و ایراد در کار هر کدام از آن‌ها می‌تواند در محصول نهایی تأثیرگذار باشد.

$$\beta_1 = \theta_1(c_{id} + c_o) \quad (7)$$

همچنین از آنجا که سرمایه‌گذاری در تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده، تأثیرش را به صورت بهبود در سطح کیفی محصولات نشان می‌دهد؛[۴] طبق رابطه‌ی ۷، میزان بهبود در سطح کیفی محصول (β_1) به میزان سرمایه‌گذاری شرکت در تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده یعنی مجموع c_o و c_{id} و کارایی سرمایه‌گذاری مذکور (θ_1) وابسته است.

$$\pi_r = (p - w - (1 - \theta_0)c_{tr} - c_{ir} - c_o)D \quad (8)$$

رابطه‌ی ۸، نشان‌گر تابع عایدی خرده‌فروش است، که برابر با تفاوت قیمت خرده‌فروشی (p) و مجموع قیمت عمده‌فروشی (W)، هزینه‌های

خرده‌فروشی (c_{tr})، و سرمایه‌گذاری کلان‌داده‌ی خرده‌فروش (c_{ir}, c_o) در میزان کل تقاضا (D) است. که در آن، (θ_0) بیانگر میزان بهبود در هزینه‌های خرده‌فروشی است، که در نتیجه‌ی تجزیه‌و تحلیل کلان‌داده حاصل شده است.

$$\pi_d = \left(w - \delta m - \left(1-\theta_0\right)c_{td} - c_{id} - c_o\right)D - \left(\frac{1}{2} z_1 q_d^2\right) \qquad (۹)$$

رابطه‌ی ۹، نیز تابع سود تولیدکننده است، که با تفاوت قیمت عمده‌فروشی (W) و مجموع قیمت مواد و قطعات اولیه (m)، هزینه‌های داخلی تولیدکننده (c_{td})، و هزینه‌ی سرمایه‌گذاری کلان‌داده‌ی تولیدکننده (c_{id}, c_o) در میزان کل تقاضا (D) برابر است. در رابطه‌ی اخیر، δ بیانگر سهم مواد و قطعات از محصول نهایی است، که بسته به اینکه چه میزان مواد و قطعات نقش حیاتی در محصول دارند و چه میزان فعالیت تولیدکننده ارزش افزوده برای محصول دارد، این میزان در سود تولیدکننده لحاظ می‌شود. به واسطه‌ی سرمایه‌گذاری کلان‌داده، اثر ضریب بهبود هزینه (θ_0) نیز در رابطه‌ی عایدی تولیدکننده در نظر گرفته شده است. عبارت دوم رابطه‌ی ۹ نیز نشان‌دهنده سرمایه‌گذاری در کیفیت محصول است، که در آن z_1 ضریب هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و q_d سطح کیفیت محصول است.

$$\pi_s = \left(m - \left(1-\theta_0\right)c_{ts} - c_{is} - c_o\right)\delta D - \left(\frac{1}{2} h l_{ig}^2\right) \qquad (۱۰)$$

رابطه‌ی ۱۰، نیز بیانگر تابع سود تأمین‌کننده است، که از تفاوت قیمت مواد و قطعات (m) و مجموع هزینه‌های تأمین‌کننده (c_{ts}) و هزینه‌ی سرمایه‌گذاری کلان‌داده‌ی تأمین‌کننده ($c_o\ c_{is}$,) ضرب در سهم مواد و قطعات از محصول نهایی قطعات (δ) از تقاضای کل (D) به‌دست می‌آید. به‌واسطه‌ی سرمایه‌گذاری کلان‌داده، اثر ضریب بهبود هزینه (θ_0) نیز در رابطه عایدی تأمین‌کننده در نظر گرفته شده است. عبارت دوم تابع سود تأمین‌کننده نیز نشانگر سرمایه‌گذاری در نوآوری سبز است، که در آن h ضریب هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و l_{ig} سطح نوآوری سبز هستند.

۵.۳. سناریوهای مسئله

در مطالعه‌ی حاضر، به‌دلیل وجود ساختارهای مختلف قدرت در زنجیره‌های تأمین دنیای واقعی و تأثیرگذاری آن در میزان تعادلی متغیرهای تصمیم و سود اعضا، به تجزیه‌وتحلیل ساختارهای مختلف قدرت، نظیر رهبری تأمین‌کننده، رهبری تولیدکننده، رهبری خرده‌فروش، و نش عمودی و شرایط سرمایه‌گذاری آن پرداخته شده است، تا بدین ترتیب بینش مناسبی در زمینه‌ی عوامل مؤثر در سرمایه‌گذاری کلان‌داده در ساختارهای مختلف قدرت فراهم شود.

۱.۵.۳. مسئله با فرض سرمایه‌گذاری کلان‌داده

- **سناریوی رهبری تأمین‌کننده**

در سناریوی رهبری تأمین‌کننده از بازی استکلبرگ استفاده می‌شود. تأمین‌کننده به‌عنوان رهبر و تولیدکننده و خرده‌فروش به‌عنوان پیرو در نظر گرفته می‌شوند. همچنین، برای حل از روش استنتاج بازگشتی استفاده می‌شود. به این صورت که ابتدا خرده‌فروش میزان سود خود را از فروش محصولات تعیین می‌کند. سپس تولیدکننده به تعیین میزان سود و میزان سرمایه‌گذاری در کیفیت محصولات می‌پردازد، و درنهایت نیز تأمین‌کننده در مورد میزان سود و سرمایه‌گذاری نوآوری سبز تصمیم‌گیری می‌کند.

قضیه‌ی ۱: مقادیر تعادلی متغیرهای تصمیم هر سطح به صورت روابط ۱۷ الی ۲۱ در پیوست ارائه شده‌اند.

- **سناریوی رهبری تولیدکننده**

در سناریوی رهبری تولیدکننده به بررسی مسئله‌ی تحت رهبری تولیدکننده در زنجیره‌ی تأمین پرداخته می‌شود. ساختار بازی استکلبرگ به این صورت است که ابتدا خرده‌فروش قیمت خرده‌فروشی را تعیین می‌کند. پس از آن تأمین‌کننده قیمت مواد و قطعات اولیه و سطح نوآوری سبز را تعیین می‌کند. درنهایت نیز قیمت محصولات ساخته‌شده و سطح کیفیت محصولات توسط تولیدکننده تعیین می‌شود. برای حل مسئله، $p_r = p - w$ و $p_d = w - \delta m$ در نظر گرفته شده است.

قضیه‌ی ۲: پس از حل مسئله با استفاده از روش استنتاج بازگشتی مقادیر تعادلی متغیرهای تصمیم به صورت روابط ۲۲ الی ۲۶ در پیوست ارائه شده‌اند.

- **سناریوی رهبری خرده‌فروش**

در سناریوی رهبری خرده‌فروش به بررسی بازی استکلبرگ تحت رهبری خرده‌فروش پرداخته می‌شود. ساختار بازی به این صورت است که ابتدا تأمین‌کننده، قیمت مواد و قطعات اولیه و سطح نوآوری سبز را تعیین می‌کند. در مرحله‌ی بعد، تولیدکننده درباره‌ی قیمت محصولات تولیدی و سطح کیفیت محصولات تصمیم‌گیری می‌کند. در آخر با درنظرگرفتن تصمیم‌های سایر اعضا، خرده‌فروش قیمت خرده‌فروشی محصولات را تعیین می‌کند. در ساختار بازی اخیر نیز مشابه ساختار قدرت رهبری تولیدکننده، برای حل مسئله، $p_r = p - w$ و $p_d = w - \delta m$ در نظر گرفته شده است.

قضیه‌ی ۳: پس از حل مدل با استفاده از روش بازگشتی، مفادیر تعادلی متغیرهای تصمیم هر سطح به صورت روابط ۲۷ الی ۳۱ در پیوست ارائه شده‌اند.

- **سناریوی نش عمودی**

در سناریوی نش عمودی از بازی نش استفاده می‌شود. تولیدکننده، تأمین‌کننده، و خرده‌فروش به‌طور همزمان درباره‌ی متغیرهای تصمیم خود تصمیم‌گیری می‌کنند. در این ساختار بازی نیز مشابه دو سناریوی قبل، برای حل مسئله، $p_r = p - w$ و $p_d = w - \delta m$ در نظر گرفته شده‌اند.

قضیه‌ی ۴: پس از حل مدل با استفاده از بازی نش بین اعضا، روابط ۳۲ الی ۳۶ برای مقادیر تعادلی متغیرهای تصمیم هر سطح حاصل می‌شوند، که در پیوست ارائه شده‌اند.

۲.۵.۳. مسئله بدون فرض سرمایه‌گذاری کلان‌داده

در این حالت، سرمایه‌گذاری در تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده صورت نمی‌گیرد. تولیدکننده برای بهبود سطح کیفیت محصولات و تأمین‌کننده برای بهبود سطح نوآوری سبز سرمایه‌گذاری می‌کنند. زیرنویس n در مدل، بیانگر حالت بدون سرمایه‌گذاری کلان‌داده است. مدل مسئله به صورت رابطه‌ی ۱۱ است:

$$v_n = l_{ig} + \gamma N_0 \qquad (۱۱)$$

رابطه‌ی اخیر، بیانگر میزان موفقیت نوآوری سبز در حالت بدون سرمایه‌گذاری کلان‌داده (v_n) بوده و از مجموع سطح تلاش‌های نوآوری سبز (l_{ig}) و میزان

دانش سازمان در حالت بدون سرمایه‌گذاری کلان‌داده (N_0) ضرب در میزان کارایی این دانش در موفقیت نوآوری سبز (γ) حاصل شده است.

$$exc_n = \alpha_0 + s_0 \quad (۱۲)$$

رابطه‌ی اخیر، حسن تجربه‌ی مشتری از برند در حالت بدون سرمایه‌گذاری (exc_n) است، که به دو عامل میزان پاسخگویی به تقاضای ناهمگن مشتریان در حالت بدون سرمایه‌گذاری کلان‌داده (α_0) و سرعت پاسخگویی به تقاضا در حالت بدون سرمایه‌گذاری کلان‌داده (s_0) وابسته است.

رابطه‌ی ۱۳، تقاضای کل زنجیره در حالت بدون سرمایه‌گذاری کلان‌داده است؛ و در آن، تقاضا علاوه‌بر قیمت خرده‌فروشی (p) به میزان موفقیت نوآوری سبز (v_n)، حسن تجربه‌ی مشتری از برند (exc_n)، و کیفیت محصول (q_d) حساس است.

$$D_n = a - ep + \lambda v_n + \xi exc_n + \phi q_d \quad (۱۳)$$

رابطه‌ی ۱۴، نشانگر تابع سود خرده‌فروش است، که از تفاوت قیمت خرده‌فروشی و مجموع قیمت عمده‌فروشی و سایر هزینه‌های خرده‌فروش ضرب در تقاضا به‌دست می‌آید.

$$\pi_r = \left(p - w - c_{tr}\right) D_n \quad (۱۴)$$

رابطه‌ی ۱۵، نیز تابع سود تولیدکننده را نشان می‌دهد، و از تفاوت قیمت عمده‌فروشی و مجموع قیمت مواد و قطعات اولیه و سایر هزینه‌های تولیدکننده ضرب در تقاضا به دست می‌آید. عبارت دوم در رابطه‌ی مذکور نیز سرمایه‌گذاری در کیفیت محصول را نشان می‌دهد.

$$\pi_d = \left(w - \delta m - c_{td}\right) D_n - \left(\frac{1}{2} z_1 q_d^2\right) \quad (۱۵)$$

رابطه‌ی ۱۶، بیانگر تابع سود تأمین‌کننده است؛ که از تفاوت قیمت مواد و قطعات اولیه و هزینه‌های تأمین‌کننده ضرب در تقاضا حاصل شده است. عبارت دوم در رابطه‌ی ۱۶ نیز گویای سرمایه‌گذاری در نوآوری سبز است.

$$\pi_s = \left(m - c_{ts}\right) \delta D_n - \left(\frac{1}{2} h l_{ig}^2\right) \quad (۱۶)$$

در ادامه، مدل در حالت بدون سرمایه‌گذاری کلان‌داده در ساختارهای مختلف قدرت بررسی شده است.

- **سناریوی رهبری تأمین‌کننده بدون سرمایه‌گذاری کلان‌داده**

در سناریوی رهبری تأمین‌کننده بدون سرمایه‌گذاری کلان‌داده از بازی استکلبرگ استفاده شده است. به این صورت که ابتدا خرده‌فروش قیمت خرده‌فروشی را تعیین می‌کند. سپس تولیدکننده درباره‌ی سطح کیفیت محصولات و قیمت عمده‌فروشی تصمیم‌گیری می‌کند. درنهایت هم تأمین‌کننده به تعیین قیمت مواد و قطعات اولیه و سطح نوآوری سبز می‌پردازد.

قضیه ۵: مقادیر تعادلی متغیرهای تصمیم هر سطح پس از حل مدل به صورت روابط ۳۷ الی ۴۱ هستند، که در پیوست ارائه شده‌اند.

- **سناریوی رهبری تولیدکننده بدون سرمایه‌گذاری کلان‌داده**

در سناریوی رهبری تولیدکننده بدون سرمایه‌گذاری کلان‌داده از بازی استکلبرگ استفاده و برای حل مسئله، $p_r = p - w$ و $p_d = w - \delta m$ در نظر گرفته شده است. ساختار بازی به این صورت است که ابتدا خرده‌فروش قیمت خرده‌فروشی را تعیین می‌کند. پس از آن تأمین‌کننده درباره‌ی سطح نوآوری سبز و قیمت مواد و قطعات اولیه تصمیم‌گیری می‌کند. درنهایت هم تولیدکننده به تعیین قیمت عمده‌فروشی و سطح کیفیت محصول می‌پردازد.

قضیه ۶: مقادیر تعادلی متغیرهای تصمیم هر سطح پس از حل مدل به صورت روابط ۴۲ الی ۴۶ هستند، که در پیوست ارائه شده‌اند.

- **سناریوی رهبری خرده‌فروش بدون سرمایه‌گذاری کلان‌داده**

روش حل در سناریوی رهبری خرده‌فروش بدون سرمایه‌گذاری کلان‌داده، بازی استکلبرگ به رهبری خرده‌فروش است. به این صورت که ابتدا تأمین‌کننده، قیمت مواد و قطعات و سطح نوآوری سبز را تعیین می‌کند. پس از آن تولیدکننده درباره‌ی سطح کیفیت محصول و قیمت عمده‌فروشی تصمیم‌گیری می‌کند. درنهایت هم خرده‌فروش به تعیین قیمت خرده‌فروشی می‌پردازد. برای تسهیل حل مسئله، $p_r = p - w$ و $p_d = w - \delta m$ در نظر گرفته شده است.

قضیه ۷: مقادیر تعادلی متغیرهای تصمیم هر سطح پس از حل مدل به صورت روابط ۴۷ الی ۵۱ هستند، که در پیوست ارائه شده‌اند.

- **سناریوی نش عمودی بدون سرمایه‌گذاری کلان‌داده**

در سناریوی نش عمودی بدون سرمایه‌گذاری کلان‌داده از بازی نش استفاده می‌شود. تولیدکننده، تأمین‌کننده، و خرده‌فروش به‌طورهمزمان درباره‌ی متغیرهای تصمیم خود تصمیم‌گیری می‌کنند. در سناریوی مذکور از بازی نش استفاده می‌شود. برای حل مسئله نیز $p_r = p - w$ و $p_d = w - \delta m$ در نظر گرفته شده است.

قضیه ۸: مقادیر تعادلی متغیرهای تصمیم به صورت روابط ۵۲ الی ۵۶ هستند، که در پیوست ارائه شده‌اند.

۴. نتایج عددی و تحلیل حساسیت

در بخش حاضر، مثال عددی جهت بررسی شدنی‌بودن مدل مسئله ارائه شده است. پس از آن به تحلیل حساسیت مهم‌ترین پارامترهای مسئله و آثار تغییر آن‌ها در خروجی‌های تعادلی بازی پرداخته شده است. مقادیر پارامترها با توجه به فرض‌های مسئله در جدول ۱ در پیوست ارائه شده‌اند.

با تنظیم مقادیر پارامترها در مدل، مقدار تعادلی متغیرهای تصمیم و توابع تقاضا و سود اعضاء زنجیره‌ی تأمین به‌دست می‌آید؛ که مقادیر مذکور در جدول ۲ در پیوست ارائه شده‌اند.

نتیجه‌ی ۱: همان‌طور که ملاحظه می‌شود در تمام ساختارهای قدرت، سرمایه‌گذاری در تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده (شامل کلان‌داده‌ی ناشی از فرآیندهای داخلی سازمان و اولویت‌های مصرف‌کنندگان) تأثیر مثبتی در مقدار تعادلی سود اعضاء زنجیره‌ی تأمین، افزایش قیمت تعادلی محصولات هر یک از اعضا، و سطح تعادلی کیفیت محصولات و نوآوری سبز دارد.

نتیجه گرفته می‌شود که مطابق فرض ۷، به‌دلیل آثار مثبتی که این سرمایه‌گذاری در کاهش هزینه‌های داخلی اعضا و افزایش تقاضا دارد، درنهایت باعث افزایش سود تعادلی کل افراد زنجیره‌ی تأمین می‌شود. همچنین افزایش توانایی سرمایه‌گذاری اعضا در پی افزایش سود تعادلی از یک سو و افزایش

بینش صاحبان کسب و کار نسبت به فرآیندهای خود و اولویت‌ها و خواسته‌های مشتریان از سوی دیگر باعث می‌شود تا تولیدکننده و تأمین‌کننده، هدفمندتر

و مؤثرتر، سرمایه‌گذاری در کیفیت و نوآوری سبز محصول را پیگیری کنند و بدین ترتیب سطح تعادلی کیفیت محصولات و نوآوری سبز در اثر سرمایه‌گذاری کلان‌داده افزایش یابد.

نتیجه‌ی ۲: سود هر یک از اعضا ابتدا در سناریوی نش عمودی و پس از آن در سناریوی رهبری خود شخص بیشترین مقدار را دارد. بنابراین، در صورت سرمایه‌گذاری در تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده، تعادل قدرت به نفع تمام اعضاء زنجیره‌ی تأمین خواهد بود.

نتیجه‌ی ۳: سود تولیدکننده در سناریوی نش عمودی و رهبری تولیدکننده تقریباً دو برابر سناریوهای رهبری خرده‌فروش و تأمین‌کننده است.

نتیجه‌ی ۴: سود خرده‌فروش در سناریوی نش عمودی و سناریوی رهبری خرده‌فروش بیش از ۴ برابر سناریوهای رهبری تأمین‌کننده و رهبری تولیدکننده است. بنابراین خرده‌فروش بیشترین نفع را از تعادل قدرت در زنجیره و یا رهبری خود در زنجیره‌ی تأمین خواهد داشت. رهبری بقیه‌ی اعضا بر زنجیره، سود خرده‌فروش را به میزان زیادی کاهش می‌دهد.

نتیجه‌ی ۵: سود تأمین‌کننده در سناریوی نش عمودی و رهبری تأمین‌کننده تقریباً ۲ برابر سناریوی رهبری تولیدکننده و تقریباً ۴ برابر سناریوی رهبری خرده‌فروش است. بنابراین سناریوی رهبری خرده‌فروش، بدترین سناریو برای سود تأمین‌کننده است.

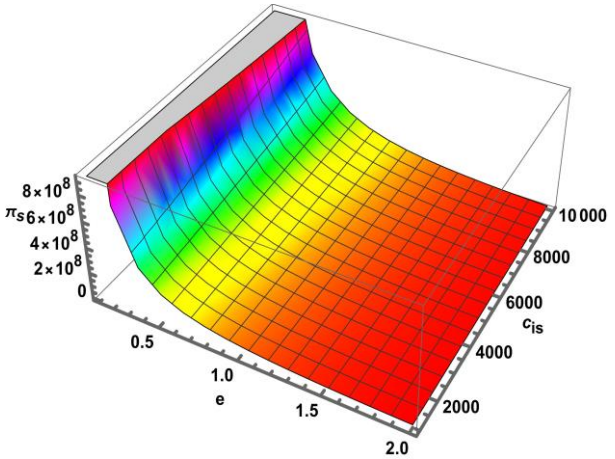
نتیجه‌ی ۶: در سناریوی نش عمودی، قیمت خرده‌فروشی در پایین‌ترین سطح ممکن، سود اعضا در بیشترین حالت خود و سطح نوآوری سبز و کیفیت محصولات نیز در بهترین حالت خود است. پس از آن رهبری خرده‌فروش نیز پایین‌ترین قیمت خرده‌فروشی و بیشترین سطح نوآوری سبز و کیفیت را داشته‌اند. البته در سناریوی ذکرشده، سود تولیدکننده و به‌خصوص تأمین‌کننده کاهش یافته است. بنابراین، به‌ترتیب سناریوی نش عمودی و رهبری خرده‌فروش بهترین سناریوها برای مصرف‌کنندگان و مسائل زیست‌محیطی هستند.

همان‌طور که در شکل های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود؛ زمانی سود تعادلی تأمین‌کننده و سطح تعادلی نوآوری سبز به میزان بیشینه می‌رسد، که حساسیت به قیمت خرده‌فروشی در کمترین مقدار خود قرار گیرد. همچنین با توجه به شکل ۱، سود تأمین‌کننده و سطح نوآوری سبز، در مقایسه با حساسیت قیمتی به مقدار بسیار کمی تحت تأثیر سرمایه‌گذاری کلان‌داده قرار گرفته است. این مسئله نشانگر لزوم شناخت دقیق از جامعه‌ی تقاضا و انجام مطالعات بازار در هر کسب و کار پیش از انجام چنین سرمایه‌گذاری‌هایی است.

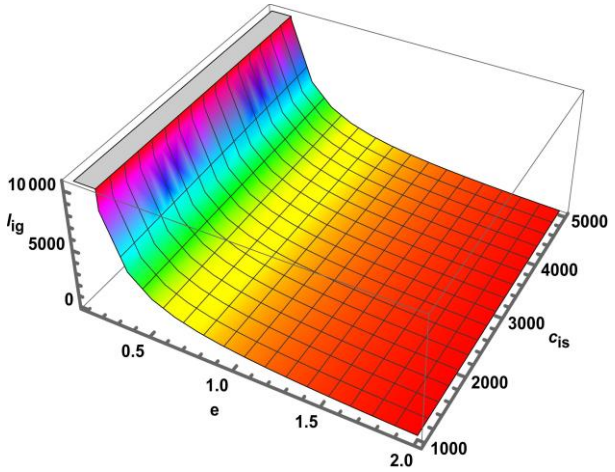
۱.۴. تحلیل میزان سرمایه‌گذاری کلان‌داده در زنجیره‌ی تأمین

زمانی که رابطه‌ی ۵۷ برقرار باشد، سرمایه‌گذاری در تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده برای هر سه سطح تأمین‌کننده، تولیدکننده، و خرده‌فروش ممکن است. جزئیات رابطه‌ی ۵۷ در پیوست ارائه شده است.

در رابطه‌ی ۵۷، بیشینه‌ی میزان برای سرمایه‌گذاری کلان‌داده‌ی کل اعضاء زنجیره به‌دست می‌آید، که در صورت برقراری رابطه‌ی اخیر، سرمایه‌گذاری



شکل ۱. اثر سرمایه‌گذاری کلان‌داده‌ی تأمین‌کننده و حساسیت به قیمت در سود تعادلی تأمین‌کننده.



شکل ۲. اثر سرمایه‌گذاری کلان‌داده‌ی تأمین‌کننده و حساسیت به قیمت در سطح تعادلی نوآوری سبز .

کلان‌داده برای همه‌ی اعضاء زنجیره‌ی تأمین امکان‌پذیر خواهد بود و سود تعادلی همه‌ی اعضاء زنجیره مثبت خواهد شد. رابطه‌ی ۵۷ برای همه‌ی ساختارهای قدرت یکسان خواهد بود و حدود شدنی‌بودن سرمایه‌گذاری کلان‌داده برای اعضاء زنجیره‌ی تأمین مستقل از ساختار قدرت است. مطابق رابطه‌ی مذکور، ضریب بهبود هزینه و ضرایب کارایی سرمایه‌گذاری کلان‌داده در بهبود فرایندهای زنجیره، تأثیر مثبتی در میزان سرمایه‌گذاری کلان‌داده دارند. همچنین ضریب تأثیر هر یک از عوامل کیفیت محصول، نوآوری سبز، و حسن تجربه‌ی مشتری بر تقاضا نیز عواملی با تأثیر مثبت در تعیین میزان سرمایه‌گذاری کلان‌داده هستند. از سوی دیگر، ضریب حساسیت به قیمت و سهم مواد و قطعات اولیه از محصول نهایی نیز تأثیر منفی در میزان سرمایه‌گذاری کلان‌داده دارند.

۲.۴. مقایسه‌ی نتایج زنجیره‌ی تأمین دوسطحی و سه‌سطحی در محیط کلان‌داده

به‌منظور مقایسه‌ی نتایج مسئله‌ی بررسی‌شده در زنجیره‌های تأمین دوسطحی و سه‌سطحی، تمام سناریوهای مسئله در حالت دوسطحی نیز بررسی شده است. نتایج بررسی زنجیره‌ی دوسطحی در جدول ۳ پیوست ارائه شده است.

نتایج نشان می‌دهند با افزایش سطوح زنجیره‌ی تأمین در مسئله‌ی بررسی‌شده، سود اعضا در همه‌ی سناریوها کاهش یافته است. همچنین افزایش قیمت محصولات و کاهش کیفیت محصول نیز با افزایش سطوح زنجیره اتفاق افتاده است.

در زنجیره‌ی تأمین دوسطحی برخلاف زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی، سود اعضا در درجه‌ی اول در سناریوی رهبری خود شخص بیشترین مقدار و پس از آن در سناریوی نش عمودی به میزان بیشینه بوده است. سود هر کدام از اعضا در سناریوی رهبری دیگری، تقریباً نصف می‌شود، که این مسئله بیانگر اهمیت برنامه‌ریزی برای به‌دست‌آوردن رهبری بازار در زنجیره‌ی تأمین دوسطحی نیز است. همچنین در زنجیره‌ی تأمین دوسطحی مشابه زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی، در سناریوی نش عمودی قیمت محصولات کمترین مقدار و کیفیت محصول بیشترین مقدار را داشته‌اند. در هر دو حالت زنجیره‌های دوسطحی و سه‌سطحی، تعادل قدرت بیشترین عایدی را برای مشتریان به دنبال داشته است.

۵. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، به بررسی قیمت‌گذاری، عایدی بازیکنان، و حدود سرمایه‌گذاری کلان‌داده در یک زنجیره‌ی تأمین متشکل از تولیدکننده، خرده‌فروش، و تأمین‌کننده در محیط کلان‌داده و تحت ساختارهای مختلف قدرت پرداخته شده است. در زنجیره‌ی مذکور، تأمین‌کننده در نوآوری سبز و تولیدکننده در کیفیت محصول، سرمایه‌گذاری کرده‌اند. همچنین تمام اعضاء زنجیره در تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده سرمایه‌گذاری کرده و متناسب با سرمایه‌گذاری انجام‌شده، شامل مزایایی شده‌اند. به‌طورکلی، نتایج مطالعه‌ی حاضر بر مزایای قابل‌توجه سرمایه‌گذاری کلان‌داده در مدیریت زنجیره‌ی تأمین تأکید می‌کند و پتانسیل آن را نه فقط برای افزایش سودآوری، بلکه برای ایجاد نوآوری و بهبود کیفیت محصول روشن می‌کند. از آنجایی که فناوری با سرعتی سریع به تکامل خود ادامه می‌دهد، برای اعضاء زنجیره‌ی تأمین ضروری است که ارزش کلان‌داده را بشناسند و از آن به نفع خود استفاده کنند تا بتوانند در چشم‌انداز کسب‌وکار به سرعت در حال تغییر امروزی در رقابت باقی بمانند. علاوه‌بر این، پژوهش حاضر، بینش‌های ارزشمندی ارائه می‌دهد، که می‌تواند به فرآیندهای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی راهبردی در مدیریت زنجیره‌ی تأمین کمک کند و مسیری برای رشد پایدار و موفقیت در محیط کسب و کار مدرن ارائه دهد. در ادامه، برخی از مهم‌ترین نتایج حاصل از تجزیه‌وتحلیل مدل‌ها و پیشنهادهای مدیریتی متناسب با آن ارائه شده‌اند:

- در پژوهش حاضر، یک حد بالا برای سرمایه‌گذاری کلان‌داده‌ی کل اعضاء زنجیره ارائه شده است. این حد سرمایه‌گذاری در همه‌ی ساختارهای قدرت یکسان و مستقل از ساختار قدرت بوده است. رابطه‌ی مذکور نشانگر رابطه‌ی مستقیم ضرایب کارایی سرمایه‌گذاری کلان‌داده و ضریب بهبود هزینه است. همچنین نشانگر تأثیر منفی حساسیت به قیمت خرده‌فروشی و سهم مواد و قطعات اولیه از محصول نهایی در میزان سرمایه‌گذاری کلان‌داده است. بنابراین شدنی‌بودن سرمایه‌گذاری ذکرشده برای اعضاء زنجیره، به کارایی سرمایه‌گذاری اخیر در سطوح مختلف وابسته است و مستلزم توجه به عوامل کاراسازی آن خواهد بود، که در ادامه بحث شده است. عامل دیگر تأثیرگذار در این زمینه، شامل ضریب بهبود هزینه است. به‌عبارتی، میزان سرمایه‌گذاری کلان‌داده به فضای بهبود کسب و کار به‌خصوص بهینه‌سازی هزینه‌ها توسط سرمایه‌گذاری مذکور وابسته است، که مشابه نتیجه‌ی لیو و همکارش (۲۰۱۶)،[۳۷] است. همچنین میزان سرمایه‌گذاری کلان‌داده، تحت تأثیر منفی حساسیت به قیمت خرده‌فروشی و سهم مواد و قطعات اولیه از محصول نهایی خواهد بود. این مسئله بیانگر لزوم دقت در سرمایه‌گذاری کلان‌داده برای مشتریان با حساسیت زیاد به قیمت و برای محصولاتی است که سهم زیادی از مواد و قطعات آن‌ها به وسیله‌ی اعضاء دیگر زنجیره‌ی تأمین تهیه می‌شود.

- در مسئله‌ی بررسی‌شده نتایج نشان داده‌اند که در درجه‌ی اول، سناریوی نش عمودی برای همه‌ی اعضاء زنجیره بهترین است. درجه‌ی بعد، بهترین سناریو از نظر سودآوری برای هر عضو، سناریوی رهبری خود آن عضو است. بنابراین تعادل در قدرت، بهترین سناریو در شرایط سرمایه‌گذاری کلان‌داده خواهد بود. در صورت عدم تعادل در قدرت، رهبری هر یک از اعضا در زنجیره‌ی تأمین از شرایط بیشینه‌سازی سود آن‌ها خواهد بود. اگر چه تغییر توازن قدرت در زنجیره‌ی تأمین به راحتی ممکن نیست، ولی جلوگیری از انحصاری‌شدن هر یک از سطوح زنجیره‌ی تأمین (مانند تأمین‌کنندگان) و انعقاد قراردادهای منصفانه و توسعه‌ی روابط می‌توانند به تعادل قدرت در زنجیره‌ی تأمین کمک کنند.

- ابتدا سناریوی نش عمودی و پس از آن سناریوی رهبری خرده‌فروش، پایین‌ترین قیمت خرده‌فروشی و بیشترین سطح نوآوری سبز و کیفیت را داشته و توانسته‌اند در جلب رضایت مشتریان مؤثر واقع شوند. البته در سناریوی اخیر، سود تولیدکننده و به‌خصوص تأمین‌کننده کاهش می‌یابد. بنابراین در سناریوی رهبری خرده‌فروش به‌منظور هماهنگی بهتر بین سطوح زنجیره‌ی تأمین و توزیع عادلانه‌ی سود بین اعضا، استفاده از قراردادهای مختلف می‌تواند حائز اهمیت باشد.

- سرمایه‌گذاری هر یک از اعضاء زنجیره‌ی تأمین در تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده موجب افزایش قیمت‌های تعادلی در همه‌ی سطوح زنجیره، افزایش سود تعادلی اعضا، و افزایش سطح تعادلی نوآوری سبز وکیفیت محصول در همه‌ی ساختارهای قدرت خواهد شد. بنابراین سرمایه‌گذاری کلان‌داده در همه‌ی ساختارهای قدرت موجب افزایش سود اعضا و بهبود متغیرهایی مانند کیفیت محصول و نوآوری سبز خواهد شد. بدین ترتیب به سبزسازی زنجیره نیز کمک خواهد کرد. بر این اساس، سرمایه‌گذاری کلان‌داده به حفظ و ارتقاء جایگاه شرکت‌ها در دنیای رقابتی امروزی کمک خواهد کرد.

- مطابق تجزیه‌وتحلیل نتایج، مقادیر تعادلی سود تأمین‌کننده و سطح نوآوری سبز، در مقایسه با حساسیت قیمتی تقاضا به مقدار بسیار کمی تحت تأثیر سرمایه‌گذاری کلان‌داده قرار می‌گیرد. این مسئله نشانگر لزوم شناخت دقیق از جامعه‌ی تقاضا و انجام مطالعات بازار در هر کسب و کار پیش از انجام چنین سرمایه‌گذاری‌هایی است. به‌منظور کاهش حساسیت تقاضا به قیمت می‌توان از آگاهی‌بخشی به مصرف‌کنندگان از طریق تبلیغات و افزایش دانش مشتری در این زمینه عمل کرد. همچنین به‌منظور کنترل حساسیت تقاضا به قیمت و تولید محصولات سازگارتر با محیط‌زیست، دولت‌ها می‌توانند یارانه‌هایی در این زمینه را در نظر بگیرند.

- نتایج پژوهش حاضر بیانگر اهمیت کارایی سرمایه‌گذاری کلان‌داده است. به این صورت که میزان کارایی سرمایه‌گذاری کلان‌داده، تأثیر زیادی در سود اعضاء زنجیره و افزایش سطح نوآوری سبز و کیفیت محصولات خواهد داشت. به‌طورکلی، زمانی سرمایه‌گذاری کلان‌داده کارایی و اثر بخشی لازم را خواهد داشت که منجر به افزایش دانش سازمان از محیط درونی (شامل تجزیه‌وتحلیل فرآیندها) و محیط

بیرونی کسب و کار (شامل اولویت‌های مشتریان و وضعیت فعلی رقابت بازار) شود. سرمایه‌گذاری کلان‌داده از سویی نیازمند زیرساخت‌های فنی و تکنولوژیکی و از سوی دیگر، نیازمند فرهنگ‌سازی و ایجاد ساز و کارهای مناسب مدیریتی در سطوح مختلف سازمان است. بنابراین، در سرمایه‌گذاری و پیاده‌سازی طرح‌های تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده، توجه به مواردی از قبیل تکنولوژی لازم جهت جمع‌آوری داده‌های با کیفیت، وجود نیروی متخصص و با مهارت در زمینه‌ی استفاده از الگوریتم‌ها، و تجزیه‌وتحلیل نتایج حاصل، ایجاد فرهنگ سازمانی مناسب در جهت ارزشمندشمردن داده‌های کسب‌وکار، و جلب همکاری کارمندان در جهت جمع‌آوری داده‌های فرآیندهای کسب و کار حائز اهمیت خواهد بود.

با توجه به نتایج و بررسی‌های انجام‌شده، به‌منظور توسعه‌ی مطالعات آتی در دو حوزه‌ی زنجیره‌ی تأمین سبز و پایدار و تکنولوژی‌های صنایع نسل چهار از جمله کلان‌داده و ارتباط این دو حوزه با یکدیگر، مواردی از قبیل: درنظرگرفتن هم‌زمان مسائل زیست‌محیطی و سرمایه‌گذاری تکنولوژی تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده در محیطی با چندین کانال فروش و چند تولیدکننده یا تأمین‌کننده‌ی رقیب و هماهنگی بین آن‌ها، بررسی مدل با درنظرگرفتن میزان سرمایه‌گذاری کلان‌داده به‌عنوان متغیر تصمیم هر یک از اعضاء زنجیره و ارزیابی سرمایه‌گذاری، قیمت‌گذاری، و هماهنگی در سایر تکنولوژی‌های صنعت نسل چهار نظیر اینترنت اشیا و بلاک چین... و بررسی تأثیر آن در شاخص‌های عملکردی زنجیره‌ی تأمین به‌خصوص سبزسازی و پایداری زنجیره‌ی تأمین می‌تواند حائز اهمیت باشد.

References- منابع

1. Ahmed, A. K., Senthilkumar, C. and Nallusamy, S., 2018. Study on environmental impact through analysis of big data for sustainable and green supply chain management. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 8, pp. 1245-1254
2. Hewage, T. N., Halgamuge, M. N., Syed, A. and Ekici, G., 2018. Big data techniques of Google, Amazon, Facebook and Twitter. *J. Commun.*, *13*, pp. 94-100.https://doi.org/10.12720/jcm.13.2.
3. Mukhtarov, I., 2023. Methodology of leveraging big data in financial services for enhanced decision-making. *Финансовые рынки и банки*, pp. 104-115
4. Zhong, R. Y., Newman, S. T., Huang, G. Q. and Lan, S., 2016. Big Data for supply chain management in the service and manufacturing sectors: Challenges, opportunities, and future perspectives. *Computers and Industrial Engineering*, *101*, pp. 572-591. https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.07.013
5. Madhani, P. M., 2022. Big Data Usage and Big Data Analytics in Supply Chain: Leveraging Competitive Priorities for Enhancing Competitive Advantages. *IUP Journal of Supply Chain Management*, pp. 19-20
6. Liu, P., 2021. Pricing rules of Green Supply Chain considering Big Data information inputs and cost-sharing model. *Soft Computing*, *25*, pp. 8515-8531. https://doi.org/10.1007/s00500-021-05779-1
7. Tambuskar, D. P., Jain, P. and Narwane, V. S., 2023. An exploration into the factors influencing the implementation of big data analytics in sustainable supply chain management. *Kybernetes*. pp. 1-12. https://doi.org/10.1108/K-07-2022-1057
8. Liu, J., Chen, M. and Liu, H., 2020. The role of big data analytics in enabling green supply chain management: a literature review. Journal of Data, *Information and Management*, *2*, pp. 75-83. https://doi.org/10.1007/s42488-019-00020-z
9. Mageto, J., 2021. Big data analytics in sustainable supply chain management: A focus on manufacturing supply chains. *Sustainability*, *13*, pp. 7101. https://doi.org/10.3390/su13137101
10. Li, Q., Kang, Y., Tan, L. and Chen, B., 2020. Modeling formation and operation of collaborative green innovation between manufacturer and supplier: A game theory approach. *Sustainability*, *12*, pp. 2209. https://doi.org/10.3390/su12062209
11. Ma, W., Zhang, R. and Chai, S., 2019. What drives green innovation? A game theoretic analysis of government subsidy and cooperation contract. *Sustainability*, pp. *11*, 5584. https://doi.org/10.3390/su11205584
12. Tate, W. L., Ellram, L. M. and Dooley, K. J., 2012. Environmental purchasing and supplier management (EPSM): Theory and practice. *Journal of Purchasing and Supply Management*, *18*, pp. 173-188. https://doi.org/10.1016/j.pursup.2012.07.001
13. Holt, D., 2004. Managing the interface between suppliers and organizations for environmental

responsibility–an exploration of current practices in the UK. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, *11*, pp. 71-84. https://doi.org/10.1002/csr.55

14. Seuring, S. and Müller, M., 2008. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, *16*, pp. 1699-1710. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.020

15. Nisar, Q. A., Haider, S., Ameer, I., Hussain, M. S., Gill, S. S. and Usama, A., 2022. Sustainable supply chain management performance in post COVID-19 era in an emerging economy: A big data perspective. *International Journal of Emerging Markets*. pp. 1-15. https://doi.org/10.1108/IJOEM-12-2021-1807

16. Al-Khatib, A. W., 2022. Big data analytics capabilities and green supply chain performance: Investigating the moderated mediation model for green innovation and technological intensity. *Business Process Management Journal*. pp. 1-10. https://doi.org/10.1108/BPMJ-07-2022-0332

17. Bag, S., Wood, L. C., Xu, L., Dhamija, P. and Kayikci, Y., 2020. Big data analytics as an operational excellence approach to enhance sustainable supply chain performance. Resources, *Conservation and Recycling*, *153*, pp. 104559. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104559

18. Fu, X., Liu, S. and Han, G., 2021. Supply chain partners' decisions with heterogeneous marketing efforts considering consumer's perception of quality. *RAIRO-Operations Research*, *55*, pp. 3227-3243. https://doi.org/10.1051/ro/2021126

19. Zhu, G., Zhang, J., Xing, E. and Han, D., 2022. Pricing and quality decisions with conspicuous consumers. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *165*, pp. 102857. https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102857

20. Hosseini-Motlagh, S.-M., Nouri-Harzvili, M. and Zirakpourdehkordi, R., 2019. Two-level supply chain quality improvement through a wholesale price coordination contract on pricing, quality and services. *International Journal of Industrial Engineering and Production Research*, *30*, pp. 287-312. https://doi:10.22068/ijiepr.30.3.287

21. Shoeleh, R., Seifbarghy, M. and Pishva, D., 2019. Modelling pricing, vertical co-op advertising and quality improvement in a non-cooperative three-echelon supply chain using game theory approach. *RAIRO-Operations Research*, *53*, pp. 1937-1965. https://doi.org/10.1051/ro/2018109

22. Mohan, A., Karthika, V. and Simon, S., 2021. Application of Big Data Analytics in Enhancing the Supply Chain Management System. *Asian Basic and Applied Research Journal*, pp. 82-89.

23. Azeem, M., Haleem, A., Bahl, S., Javaid, M., Suman, R. and Nandan, D., 2022. Big data applications to take up major challenges across manufacturing industries: A brief review. Materials Today. *Proceedings*, *49*, pp. 339-348. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.147

24. Shi, C., Li, D. and Wu, T., 2021. Influencing factors of catering O2O customer experience: an approach integrating big data analytics with grounded theory. *Tehnički vjesnik*, *28*, pp. 862-872. https://doi.org/10.17559/TV-20210124041130

25. Holmlund, M., Van Vaerenbergh, Y., Ciuchita, R., Ravald, A., Sarantopoulos, P., Ordenes, F. V. and Zaki, M., 2020. Customer experience management in the age of big data analytics: A strategic framework. *Journal of Business Research*, *116*, pp. 356-365. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.01.022

26. Sanders, N. R., 2016. How to use big data to drive your supply chain. *California Management Review*, *58*, pp. 26-48. https://doi.org/10.1525/cmr.2016.58.3.26

27. Liu, P., 2019. Pricing policies and coordination of low-carbon supply chain considering targeted advertisement and carbon emission reduction costs in the big data environment. *Journal of Cleaner Production*, *210*, pp. 343-357. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.328

28. Liu, P. and Yi, S.-p., 2017. Pricing policies of green supply chain considering targeted advertising and product green degree in the big data environment. *Journal of Cleaner Production*, *164*, pp. 1614-1622. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.049

29. Chen, S., 2021. Analysis of customization strategy for E-commerce operation based on big data. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, pp. 1-11. https://doi.org/10.1155/2021/6626480

30. Song, H., Shu, Y., Dai, Y., Zhou, L. and Li, H., 2022. Big data service investment choices in a manufacturer-led dual-channel supply chain. *Computers and Industrial Engineering*, *171*, pp. 108423. https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108423

31. Liu, P. and Zhang, F.-j., 2022. Pricing strategies of dual-channel green supply chain considering Big Data information inputs. *Soft Computing*, pp. 1-19. https://doi.org/10.1007/s00500-021-06611-6

32. Liu, P., Long, Y., Song, H.-C. and He, Y.-D.,2020. Investment decision and coordination of green agri-food supply chain considering information service based on blockchain and big data. *Journal of Cleaner Production*, *277*, pp. 123646. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123646

33. Hu, H., Li, Y. and Li, M., 2022. Decisions and Coordination of Green Supply Chain Considering Big Data Targeted Advertising. *Journal of Theoretical and*

Applied Electronic Commerce Research, *17*, pp. 1035-1056. https://doi.org/10.3390/jtaer17030053

34. Agi, M. A., Faramarzi-Oghani, S. and Hazır, Ö., 2021. Game theory-based models in green supply chain management: A review of the literature. *International Journal of Production Research*, *59*, pp. 4736-4755.

35. Liu, P. and Yi, S.-p., 2018. A study on supply chain investment decision-making and coordination in the Big Data environment. *Annals of Operations Research*, *270*, pp. 235-253. https://doi.org/10.1007/s10479-017-2424-4

36. Wang, Y., Wang, X., Chang, S. and Kang, Y., 2019. Product innovation and process innovation in a dynamic Stackelberg game. *Computers and Industrial Engineering*, *130*, pp. 395-403. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.02.042

37. Liu, P. and Yi, S.-p., 2016. Investment decision-making and coordination of supply chain: A new research in the big data era. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, pp. 1-18. https://doi.org/10.1155/2016/2026715

"پیوست"

قضیه‌ی ۱: مقادیر تعادلی متغیرهای تصمیم هر سطح به صورت روابط ۱۷ الی ۲۱ است:

$$m^* = \frac{1}{e\delta\left(+2h\varphi^2 - \left(8eh - \lambda^2\right)z_1\right)}\left(N_1 + hc_{ir}N_2 + N_3 + h\varphi c_o\theta_1 N_4 + hc_{id}N_4N_5\right) \quad (17)$$

$$l_{ig}^* = \frac{1}{-2h\varphi^2 - \left(-8eh + \lambda^2\right)z_1}\lambda z_1 M \quad (18)$$

$$w^* = \frac{1}{e\left(+2h\varphi^2 - \left(8eh - \lambda^2\right)z_1\right)}\left(S_1 + hc_{ir}S_2 + c_{id}S_3\right) \quad (19)$$

$$q_d^* = \frac{1}{-2h\varphi^2 - \left(-8eh + \lambda^2\right)z_1}h\varphi T \quad (20)$$

$$p^* = \frac{1}{e\left(+2h\varphi^2 - \left(8eh - \lambda^2\right)z_1\right)}\left(K_1 + c_{ir}K_2 + K_3 + c_{id}K_4\right) \quad (21)$$

مقادیر N_1 تا N_5، S_1 تا S_3، M، T و K_1 تا K_4 و اثبات روابط در ادامه‌ی پیوست ارائه شده است.

قضیه‌ی ۲: پس از حل مسئله با استفاده از روش استنتاج بازگشتی، مقادیر تعادلی متغیرهای تصمیم در روابط ۲۲ الی ۲۶ ارائه شده است:

$$m^* = \frac{1}{\delta(-h\phi^2 - 2(-4eh + \lambda^2)z_1)}(A_1 - c_{is}A_2 - c_oA_4) \quad (22)$$

$$l^*_{ig} = \frac{1}{(-h\phi^2 - 2eh + \lambda^2)z_1}\lambda z_1 M \quad (23)$$

$$w^* = \frac{1}{-h\phi^2 - 2(-4eh + \lambda^2)z_1)}(c_1 + 2c_oz_1c_2 + \frac{1}{e}c_{is}c_3 - c_4) \quad (24)$$

$$q_d^* = \frac{1}{-h\varphi^2 - 2\left(-4eh + \lambda^2\right)z_1}h\varphi T \quad (25)$$

$$p^* = \frac{1}{e\left(+h\varphi^2 - \left(8eh - 2\lambda^2\right)z_1\right)}\left(F_1 + c_{ir}F_2 - F_3 + c_{id}F_4\right) \quad (26)$$

مقادیر A_1 تا A_4، c_1 تا c_4، M، T و F_1 تا F_4 و اثبات قضیه ۲ در ادامه‌ی پیوست ارائه شده است.

قضیه‌ی ۳: پس از حل مدل با استفاده از روش بازگشتی، مقدار تعادلی متغیرهای تصمیم هر سطح به صورت روابط ۲۷ الی ۳۱ است:

$$m^* = \frac{1}{2\delta(-h\phi^2 - 2(-2eh+\lambda^2)z_1)}(Y_1 + c_{is}Y_2 + Y_3 + c_oY_4) \tag{۲۷}$$

$$l_{ig}{}^* = \frac{1}{-2h\phi^2 - 4(-2eh+\lambda^2)z_1}\lambda z_1 M \tag{۲۸}$$

$$w^* = \frac{1}{2(-h\phi^2 - 2(-2eh+\lambda^2)z_1)}(Y_6 + c_{is}z_1Y_7 + Y_8 + c_oz_1Y_9 + \frac{1}{e}z_1c_{ir}Y_{10} + Y_{11}) \tag{۲۹}$$

$$q_d^* = \frac{1}{-2h\varphi^2 - 4\left(-2eh+\lambda^2\right)z_1}h\varphi T \tag{۳۰}$$

$$p^* = \frac{1}{2}(Y_{13} - \frac{1}{h\phi^2 + 2(-2eh+\lambda^2)z_1}(Y_6 + c_{is}z_1Y_7 + Y_8 + c_oz_1Y_9 + \frac{1}{e}z_1c_{ir}Y_{10} + Y_{11})) \tag{۳۱}$$

مقادیر Y_1 تا Y_{11}، M و T و اثبات قضیه‌ی ۳ در ادامه‌ی پیوست ارائه شده است.

قضیه‌ی ۴: پس از حل مدل با استفاده از بازی نش بین اعضا، روابط ۳۲ الی ۳۶ برای مقادیر تعادلی متغیرهای تصمیم هر سطح حاصل می‌شود:

$$m^* = \frac{1}{\delta(-h\phi^2 - (-4eh+\lambda^2)z_1)}(J_1 + c_{is}J_2 + J_3 + c_oJ_4) \tag{۳۲}$$

$$l_{ig}{}^* = \frac{1}{-h\phi^2 - (-4eh+\lambda^2)z_1}\lambda z_1 M \tag{۳۳}$$

$$w^* = \frac{1}{h\phi^2 + (-4eh+\lambda^2)z_1}(J_5 + c_{is}J_6 + J_7 + c_{id}J_8) \tag{۳۴}$$

$$q_d^* = \frac{1}{-h\varphi^2 - \left(-4eh+\lambda^2\right)z_1}h\varphi T \tag{۳۵}$$

$$p^* = \frac{1}{h\phi^2 + (-4eh+\lambda^2)z_1}(J_9 + c_{ir}J_{10} + J_{11} + c_{id}J_{12}) \tag{۳۶}$$

مقادیر J_1 تا J_{12} و اثبات قضیه‌ی ۴ در ادامه‌ی پیوست ارائه شده است.

قضیه‌ی ۵: مقادیر تعادلی متغیرهای تصمیم هر سطح پس از حل مدل به صورت روابط ۳۷ الی ۴۱ در پیوست ارائه شده است:

$$m^* = \frac{1}{e\delta\left(+2h\varphi^2 - \left(8eh-\lambda^2\right)z_1\right)}U_1 \tag{۳۷}$$

$$l_{ig}^* = \frac{\lambda z_1\left(a - e\left(c_{\mathrm{td}} + c_{\mathrm{tr}} + \delta c_{\mathrm{ts}}\right) + \gamma\lambda N_0 + \xi\left(s_0 + \alpha_0\right)\right)}{-2h\varphi^2 - \left(-8eh+\lambda^2\right)z_1} \tag{۳۸}$$

$$w^* = \frac{1}{e\left(+2h\varphi^2 - \left(8eh-\lambda^2\right)z_1\right)}U_2 \tag{۳۹}$$

$$q_d^* = \frac{h\varphi\left(a - e\left(c_{\text{td}} + c_{\text{tr}} + \delta c_{\text{ts}}\right) + \gamma\lambda N_{۰} + \xi\left(s_{۰} + \alpha_{۰}\right)\right)}{-۲h\varphi^{۲} - \left(-۸eh + \lambda^{۲}\right)z_{۱}} \tag{۴۰}$$

$$p^* = \frac{۱}{+۲eh\varphi^{۲} - e\left(۸eh - \lambda^{۲}\right)z_{۱}} U_{۳} \tag{۴۱}$$

مقادیر $U_{۱}$ تا $U_{۳}$ و اثبات قضیه‌ی ۵ در ادامه‌ی پیوست ارائه شده است.

قضیه‌ی ۶: مقادیر تعادلی متغیرهای تصمیم هر سطح پس از حل مدل به صورت روابط ۴۲ الی ۴۶ است:

$$m^* = \frac{U_{۸}}{\delta\left(h\varphi^{۲} + ۲\left(-۴eh + \lambda^{۲}\right)z_{۱}\right)} \tag{۴۲}$$

$$l_{ig}^* = \frac{\lambda z_{۱}\left(a - e\left(c_{\text{td}} + c_{\text{tr}} + \delta c_{\text{ts}}\right) + \gamma\lambda N_{۰} + \xi\left(s_{۰} + \alpha_{۰}\right)\right)}{-h\varphi^{۲} - ۲\left(-۴eh + \lambda^{۲}\right)z_{۱}} \tag{۴۳}$$

$$w^* = \frac{U_{۹}}{e\left(-h\varphi^{۲} + \left(۸eh - ۲\lambda^{۲}\right)z_{۱}\right)} \tag{۴۴}$$

$$q_d^* = \frac{h\varphi\left(a - e\left(c_{\text{td}} + c_{\text{tr}} + \delta c_{\text{ts}}\right) + \gamma\lambda N_{۰} + \xi\left(s_{۰} + \alpha_{۰}\right)\right)}{-h\varphi^{۲} - ۲\left(-۴eh + \lambda^{۲}\right)z_{۱}} \tag{۴۵}$$

$$p^* = \frac{۱}{e\left(-h\varphi^{۲} + \left(۸eh - ۲\lambda^{۲}\right)z_{۱}\right)} U_{۱۰} \tag{۴۶}$$

مقادیر $U_{۸}$ تا $U_{۱۰}$ و اثبات قضیه‌ی ۶ در ادامه‌ی پیوست ارائه شده است.

قضیه‌ی ۷: مقادیر تعادلی متغیرهای تصمیم هر سطح پس از حل مدل به صورت روابط۴۷ الی ۵۱ است:

$$m^* = \frac{U_{۱۱}}{۲\delta\left(h\varphi^{۲} + ۲\left(-۲eh + \lambda^{۲}\right)z_{۱}\right)} \tag{۴۷}$$

$$l_{ig}^* = \frac{\lambda z_{۱}\left(a - e\left(c_{\text{td}} + c_{\text{tr}} + \delta c_{\text{ts}}\right) + \gamma\lambda N_{۰} + \xi\left(s_{۰} + \alpha_{۰}\right)\right)}{-۲h\varphi^{۲} - ۴\left(-۲eh + \lambda^{۲}\right)z_{۱}} \tag{۴۸}$$

$$w^* = \frac{U_{۱۲}}{-۲eh\varphi^{۲} + ۴e\left(۲eh - \lambda^{۲}\right)z_{۱}} \tag{۴۹}$$

$$q_d^* = -\frac{h\varphi\left(a - e\left(c_{\text{td}} + c_{\text{tr}} + \delta c_{\text{ts}}\right) + \gamma\lambda N_{۰} + \xi\left(s_{۰} + \alpha_{۰}\right)\right)}{۲h\varphi^{۲} + ۴\left(-۲eh + \lambda^{۲}\right)z_{۱}} \tag{۵۰}$$

$$p^* = \frac{a - e\left(c_{\text{td}} - c_{\text{tr}} + \delta c_{\text{ts}}\right) + \gamma\lambda N_{۰} + \xi\left(s_{۰} + \alpha_{۰}\right)}{۲e} + \frac{U_{۱۲}}{-۲eh\varphi^{۲} + ۴e\left(۲eh - \lambda^{۲}\right)z_{۱}} \tag{۵۱}$$

مقادیر $U_{۱۱}$ و $U_{۱۲}$ و اثبات قضیه‌ی ۷ در ادامه‌ی پیوست ارائه شده است.

قضیه‌ی ۸: مقادیر تعادلی متغیرهای تصمیم به صورت روابط ۵۲ الی (۵۶) است:

$$m^* = \frac{\delta c_{\text{ts}}\left(h\varphi^{۲} + \left(-۳eh + \lambda^{۲}\right)z_{۱}\right) - hz_{۱}\left(a - e\left(c_{\text{td}} + c_{\text{tr}}\right) + \gamma\lambda N_{۰} + \xi\left(s_{۰} + \alpha_{۰}\right)\right)}{\delta\left(h\varphi^{۲} + \left(-۴eh + \lambda^{۲}\right)z_{۱}\right)} \tag{۵۲}$$

$$l_{ig}^* = \frac{\lambda z_{۱}\left(a - e\left(c_{\text{td}} + c_{\text{tr}} + \delta c_{\text{ts}}\right) + \gamma\lambda N_{۰} + \xi\left(s_{۰} + \alpha_{۰}\right)\right)}{-h\varphi^{۲} - \left(-۴eh + \lambda^{۲}\right)z_{۱}} \tag{۵۳}$$

$$w^* = \frac{U_{۱۳}}{h\varphi^{۲} + \left(-۴eh + \lambda^{۲}\right)z_{۱}} \tag{۵۴}$$

$$q_d^* = \frac{h\varphi\left(a - e\left(c_{\text{td}} + c_{\text{tr}} + \delta c_{\text{ts}}\right) + \gamma\lambda N_{۰} + \xi\left(s_{۰} + \alpha_{۰}\right)\right)}{-h\varphi^{۲} - \left(-۴eh + \lambda^{۲}\right)z_{۱}} \tag{۵۵}$$

$$p^* = \frac{U_{۱۴}}{h\varphi^{۲} + \left(-۴eh + \lambda^{۲}\right)z_{۱}} \tag{۵۶}$$

مقادیر $U_{۱۳}$ و $U_{۱۴}$ و اثبات قضیه‌ی ۸ در ادامه‌ی پیوست ارائه شده است.

$$c_o + c_{ir} + c_{id} + c_{is} \le e\left(c_{\text{td}} + c_{\text{tr}} + \delta c_{\text{ts}}\right)\theta_{۰}U_{۴} \tag{۵۷}$$

$$U_{۴} = \left(\begin{array}{l} \dfrac{۱}{e - \xi\left(\sigma + \tau\right)} + \dfrac{۱}{e\delta - \gamma\lambda\mu - \xi\left(\sigma + \tau\right)} + \dfrac{۱}{e - \xi\left(\sigma + \tau\right) - \varphi\theta_{۱}} \\ - \dfrac{۱}{-e\left(۲ + \delta\right) + \gamma\lambda\mu + \xi\left(\sigma + \tau\right) + \varphi\theta_{۱}} \end{array}\right) \tag{۵۸}$$

جدول۱. مقادیر عددی پارامترها.

Parameter	Value	Parameter	Value
a	20000	c_{ir} ($)	2000
e	0.9	c_{id} ($)	3000
σ	0.8	c_{is} ($)	3000
λ	0.75	$\theta_{۱}$	0.8
τ	0.75	$z_{۱}$	3
ϕ	0.85	γ	0.8
$\theta_{۰}$) [۲۱ ,۱۶]	0.35	μ	0.9
h	3	ζ	0.85
c_{tr} ($)	4000	δ	0.6
c_{td} ($)	7000	$s_{۰}$	6000
c_{ts} ($)	9000	$\alpha_{۰}$	7000
c_o ($)	1000	$N_{۰}$	7000

جدول۲. نتایج عددی حاصل از سناریوها.

Variables	Scenario							
	Supplier as leader		Manufacturer as leader		Retailer as leader		**Vertical Nash**	
	With invest.	Without invest.	With invest.	Without invest.	With invest.	Without invest.	With invest.	**Without invest.**
$\pi_d\ (m\$)$	43.7	15.5	84.3	30.0	46.5	16.5	86.1	**30.6**
$\pi_r\ (m\$)$	23.4	83.4	23.0	8.2	93.0	33.1	99.4	**35.3**
$\pi_s\ (m\$)$	85.0	30.2	43.7	15.5	25.1	8.95	89.0	**31.7**
D	4593.6	2740.0	4556.4	2718.7	5026.5	2999.3	9458.7	**5644.0**
$P(\$)$	54422.3	36903.3	54444.0	36916.8	54170.2	36753.4	51589.3	**35213.5**
$w\ (\$)$	43718.2	29858.3	43781.3	29895.9	30051.6	21713.4	35479.4	**24942.3**
$m(\$)$	41600.4	27945.3	26725.5	19069.6	19158.4	14544.4	27363.2	**19451.6**
q_d	1446.1	862.9	1434.4	855.9	1582.4	944.2	2977.2	**1778.6**
l_{ig}	1276.0	761.4	1265.7	755.2	1396.3	833.1	2627.4	**1567.8**

جدول ۳ . نتایج زنجیره‌ی تأمین دوسطحی در محیط کلان‌داده.

	Scenarios		
Variables	**Manufacturer as leader**	**Retailer as leader**	**Vertical Nash**
$\pi_d\ (m\$)$	124.66	67.14	**107.96**
$\pi_r\ (m\$)$	66.79	134.29	**124.64**
D	7753.70	8352.53	**10591.3**
$P(\$)$	3995.69	39508.37	**37686.42**
$w\ (\$)$	2440.98	17830.59	**20318.21**
q_d	25780.46	2629.50	**3334.32**

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2025), 41(1), 57-72

Sharif University of Technology

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

Research Article

Analysis of Customers' Lifetime Value with a Clustering Approach Based on Som Artificial Neural Networks and Markov Chain (Case Study: Pasargad Digital Bank)

Maral Mirzaei Moradi [1], Hossein Razavi Haji Agha*[2], Hanan Amouzad Mehdirji [3] and Ali Alikhani [4]

[1] Faculty of Industrial Management, University of Tehran, Kish International Campus, Iran
[2] Department of Management, Faculty of Management and Financial Sciences, Khatam University, Tehran, Iran
[3] Department of Technology and Innovation Management, Faculty of Industrial and Technology Management, University of Tehran, Tehran, Iran
[4] Department of Industrial Management, Faculty of Management and Social Sciences, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran
* corresponding author: (h.razavi@khatam.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:27 January 2024

Revised:25 November 2024

Accepted:30 December 2024

Keywords:

Customer lifetime value,
clustering,
markov chain,
SOM neural network.

Abstract

Clustering of customers and analysis of their lifetime value is one of the basic strategies of policy making in production and marketing. Since the advertising strategies of many businesses are implemented regardless of the financial behavior clusters of customers and the expected income resulting from the dynamic financial behavior of customers, the advertising policy based on the customers' lifetime value in the dynamic clusters of their financial behavior can save a lot of advertising and marketing costs to manage the costs imposed on businesses. This is despite the fact that the studies conducted in the field of customer lifetime value analysis have not paid attention to advertising strategies based on lifetime value. The existing methods for determining the lifetime value of customers rely on static clustering of customers' status, while customer clustering based on their financial behavior is a dynamic and time-varying phenomenon. Therefore, in this research, the lifetime value analysis of customers and the optimization of advertising strategy in the dynamic clusters of their financial behavior using a self-organizing neural network and dynamic stochastic programming have been discussed. For this purpose, based on the status of each customer belonging to a cluster during consecutive weeks, a Markov chain is formed from the clusters containing customers, and the lifetime value of customers is based on the transition probability matrices of customers' status from one cluster to another, and it is also estimated based on the expected income of customers in each cluster. The results showed that customer clustering with the self-organizing neural network method can explain at least 91% of the changes in the data. Also, the findings showed that the optimal advertising strategy for each cluster of customers with a certain expected income level will lead to different lifetime value for customers, which shows the importance of dynamic clustering of customers and determining the optimal level of advertising cost in each cluster to gain more customer lifetime value.

Funding

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

To Cite this article:

Mirzaei Moradi, M., Razavi Haji Agha, H., Amouzad Mehdirji, H. and Alikhani, A. 2025. Analysis of customers' lifetime value with a clustering approach based on som artificial neural networks and markov chain (case study: Pasargad Digital Bank), Sharif Industrial Engineering and Management Journal, 41(1), 57-72. https://doi.org/10.24200/j65.2024.63417.2379

مجله علمی مهندسی صنایع و مدیریت شریف

https://sjie.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

تحلیل ارزش طول عمر مشتریان با رویکرد خوشه‌بندی مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی SOM و زنجیره‌ی مارکوف (مطالعه‌ی موردی: بانک دیجیتال پاسارگاد)

مارال میرزایی مرادی[۱]، حسین رضوی حاجی آقا[۲*]، حنان عموزاد مهدیرجی[۳] و علی عالیخانی[۴]

[۱] گروه مدیریت صنعتی، دانشکده‌ی پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

[۲] گروه مدیریت، دانشکده‌ی مدیریت و علوم مالی، دانشگاه خاتم، تهران، ایران.

[۳] گروه مدیریت تکنولوژی و نوآوری، دانشکده‌ی مدیریت صنعتی و فناوری، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

[۴] گروه مدیریت صنعتی، دانشکده‌ی مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (h.razavi@khatam.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۱۱/۰۷

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۹/۰۵

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

واژگان کلیدی:

ارزش طول عمر مشتری،

خوشه‌بندی،

زنجیره‌ی مارکوف،

شبکه‌ی عصبی SOM.

چکیده

خوشه‌بندی مشتریان و تحلیل ارزش طول عمر آن‌ها، یکی از راهبردهای اساسی سیاست‌گذاری در تولید و بازاریابی است. از آنجا که راهبردهای تبلیغاتی بسیاری از واحدهای تجاری بدون توجه به خوشه‌های رفتار مالی مشتریان و درآمد موردانتظار حاصل از رفتار پویای مالی مشتریان اجرا می‌شود، سیاست‌گذاری تبلیغاتی براساس ارزش طول عمر مشتریان در خوشه‌های پویای رفتار مالی آن‌ها می‌تواند بسیاری از هزینه‌های تبلیغات و بازاریابی تحمیل‌شده به واحدهای تجاری را مدیریت کند. این در حالی است که مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی تحلیل ارزش طول عمر مشتریان، توجهی به راهبردهای تبلیغاتی مبتنی بر ارزش طول عمر نداشته و روش‌های موجود درخصوص تعیین ارزش طول عمر مشتریان متکی بر خوشه‌بندی ایستا از وضعیت مشتریان بوده است؛ در حالی که خوشه‌بندی مشتریان بر پایه‌ی رفتار مالی آن‌ها یک پدیده‌ی پویا و زمان-متغیر است. از این رو، در پژوهش حاضر به تحلیل ارزش طول عمر مشتریان و بهینه‌یابی راهبردهای تبلیغاتی در خوشه‌های پویای رفتار مالی آن‌ها با استفاده از شبکه‌ی عصبی خودسازمان‌ده (SOM) و برنامه‌ریزی تصادفی پویا پرداخته شده است. برای این منظور، براساس وضعیت تعلق هر مشتری به یک خوشه در طول هفته‌های متوالی، یک زنجیره‌ی مارکوف از خوشه‌های در برگیرنده‌ی مشتریان تشکیل و ارزش طول عمر مشتریان بر پایه‌ی ماتریس‌های احتمال انتقال وضعیت مشتریان از یک خوشه به خوشه‌ی دیگر و همچنین براساس درآمد موردانتظار مشتریان در هر خوشه برآورد شده است. نتایج نشان داده است که خوشه‌بندی مشتریان با روش شبکه‌ی عصبی خودسازمان‌ده (SOM) می‌تواند کمینه‌ی ۹۱٪ از تغییرات موجود در داده‌ها را تبیین کند. همچنین یافته‌ها نشان داده‌اند که راهبرد تبلیغاتی بهینه برای هر خوشه از مشتریان با سطح درآمد موردانتظار مشخص، منجر به ارزش طول عمر متفاوتی برای مشتریان شده است، که نشانگر اهمیت خوشه‌بندی پویای مشتریان و تعیین سطح بهینه‌ی هزینه‌ی تبلیغات در هر خوشه برای کسب ارزش طول عمر بیشتر برای مشتریان است.

۱. مقدمه

ارزش طول عمر مشتری، یک معیار بازاریابی است که ارزش یک مشتری را در کل تاریخ رابطه‌ی آن مشتری با یک شرکت پیش‌بینی می‌کند. این ارزش فعلی، جریان درآمد احتمالی آتی است، که توسط یک خریدار خاص ایجاد می‌شود. ارزش طول عمر مشتری، ارزش یک مشتری را برای شرکت در طول چرخه‌ی عمر مشتری تعیین می‌کند.[۱] یک شرکت با هدف سودآوری آتی، به دنبال بیشینه‌سازی سود با تجزیه‌وتحلیل رفتار مشتری و چرخه‌های تجاری برای شناسایی و هدف قراردادن مشتریان با بیشترین ارزش خالص بالقوه در طول زمان است. مشتری سودآور، مشتری‌ای است که مازاد درآمد ایجاد می‌کند و در طول زمان، درآمد حاصل از مشتری به میزان قابل‌قبولی از هزینه‌های شرکت برای جذب، فروش، و خدمات‌رسانی به او فراتر می‌رود.[۲]

باتوجه به اهمیت ارزش طول عمر مشتریان به‌عنوان یک معیار سودآوری، روش‌های متفاوتی برای تقسیم‌بندی مشتریان بر حسب ارزش طول عمر آن‌ها پیشنهاد شده است.[۳] تقسیم‌بندی مشتریان براساس ارزش طول عمر مشتری شرکت‌ها را قادر می‌سازد تا به اندازه‌ی کافی روابط بلندمدت با مشتریان ایجاد کنند و به‌طورمؤثر سرمایه‌گذاری در ابزارهای بازاریابی را مدیریت کنند. ارزش طول عمر مشتری براساس تقسیم‌بندی آن‌ها از منظرهای موردعلاقه‌ی مدیران (مانند: درآمدزایی، هزینه‌ها، و ...) در حل مشکلاتی مانند تصمیم‌های مربوط به رسیدگی، حفظ و به‌دست‌آوردن مشتریان، یا مسائل مربوط به ارزش بلندمدت شرکت کمک می‌کند.[۴]

با این حال، در تلاش برای معرفی ارزش طول عمر مشتری به‌عنوان مبنای تصمیم‌گیری برای مدیران، انتخاب مدل مناسب ارزش طول عمر مشتری، که

استناد به این مقاله:

میرزایی مرادی، مارال، رضوی حاجی آقا، حسین، عموزاد مهدیرجی، حنان و عالیخانی، علی، ۱۴۰۴. تحلیل ارزش طول عمر مشتریان با رویکرد خوشه‌بندی مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی SOM و زنجیره‌ی مارکوف (مطالعه‌ی موردی: بانک دیجیتال پاسارگاد). مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۴۱(۱)، صص.۵۷-۷۲.

https://doi.org/10.24200/j65.2024.63417.2379

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

برای نوع تجارت آن‌ها مناسب باشد، حائز اهمیت است. شناسایی رفتار مشتری را می‌توان به‌عنوان یکی از اولین گام‌های تشخیص مدل ارزش طول عمر مشتریان در هر کسب و کار دانست. پژوهشگران روش‌های متفاوتی را برای شناسایی رفتار مشتریان مطالعه کرده‌اند، اما خوشه‌بندی مشتریان را می‌توان جزء مشترک بسیاری از مطالعات اخیر دانست.[۵] خوشه‌بندی مشتریان، این امکان را به صاحبان کسب و کار می‌دهد که با تحلیل جزئی‌تر و دقیق‌تر رفتار مشتریان، چشم‌انداز گسترده‌تری نسبت به هزینه‌ها و درآمدهای حاصل از هر مشتری ایجاد کنند. خوشه‌بندی مشتریان در گروه‌های متفاوت درآمد، هزینه و تعدد دفعات تعامل با کسب و کار (دفعات سودآوری) می‌تواند علاوه‌بر شناسایی مشتریان با سطوح درآمدزایی بالا، راهبردهای هزینه‌یابی مشتریان را نیز بهبود بخشد.[۶] از این رو، با توجه به اهمیت خوشه‌بندی مشتریان، تشخیص روش‌های بهینه‌ی خوشه‌بندی آنان در کانون توجه قرار دارد و آنچه که عموماً مبنای خوشه‌بندی مشتریان قرار می‌گیرد، سودآوری و هزینه‌های مربوط به آن‌هاست.[۷]

رفتار مشتریان، یک پدیده‌ی پویا و زمان- متغیر است.[۸] مشتریان در هر خوشه‌ای از منظر درآمد، هزینه یا هر عامل موردعلاقه‌ی مدیران بازاریابی که قرار گیرند، پتانسیل تغییر موضع و تغییر میزان درآمدزایی را خواهند داشت. از این رو به رفتار متغیر مشتریان در طول زمان نیز در خوشه‌بندی مشتریان باید توجه کرد. یکی از ابزارهای تحلیل رفتار زمان- متغیر مشتریان، تحلیل تخصیص آن‌ها به خوشه‌های متفاوت در طول زمان است.[۹] بنابراین، با این پیش‌فرض که تخصیص مشتری به هر خوشه، فقط به وضعیت قبلی او وابسته است، می‌توان یک فرایند چندوضعیتی مارکوف را برای خوشه‌های تخصیص‌یافته‌ی مشتریان متصور بود. به خصوص در کسب و کارهای دیجیتال، از جمله فناوری‌های مالی ارائه‌شده توسط بانک‌ها، که سطح و اندازه‌ی فعالیت مشتریان می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در خوشه‌بندی آن‌ها بگذارد، تنوع در خوشه‌های شناسایی‌شده برای هر مشتری دور از انتظار نیست.

بسیاری از مدل‌های مختلف ارزش طول عمر مشتری و روش‌های خوشه‌بندی مشتریان در دهه‌های اخیر ابداع شده‌اند، که هم‌زمان با آن‌ها، فناوری اطلاعات و ارتباطات نیز باعث توسعه‌ی تجارت الکترونیکی و گسترش بسیاری از خدمات سنتی در قالب خدمات الکترونیک و دیجیتال شده است.[۱۰] به فناوری‌های مالی (فین تک) نیز هم‌راستا با توسعه‌ی انواع تجارت الکترونیک، بیش از پیش توجه شده است. بانک‌هایی که خدمات مالی و اعتباری مبتنی بر فناوری ارائه می‌دهند، به‌دلیل تعامل مشتریان با وب‌سایت‌ها و سایر خدمات مبتنی بر اینترنت، داده‌های با سطوح بالای اهمیت در دسترس دارند.[۱۱] سطح بالای رقابت، به‌ویژه در فناوری‌های مالی، بانک‌ها را وادار می‌کند تا منابع مالی خود را برای فعالیت‌های بازاریابی به نحو احسن هزینه کنند. برای این منظور، پیاده‌سازی مدل ارزش طول عمر مشتری با استفاده از داده‌های تاریخی برای تخمین ارزش و لحاظ‌کردن ویژگی‌های متغیر مشتری در طول زمان می‌تواند ارزیابی دقیق‌تری از وضعیت سودآوری آتی مشتری را برای بانک‌ها فراهم سازد.

اگرچه مطالعات متعددی درخصوص مدل‌بندی و پیش‌بینی ریزش مشتریان بر پایه‌ی روش‌های زنجیره‌ی مارکوف و انواع شبکه‌های عصبی انجام شده است، اما ماهیت پویای رفتار مالی مشتریان و به‌خصوص، به‌کارگیری اطلاعات حاصل از تغییر وضعیت مالی مشتریان در تعیین ارزش طول عمر مشتری در مطالعات پیشین مورد توجه نبوده است. از طرفی، تعیین ارزش طول عمر مشتریان با استفاده از اطلاعات مربوط به تغییر رفتار مالی آن‌ها می‌تواند گام قابل‌توجهی در راستای مدیریت ریسک اعتباری بانک‌ها و سیاست‌گذاری آن‌ها در بازاریابی و نگهداشت مشتریان باشد. اتخاذ سیاست‌های نگهداشت مشتریان در قالب برنامه‌های بازاریابی در گروه‌های مختلف مشتریان می‌تواند بسیاری از هزینه‌های بازاریابی بانک‌ها را کاهش دهد و منجر به طرح‌ریزی برنامه‌های وفاداری مبتنی بر رفتار انتقالی مشتریان شود.

رویکرد کلی مطالعات پیشین به مبحث ارزش طول عمر مشتریان، مبتنی بر روش‌های خوشه‌بندی و شبکه‌های عصبی مصنوعی بوده است، در حالی که رفتار پویای مالی مشتریان و عوامل تأثیرگذار محیطی در تغییر وضعیت مشتریان در خوشه‌های مختلف، عموماً نادیده گرفته شده است. از این رو، انجام پژوهش حاضر با هدف توسعه‌ی روش‌های خوشه‌بندی مشتریان و تعیین ارزش طول عمر آن‌ها ضرورت دارد. به همین علت، در مطالعه‌ی حاضر، پس از تعیین خوشه‌های مشتریان، به بیشینه‌سازی ارزش طول عمر مشتری با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی پویا پرداخته شده است. این امر بر پایه‌ی تشخیص راهبرد بهینه‌ی تبلیغات برای خوشه‌های مشتریان و درآمد موردانتظار از هر مشتری، مبتنی بر احتمال نگهداشت مشتری در هر خوشه انجام شده است. مطالعه‌ی حاضر می‌تواند گام مهمی در راستای توسعه و تعمیم روش‌های پویای خوشه‌بندی مشتریان و برآورد پویای ارزش طول عمر هر مشتری به شمار آید.بنابراین، با توجه به شکاف پژوهشی موجود در زمینه‌ی برآورد پویای ارزش طول عمر مشتریان و به‌کارگیری اطلاعات حاصل از معیار مذکور در تعیین راهبرد بهینه‌ی تبلیغاتی برای مشتریان، انجام پژوهش حاضر در راستای بهینه‌سازی هزینه‌ی تبلیغات و بازاریابی مشتریان با استفاده از مدل احتمالی رفتار مالی آن‌ها ضرورت دارد.

این در حالی است که عدم شناخت کافی نسبت به رفتار احتمالی مشتریان و استفاده از آن در تعیین ارزش طول عمر مشتریان، می‌تواند منجر به هدررفت منابع بانک در هزینه‌های بازاریابی و نگهداشت مشتریان شود. از آنجا که در مطالعات پیشین، برآورد ارزش طول عمر مشتریان و تعیین راهبرد تبلیغاتی برای گروه‌های مشتریان، براساس ماتریس‌های انتقال وضعیت مارکوفی آن‌ها موردتوجه نبوده است، انجام مطالعه‌ی حاضر می‌تواند به کاهش شکاف پژوهشی در این حوزه نیز کمک بسزایی کند. با اجرای راهبردهای مطرح‌شده در مطالعه‌ی حاضر، مدیران می‌توانند با شناسایی و حفظ با ارزش‌ترین مشتریان خود، مزیت رقابتی کسب کنند. پتانسیل رشد و حفظ مشتری در صورت پیش‌بینی تغییرات در خوشه‌های مختلف و تنظیم راهبردهای تبلیغاتی بر این اساس بسیار بالاست. مطالعه‌ی حاضر، یک ابزار و بینش مناسب برای کمک به مدیران در بهینه‌سازی هزینه‌های تبلیغاتی خود با پیش‌بینی ارزش طول عمر مشتری و تحلیل پویای تغییرات در خوشه‌بندی مشتریان ارائه می‌کند. از طرفی، پیاده‌سازی نتایج پژوهش حاضر می‌تواند به طور قابل‌توجهی از هزینه‌های فعلی نگهداشت مشتریان در بانک موردمطالعه، از طریق هدفمندسازی راهبردهای تبلیغاتی بکاهد.

در پژوهش حاضر، با تأکید بر رفتار زمان- متغیر مشتریان، به خوشه‌بندی آن‌ها

در پژوهش حاضر، با تأکید بر رفتار زمان- متغیر مشتریان، به خوشه‌بندی آن‌ها

با استفاده از تحلیل شبکه‌ی عصبی (SOM)[1] پرداخته شده است؛ که مزیت آن

[1] Self Organization Map

نسبت به روش‌های کلاسیک آماری در خوشه‌بندی، عدم محدودیت در تشخیص خوشه‌ها بر پایه‌ی روابط خطی است. از طرفی، تشکیل ماتریس‌های انتقال وضعیت مشتریان و استفاده از آن در برآورد درآمد موردانتظار از هر مشتری و از طرفی، سیاست‌گذاری در هزینه‌های تبلیغات و بازاریابی مشتریان بر پایه‌ی درآمد موردانتظار حاصل از ویژگی مارکوفی، رفتار مالی مشتریان از وجوه تمایز مطالعه‌ی حاضر نسبت به مطالعات پیشین است. بر این اساس، در مطالعه‌ی حاضر به این مسئله پاسخ داده شده است که خوشه‌بندی مشتریان در بانک دیجیتال پاسارگاد، به‌عنوان یکی از نهادهای مبتنی بر فناوری‌های مالی چگونه است و ارزش طول عمر مشتریان در هریک از خوشه‌ها و با توجه به احتمالات انتقال وضعیت آنان به خوشه‌های دیگر چقدر است؟

۲. چارچوب نظری و پیشینه‌ی پژوهش

بازاریابی بر ارتباط متقابل کلیه‌ی فرآیندها و فعالیت‌هایی که برای مشتریان ارزش ایجاد می‌کنند، از جمله مدیریت ارتباط با مشتری تأکید می‌کند.[۱۲] در دو دهه‌ی گذشته، حوزه‌ی مدیریت ارتباط با مشتری به لطف فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات (عمدتاً پایگاه داده و فناوری تحلیلی)، تحول قابل‌توجهی را پشت سر گذاشته است.[۱۳] هدف فعالیت‌های مدیریت ارتباط با مشتری عمدتاً حفظ مشتریان فعلی، ایجاد یک رابطه‌ی بلندمدت، و به‌دست‌آوردن مشتریان جدید است.[۱۴] در این فرآیند، ارزش طول عمر مشتری نقش مهمی ایفا می‌کند، زیرا شرکت‌ها را قادر می‌سازد تا مشتریان را بخش‌بندی کنند و کسانی را که بیشترین سود را برای شرکت به ارمغان می‌آورند، شناسایی کنند.[۱۵] تحلیل ارزش طول عمر مشتری به‌طور هم‌زمان، انتخاب راهبردهای‌های مناسب برای فعالیت‌های مدیریت ارتباط با مشتری شرکت را ممکن می‌سازد.[۱۶]

تعاریف متفاوتی از ارزش طول عمر مشتری وجود دارد، اما یک تعریف عمومی پذیرفته‌شده، تعریف آن به صورت ارزش فعلی جریان‌های نقدی خالص آتی مرتبط با یک مشتری خاص است.[۱۷] شرکت‌ها همچنین از شاخص‌های دیگری، مانند سودآوری مشتری استفاده می‌کنند. این دیدگاهی معاصر یا گذشته‌نگر در مقابل ارزش طول عمر مشتری است، که نگاهی به آینده ارائه می‌دهد. به همین دلیل، استفاده از ارزش طول عمر مشتری برای برنامه‌ریزی راهبردی و تاکتیکی بازاریابی مناسب‌تر است.[۱۸]

رویکرد ارزش طول عمر مشتری، پلی بین معیارهای بازاریابی و مالی ایجاد می‌کند، به این معنی که فعالیت‌های بازاریابی همیشه با معیارهای مالی مرتبط هستند و فضایی را برای بهینه‌سازی درآمد و مدیریت مشتریان فراهم می‌کنند.[۱۹] در کاربرد، ارزش طول عمر مشتری، تغییرات در رفتار مشتری (به عنوان مثال افزایش خرید) است، که می‌تواند در سودآوری آینده تأثیر بگذارد.[۲۰] همه‌ی مؤلفه‌هایی که برای مدل‌های مناسب ارزش طول عمر مشتری با داده‌های موجود استفاده می‌شوند، تأثیر مستقیم و غیرمستقیم در ارزش طول عمر مشتری دارند. این در حالی است که کاربردهای اصلی ارزش طول عمر مشتری در زمینه‌ی کسب و کار، مصرف‌کننده را هدف قرار می‌دهد؛ در حالی که برنامه‌های کاربردی کسب و کار بر مدیریت دارایی مشتری متمرکز هستند.[۲۱]

ارزش طول عمر مشتری با ارزش ویژه‌ی مشتری در ارتباط است، که عمدتاً برای محاسبه‌ی ارزش بلندمدت یک شرکت استفاده می‌شود. ارزش ویژه‌ی مشتری معمولاً به‌عنوان مجموع ارزش طول عمر همه‌ی مشتریان فعلی شرکت تعریف می‌شود، یا می‌تواند مجموع ارزش طول عمر همه‌ی مشتریان فعلی و بالقوه باشد.[۲۲]

در مطالعات ارزش طول عمر مشتری، مقایسه‌های زیادی بین مدل‌های منتخب برای محاسبه‌ی ارزش طول عمر انجام شده است. به‌عنوان مثال، دانکرز[۲] و همکاران (۲۰۰۷)،[۲۳] مدل‌های رگرسیون ساده را با بهترین عملکرد در محاسبه‌ی ارزش طول عمر مشتری دانسته‌اند. در حالی که باتسلام[۳] و همکاران (۲۰۰۷)،[۲۴] کارایی بهتر مدل بتا هندسی اصلاح‌شده را تأیید می‌کنند. از مطالعات اخیر انجام‌شده درخصوص ارزش طول عمر مشتری می‌توان به نتایج مطالعه‌ی داندیس[۴] و همکاران (۲۰۲۳)،[۲۵] اشاره کرد که نشان می‌دهد رضایت، اعتماد، و تعهد به‌طور مثبت و قابل‌توجهی در ارزش طول عمر مشتری تأثیر می‌گذارند. همچنین، گاگیل[۵] و همکاران (۲۰۲۳)،[۲۶] در مطالعه‌ی خود بیان کرده‌اند که مدل‌های مبتنی بر توزیع و پایه‌ی (تأخر، فراوانی، و پول) موجود با محدودیت‌هایی از نظر مدیریت طیف گسترده‌ای از ویژگی‌های ورودی مواجه هستند. با وجود این، رویکردهای پیشرفته‌تر یادگیری عمیق می‌توانند پیچیدگی نامطلوبی را در زمینه‌های کاربردی ارزش طول عمر مشتری اضافه کنند. بنابراین، سیستمی که بتواند هم مؤثر و هم جامع و در عین حال ساده و قابل تفسیر باشد، برای تعیین ارزش طول عمر مشتری مناسب‌تر است. ایشان در مطالعه‌ی خود یک مدل رگرسیون انباشته مبتنی بر فرایادگیری را توسعه داده‌اند.

آبیدر[۶] و همکاران (۲۰۲۳)،[۲۷] در مطالعه‌ی خود به این نتیجه رسیده‌اند که در بازار بسیار رقابتی امروزی، تبلیغ‌کنندگان تلاش می‌کنند تا پیام‌های خود را برای افراد یا گروه‌های خاص تنظیم کنند و اغلب مهم‌ترین مشتریان خود را نادیده می‌گیرند و پیش‌بینی ارزش طول عمر مشتری در این مقطع برای کمک به شرکت‌ها برای اولویت‌بندی مؤثر تلاش‌هایشان بسیار مهم است. ایشان در مطالعه‌ی مذکور، یک روش جامع برای پیش‌بینی ارزش طول عمر مشتری و پیش‌بینی فعالانه‌ی تغییرات در تقسیم‌بندی مشتری ارائه کرده‌اند. اهمیت نوشتار اخیر در بخش‌بندی مشتریان و محاسبه‌ی ارزش طول عمر آن‌ها بوده است. داندیس و همکاران (۲۰۲۲)، [۲۸] در مطالعه‌ی خود به این نتیجه رسیده‌اند که اطمینان، برخورد ویژه، و اعتبار برند، تأثیر مثبت و معنی‌داری در رضایت و تعهد مشتری دارد و اعتبار برند به‌عنوان تأثیرگذارترین عامل منجر به رضایت و تعهد مشتری و درنهایت ارزش طول عمر مشتری ظاهر می‌شود. بخشی‌زاده و همکاران (۲۰۲۲)، در مطالعه‌ی خود به خوشه‌بندی مشتریان پرداخته و نتایج مطالعه‌شان نشان داده است که مشتریان در ۴ گروه مشتریان وفادار با ارزش بالا، مشتریان گم‌شده‌ی نامطمئن، مشتریان جدید نامطمئن، و مشتریان با هزینه‌ی مصرف بالا دسته‌بندی شده‌اند. مشتریان خوشه‌ی اول با بیشترین تعداد و بیشترین ارزش طول عمر با ارزش‌ترین مشتریان و مشتریان خوشه‌های چهارم، سوم، و دوم به ترتیب در رتبه‌های دوم، سوم، و چهارم قرار گرفته‌اند.[۲۹]

دی مارکو[۷] و همکاران (۲۰۲۱)، پس از مقایسه‌ی دو الگوریتم یادگیری ماشین نشان داده‌اند که نقشه‌ی خودسازماندهی، پایگاه مشتریان خرده‌فروشی را بهتر طبقه‌بندی می‌کند. الگوریتم یادگیری ماشین با استفاده از مقادیر ارزش طول عمر مشتری و نمره‌های مدل RFM، سه خوشه را استخراج کرده است.[۳۰] بائر

[2] Donkers
[3] Batislam
[4] Dandis
[5] Gadgil
[6] Abidar
[7] De Marco

و جاناچ[8] (۲۰۲۱)، در مطالعه‌ی خود یک روش جدید برای پیش‌بینی ارزش طول عمر مشتریان براساس ترکیبی از چند شیوه‌ی یادگیری ماشین ارائه کرده‌اند، که شامل یک رویکرد یادگیری عمیق مبتنی بر شبکه‌های عصبی تکراری دنباله به دنباله‌ی رمزگذار- رمزگشا[9] با پیچیدگی‌های زمانی تقویت‌شده[10] است. نتایج مدل نشان داده است که مدل مبتنی بر توالی منجر به نتایج مطلوبی می‌شود و ترکیب آن با مدل ماشین‌های تقویت گرادیان[11] دقت را بیشتر می‌کند.[۳۱] کارنیرو و میگوییس[12] (۲۰۲۱)،[۳۲] در مطالعه‌ی خود با استفاده از RFM وزنی (تأخر، فراوانی، و پول) و استفاده از روش‌های داده‌کاوی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، به طبقه‌بندی مشتریان براساس ارزش طول عمر آن‌ها پرداخته و هر بخش از مشتریان را با مجموعه‌ای از الگوهای خرید توصیف کرده‌اند.

در میان مطالعات انجام‌شده در داخل کشور نیز حسینی روش و مقدم (۲۰۲۳) نشان داده‌اند که کیفیت خدمات ارائه‌شده در ارزش طول عمر مشتری تأثیر مثبت و معناداری دارد و بین ارزش طول عمر مشتری و درجه‌بندی تحویل‌دهندگان خدمت/ کالا تفاوت معناداری وجود دارد و کیفیت خدمات ارائه‌شده و درجه‌بندی تحویل‌دهندگان خدمت/ کالا، تأثیر معناداری در طول عمر مشتری دارد.[۳۳] رجبی اصلی و همکاران (۲۰۲۳)، نشان داده‌اند که وجود زیرساخت ورزشی، حمایت مالی باشگاه‌ها، رفاه عمومی جامعه، اثربخشی خدمات ورزشی، مدیریت ورزشی هوشمند، و مهارت مربی، تأثیر بالایی در افزایش ارزش طول عمر مشتری در مجموعه‌های ورزشی دارد.[۳۴] ایشان دریافته‌اند که پیشران‌های ارزش طول عمر مشتری به عوامل نُه‌گانه (سخت‌افزاری، نرم‌افزاری، مالی، راهبردی، اجتماعی، انگیزشی، رفتاری، فرآیندی، و اجرایی) بستگی دارد.[۳۵] صفابخش و آسایش (۲۰۲۳)، به بخش‌بندی مشتریان بانکی براساس ارزش طول عمر مشتری و توانایی سوددهی آنان براساس مؤلفه‌هایی، مانند: نرخ ماندگاری، نرخ ریزش، تورم، و میانگین موجودی پرداخته و مشتریان را در ۶ دسته با عناوین مشتریان طلایی، مشتریان با سودآوری مناسب، مشتریان با سودآوری متوسط، مشتریان با سودآوری کمابیش متوسط، مشتریان با ارزش پایین و کم‌ارزش‌ترین مشتریان تقسیم کرده‌اند. [۳۶] نتایج مطالعه‌ی قدیرمحسنی و همکاران (۲۰۲۳)، نیز با برآورد تابع سود مشتریان بانک با استفاده از ارزش طول عمر مشتری دلالت بر اهمیت بخش‌بندی مشتریان در محاسبه‌ی ارزش طول عمر داشته است.[۳۷] نبی‌زاده و روحانی (۲۰۲۰)، در مطالعه‌ای یک مدل خوشه‌بندی و پیش‌بینی ارزش طول عمر مشتری ارائه کرده‌اند؛ که در آن، ابتدا اعضا توسط مدل RFM و الگوریتم k- میانگین به ۷ طبقه دسته‌بندی و سپس هر طبقه توسط روش محاسبه‌ی ارزش طول عمر مشتریان رتبه‌بندی شده است. در ادامه، توسط الگوریتم‌های رگرسیون لجستیک، درخت تصمیم، و شبکه‌های عصبی، الگوهای پنهان بین داده‌ها و بخش‌های مختلف مشتریان کشف شده و پژوهش مذکور، رفتار مشتریان در هر یک از خوشه‌ها، و همچنین مدل رفتار آتی آنان نشان داده شده است.[۳۸] اسفیدانی و توپا اسفندیاری (۲۰۱۹)، در مطالعه‌ای به ارائه‌ی مدل شناخت ارزش طول عمر مشتریان پرداخته و دریافته‌اند که تعهد عاطفی، تعهد حسابگرانه، وفاداری رفتاری، و هزینه‌های تعویض در ارزش طول عمر مشتریان تأثیر مثبت و معناداری دارد.[۳۹]

مطابق جدول ۱ و همان‌طور که در مطالعات پیشین مشهود است، یکی از مهم‌ترین رویکردها برای پیگیری بخشی از برنامه تجربه‌ی مشتری، ارزش طول عمر مشتری است و اندازه‌گیری میزان ارزش مشتری برای سازمان‌ها، نه فقط براساس خرید، بلکه براساس روابط کلی بوده و در بیشتر مطالعات به آن‌ها توجه شده است.

روش اصلی استفاده‌شده در غالب پژوهش‌ها، استفاده از زنجیره‌ی مارکوف است.[۲۶] مزیت استفاده از زنجیره‌ی مارکوف، قابلیت درنظرگرفتن مشتریانی است که بین شرکت و رقبای آن جابجا می‌شوند. بنابراین، می‌توان مدیریت ارتباط با مشتری را با روشی احتمالی توصیف کرد.[۱۱] مدل‌های زنجیره‌ی مارکوف پیشنهادی در مطالعات پیشین، ماتریس احتمال انتقال وضعیت را با استفاده از کل داده‌های بازه‌ی زمانی موردبررسی تخمین زده‌اند؛ که با این روش، احتمال تغییر رفتار مشتری نادیده گرفته شده‌اند و ممکن است در مقاطع زمانی کوچک‌تر رخ داده باشند. در تمام مدل‌های ارائه‌شده در مطالعات پیشین، محاسبه‌ی ارزش طول عمر مشتری با استفاده از مدل‌سازی زنجیره‌ی مارکوف، ماتریس احتمال انتقال به صورت ماتریسی با درایه‌های ثابت تخمین زده شده است.[۲۷] در حالی که در دنیای واقعی این فرض می‌تواند خلاف واقعیت باشد و ممکن است احتمال تغییر رفتار مشتری از یک وضعیت خاص به یک وضعیت معین دیگر با توجه به تغییر سیاست‌های بازاریابی، تغییر عوامل اقتصادی، افزایش اعتماد و وفاداری مشتریان به برند، و ... در طول بازه‌ی زمانی موردبررسی ثابت نباشد و به‌صورت پویا تغییر کند. از آنجایی که تخمین درست مقادیر احتمال‌های گذار، اثر مستقیمی در تخمین درست ارزش طول عمر مشتریان و به تبع آن تخصیص درست هزینه‌های بازاریابی مربوط به جذب و حفظ مشتریان دارد، می‌توان ارزش طول عمر مشتریان را با درنظرگرفتن متغیربودن احتمال‌های انتقال از یک وضعیت به وضعیت دیگر در طول زمان با دقت بیشتری محاسبه کرد. لذا، در مطالعه‌ی حاضر با خوشه‌بندی پویای مشتریان به‌منظور ایجاد کنترل نسبی بر روی رفتار پویای مالی آن‌ها، ماتریس‌های احتمال انتقال وضعیت مشتریان به‌صورت پویا در مقاطع زمانی هفتگی برآورد شده است. همچنین، درآمد موردانتظار از هر یک از مشتریان براساس احتمال‌های انتقال وضعیت آن‌ها از یک خوشه به خوشه‌ی دیگر محاسبه شده و مبنای محاسبه ارزش طول عمر مشتریان قرار گرفته است. بنابراین، مطالعه‌ی حاضر، با رویکردی متفاوت به محاسبه‌ی ارزش طول عمر مشتریان، نسبت به مطالعات پیشین دانش‌افزایی دارد.

۳. روش پژوهش

مطالعه‌ی حاضر، از نظر شیوه و روش، مبتنی بر مدل‌سازی ریاضی برای طراحی مدل خوشه‌بندی با شبکه‌ی عصبی خودسازمانده و مدل‌سازی زنجیره‌ی مارکوف در تحلیل وضعیت مشتریان است. از نظر افق زمانی، تک‌مقطعی بوده و در یک بازه‌ی زمانی خاص بررسی شده است. نوع پژوهش حاضر، از لحاظ ابزار جمع‌آوری اطلاعات، توصیفی و از نظر هدف، کاربردی بوده است. جامعه‌ی آماری پژوهش حاضر، شامل کلیه‌ی مشتریان بانک دیجیتال پاسارگاد در سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱ بوده است، که اطلاعات مرتبط با تراکنش‌های آنان شامل: تازگی تراکنش، تعداد تراکنش‌ها، و حجم تراکنش‌ها در پایگاه داده‌های شرکت داتیس آرین قشم موجود است. تعداد مشتریانی که اطلاعات موردنیاز برای آن‌ها در دسترس بوده و ثبت شده است، مساوی ۲۳۵۳۴۱۹ نفر بوده است. با توجه به حجم بزرگ، اما محدود جامعه‌ی آماری، جهت تعیین حجم نمونه از رابطه‌ی نمونه‌گیری کوکران

[8] Bauer & Jannach
[9] encoder–decoder sequence-to-sequence recurrent neural networks
[10] augmented temporal convolutions
[11] gradient boosting machines
[12] Carneiro & Miguéis

جدول ۱. خلاصه‌ی مرور پیشینه‌ی پژوهش.

Researcher(s) (Year)	Objective	Approach
Dankers et al. [۲۳]	Customer Lifetime Value Calculation	Simple Linear Regression
Batsalam et al. [۲۴]	Customer Lifetime Value Calculation	Modified Geometric Beta Model
Dandis et al[۲۵]	Factors Affecting Customer Lifetime Value	Structural Equation Modeling
Gagil et al[۲۶]	Customer Lifetime Value Calculation	Ensemble Regression Based on Meta-Learning
Abider et al[۲۷]	Customer Lifetime Value Prediction	Qualitative
Dandis et al. [۲۸]	Factors Affecting Customer Lifetime Value	Structural Equation Modeling
Bakhshi Zadeh et al[۲۹]	Customer Clustering	K-Means Algorithm
Di Marco et al[۳۰]	Customer Clustering	Self-Organizing Map (SOM)
Bauer & Janach [۳۱]	Customer Lifetime Value Prediction	Artificial Neural Network
Karneiro & Migueis [۳۲]	Customer Classification Based on CLV	Weighted RFM, Data Mining, Hierarchical Analysis
Hosseini Ravesh & Moghaddam [۳۳]	Factors Affecting Customer Lifetime Value	Structural Equation Modeling
Rajabi Asli et al[۳۴]	Factors Affecting Customer Lifetime Value	Structural Equation Modeling
Safabakhs & Asayesh [۳۶]	Banking Customer Segmentation Based on CLV	Clustering
Ghadir Mohseni et al[۳۷]	Customer Lifetime Value	Customer Profit Function Estimation
Nabizadeh & Rouhani [۳۸]	Customer Lifetime Value Prediction	K-Means Algorithm, Logistic Regression, ANN
Esfidani & Topa Asfandiari [۳۹]	Understanding Customer Lifetime Value	Structural Equation Modeling
Present Study	Customer Lifetime Value Analysis	Artificial Neural Networks, SOM, Markov Chain

برای جامعه با حجم مشخص استفاده شده است. در این رابطه، خطای برآورد برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شده و سطح اطمینان برابر با ۹۵٪ لحاظ شده است. بنابراین، با جایگذاری مقادیر پارامترهای مذکور در رابطه‌ی نمونه‌گیری کوکران، حجم نمونه برابر با ۳۸۵ نفر به‌دست آمده است، که به‌منظور نمونه‌گیری از بین مشتریان، از روش نمونه‌گیری تصادفی ساده استفاده شده است. شایان ذکر است که تجزیه‌وتحلیل داده‌ها در نرم‌افزار آماری R ویرایش ۴.۱.۳ و با استفاده از کتابخانه‌ی SOM انجام شده است.

۱.۳. خوشه‌بندی مشتریان

در پژوهش حاضر از مدل RFM استفاده شده است. مدل RFM متداول‌ترین روش بخش‌بندی مشتریان است؛ که شامل سه متغیر: تأخر، تواتر، و حجم است. مدل RFM، یک مدل مبتنی بر رفتار است که برای تحلیل رفتار یک مشتری و سپس پیش‌بینی او براساس رفتارش در بانک اطلاعات استفاده می‌شود. براساس مطالعات انجام‌شده، متغیرهای RFM در واقع مختص شرکت هستند و براساس طبیعت محصولات یا خدمات شرکت، اهمیت آن‌ها فرق می‌کند. در مدل مذکور، R معرف فاصله‌ی زمانی آخرین خرید مشتری تا زمان حال، F معرف تعداد خریدها در یک دوره‌ی زمانی مشخص، و M معرف مبلغ اسمی خریداری‌شده در دوره‌ی موردنظر هستند. بنابراین، همسان‌سازی مفاهیم مدل RFM با داده‌ها و صنعت موردمطالعه منجر به تعریف متغیرها به این شکل شده است:

– **شاخص تأخر (R)**: متوسط تعداد روزهایی که بین هر دو تراکنش متوالی مشتری در طول یک هفته وجود دارد. این شاخص برای دوره‌ی ۳ ساله‌ی ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱ با تواتر هفتگی ثبت شده است. برای محاسبه‌ی متغیر R، تراکنش‌های هر مشتری در طول هر یک از ۱۵۶ هفته‌ی موردمطالعه ثبت و فاصله‌ی زمانی بین هر دو تراکنش متوالی در هر هفته (در واحد ۱ روز) محاسبه شده است. متوسط فاصله‌ی زمانی بین هر دو تراکنش متوالی در طول یک هفته، به‌عنوان شاخص تأخر برای آن مشتری در طول هفته‌ی موردنظر در نظر گرفته شده است. مقادیر اعشاری برای متغیر R، نشان از تأخر کمتر از ۱ روز دارند.

– **شاخص تناوب (F)**: تعداد تراکنش‌های مشتری در طول یک هفته است، که در دوره‌ی زمانی ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱ و برای تعداد ۱۵۶ هفته در ۳ سال ثبت شده است.

– **شاخص پولی (M)**: مجموع گردش حساب مشتری در طول یک هفته است، که در دوره‌ی زمانی ۳ ساله‌ی ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱ با تواتر هفتگی ثبت شده است. این مقدار برابر با مجموع ارزش کل تراکنش‌های انجام‌شده توسط مشتری (واریز/ برداشت) در طول هر هفته بوده است.از آنجا که تعیین ارزش طول عمر مشتریان نیازمند معیارهای دیگری برای سنجش هزینه‌ی تبلیغات صرف‌شده برای هر مشتری و سودآوری حاصل از هر مشتری است، دو متغیر دیگر هم در پژوهش حاضر استفاده شده‌اند، که عبارت‌اند از:

– **هزینه‌ی تبلیغات (P)**: برابر با مجموع هزینه‌های تبلیغاتی تحمیل‌شده به بانک برای هر مشتری در طول یک هفته است، که در دوره‌ی زمانی ۳ ساله‌ی ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱ با تواتر هفتگی ثبت شده است.

– **درآمد حاصل از تراکنش‌های مشتری (Rev)**: برابر با مجموع درآمدهای حاصل از تراکنش‌های بانکی مشتری در طول یک هفته است، که در دوره‌ی زمانی ۳ ساله‌ی ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱ با تواتر هفتگی ثبت شده است.

در تحلیل کنونی، ویژگی‌های RFM به‌عنوان ویژگی‌های اصلی مشاهده‌ها به‌منظور خوشه‌بندی مشتریان در نظر گرفته شده‌اند. تحلیل حاضر برای هر هفته به‌طور جداگانه انجام و وضعیت تعلق هر مشتری به هر خوشه تعیین شده است. بنابراین اگر فرض شود که $(X_{Ri}^{j}, X_{Pi}^{j}, X_{Mi}^{j})$ معرف بردار مقادیر RFM برای مشتری i اُم در هفته‌ی j اُم باشد، آنگاه پس از انجام تحلیل به تعداد هفته‌های مطالعه‌شده (۱۵۶ هفته)، تعداد ۱۵۶ وضعیت متفاوت برای تعلق مشتری i اُم به یکی از خوشه‌ها ثبت شده است. بنابراین خروجی حاصل از تحلیل کنونی، شامل یک ماتریس انتقال وضعیت مشتریان از خوشه‌ای به خوشه‌ی دیگر طی ۱۵۶ هفته متوالی بوده است.

۲.۳. تشکیل زنجیره‌ی مارکوف خوشه‌ها برای مشتریان

پس از دسته‌بندی مشتریان، به ارائه‌ی مدلی جهت پیش‌بینی وضعیت آتی آنان با کمک زنجیره‌های مارکوف پرداخته شده است. طبق مدل‌های زنجیره‌ی مارکوف برای رفتار مشتری، مشتری شرکت را می‌توان در یکی از N حالت ممکن خوشه‌بندی کرد، که با مجموعه‌ی {N-۱، ...، ۲، ۱، ۰} نشان داده می‌شود.

به‌عنوان مثال، مشتریان را می‌توان به ۴ گروه طبقه‌بندی کرد: مشتری با ارزش کم (حالت ۱)، مشتری با ارزش متوسط (حالت ۲)، مشتری با ارزش زیاد (حالت ۳)، و مشتری با ارزش خیلی زیاد (حالت ۴). یک مدل زنجیره‌ای مارکوف با N حالت مختلف، با ماتریس احتمال انتقال وضعیت آن با ابعاد N×N و نماد P مشخص می‌شود. هر درایه‌ی ماتریس اخیر با نماد p_{ij} شناخته می‌شود و این مقدار برابر با احتمال انتقال وضعیت مشتری از وضعیت (خوشه) i به وضعیت (خوشه) j است. بنابراین احتمال باقی‌ماندن مشتری در وضعیت i برابر با مقدار روی قطر اصلی ماتریس احتمال انتقال وضعیت و برابر با p_{ii} است.

اگر فرض شود زنجیره‌ی مارکوف غیرقابل کاهشی باشد (حالت‌ها یا وضعیت‌های آن قابل حذف نباشند)، آنگاه توزیع مانای $\boldsymbol{p}$ وجود دارد، که نشانگر احتمال قرارگیری هر مشتری در هر یک از وضعیت‌های N-گانه در زمان شروع فرایند است (رابطه‌ی ۱):

$$\boldsymbol{p} = (\boldsymbol{p}_0, \boldsymbol{p}_1, ..., \boldsymbol{p}_{N-1})^T; \qquad \sum_{i=0}^{N-1} \boldsymbol{p}_i = 1, \quad \boldsymbol{p}_i \geq 0 \qquad (1)$$

که در آن، $\boldsymbol{p}_i$ معرف قرارگیری هر یک از مشتریان در وضعیت i اُم زنجیره‌ی مارکوف در زمان شروع فرایند و T نماد ترانهاده‌ی بردار است. بنا به فرض مانایی توزیع، رابطه‌ی ۲ برقرار است:

$$\boldsymbol{p} = P\boldsymbol{p} \qquad (2)$$

بنابراین، احتمال باقی‌ماندن مشتری در وضعیتی غیر از صفر (احتمال نگهداشت مشتری) با استفاده از توزیع مانای $\boldsymbol{p}$، مطابق رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$\sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{\boldsymbol{p}_i}{\sum_{j=1}^{N-1} \boldsymbol{p}_j}\right)(1 - p_{i.}) = 1 - \frac{1}{1-\boldsymbol{p}_.} \sum_{i=1}^{N-1} \boldsymbol{p}_i p_{.i} = 1 - \frac{\boldsymbol{p}_.(1-p_{..})}{1-\boldsymbol{p}_.} \qquad (3)$$

در این گام، وضعیت قرارگیری مشتریان در هریک از خوشه‌ها، تعیین‌کننده‌ی یک زنجیره‌ی مارکوف است. بنابراین زنجیره‌ی مارکوف متشکل از خوشه‌های مشتریان، شامل N وضعیت (خوشه) و طول ۱۵۶ مشاهده برای هر مشتری است. خروجی بخش اخیر، شامل یک ماتریس وضعیت است، که ۱۵۶ ستون و سطرهایی برابر با تعداد مشتریان دارد. ماتریس وضعیت با M نمادگذاری شده و مقدار درایه‌ی m_{ij} در ماتریس M، نشانگر وضعیت مشتری i در یکی از خوشه‌ها در هفته‌ی j اُم است. مقدار درایه‌های مذکور با یکی از مقادیر {N-۱، ...، ۲، ۱، ۰} برابر است.

به‌منظور برآورد ماتریس پویای انتقال وضعیت، ابتدا مشتریان بر حسب میزان هزینه‌های تبلیغاتی‌شان به دو گروه: ۱) هزینه‌ی تبلیغات کم، و ۲) هزینه‌ی تبلیغات زیاد طبقه‌بندی می‌شوند. از آنجایی که هزینه‌های تبلیغاتی مشتریان در هر هفته می‌تواند متفاوت از سایر هفته‌ها باشد، متوسط هزینه‌های تبلیغاتی هر مشتری طی ۱۵۶ هفته‌ی مطالعه‌شده، برآورد و مشتریان بر حسب متوسط هزینه‌های تبلیغاتی آن‌ها به دو گروه مشتریان با هزینه‌های تبلیغاتی کم و زیاد طبقه‌بندی شده‌اند. برای تفکیک مشتریان به دو گروه اخیر از تحلیل خوشه‌ای استفاده شده است. بنابراین ماتریس M به‌دست‌آمده از وضعیت مشتریان در مرحله‌ی پیشین، به ۲ زیرماتریس با ۱۵۶ ستون و سطرهایی برابر با تعداد مشاهده‌های هر یک از گروه‌های تبلیغاتی تفکیک می‌شود، که آن‌ها با M_1 و M_2، درایه‌های آن‌ها با m_{ij}^{1} و m_{ij}^{2} و ماتریس‌های احتمال انتقال وضعیت آن‌ها با P_1 و P_2 نام‌گذاری شده است. سپس ماتریس احتمالات انتقال وضعیت مشتری برای هر یک از ماتریس‌های M_1 و M_2 به‌طورجداگانه و به این صورت برآورد شده است:

۱) در هریک از ماتریس‌های وضعیت M_1 و M_2 با حرکت افقی بر روی ستون‌های ماتریس، تعداد مشتریانی که از وضعیت i (در ستون اول) به وضعیت j (در ستون بعدی) تغییر وضعیت داده‌اند، شمرده می‌شود و حاصل آن بر تعداد کل مشتریانی که در آن ماتریس و در وضعیت i قرار دارند، تقسیم می‌شود. حاصل این عبارت برابر با مقدار درایه‌ی p_{ij} در ماتریس احتمال انتقال وضعیت‌های P_1 و P_2 است.

۲) در ستون اول، تعداد مشتریان هر یک از ماتریس‌های M_1 و M_2، که در هریک از وضعیت‌های i قرار دارند، شمرده می‌شوند و بر تعداد کل مشتریان آن ماتریس تقسیم می‌شوند. حاصل محاسبات اخیر، برآورد توزیع‌های اولیه‌ی وضعیت مشتریان در هر یک از ماتریس‌های M_1 و M_2 خواهد بود.بنابراین، حاصل خروجی‌های بخش کنونی، ۲ ماتریس احتمال انتقال وضعیت P_1 و P_2 و ۲ بردار وضعیت‌های اولیه‌ی $\boldsymbol{p}^{(1)}$ و $\boldsymbol{p}^{(2)}$ هستند، که هر یک از آن‌ها متناظر با یکی از وضعیت‌های هزینه‌های تبلیغاتی هستند. مجموع درایه‌های هر یک از سطرهای ماتریس‌های ذکرشده مساوی ۱ خواهد بود. بنابراین مقادیر احتمال نگهداشت مشتریان در هر یک از وضعیت‌های تبلیغاتی، با استفاده از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود.

۳.۳. درآمدزایی موردانتظار مشتریان

در بخش حاضر، از مدل مارکوف در برآورد ارزش طول عمر مشتریان استفاده شده است. در این حالت، اگر c_{ij} معرف مقدار درآمد حاصل از مشتری j اُم باشد، که در وضعیت i عاید شرکت می‌کند، آنگاه درآمد موردانتظار مشتری j اُم مطابق رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود:

$$E.\mathrm{Rev}_i = \sum_{i=0}^{N-1} c_{ij} \boldsymbol{p}_i \qquad (4)$$

جدول ۲. توصیف متغیرها.

Variable	Symbol	Std. Deviation	Minimum	Maximum	Median	Mean
Lag Index	R	0.81934	0.15	3	1.5827	1.5778
Frequency Index	F	7.498	4	29	17	16.55
Monetary Index	M	192,403,725.3	2,122,996	868,913,107	820,380,134.8*	251,955,046.9
Advertising Cost	P	625,974.43	40,065	2,899,302	754,240.8	908,229.6
Revenue from Transactions	Rev	427,840.236	3,168	2,550,608	380,183.7	503,503.6

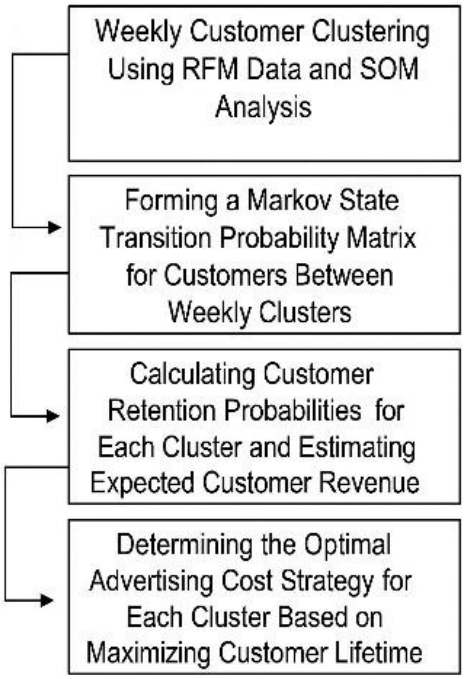
احتمال نگهداشت رابطه‌ی ۳ و درآمد موردانتظار رابطه‌ی ۴ با این فرض محاسبه می‌شود که شرکت در طول دوره، هیچ تبلیغاتی انجام نمی‌دهد. ماتریس احتمال انتقال وضعیت P در صورت تبلیغات توسط شرکت، می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی متفاوت باشد. بنابراین، تحت رابطه‌ی ۴، می‌توان ارزش طول عمر هر مشتری را در هر یک از خوشه‌های شناسایی‌شده از تحلیل SOM و تحت شرایط زمان-متغیر حاصل از زنجیره‌ی مارکوف محاسبه کرد.

۴.۳ . ارزش طول عمر مشتریان مبتنی بر خوشه‌های SOM و احتمالات انتقال وضعیت

برای محاسبه‌ی ارزش طول عمر مشتریان در هر یک از خوشه‌ها و با توجه به احتمالات انتقال وضعیت مشتری از خوشه‌ای به خوشه‌ی دیگر، به بیشینه‌سازی درآمد موردانتظار از هر مشتری تحت شرایط احتمالات انتقال وضعیت مشتری و در افق زمانی نامتناهی پرداخته شده است. علت استفاده از افق زمانی نامتناهی، حصول شرایط ایده‌آل، یعنی حفظ مشتری به‌صورت مادام‌العمر است. بنابراین مدل برنامه‌ریزی پویای تصادفی در افق نامتناهی به صورت رابطه‌ی ۵ تبیین می‌شود:

$$\upsilon_i = \max\{E.\mathrm{Rev}_i^{(1)} - d_1 + \alpha\sum_{j=0}^{N-1} p_{ij}^{(1)}\upsilon_j \;, \quad E.\mathrm{Rev}_i^{(2)} - d_2 + \alpha\sum_{j=0}^{N-1} p_{ij}^{(2)}\upsilon_j \;\} \tag{۵}$$

که در آن، υ_i ارزش طول عمر مشتریان در وضعیت (خوشه) i و $E.\mathrm{Rev}_i^{(k)}$ درآمد موردانتظار از مشتریان در وضعیت (خوشه) i است، که تحت یکی از راهبردهای تبلیغاتی k (k = ۱، ۲) قرار دارد. همچنین، d_k میزان هزینه‌ی انجام‌شده برای تبلیغات در گروه تبلیغاتی k (k = ۱، ۲) و $p_{ij}^{(k)}$ احتمال انتقال وضعیت مشتری از حالت i به حالت j در صورتی است که مشتری تحت راهبرد تبلیغاتی k قرار داشته باشد. α نیز نرخ تنزیل درآمد موردانتظار از مشتریان است، که در پژوهش حاضر بر پایه‌ی رابطه‌ی $\alpha = e^{-at}$ با افق زمانی ۱۰ ساله (t =۱۰) و نرخ بازدهی ۱۸٪ سالیانه ($\alpha = ۰/۱۸$) برابر با ۰/۱۶۵۳ بوده است. خروجی تحلیل انجام‌شده، برآورد ارزش طول عمر مشتریان در هر یک از گروه‌های تبلیغاتی و با اتکا به ماتریس‌های احتمال انتقال وضعیت آن‌هاست. در شکل ۱، نمودار مراحل انجام تحلیل و پاسخ به مسئله‌ی پژوهش بر پایه‌ی توضیحات مذکور مشاهده می‌شود.



شکل ۱. نمودار روند تحلیل داده‌ها و بهینه‌یابی راهبرد تبلیغات.

۴. یافته‌ها

در بخش حاضر، اطلاعات مربوط به هر یک از متغیرهای پژوهش با تواتر هفتگی و در مجموع برای ۱۵۶ هفته جمع‌آوری شده و مبنای تحلیل قرار گرفته است. بنابراین، ۶۰۰۶۰ ردیف مشاهده مربوط به تعداد ۳۸۵ مشتری در تحلیل‌های آماری پژوهش استفاده شده‌اند. در جدول ۲، شاخص‌های توصیفی هر یک از متغیرهای مطالعه‌شده در تحلیل رفتار مشتریان ارائه شده است.

با توجه به شاخص‌های ارائه‌شده در جدول ۲ مشاهده می‌شود که شاخص تأخر (R)، که بیان‌کننده‌ی میانگین تعداد روزهای سپری‌شده بین دو تراکنش متوالی مشتری در هر هفته است، به‌طورمیانگین برابر با ۱/۵۷۷۸ روز برآورد شده است. شاخص تناوب (F)، که تبیین‌کننده‌ی تعداد تراکنش‌های هر مشتری در طول یک هفته است، به‌طورمیانگین مساوی ۱۶/۵۵ به‌دست آمده است، که نشانگر متوسط تعداد تراکنش‌های مشتریان جامعه‌ی آماری هدف در طول هر هفته است. شاخص پولی (M)، به‌عنوان مجموع گردش حساب مشتری در طول یک هفته با مقدار متوسط ۲۵۱۹۵۵۰۴۶/۹۰ ریال نشان می‌دهد که هر مشتری به‌طورمتوسط در طول یک هفته از کل ۱۵۶ هفته‌ی مطالعه‌شده، گردش حسابی برابر با مقدار مذکور داشته است. هزینه‌ی تبلیغات نیز نشانگر مجموع هزینه‌های تبلیغاتی تحمیل‌شده به بانک برای هر مشتری در طول یک هفته است، که به‌طورمیانگین برابر با ۹۰۸۲۲۹/۶۰ ریال برآورد شده است. همچنین درآمد حاصل از تراکنش‌های مشتریان نیز در طول یک هفته به‌طور متوسط مساوی ۵۰۳۵۰۳/۶۱ بوده است.

۱.۴. خوشه‌بندی SOM مشتریان

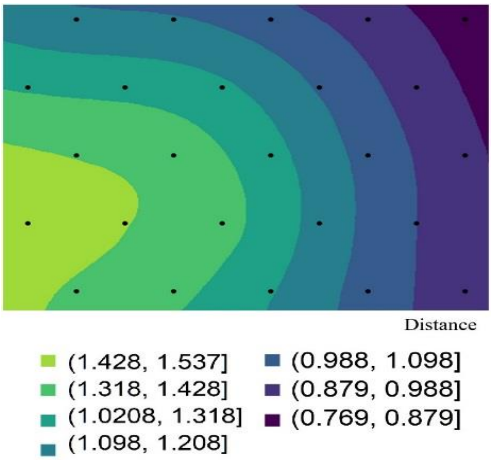
در تحلیل حاضر، مشتریان در هر هفته با توجه به وضعیت توأم شاخص‌های سه‌گانه‌ی RFM، به ۴ خوشه (آبرکلاس[13]) دسته‌بندی شده‌اند. برای این منظور، ابتدا ۲۵ نگاشت اولیه (سلول) از مشتریان ایجاد و سپس به ۴ آبرکلاس یا خوشه‌ی کلی‌تر تقسیم شده‌اند. در شکل ۲، نمودار نقشه‌ی حرارتی[14] یکی از ۱۵۶ تحلیل انجام‌شده برای نگاشت‌های اولیه در ۷ خوشه‌ی میانی، به‌همراه بازه‌های تشخیصی نگاشت‌ها از یکدیگر مشاهده می‌شود.

مطابق شکل ۲ مشاهده می‌شود که ابتدا ۲۵ بردار گره از کل مشاهده‌های RFM در یک هفته تشکیل شده‌اند. سپس بردارهای گره‌ی مذکور در ۷ لایه براساس کمینه‌ی فاصله‌ی مشاهده‌ها از مرکز دسته (گره) تفکیک شده‌اند. مقادیر سمت راست نمودار، نشانگر نقاط مرزی تفکیک لایه‌ها از یکدیگر است. در واقع، مجسم‌سازی SOM بر پایه‌ی گره‌های اخیر انجام می‌شود و هر بردار گره، این ویژگی‌ها را دارد:

- ✓ یک موقعیت ثابت در شبکه‌ی SOM دارد.
- ✓ هر گره، شامل اطلاعات مربوط به تمامی متغیرهاست.
- ✓ هر بردار گره، شامل اطلاعات مربوط به چند مشاهده است. مشاهده‌هایی که از نظر RFM، کمترین فاصله‌ی اقلیدسی را با مرکز گره دارند، در آن بردار گره دسته‌بندی می‌شوند. بنابراین، یک گره می‌تواند چند نمونه‌ی ورودی را نشان دهد.

ویژگی اصلی SOM این است که ویژگی‌های توپولوژیکی داده‌های ورودی اصلی روی نقشه حفظ می‌شوند. این بدان معناست که مشاهده‌های مشابه (بر حسب متغیرهای ورودی) در شبکه‌ی SOM نزدیک به هم قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال، تمام مشتریانی که شاخص تأخری در حدود ۰/۵، شاخص تناوبی در حدود ۱۰، و شاخص پولی در حدود ۱۰۰۰۰۰۰۰ ریال داشته باشند، در همان ناحیه از شبکه نگاشت می‌شوند. افرادی با شاخص‌های RFM بسیار متفاوت‌تر، در نقاط دیگری از نقشه دسته‌بندی می‌شوند.

پس از تشکیل بردار گره‌ها، تعداد کل گره‌ها به ۴ خوشه‌ی اصلی یا سوپرکلاس طبقه‌بندی شده‌اند. تعداد آبرکلاس‌ها براساس روش SSE و کمینه‌سازی مجموع فواصل گره‌ها از مراکز دسته تعیین شده است.در شکل ۳، نمودار تفکیک بردار گره‌های ۲۵ گانه در ۴ آبرکلاس کلی‌تر در همان هفته‌ای مشاهده می‌شود که نقشه‌ی حرارتی آن ارائه شده است.

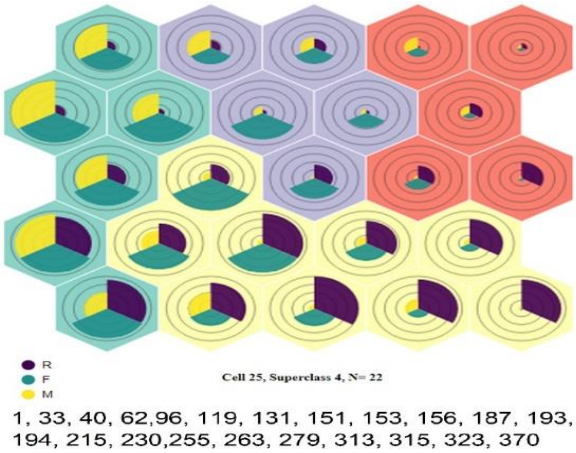


شکل ۲. نمودار نقشه‌ی حرارتی نگاشت‌های ۲۵ گانه حاصل از تحلیل SOM بر روی مقادیر RFM مشتریان در یک هفته.

مطابق شکل ۳ مشاهده می‌شود که ۲۵ بردار گره‌ی اولیه، به ۴ آبرکلاس کلی‌تر تفکیک شده‌اند، که هر آبرکلاس با یک رنگ متفاوت در نمودار مشخص شده است. هر بردار گره، همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شده است، براساس وضعیت کلی هر سه متغیر ورودی RFM تشکیل شده است، که در شکل مذکور، شدت مقادیر هر یک از متغیرهای مذکوز در هر بردار گره با استفاده از نمودار دایره‌ای مشخص شده است. به عنوان مثال، سوپرکلاس اول با رنگ قرمز، نشانگر بردارهای گره‌ی حاصل از مشاهداتی است که مقادیر RFM آن‌ها کوچک است. آبرکلاس دوم با رنگ بنفش، نشانگر بردارهای گره‌ی حاصل از مشاهده‌هایی است که تناوب تراکنش (F) آن‌ها بزرگ است. آبرکلاس سوم نیز با رنگ سبز، نشانگر بردارهای گره‌ی حاصل از مشاهده‌هایی است که مقادیر دو متغیر F و M در آن‌ها بزرگ بوده است. در حالی که سوپرکلاس چهارم با رنگ زرد، نشانگر بردارهای گره‌ی حاصل از مشاهده‌هایی است که مقادیر تأخر (R) در آن‌ها بزرگ بوده است.

با توجه به نتایج گرافیکی تحلیل اخیر، مشاهده می‌شود که برای هر یک از مشتریان در هر هفته، یک وضعیت قابل تشخیص است که نشانگر وضعیت قرارگیری مشتری در یکی از خوشه‌های ۴ گانه‌ی تحلیل SOM است. بنابراین، با انجام این تحلیل بر روی تمامی ۱۵۶ هفته‌ی موردمطالعه، برای هر مشتری یک زنجیره‌ی مارکوف با ۱۵۶ عنصر تشکیل می‌شود، که نشانگر وضعیت‌های متوالی مشتریان از منظر خوشه‌های RFM است. در جدول ۳، نتایج ارزیابی معیارهای کیفی تحلیل SOM برای ۱۵۶ هفته ارائه شده است.

در جدول ۲، «کوانتیزاسیون» را می‌توان خطای ناشی از گردکردن اعداد دانست، که در دقت محاسبات تأثیرگذار است. مقدار متوسط خطای کوانتیزاسیون[15] در تحلیل‌های انجام‌شده مساوی ۰/۲۴۰۱۶۲ به‌دست آمده است، که با توجه به مقیاس متغیرهای پژوهش، مقدار قابل قبولی به‌نظر می‌رسد. همچنین در تحلیل‌های SOM انجام‌شده به‌طور متوسط می‌توان ۹۱/۹۷٪ از تغییرات موجود در داده‌ها را کنترل و تبیین کرد.



شکل ۳. نمودار نقشه‌ی SOM آبرکلاس‌های مشتریان در طول یک هفته.

[13] Super Class
[14] Heat map
[15] Quantization error

جدول ۳. معیارهای کیفی تشکیل آبَرکلاس‌ها در تحلیل SOM برای ۱۵۶ هفته.

Quality Performance Indicator	Minimum	Maximum	Average
Quantization Error	0.218755	0.263433	0.240162
Percentage of Explained Variance	91.2	92.69	91.973397
Topographic Error	0.116883	0.309091	0.205877
Casky-Lag Error	1.579139	2.116103	1.801255

جدول ۴. عملکرد روش خوشه‌بندی SOM در مقایسه با روش‌های سنتی.

Clustering Method	Number of Proposed Clusters	Percentage of Explained Variance
SOM	4	91.973397
K-Means	6	84.32216
Density-Based	3	87.151097
Distribution-Based	4	86.690851

جدول ۵. ماتریس احتمال انتقال وضعیت مشتریان در آبَرکلاس‌ها.

Base State	Cluster 4	Cluster 3	Cluster 2	Cluster 1
Cluster 1	0.2276973	0.2499102	0.2434439	0.2789486
Cluster 2	0.2227514	0.2430747	0.2536052	0.2805688
Cluster 3	0.2162457	0.2476340	0.2506298	0.2854906
Cluster 4	0.2293489	0.2363759	0.2599985	0.2742767

به بیان دیگر، تفکیک مشاهده‌ها به بردار گره‌ها و سپس آبَرکلاس‌ها فقط منجر به از دست‌رفتن کمتر از ۹٪ از کل اطلاعات موجود در داده‌ها شده است. خطای توپوگرافی[16] نیز نشانگر میزان خطای پیوستگی در نمودارهای حاصل از تحلیل است، که به‌طور متوسط برابر با ۰/۲۰۵۸۷۷ به‌دست آمده و این مقدار نیز با توجه به مقیاس بزرگ متغیرهای پژوهش قابل اغماض بوده است. خطای کاسکی- لاگز[17] (۱۹۹۶)، جنبه‌های کوانتیزاسیون و خطای توپوگرافی را ترکیب می‌کند. این معیار، مجموع میانگین‌های فاصله بین نقاط با بهترین نمونه‌های مشابه آن‌ها و میانگین فاصله بین نقاط با دومین نمونه‌ی شبیه با آن‌هاست. در واقع، خطای کاسکی- لاگز، معیاری برای سنجش عدم تشابه بین دو SOM است و این مقدار، کمترین مقدار خطای ممکن برای تشکیل آبَرکلاس‌ها از بردارهای گره است. در واقع، تشکیل آبَرکلاس‌ها از بردارهای گره بر پایه‌ی کمینه‌سازی خطاهای کوانتیزاسیون، توپوگرافی، و کاسکی- لاگز و بیشینه‌سازی درصد واریانس تبیین‌شده[18] انجام می‌شود. به‌منظور ارزیابی عملکرد روش خوشه‌بندی SOM مشتریان، از ۳ روش خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی، خوشه‌بندی مبتنی بر توزیع، و خوشه‌بندی K- میانگین استفاده شده است، که نتایج عملکرد هر یک از روش‌های مذکور نسبت به میزان تبیین تغییرات در داده‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

مطابق با نتایج جدول ۴ مشاهده می‌شود که روش شبکه‌ی عصبی خودسازمانده (SOM)، عملکرد بهتری در تبیین تغییرات موجود در خوشه‌ها داشته است. الگوریتم K- میانگین به‌عنوان متداول‌ترین و البته ساده‌ترین روش خوشه‌بندی توانسته است تقریباً ۸۴٪ از تغییرات موجود در خوشه‌ها را تبیین کند، در حالی که روش‌های خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی و مبتنی بر توزیع به ترتیب ۸۷ و ۸۶ درصد از تغییرات موجود بین خوشه‌ها را تبیین کرده‌اند. در الگوریتم K- میانگین، از معیار فاصله‌ی خطی بین مشاهده‌ها در هر خوشه استفاده می‌شود، در حالی که روش مبتنی بر چگالی، مناطق تمرکز مشاهده‌ها را شناسایی و مشاهده‌های دورافتاده را از تحلیل حذف می‌کند. در روش مبتنی بر توزیع نیز با فرض گاوسی‌بودن توزیع مشاهده‌ها در هر خوشه، اقدام به خوشه‌بندی مشاهده‌ها می‌شود، که یک فرض سخت بر روی داده‌های طبیعی است. بنابراین، عملکرد بهتر روش شبکه‌ی عصبی خودسازمانده (SOM) نسبت به روش‌های مذکور، دور از انتظار نبوده است.

۲.۴. ماتریس احتمال انتقال وضعیت مشتریان

پس از طبقه‌بندی مشتریان در آبَرکلاس‌های تحلیل SOM طی ۱۵۶ هفته، برای هر مشتری یک زنجیره‌ی مارکوف با ۱۵۶ عضو ایجاد شده است، که هر عضو از زنجیره‌ی مارکوف، نشانگر وضعیت تعلق مشتری به یکی از خوشه‌های ۴ گانه در آن هفته است. بنابراین ماتریس احتمال انتقال وضعیت هر مشتری از یک خوشه به خوشه‌ی دیگر بر پایه‌ی تغییر وضعیت‌های i به j نسبت به کل وضعیت‌های i محاسبه شده است (i = ۱، ۲، ۳، ۴ و j). از آنجا که امکان گزارش نتایج اخیر برای هر مشتری وجود نداشته است، نتایج حاصل از ماتریس احتمال انتقال وضعیت تمامی مشتریان در جدول ۵ ارائه شده است.

مطابق با نتایج جدول ۵ مشاهده می‌شود که احتمال انتقال‌های وضعیت مشتریان از یک خوشه به خوشه‌ای دیگر تقریباً یکنواخت توزیع شده است. به‌طورکلی، مشتریانی که در یک هفته در خوشه‌ی ۱ قرار داشته‌اند، با بیشترین احتمال، در همان خوشه باقی مانده‌اند. مشتریانی که در یک هفته در خوشه‌ی ۲ قرار داشته‌اند، در هفته‌ی بعد با بیشترین احتمال، از خوشه‌ی ۲ به خوشه‌ی ۱ تغییر وضعیت داده‌اند. مشتریانی که در خوشه‌های ۳ و ۴ قرار داشته‌اند نیز در هفته‌ی بعد، با بیشترین احتمال به خوشه‌ی ۱ تغییر وضعیت داده‌اند. نتایج اخیر نشان می‌دهد که یک گرایش کلی در مشتریان از منظر متغیرهای RFM

[16] Topographic error
[17] Kaski-Lagus error
[18] explained variance

به‌قرارگیری در خوشه‌ی ۱ وجود دارد و مشتریان در هر خوشه‌ی دیگری، با بیشترین احتمال، در هفته‌ی آینده به خوشه‌ی ۱ تغییر وضعیت می‌دهند. اگرچه مقدار فزونی این احتمال نسبت به سایر احتمال‌های انتقال وضعیت، زیاد نیست و اختلاف اندکی بین مقادیر احتمال‌های انتقال وضعیت وجود دارد، اما با رویکرد قیاس مطلق، این مقادیر بزرگ‌ترین مقادیر احتمال انتقال وضعیت را در هر سطر ماتریس احتمال انتقال وضعیت به خود تخصیص داده‌اند. همچنین، مقادیر احتمالات وضعیت اولیه‌ی مشتریان نیز تحت رابطه‌ی ۲ برآورد شده است، که احتمال قرارگیری هر مشتری در هر یک از خوشه‌های ۴ گانه‌ی تحلیل را نشان می‌دهد.

باتوجه به نتایج جدول ۶، که توزیع مانای زنجیره‌ی مارکوف را برای کلیه‌ی مشتریان بانک نشان می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت که در لحظه‌ی شروع فرایند (اولین هفته‌ی مطالعاتی پژوهش)، ۲۳/۱۱٪ از مشتریان در خوشه‌ی اول با بیشترین مقادیر RFM کوچک، ۲۱/۲۹٪ در خوشه‌ی دوم با مقادیر تناوب تراکنش بزرگ (F)، ۴۱/۵۵٪ در خوشه‌ی سوم با مقادیر F و M بزرگ، و ۱۴/۰۲٪ نیز در خوشه‌ی چهارم با تأخر (R) بزرگ قرار داشته‌اند. مقایسه‌ی مقادیر احتمالات ذکرشده نشان می‌دهد که در اولین هفته‌ی مطالعه، مشتریان با بیشترین فراوانی در خوشه‌ی سوم قرار داشته‌اند و کمترین فراوانی نیز مربوط به خوشه‌ی چهارم مشتریان بوده است. براساس نتایج جدول اخیر، به‌نظر می‌رسد که بخش عمده‌ای از مشتریان بانک موردمطالعه را مشتریانی با تناوب و شاخص پولی بالا تشکیل داده‌اند، که این ویژگی را می‌توان یک مزیت بالقوه برای بانک در راستای سیاست‌گذاری اعتباری بر روی این گروه از مشتریان به‌شمار آورد.

۳.۴. ماتریس احتمالات انتقال وضعیت تحت راهبردهای تبلیغاتی

پس از محاسبه‌ی ماتریس‌های احتمال انتقال وضعیت مشتریان، به‌منظور محاسبه‌ی احتمالات نگهداشت مشتریان و همچنین درآمد موردانتظار مشتریان در گروه‌های تبلیغاتی مختلف، بر پایه‌ی احتمالات انتقال وضعیت، مشتریان به دو گروه براساس هزینه‌های تبلیغاتی انجام‌شده برای آن‌ها دسته‌بندی شده‌اند. برای این منظور، از تحلیل خوشه‌ای مشتریان استفاده شده است. ابتدا متوسط هزینه‌های تبلیغاتی انجام‌شده برای هر مشتری طی ۱۵۶ هفته محاسبه و سپس بر پایه‌ی متوسط هزینه‌های تبلیغاتی، مشتریان به دو گروه از مشتریان با هزینه‌ی تبلیغاتی بالا و پایین طبقه‌بندی شده‌اند. در جدول ۷، نتایج حاصل از خوشه‌بندی مشتریان براساس هزینه‌های تبلیغاتی آن‌ها ارائه شده است.

با توجه به نتایج جدول ۷ و سطح معناداری آزمون تحلیل واریانس برای خوشه‌بندی مشتریان براساس متوسط هزینه‌های تبلیغاتی که کوچک‌تر از خطای ۰/۰۵ به‌دست آمده است، می‌توان پذیرفت که خوشه‌بندی مشتریان در ۲ گروه مشتریان با هزینه‌های تبلیغاتی بالا و پایین، اختلاف معناداری بین دو گروه ایجاد کرده است. براساس تحلیل اخیر، ۲۰۸ مشتری در خوشه‌ی ۱ و ۱۷۷ مشتری در خوشه‌ی ۲ قرار گرفته‌اند؛ به‌طوری که خوشه‌ی ۱ با مرکز دسته‌ی ۹۴۵۷۹۰/۰۸۹۶، به‌عنوان خوشه با هزینه‌ی تبلیغاتی بالا و خوشه‌ی ۲ با مرکز دسته‌ی ۸۶۴۰۹۰/۷۲۱۰ به‌عنوان خوشه با هزینه‌ی تبلیغاتی پایین شناسایی شده‌اند. با تفکیک مشتریان به دو گروه مشتریان با هزینه‌های تبلیغاتی بالا و پایین، ماتریس‌های احتمال انتقال وضعیت و بردار احتمالات وضعیت اولیه‌ی مشتریان در هر گروه محاسبه شده است، که نتایج آن در جدول ۸ ارائه شده است.

نتایج جدول ۸ و مقایسه‌ی ماتریس‌های احتمال انتقال وضعیت در دو گروه مشتریان با هزینه‌های تبلیغاتی بالا و پایین نشان می‌دهد که اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای بین احتمالات انتقال وضعیت مشتریان در دو گروه تبلیغاتی و در خوشه‌های ۱ و ۲ وجود ندارد. همچنین بردارهای احتمال وضعیت اولیه در

جدول ۶. بردار احتمال وضعیت مشتریان در آبرکلاس ها.

	Cluster 4	Cluster 3	Cluster 2	Cluster 1
Probability of Cluster Membership	0.1402597	0.4155844	0.212987	0.2311688

جدول ۷. خوشه‌بندی مشتریان براساس متوسط هزینه‌های تبلیغاتی.

Indicators	Cluster 1	Cluster 2
Cluster Centers (Advertising Cost)	945790.0896	864090.7210
Number of Customers in Each Advertising Cluster	208	177
ANOVA F-Statistic (Significance Level)	623.585 (0.000)	

جدول ۸. ماتریس احتمال انتقال وضعیت مشتریان در گروه‌های تبلیغاتی.

Advertising Group	Initial State	Cluster 4	Cluster 3	Cluster 2	Cluster 1
High Advertising Cost Customers	Cluster 1	0.2243677	0.2559846	0.2529359	0.2667118
	Cluster 2	0.2212217	0.2439766	0.2568752	0.2779265
	Cluster 3	0.2156398	0.2471938	0.2529309	0.2842355
	Cluster 4	0.2236989	0.2404868	0.2653889	0.2704253
	Initial State Probability Vector	0.1586538	0.3990385	0.2115385	0.2307692
Low Advertising Cost Customers	Cluster 1	0.2314555	0.2430538	0.2327301	0.2927606
	Cluster 2	0.2246301	0.2419668	0.2495890	0.2838141
	Cluster 3	0.2169741	0.2481631	0.2478632	0.2869996
	Cluster 4	0.2358324	0.2316584	0.2538128	0.2786964
	Initial State Probability Vector	0.1186441	0.4350282	0.2146893	0.2316384

دو گروه نیز مقادیر نزدیک به یکدیگر را نشان می‌دهند و این نتایج تبیین‌کننده‌ی این مطلب است که اگرچه اختلافات جزئی در مقادیر احتمالات انتقال وضعیت در خوشه‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود، اما احتمال تغییر وضعیت مشتری از این خوشه‌ها به خوشه‌ی دیگر، تحت تأثیر قابل ملاحظه‌ی هزینه‌های تبلیغاتی آن‌ها نبوده است. اما با تمرکز بر وضعیت مشتریان در خوشه‌های ۳ و ۴ می‌توان ملاحظه کرد که احتمال قرارگیری مشتریان در خوشه‌های سوم و چهارم (براساس بردار احتمال وضعیت اولیه) با توجه به هزینه‌های تبلیغاتی آن‌ها متفاوت بوده است. بنابراین، هزینه‌های تبلیغاتی را می‌توان در توزیع احتمال اولیه‌ی وضعیت مشتریان مؤثر دانست و از آنجا که تغییر وضعیت مشتریان از یک هفته تا هفته‌ی دیگر، تشکیل‌دهنده‌ی یک فرایند مارکوف است، می‌توان اثر این هزینه‌های تبلیغاتی را در انتقال وضعیت آتی مشتریان براساس ماتریس احتمال انتقال وضعیت تقریباً یکنواخت لحاظ کرد. با محاسبه‌ی ماتریس‌های احتمال انتقال وضعیت در خوشه‌های تبلیغاتی مشتریان و همچنین برآورد احتمالات وضعیت اولیه‌ی آن‌ها، احتمال نگهداشت مشتری در هر گروه تبلیغاتی بر پایه‌ی رابطه‌ی ۳ نیز محاسبه شده است؛ که در آن، نگهداشت مشتریان در هر یک از خوشه‌ها (آبرکلاس‌ها) محاسبه شده است، اما خوشه‌ی (آبرکلاس) دوم، که بیشترین مقادیر تناوب و مالی را داشته است، به‌عنوان وضعیت مطلوب در نظر گرفته شده است. نتایج تحلیل اخیر در جدول ۹ ارائه شده است.

نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد که احتمال نگهداشت مشتریان در خوشه‌های اول و دوم SOM در بین گروه‌های تبلیغاتی مختلف، اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای نداشته است. در حالی که احتمال نگهداشت مشتری در خوشه‌های سوم و چهارم با توجه به هزینه‌های تبلیغاتی متفاوت بوده است. نتایج ذکرشده نشان می‌دهند که احتمال نگهداشت مشتریان با هزینه‌های تبلیغاتی کم در خوشه‌ی چهارم بیشتر از احتمال نگهداشت مشتریان با هزینه‌های تبلیغاتی بالا بوده است. یعنی راهبرد تبلیغاتی بهینه برای نگهداشت مشتریانی که در خوشه‌ی چهارم تحلیل قرار می‌گیرند، مبنی بر هزینه‌ی تبلیغاتی پایین است. در حالی که برای مشتریان در خوشه‌ی سوم این وضعیت بالعکس است و راهبرد تبلیغاتی بهینه برای نگهداشت مشتریانی که در خوشه‌ی سوم تحلیل قرار دارند، مبنی بر هزینه‌ی تبلیغاتی بالاست. این در حالی است که برای مشتریان خوشه‌های اول و دوم، هزینه‌های تبلیغاتی بالا و پایین اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای را در احتمال نگهداشت آنان در وضعیت کنونی ایجاد نکرده است. همان‌طور که پیشتر نیز مشاهده شده است، گروه عمده‌ی مشتریان بانک را مشتریان در خوشه‌ی سوم یعنی مشتریان با تناوب و شاخص پولی بالا تشکیل می‌دهند. در حالی که احتمال نگهداشت مشتریان در خوشه‌ی سوم، در هر یک از گروه‌های تبلیغاتی کمتر از خوشه‌ی چهارم بوده است. این یافته نشان می‌دهد که بانک موردمطالعه برای نگهداشت مشتریان عمده‌ی خود در خوشه‌ی سوم، سیاست‌های نگهداشت ویژه‌ای را باید اتخاذ کند تا بتواند از درآمد موردانتظار مشتریان عمده‌ی خود، سود قابل توجهی کسب کند.

۴.۴. ارزش طول عمر مشتریان

به‌منظور محاسبه‌ی ارزش طول عمر مشتریان از حل برنامه‌ریزی پویای تصادفی در رابطه‌ی ۵ استفاده شده است. در تحلیل اخیر، از درآمد موردانتظار از مشتریان در وضعیت (خوشه) های مختلف و تحت یکی از راهبردهای تبلیغاتی، میزان هزینه‌ی انجام‌شده برای تبلیغات در گروه تبلیغاتی و ماتریس‌های احتمال انتقال وضعیت مشتریان به‌عنوان اطلاعات پایه استفاده شده است. همچنین نتایج حاصل از برآورد ارزش طول عمر مشتریان در هر یک از گروه‌های تبلیغاتی در جدول ۱۰ ارائه شده است.

با توجه به نتایج جدول ۱۰ مشاهده می‌شود که ارزش طول عمر مشتریان در گروه تبلیغاتی با هزینه‌ی بالا و در تمامی خوشه‌ها بیشتر از ارزش طول عمر مشتریان در گروه با هزینه‌ی کم تبلیغاتی بوده است. در هر دو گروه، بیشترین ارزش طول عمر مشتری مربوط به مشتریان خوشه‌ی سوم، یعنی مشتریان با تناوب و شاخص پولی بالا بوده و کمترین ارزش طول عمر مشتری نیز مربوط به مشتریان خوشه‌ی چهارم به‌دست آمده است. این نتایج نشان می‌دهند که راهبرد تبلیغاتی با هزینه‌های بالاتر، ارزش طول عمر بیشتری را برای هر مشتری همراه می‌آورد. یافته‌های اخیر نشان می‌دهند که برای کسب ارزش طول عمر بیشتر در مشتریان، راهبرد تبلیغاتی با هزینه‌های تبلیغاتی بالا مناسب‌تر بوده است. یعنی، انجام هزینه‌های تبلیغات و بازاریابی بیشتر برای مشتریان، در تمامی خوشه‌ها می‌تواند منجر به افزایش ارزش طول عمر مشتریان در آن خوشه شود. بنابراین، فاصله‌گرفتن از سیاست‌های کنونی نگهداشت مشتریان، مبتنی بر

جدول ۹. احتمال نگهداشت مشتریان در آبرکلاس‌های SOM.

Advertising Group	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
High Advertising Cost Customers	0.7800136	0.800625	0.500136	0.8536118
Low Advertising Cost Customers	0.7867881	0.7948517	0.4210856	0.8971313

جدول ۱۰. ارزش طول عمر مشتریان در گروه‌های تبلیغاتی و خوشه‌های SOM.

Customer Lifetime Value in Cluster	Expected Revenue	Cluster	Discount Rate (α)	Advertising Cost	Advertising Group
24,191,615	20,786,274.96	Cluster 1	0.1653	945,790.09	High Advertising Cost Customers
23,849,653	20,729,791.73	Cluster 2			
24,800,590	21,837,171.77	Cluster 3			
22,900,153	20,345,779.40	Cluster 4			
23,377,350	19,950,112.37	Cluster 1	0.1653	864,090.72	Low Advertising Cost Customers
22,132,280	19,305,156.80	Cluster 2			
23,956,439	21,194,436.37	Cluster 3			
21,385,392	18,840,387.35	Cluster 4			

جدول ۱۱. مقایسه‌ی عملکرد روش پیشنهادی تعیین ارزش طول عمر مشتریان.

Average Customer Lifetime Value	Expected Revenue	Estimation Method
19,534,908	17,063,712.09	Based on K-Means Algorithm
21,193,052	18,512,098.32	Based on Data Density
20,593,746	17,988,605.45	Based on Data Distribution
23,324,184	20,373,638.84	Based on Self-Organizing Neural Network and Stochastic Dynamic Programming

تبلیغات گروهی بدون توجه به خوشه‌بندی مالی مشتریان و تدوین راهبرد تبلیغات براساس جامعه‌ی هدف کوچک‌تر از مشتریان را می‌توان از راهکارهای مناسب برای افزایش ارزش طول عمر مشتریان در بانک موردمطالعه به‌شمار آورد.

به منظور مقایسه‌ی عملکرد این روش با روش متداول پیش‌بینی ارزش طول عمر مشتریان، متوسط ارزش طول عمر مشتریان در روش اخیر، با روش‌های متداول پیشین و طی یک دوره‌ی مشخص محاسبه شده است. در مقایسه‌ی انجام‌شده، گروه‌های تبلیغاتی موردتوجه نبوده‌اند و ارزش طول عمر مشتریان در روش‌های پایه براساس حاصل‌ضرب ارزش مشتری (حاصل‌ضرب متوسط تعداد تراکنش ها و متوسط درآمد حاصل از هر تراکنش) و طول دوره‌ی تعامل با مشتری در خوشه‌های معین محاسبه شده است؛ که نتایج آن در جدول ۱۱ ارائه شده است.

با توجه به نتایج جدول ۱۱ مشاهده می‌شود که درآمد موردانتظار هر مشتری و ارزش طول عمر مشتریان، تحت روش پیشنهادی در مطالعه‌ی حاضر، بیشتر از سایر روش‌های موردمقایسه بوده است. اگرچه باید توجه داشت که این برتری نسبی است و شاید بتوان روش‌های خوشه‌بندی دیگری را نیز شناسایی یا تعریف کرد، که عملکردی بهتر از روش پیشنهادی پژوهش حاضر ارائه دهند. همچنین، باید توجه داشت که براساس شاخص پولی معیار RFM، متوسط درآمد حاصل از تراکنش‌های هر مشتری براساس داده‌های تاریخی به‌دست‌آمده از رفتار مالی مشتریان برابر با ۵۰۳۵۰۳/۶ بوده است، که در مقایسه با درآمد موردانتظار برآوردشده‌ی هر مشتری در روش پیشنهادی، بسیار کمتر بوده است. بنابراین، به‌کارگیری روش‌های خوشه‌بندی مبتنی بر اطلاعات RFM و برنامه‌ریزی تصادفی پویا برای تعیین هزینه‌های تبلیغات در گروه‌های مختلف مشتریان می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی، متوسط درآمد حاصل از هر مشتری را بهبود بخشد.

۵. بینش‌های مدیریتی

با توجه به یافته‌های پژوهش، به‌نظر می‌رسد که مطلوب‌تر است سیاست‌های تبلیغاتی بهینه‌ی بانک مبتنی بر ارزش طول عمر مشتریان انجام پذیرد و سیاست‌های کلی تبلیغاتی کنونی دستخوش تغییر شوند. خوشه‌بندی مشتریان بر پایه‌ی رفتار مالی آن‌ها و فاصله‌گیری از سیاست‌های تبلیغاتی مبتنی بر رتبه‌ی اعتباری می‌تواند ارزش طول عمر بیشتر و در نتیجه، سودآوری بیشتری را عاید بانک سازد. در این میان، بهتر است که مشتریان با تناوب و شاخص مالی بالاتر، به‌دلیل پایداری بیشتر در رفتار مالی (مبتنی بر احتمال نگهداشت مشتری در خوشه‌ی سوم پژوهش) در کانون توجه سیاست‌های تبلیغاتی بانک قرار گیرند. سرمایه‌گذاری بر روی هزینه‌های تبلیغاتی مشتریان با رفتار مالی پایدار می‌تواند سودآوری پایدارتری را برای بانک فراهم آورد.

۶. نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش نشان داد که خوشه‌بندی مشتریان با روش SOM می‌تواند کمینه‌ی ۹۱٪ از تغییرات موجود در داده‌ها را تبیین سازد، که مقدار قابل توجهی است. این خوشه‌بندی از مشتریان نشان داد که هر سه عامل تأخر، تناوب، و پول در تحلیل RFM مشتریان، درجه‌ی اهمیت بالایی دارد و خوشه‌بندی مشتریان بر پایه‌ی عوامل مذکور، می‌تواند تفکیک مناسبی از عملکرد کلی آن‌ها از منظر هر سه عامل ایجاد کند. یافته‌های مطالعات دی مارکو و همکاران (۲۰۲۱)،[۳۰] و بائر و جاناچ (۲۰۲۱)،[۳۱] نیز نشان از کارایی قابل قبول رویکردهای مبتنی بر شبکه‌ی عصبی مصنوعی در خوشه‌بندی مشتریان داشته است. همچنین، مطالعه‌ی گاگیل و همکاران (۲۰۲۳)،[۲۶] نیز بر استفاده از روش‌های دقیق‌تر مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی در تحلیل خوشه‌بندی مشتریان تأکید داشته است.

با توجه به یافته‌های تحلیل کنونی و برآورد ارزش طول عمر مشتریان در هر یک از خوشه‌ها، به نظر می‌رسد که تحلیل SOM در خوشه‌بندی مشتریان با معیارهای RFM، اولویت را بر تناوب و گردش مالی بالای مشتریان قرار می‌دهد. پس از آن، تناوب بالا و تأخر پایین در مراتب بعدی اولویت قرار گرفته‌اند. اگرچه تحلیل حاضر به‌صورت همزمان هر سه عامل را با یکدیگر لحاظ می‌کند، اما نتایج حاصل از ارزش طول عمر مشتریان در خوشه‌های ذکرشده نشان می‌دهد که دسته‌بندی حاصل، منجر به تفکیک مشتریان بر حسب ارزش بالاتر شده است. از کاستی‌های روش حاضر در خوشه‌بندی می‌توان به این مطلب اشاره کرد که تمامی عوامل در تحلیل کنونی با یک مفهوم و در یکسو در نظر گرفته شده‌اند؛ در حالی که مفهومی مانند تأخر دارای پیامد منفی، اما مفاهیمی چون گردش مالی و تناوب، پیامدهای مثبت مالی دارند. بنابراین به‌نظر می‌رسد که برای تقویت روش ذکرشده، می‌توان رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره را نیز اثربخش دانست و تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با روش خوشه‌بندی SOM می‌تواند یک گزینه‌ی مطالعاتی قابل‌توجه برای سایر پژوهشگران باشد.

همچنین، ارزش طول عمر مشتریان با استفاده از ماتریس‌های احتمال انتقال وضعیت آنان برآورد شده است. نتایج تحلیل حاضر نشان داده است که راهبرد تبلیغاتی با هزینه‌های بالاتر، ارزش طول عمر بیشتری را برای هر مشتری به‌همراه می‌آورد. بنابراین، به‌نظر می‌رسد که بهترین راهبرد تبلیغاتی براساس ارزش طول عمر پیش‌بینی‌شده‌ی مشتریان، انجام تبلیغات با هزینه‌ی بالا برای مشتریان خوشه‌ی سوم است. از جمله مطالعاتی که در این حوزه انجام شده است، می‌توان به مطالعات گاگیل و همکاران (۲۰۲۳)،[۲۶] آبیدر و همکاران (۲۰۲۳)،[۲۷] بخشی‌زاده و همکاران (۲۰۲۲)،[۲۹] و دی مارکو و همکاران (۲۰۲۱)،[۳۰] اشاره کرد، که اهمیت خوشه‌بندی مشتریان را در تعیین ارزش طول عمر آن‌ها تأیید کرده‌اند. اما باید توجه داشت که در تمام پژوهش‌های اخیر، احتمال تغییر رفتار مشتری نادیده گرفته شده است. در تمام مدل‌های ارائه‌شده در مطالعات پیشین، محاسبه‌ی ارزش مشتری با استفاده از مدل‌سازی زنجیره‌ی مارکوف، ماتریس احتمال انتقال را به‌صورت ماتریسی با درایه‌های

ثابت تخمین زده‌اند. در حالی که احتمال تغییر رفتار مشتری از یک وضعیت خاص به یک وضعیت معین دیگر با توجه به تغییر سیاست‌های بازاریابی، تغییر عوامل اقتصادی، افزایش اعتماد، و وفاداری مشتریان به برند مرتبط، و ... در طول بازه‌ی زمانی موردبررسی ثابت نبوده و پویا بوده است. در پژوهش حاضر نیز ماتریس‌های احتمال انتقال وضعیت مشتریان برآورد شده است، تا بتوان تغییرات پویای وضعیت عملکردی مشتریان را در طول زمان لحاظ کرد. بر این اساس، یافته‌های پژوهش حاضر در راستای توسعه‌ی نتایج مطالعات پیشین، یک روش مطلوب را در برآورد ماتریس احتمالات انتقال وضعیت پیشنهاد کرده است، که ارزش طول عمر را در پویایی ماتریس مذکور لحاظ می‌کند.

با توجه به اینکه سیاست‌های تبلیغاتی بانک در حال حاضر، مبتنی بر خوشه‌های مشتریان انجام نمی‌شود و بخشی از هزینه‌های تبلیغات به‌صورت گروهی برای تمامی مشتریان انجام می‌شود و بخشی دیگر نیز فقط براساس رتبه‌ی اعتباری مشتریان انجام می‌شود، به‌نظر می‌رسد که راهبرد تبلیغاتی به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر، براساس خوشه‌های به‌دست‌آمده از رفتار پویای مالی مشتریان بتواند منجر به مدیریت هزینه‌ی بیشتر در بانک شود و همچنین، گروه‌های با سطح درآمد موردانتظار بالا را در کانون هدف تبلیغات بانک قرار دهد. از این رو، با توجه به یافته‌های پژوهش پیشنهاد می‌شود سیاست‌های اعتباری و تبلیغاتی بانک دیجیتال پاسارگاد با توجه به ارزیابی عملکرد کلی مشتریان از منظر هزینه، سودآوری، و تداوم فعالیت صورت پذیرد. خوشه‌بندی مشتریان با اتکاء به عواملی چون RFM و عوامل دیگر (مانند: طول دوره‌ی تعامل، رتبه‌ی وفاداری مشتری، سپرده‌های مشتری، و ...) می‌تواند در راستای تشخیص خوشه‌های پردرآمد مشتریان مؤثر واقع شود. همچنین، پیشنهاد می‌شود سرمایه‌گذاری تبلیغاتی و تسهیلات تشویقی برای مشتریان خوشه‌ی سوم بانک که تناوب بالاتر، گردش مالی بیشتر، و ارزش طول عمر بیشتری دارند؛ در کانون توجه مدیران قرار گیرد. به‌نظر می‌رسد که مشتریان دارای تناوب بالاتر، درآمدهای موردانتظار بیشتری نسبت به سایر خوشه‌ها ایجاد کنند. از طرفی، به‌نظر می‌رسد که بیشترین سهم هزینه‌های تبلیغاتی برای مشتریان با هزینه‌های تبلیغاتی بالا و پایین، اما در خوشه‌ی سوم مشتریان انجام پذیرد. همچنین با توجه به تغییر سیاست‌های پولی و مالی کشور و تفاوت میزان نقدینگی در جامعه در هر دوره با دوره‌های دیگر، به‌نظر می‌رسد که بهتر است کیفیت استفاده از شاخص مالی (M) در داده‌های RFM دستخوش تغییر و اصلاح شود. بنابراین، پیشنهاد می‌شود به‌منظور تقلیل اثر عوامل کلان مذکور در نتایج خوشه‌بندی مشتریان، شاخص مالی در تحلیل خوشه‌بندی نسبت به عامل تورم و افق زمانی موردمطالعه تعدیل شود، تا بتوان نتایج تعدیل‌شده نسبت به تغییرات شاخص‌های کلان به‌دست آورد. از این رو به بانک‌ها پیشنهاد می‌شود در تعیین سودآوری و برآورد درآمد موردانتظار مشتریان، افق‌های زمانی متفاوتی را مدنظر قرار دهند و نسبت به کاهش یا افزایش ارزش پول در افق زمانی موردنظر، درآمد موردانتظار هر مشتری را برآورد کنند. همچنین، سیاست‌های تبلیغاتی و نگهداشت مشتری خود را بر پایه‌ی درآمد موردانتظار تعدیل‌شده نسبت به تورم تعیین کنند.

References- منابع

1. Kumar, V. and Rajan, B., 2020. *Customer Lifetime Value: What, How, And Why*, The Routledge Companion to Strategic Marketing, pp.422–448. http://doi.org/10.4324/9781351038669
2. Libai, B., Bart, Y., Gensler, S., Hoffman, D.L., Indurkhya, N., van Bruggen, G.H. and Steven, A., 2020. Brave new world? on AI and the management of customer relationships. *Journal of Interactive Marketing*, *51*(1), pp.44–56. http://doi.org/10.1016/j.intmar.2020.04.002
3. Pramono, P.P., Surjandari, I. and Laoh, E., 2019. Estimating customer segmentation based on customer lifetime value using two-stage clustering method. *In 2019 16th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM)*, pp. 1–5. http://doi.org/10.1109/ICSSSM.2019.8887704
4. Kanchanapoom, K. and Chongwatpol, J., 2023. Integrated customer lifetime value (CLV) and customer migration model to improve customer segmentation. *Journal of Marketing Analytics*, *11*(2), pp.172–185. http://doi.org/10.1057/s41270-022-00158-7
5. Marmol, M., Chamorro, A., Sandoval, M. and Liébana-Cabanillas, F., 2021. Maximizing customers' lifetime value using limited marketing resources. *Marketing Intelligence & Planning*, *39*(8), pp.1058–1072. http://doi.org/10.1108/MIP-02-2021-0050
6. Manosuthi, N., Lee, J.S. and Han, H., 2021. Causal-predictive model of customer lifetime/influence value. *Journal of Travel & Tourism Marketing*, *38*(5), pp.461–477. http://doi.org/10.1080/10548408.2021.1940422
7. Tekin, A.T., Kaya, T. and Cebi, F., 2022. Customer lifetime value prediction for gaming industry. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, *42*(1), pp.87–96. http://doi.org/10.3233/JIFS-219177
8. Pradhan, S., Patel, G. and Priya, P., 2021. Measuring customer lifetime value. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, *13*(3), pp.1–16. http://doi.org/10.13033/ijahp.v13i3.892
9. Asadi, N. and Kazerooni, M., 2023. A stacked ensemble learning method for customer lifetime value prediction. *Kybernetes*, *53*(7), pp.2342-2360. http://doi.org/10.1108/K-12-2022-1676
10. Reddy, K.B., Rani, G., Bhargavi, P. and Padmavathi, M., 2022. Prediction of customer lifetime value using machine learning. *In Proceedings of Second Doctoral Symposium on Computational Intelligence: DoSCI*, pp. 271–278.

http://doi.org/10.1007/978-981-16-3346-1_22

11. Badri, H. and Tran, A., 2022. Beyond customer lifetime valuation. *In Proceedings of the ACM Web Conference*, pp. 132–140. http://doi.org/10.1145/3485447.3512058

12. Katsikeas, C., Leonidou, L. and Zeriti, A., 2020. Revisiting international marketing strategy in a digital era. *International Marketing Review*, *37*(3), pp.405–424. http://doi.org/10.1108/IMR-02-2019-0080

13. Fader, P.S., 2012. *Customer Centricity: Focus on the Right Customers for Strategic Advantage*, Wharton Digital Press. http://doi.org/10.2307/j.ctv2hdrfj0

14. Persson, A. and Ryals, L., 2010. Customer assets and customer equity. *Marketing Theory*, *10*(4), pp.417–436. http://doi.org/10.1177/1470593110382828

15. Ryals, L. and Knox, S., 2007. Measuring and managing customer relationship risk in business markets. *Industrial Marketing Management*, *36*(6), pp.823–833. http://doi.org/10.1016/j.indmarman.2006.06.017

16. Al-Dmour, R., Al-Dmour, H., Masa'deh, R. and Al-Hawasheen, M., 2020. The effect of customer lifestyle patterns on mobile banking use in Jordan. *International Journal of Electronic Marketing and Retailing*, *11*(3), pp.239–258. http://doi.org/10.1504/IJEMR.2020.108121

17. Myburg, M. and Berman, S., 2022. Customer lifetime value prediction with k-means clustering and xgboost. *In 2022 IEEE/ACM International Conference on ASONAM*, pp. 298–302. http://doi.org/10.1109/ASONAM55673.2022.10068602

18. Ali, R., Pye, A., Mortier, R. and Crowcroft, J., 2021. Estimating customer lifetime value in the gaming industry using incomplete data. *Mathematics in Industry Reports (MIIR)*, pp.1–36. http://doi.org/10.33774/miir-2021-rd4pd

19. von Focht, T., 2022. *Customer Lifetime Value–Neue Anwendungsmöglichkeiten*, *In Marketing Analytics*, pp.229–241. http://doi.org/10.1007/978-3-658-33809-1_13

20. Libai, B., Bart, Y., Gensler, S., Hoffman, D.L., Indurkhya, N., van Bruggen, G.H. and Steven, A., 2020. Brave new world? on AI and customer relationships. *Journal of Interactive Marketing*, *51*(1), pp.44–56. http://doi.org/10.1016/j.intmar.2020.04.002

21. Shekary, M., 2021. Calculating CLV using Markov chain approach. *Management Research in Iran*, *22*(4), pp.1–21. [In Persian]. https://mri.modares.ac.ir/m/article_474.html?lang=en

22. Waarden, L.M., 2007. The effects of loyalty programs on CLV. *Journal of Retailing*, *83*(2), pp.223–236. http://doi.org/10.1016/j.jretai.2007.01.002

23. Donkers, B., Verhoef, P.C. and De Jong, M.G., 2007. Modeling CLV. *Quantitative Marketing and Economics,* *5*, pp.163–190. http://doi.org/10.1007/s11129-006-9016-y

24. Batislam, E.M., Denizel, M. and Filiztekin, A., 2007. Validation of models for customer base analysis. *International Journal of Research in Marketing*, *24*(3), pp.201–209. http://doi.org/10.1016/j.ijresmar.2006.12.005

25. Dandis, A.O., Al-Shboul, R., Al-Kasasbeh, M. and Al-Shammari, M., 2023. CLV in fast-food restaurants. *The TQM Journal*. *35*(8), pp.2526-2546. http://doi.org/10.1108/TQM-08-2022-0248

26. Gadgil, K., Gill, S.S. and Abdelmoniem, A.M., 2023. Stacked regression approach for CLV. *Journal of Economy and Technology*. ahead-of-print. http://doi.org/10.48550/arXiv.2308.08502

27. Abidar, L., El Himer, S., El Bouchti, A. and Hachimi, H.E., 2023. Predicting customer segment changes. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, *14*(7), pp.910–920. http://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0140799

28. Dandis, A.O. and Al Haj Eid, M.B., 2022. CLV and brand loyalty. *The TQM Journal*, *34*(3), pp.476–493. http://doi.org/10.1108/TQM-12-2020-0311

29. Bakhshizadeh, E., Nasrabadi, H.A., Karamoozian, A. and Mahdavi, I., 2022. Customer clustering in software industry. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, *33*(1), pp.18–33. [In Persian]. http://doi.org/10.22068/ijiepr.33.1.1

30. De Marco, M., Mangano, G., Casale, G. and Raguseo, E., 2021. Cognitive analytics of clv using ann. *Journal of Enterprise Information Management*, *34*(2), pp.679–696. http://doi.org/10.1108/JEIM-01-2020-0029

31. Bauer, J. and Jannach, D., 2021. Improved clv prediction with sequence-to-sequence learning. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*, *15*(5), pp.1–37. http://doi.org/10.1145/3441444

32. Carneiro, F. and Miguéis, V., 2021. Estimating clv in the food industry. *In Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operation Management*, p.125. http://doi.org/10.46254/sa02.20210125

33. Hoseini Ravesh, S.M.H. and Moghaddam, A., 2023. CLV based on service quality in gyms. *Sport Management Studies*, *2*(2), pp.19–36. [In Persian]. https://www.magiran.com/paper/2614412

34. Rajabiasli, M., Fatemi, M. and Khodadadi, A., 2023. Leading indicators of clv in sports clubs. *Knowledge*

Management in Sport Journal, *2*(4), pp.1–16. [In Persian]. http://doi.org/10.30495/kmsj.2022.1975357.1062

35. Rajabiasli, M., Fatemi, M. and Khodadadi, A., 2023. CLV prediction using GMDH neural networks. *Sport Management Studies*, *15*(81) , pp.265-284. [In Persian]. http://doi.org/10.22089/smrj.2023.13662.3763

36. Safabakhsh, M. and Asayesh, F., 2023. Segmentation of bank customers based on CLV. *Quarterly Studies in Banking Management and Islamic Banking*, *8*(19), pp.53–80. [In Persian]. http://doi.org/10.22034/jifb.2023.166991

37. Ghadirmohseni, M., Ayough, A. and Razavi Haji Agha, S.H., 2023. Profit function of bank customers using CLV. *Quarterly Studies in Banking Management and Islamic Banking*, *8*(19), pp.23–52. [In Persian]. https://www.magiran.com/paper/2549150

38. Nabizade, F. and Rouhani, S., 2020. Clustering and prediction model of CLV. *Journal of Industrial Management Perspective*, *10*(4), pp.41–63. [In Persian]. http://doi.org/10.52547/jimp.10.4.41

39. Esfidani, M.R. and Toopa Esfandiari, F., 2019. Factors affecting CLV in melli bank. *Journal of Business Administration Researches*, *11*(21), pp.69–89. [In Persian]. http://doi.org/10.22034/JBAR.2019.1550

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2025), 41(1), 73-85

Sharif University of Technology

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

Research Article

A Novel Method for Designing Glaze Formulation Using Mathematical Programming

Hossein Shams Shemirani* and Hamid Reza Zahedi Neiestani

Industrial Engineering Group, Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
* corresponding author: (h.shams@iut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:24 April 2024

Revised:28 September 2024

Accepted:8 October 2024

Keywords:

Glaze formulation,
mathematical modeling,
seger formula,
batch formula,
applied optimization.

Abstract

Glaze is one of the fundamental components of ceramic products such as tiles, porcelain dishes, and sanitary ceramics. The formulation of glaze is a critical and complex process, representing one of the most significant and challenging aspects within the ceramic industry. Establishing the optimal formulation for glaze production is crucial for enhancing product quality and minimizing production costs. In this study, grounded in practical experiences from a factory setting, the issue of glaze formulation is examined and analyzed using an operations research approach for the first time globally. The outcomes of the developed model were tested and successfully implemented on the production line. To ensure the practical implementation of this research within the industry and to enhance user accessibility, a user-friendly software was developed. It is crucial to recognize that different factories employ a variety of raw materials in their glaze production processes. This variation arises from factors such as the unavailability of certain raw materials, the elevated costs associated with some materials, and the expenses related to transportation. The chemical composition of raw materials varies significantly, with the percentage of oxides differing based on the specific mine and the section of the mine from which they are sourced. Consequently, determining the optimal proportion of available raw materials for producing a glaze with a specific Seger formula necessitates repeated analysis. This iterative process is essential to identify the appropriate formula, which can then be implemented in the production line. In this study, conducted with real-world data and a thorough understanding of the problem through the production process, as well as an extensive review of relevant literature, the issue of designing a glaze formula is analyzed using operations research methodology. This paper presents a novel approach to glaze formulation, which can serve as a foundation for future research in this area.

Funding

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

To Cite this article:

Shams Shemirani, H. and Zahedi Neiestani, H.R. 2025. A novel method for designing glaze formulation using mathematical programming, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, 41(1), 73-85. https://doi.org/10.24200/j65.2024.63797.2387

مجله علمی مهندسی صنایع و مدیریت شریف

https://sjie.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

روشی نوین برای طراحی فرمولاسیون لعاب با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی

حسین شمس شمیرانی* و حمیدرضا زاهدی نیستانی

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

*نویسنده مسئول (h.shams@iut.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۰۲/۰۵

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۷/۰۷

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۷/۱۷

واژگان کلیدی:

فرمولاسیون لعاب،

مدل‌سازی ریاضی،

فرمول زگر،

فرمول بچ،

بهینه‌سازی کاربردی.

چکیده

لعاب، یکی از اصلی‌ترین مواد در تهیه‌ی چینی‌آلات محسوب می‌شود و همواره روش فرمولاسیون آن از مهم‌ترین و چالش‌برانگیزترین کارها در صنعت سرامیک بوده است. تنظیم فرمول مناسب برای تولید لعاب، هم از نظر بهبود کیفیت محصولات و هم از نظر کاهش هزینه‌های تولید، بسیار حائز اهمیت است. در پژوهش حاضر، که براساس تجربیات عملی در یکی از کارخانه‌های کشور ایران انجام شده است، برای اولین بار در جهان، مسئله‌ی فرمولاسیون لعاب با رویکرد پژوهش در عملیات، بررسی و تحلیل شده است. نتایج حاصل از مدل طراحی‌شده، آزمایش و در خط تولید پیاده‌سازی شده است. برای آنکه نتایج حاصل از پژوهش حاضر به‌صورت عملی در صنعت قابل استفاده باشند و کاربران به‌راحتی بتوانند از مزایای آن بهره‌مند شوند، یک نرم‌افزار کاربرپسند نیز برای آن طراحی و ایجاد شده است.

۱. مقدمه

صنایع چینی و سرامیک طی چند دهه‌ی اخیر، رشد فزآینده‌ای هم از نظر کمیت و هم از نظر کیفیت داشته است. فروش کالاها در بازار جهانی، تحت تأثیر دو عامل قیمت و کیفیت قرار دارد. کیفیت محصول یک شاخص مهم رقابتی است. لعاب قشر نازک شیشه‌مانندی است که بر سطح برخی از محصولات سرامیکی قرار می‌گیرد. برای ساخت لعاب، پودر مواد شیشه‌ساز با آب مخلوط می‌شود و تا زمان تشکیل دوغابی با غلظت مناسب، همزده می‌شود. سپس دوغاب لعاب، با قلم‌مو یا با روش غوطه‌ورسازی یا با اسپری‌کردن به‌صورت لایه‌ای نازک بر روی سطح بدنه اعمال می‌شود. هنگامی که بدنه در دمای صحیح پخت شود، ذرات لعاب ذوب می‌شوند و لایه‌ای پیوسته و شیشه‌ای‌مانند بر سطح بدنه تشکیل می‌دهند. لعاب باید ویژگی‌هایی نظیر ثبات در مقابل شرایط محیطی، مقاومت در مقابل اثر صابون‌ها، و سختی کافی داشته باشد، آنچنان‌که به آسانی خراش بر ندارد. در ضمن، باید در عین سردشدن، انقباض مساوی با انقباض سردشدن بدنه داشته باشد تا از ترک‌خوردن لعاب جلوگیری شود. وجود لعاب به این دلایل سودمند است:

۱- بدنه‌ای که سطح آن لعاب داشته باشد، سطحی صاف، صیقلی، و غیرجاذب رطوبت دارد و به آسانی قابل تمیزکردن خواهد بود.

۲- با وجود لعاب می‌توان رنگ‌ها و بافت‌های متنوعی بر روی سطح بدنه ایجاد کرد.

در فرآیند تولید لعاب، تعدادی ماده‌ی اولیه‌ی معدنی با یکدیگر ترکیب می‌شوند. اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی مواد اولیه، اکسیدهایی هستند که درصد وجود آن‌ها با دستگاه آنالایزر[1] شناسایی می‌شود. پژوهشگران صنعت سرامیک طی سال‌ها کوشش و پژوهش توانسته‌اند برای محصولات مختلف، فرمول‌های مناسبی را براساس میزان اکسیدهای مختلف شناسایی کنند، که اصطلاحاً به آن‌ها، فرمول زگر[2] آن لعاب گفته می‌شود.

زگر، پدر علم سرامیک، اولین کسی بود که لعاب‌ها را بر حسب اکسیدهای تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها فرمول‌بندی کرد. همچنین وی اکسیدها را به سه گروه اسیدی، خنثی، و قلیایی تقسیم‌بندی کرد و مجموع مولی‌اکسیدهای قلیایی را نیز برابر واحد در نظر گرفت و دیگر اکسیدهای فرمول را بر مبنای آن محاسبه کرد.[۱۶]

مواد اولیه‌ی مختلف با توجه به اینکه از کدام معدن و نیز از کدام قسمت معدن تهیه شده‌اند، آنالیز شیمیایی متفاوتی دارند و درصد اکسیدهای موجود در آن‌ها متفاوت است. بنابراین تعیین اینکه درصد استفاده از مواد اولیه‌ی تهیه‌شده یا

[1] Analyzer

[2] Seger

استناد به این مقاله:

شمس شمیرانی، حسین و زاهدی نیستانی، حمیدرضا، ۱۴۰۴. روشی نوین برای طراحی فرمولاسیون لعاب با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی. مهندسی صنایع و مدیریت شریف ، ۴۱(۱)، صص. ۷۳-۸۵. https://doi.org/10.24200/J65.2024.63797.2387

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

قابل دسترس، برای تولید لعابی با فرمول زگر مشخص، چگونه باید باشد؛ فعالیتی است که به‌طور مکرر باید انجام شود تا فرمول مناسب شناسایی و وارد خط تولید شود. کارخانه‌های مختلف از مواد اولیه‌ی یکسان برای تولید لعاب استفاده نمی‌کنند. این امر ناشی از عواملی چون در دسترس‌نبودن بعضی از مواد اولیه، هزینه‌ی بالای برخی از مواد، و هزینه‌های حمل‌ونقل است.

برای هر لعاب ۲ گونه فرمول مطرح است:

۱. **فرمول بچ**[1]: فرمولی که بر حسب مواد اولیه است و درصد استفاده از آن‌ها را مشخص می‌کند. از فرمول بچ در خط تولید استفاده می‌شود و هر کارخانه، فرمول خاص خود را دارد.

۲. **فرمول زگر**: فرمولی براساس مقدار مولی‌اکسیدهای تشکیل‌دهنده‌ی آن لعاب است؛ که در تمامی کارخانجات یکسان است.

از آنجا که فرمول‌های بچ به آنالیز شیمیایی مواد اولیه وابسته هستند، با هر تغییری در مواد اولیه باید دوباره طراحی شوند. فرمول‌های بچ، به‌طوردائم تغییر می‌کنند و این موضوع، یک چالش اساسی برای کارخانه‌هایی است، که باید لعاب تولید کنند.

نوآوری اصلی مسئله‌ی حاضر، به‌کارگیری دانش پژوهش در عملیات برای مدل‌سازی مسئله‌ی فرمولاسیون لعاب است، که برای اولین بار در ایران و نیز جهان انجام شده است. با بررسی‌هایی که به‌عمل آمده است مشخص شد که متخصصان ایرانی و خارجی صنعت سرامیک به‌دلیل عدم آشنائی با دانش پژوهش در عملیات، از روش‌های مبتنی بر سعی و خطا و نیز مدل‌سازی‌های مقدماتی ریاضی برای این‌کار همچنان استفاده می‌کنند.[۱۴-۱۶]

در پژوهش حاضر، که به‌صورت عملیاتی با داده‌های واقعی و شناخت دقیق مسئله از طریق فرآیند تولید و نیز مطالعه‌ی کتاب‌ها و نوشتارهای منتشرشده در این زمینه انجام شده است، مسئله‌ی فرمولاسیون لعاب با استفاده از دانش پژوهش در عملیات، مدل‌سازی و تحلیل شده است. نوشتار حاضر، یک رویکرد جدید را برای فرمولاسیون لعاب معرفی می‌کند و می‌تواند نقطه‌ی شروعی برای بسیاری از پژوهش‌های دیگر در این زمینه باشد.

گام‌های اجرای پژوهش حاضر، به این صورت بوده است:

۱. شناسایی و تعریف دقیق مسئله‌ی فرمولاسیون موجود در کارخانه.
۲. بررسی دقیق روش‌های موجود برای حل مسئله‌ی فرمولاسیون لعاب.
۳. طراحی مدل ریاضی فرمولاسیون لعاب با رویکرد پژوهش در عملیات.
۴. آزمون عملی نتایج حاصل از مدل ریاضی.
۵. طراحی و ایجاد نرم‌افزار کاربردی برای عملیاتی‌ساختن سیستم طراحی‌شده.

۲. مرور پژوهش‌های مرتبط

با توجه به بررسی‌های به‌عمل‌آمده، مشخص شد که کارشناسان و متخصصان صنعت سرامیک برای طراحی فرمول بچ در آزمایشگاه از یک روش ابتکاری[2] استفاده می‌کنند. به این صورت که درصد استفاده‌ی هر یک از مواد اولیه را با سعی و خطا افزایش یا کاهش می‌دهند تا به فرمول زگر موردنظر نزدیک شوند. روش اخیر، علاوه‌بر اینکه وقت‌گیر و زمان‌بر است، دقت چندان بالایی نیز ندارد. همچنین با تغییر مواد اولیه یا تغییر آنالیز شیمیایی آن‌ها (موضوعی که مکرراً در عمل اتفاق می‌افتد)، آزمایشگاه مؤظف است فرمول جدیدی برای بچ طراحی کند، که کاری طاقت‌فرسا و دشوار است.

الگوریتم رایج در صنعت و مطرح‌شده در کتب مرجع سرامیک،[۱۴-۱۶] مطابق این گام‌هاست:

۱- ترسیم جدولی که در آن نسبت مولی هر اکسید براساس فرمول زگر در بالای آن درج شود.

۲- لحاظ‌کردن ستونی به جدول، که جرم معادل مواد تأمین‌کننده‌ی اکسیدهای موردنظر در آن درج شود. جرم معادلی که برای اولین ماده‌ی اولیه نوشته می‌شود، باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که اولین اکسید نوشته‌شده در بالای جدول را حذف کند.

۳- به ترتیب، جرم معادل موادی که به وسیله‌ی اولین ماده‌ی خام به ترکیب لعاب اضافه می‌شوند، به‌صورت افقی نوشته می‌شود و از کل مقدار موردنیاز مشخص‌شده‌ی آن در بالای جدول کم می‌شود.

٤- دومین ماده‌ای که در ستون مواد اولیه نوشته می‌شود باید به اندازه‌ای انتخاب شود که دومین اکسید مشخص‌شده در بالای جدول را حذف کند.

٥- به همین ترتیب اکسیدهای حاصل از ماده‌ی اولیه کم می‌شوند و تفاضل آن‌ها به دست می‌آید. این عملیات تا حذف کامل اکسیدهای بالای جدول ادامه می‌یابد.

٦- سرانجام نسبت‌های جرمی مواد اولیه در جرم معادل آن‌ها ضرب می‌شود تا جرم هر ماده برحسب گرم به‌دست آید.

با بررسی‌های به‌عمل‌آمده مشخص‌شد که بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در سال‌های دور و نزدیک بر روی بهبود خواص و ویژگی‌های فنی لعاب و طراحی فرمول زگر متمرکزند و فقط در کتاب‌های مرجع، یک روش ابتکاری برای طراحی فرمول بچ، که موردنیاز فرآیند تولید است، مطرح شده است. پژوهش حاضر اولین اقدامی بوده است که مسئله‌ی طراحی فرمول بچ لعاب را با رویکرد پژوهش در عملیات بررسی و تحلیل کرده است. همچنین، روشی مؤثر و کارآمد را به جای استفاده از روش ابتکاری متداول در صنعت، برای این موضوع مطرح کرده و ابزاری بسیار قدرتمند، سریع، و انعطاف‌پذیر را در اختیار کارشناسان صنعت سرامیک قرار داده است تا بتوانند طراحی فرمول بچ را به بهترین وجه ممکن انجام دهند.

در جدول ۱، مقایسه‌ی روش‌های مطرح‌شده در نوشتارها و کتاب‌های مرتبط با موضوع ارائه شده است.

تئودوسیو[3] و همکاران (۲۰۲۲)،[۱] و ایسایا[4] و همکاران (۲۰۲۱)،[۲] به بررسی بهینه‌سازی ترموکرومیک لعاب برای افزایش کارایی انرژی در ساختمان‌ها پرداخته و نشان داده‌اند که چگونه می‌توان با استفاده از مدل‌های ریاضی، خواص نوری و حرارتی لعاب را بهبود بخشید. همچنین، کرارتی[5] (۲۰۲۲)،[۳] به بهینه‌سازی همزمان طراحی و کنترل پنجره‌های لعاب‌کاری هوشمند پرداخته و نشان داده است که بهینه‌سازی می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و بهبود کیفیت محیط زیست داخلی ساختمان کمک کند. برخی مطالعات دیگر،[۴-۶] هم به بررسی بهینه‌سازی چندهدفه‌ی ویژگی‌های لعاب‌های ترموکرومیک پرداخته‌اند، که هدف‌شان بهبود کارایی انرژی ساختمان‌ها بوده و دریافته‌اند که بهینه‌سازی چندهدفه در بهبود کیفیت و کاهش هزینه‌های تولید لعاب تأثیر قابل‌توجهی داشته است. هونگ[6] و همکاران (۲۰۲۱)،[۷] در بررسی بهینه‌سازی چندهدفه‌ی

[1] Batch
[2] Heuristic method
[3] Teodosiu
[4] Isaia
[5] Krarti
[6] Hong

جدول ۱. مرور ادبیات و پژوهش‌های مرتبط.

Row	Study	Year	Improving Glaze Properties	Heuristic Formulation Solution	Optimal Formulation Solution
1	[12]	2023	✓		
2	[7]	2023	✓		
3	[3]	2022	✓		
4	[4]	2022	✓		
5	[1]	2022	✓		
6	[13]	2022	✓		
7	[2]	2021	✓		
8	[5]	2021	✓		
9	[9]	2020	✓		
10	[10]	2020	✓		
11	[8]	2020	✓		
12	[6]	2020	✓		
13	[11]	2019	✓		
14	[16]	2003	✓	✓	
15	[15]	2001	✓	✓	
16	[14]	2001	✓	✓	
17	Current Study	—			✓

لعاب براساس ارزیابی عملکرد نوری و انرژی نشان داده‌اند ک ه چگونه می‌توان با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه، کارایی لعاب را در شرایط مختلف بهبود بخشید. پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌ی هوش مصنوعی و یادگیری ماشین[1]، فرصت‌های جدیدی را برای بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی، از جمله فرمولاسیون لعاب فراهم کرده است؛ که استفاده از آن‌ها می‌تواند به شناسایی الگوهای پیچیده و بهبود دقت پیش‌بینی‌ها کمک کند. ژو و ژنگ (۲۰۲۰)،[۸ و ۹] در مطالعاتی به بررسی بهینه‌سازی مبتنی بر عدم قطعیت تصادفی در سیستم‌های لعاب‌کاری پرداخته و از مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی فرآیند استفاده کرده‌اند. مطالعات ایشان نشان می‌دهد که چگونه می‌توان با استفاده از روش‌های پیشرفته، عدم قطعیت‌ها را مدیریت و کارایی فرآیند را افزایش داد. هی[2] (۲۰۲۰)،[۱۰] و روزنداهل[3] و همکاران (۲۰۱۹)،[۱۱] در مطالعات خود از روش‌های کنترل فازی برای بهینه‌سازی فرآیند پخت لعاب در کوره‌های رولری استفاده کرده و قابلیت‌های بالای کنترل پیشرفته در بهبود فرآیندهای صنعتی را نشان داده‌اند. یانگ[4] و همکاران (۲۰۲۳)،[۱۲] در مطالعه‌ای به بهینه‌سازی ترکیبی ویژگی‌های نوری لعاب پرداخته و از مدل‌های ترکیبی برای بهبود عملکرد لعاب استفاده کرده‌اند. نتایج مطالعه‌ی اخیر نشان داده است که بهینه‌سازی ترکیبی می‌تواند به بهبود دقت و کارایی فرآیندهای تولیدی منجر شود. همچنین، ژو[5] (۲۰۲۲)،[۱۳] از رویکرد بهینه‌سازی چندمرحله‌ای مبتنی بر یادگیری ماشین برای بهبود سیستم‌های لعاب‌کاری استفاده کرده است، که نشانگر قدرت بالای بهینه‌سازی ترکیبی در مدیریت پیچیدگی‌های فرآیندهای صنعتی است. فقط در برخی منابع،[۱۴-۱۶] به صنعت تشریح سرامیک از گذشته تاکنون پرداخته شده است. همچنین، فعالیت‌های صورت‌گرفته در زمینه‌های ساخت و تولید لعاب، بررسی و یک روش ابتکاری برای طراحی فرمول بچ ارائه شده است. ضعف بزرگی که در مرور ادبیات مشاهده می‌شود، عدم استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ریاضی برای طراحی فرمول بچ است. در حالی که این موضوع یکی از مهم‌ترین چالش‌های صنعت سرامیک در

[1] Machine learning
[2] He
[3] Rosendahl
[4] Yang
[5] Zhou

دنیای واقعی است. در پژوهش حاضر، با طراحی و معرفی مدل ریاضی قابل استفاده و کاربردی برای فرمولاسیون لعاب، گام مهمی در جهت بهبود فرآیندهای تولید لعاب برداشته شده است.

۳. شرح مسئله و مدل‌سازی ریاضی

با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی می‌توان مسئله‌ی فرمولاسیون لعاب را در زمان کمینه‌ی ممکن و با درنظرگرفتن عوامل و ملاحظات فنی و نیز نکاتی دیگر از قبیل قیمت تمام‌شده‌ی لعاب، استفاده از مواد اولیه‌ی جدید و حذف برخی از مواد اولیه از فرمولاسیون تعیین کرد. اجزاء مدل ریاضی طراحی‌شده در روابط ۱ الی ۸، عبارت‌اند از:

- مجموعه‌ها

I: مجموعه‌ی اکسیدها Y

J: مجموعه‌ی مواد اولیه؛

K: مجموعه‌ی اکسیدهای قلیایی.

- داده‌های عددی

A_{ij}: درصد وزنی اکسید i در ماده‌ی اولیه‌ی j ؛

M_i: جرم مولکولی اکسید i ؛

$SEGPARM_i$: مقدار زگر موردنظر برای اکسید i؛

$Cost_j$: هزینه‌ی تأمین ماده‌ی اولیه‌ی j؛

GlazeCost: بیشینه‌ی هزینه‌ی قابل‌قبول برای فرمول بچ؛

U_j: حد بالای مصرف برای درصد وزنی ماده‌ی اولیه‌ی j ؛

L_j: حد پایین مصرف برای درصد وزنی ماده‌ی اولیه‌ی j .

- متغیرهای تصمیم

X_j : درصد استفاده از ماده‌ی اولیه‌ی j؛

SMOLG: مجموع مولی اکسیدهای قلیایی؛

MOL_i : مقدار مولی حاصل برای اکسید i؛

PS_i : انحراف بالای اکسید i از زگر موردنظر؛

NS_i : انحراف پایین اکسید i از زگر موردنظر

$$Minimize: \sum_i (PS_i + NS_i) \quad (۱)$$

$$\sum_j X_j = 100 \quad (۲)$$

$$M_i * MOL_i = \sum_j A_{ij} * X_j \quad \forall i \quad (۳)$$

$$SMOLG = \sum_k MOL_k \quad (۴)$$

$$SEGPARM_i * SMOLG = MOL_i + PS_i - NS_i, \forall i \quad (۵)$$

$$\sum_j \text{Cost}_j * \text{X}_j \le \text{GlazeCost} \quad (۶)$$

$$L_j \le X_j \le U_j \quad \forall j \quad (۷)$$

$$PS_i \ge 0,\ NS_i \ge 0,\ MOL_i \ge 0,\ \forall i,$$
$$SMOLG \ge 0,\ X_j \ge 0,\ \forall j \quad (۸)$$

که در آن‌ها، رابطه‌ی ۱، بیانگر تابع هدف مسئله است و مجموع انحراف‌ها از زگر مطلوب هر یک از اکسیدها را کمینه می‌سازد. برای آنکه مجموع استفاده از مواد اولیه، برابر ۱۰۰ شود، رابطه‌ی ۲ لحاظ شده است. برای محاسبه‌ی میزان مول هر یک از اکسیدها از رابطه‌ی ۳ و برای محاسبه‌ی مجموع مولی اکسیدهای قلیایی از رابطه‌ی ۴ و برای محاسبه‌ی انحراف بالا یا انحراف پایین از زگر مطلوب هر یک از اکسیدها از رابطه‌ی ۵ استفاده شده است. به‌منظور بیشترنشدن هزینه‌ی مواد اولیه از هزینه‌ی موردنظر از رابطه‌ی ۶ استفاده شده است. رابطه‌ی ۷، حدهای بالا و پایین درصد استفاده از هر یک از مواد اولیه را مشخص می‌کند. رابطه‌ی ۸، نیز بیانگر غیرمنفی‌بودن متغیرهای تصمیم مسئله است.

۴. حل عددی یک مسئله‌ی نمونه

برای طراحی فرمول بچ برای لعابی، که فرمول زگر آن مطابق جدول ۲ است، از ۸ نوع مواد اولیه که آنالیز شیمیایی آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است، استفاده شده است.

هزینه‌ی تأمین، حد پایین مص رف، و حد بالای مصرف مواد اولیه مطابق جدول ۴ است.

جرم مولکولی اکسیدها، در جدول ۵ ارائه شده است.

بیشینه‌ی هزینه‌ی قابل قبول برای فرمول بچ، ۱۶۶ واحد پولی است.

با استفاده از روش ابتکاری رایج در صنعت، که قبلاً در قسمت مقدمه بیان شده است، فرمول بچ مطابق جدول ۶ به‌دست می‌آید.

جدول ۲. فرمول زگر یک لعاب نمونه.

Oxide	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	BaO	ZnO	K_2O	Na_2O	MgO	CaO
Target Seger Value	2.90	0.00	0.30	0.05	0.05	0.04	0.06	0.15	0.65

جدول ۳. مواد اولیه‌ی قابل دسترس و آنالیز شیمیایی آن‌ها.

Raw Material No.	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	BaO	ZnO	K_2O	Na_2O	MgO	CaO
1	48.80	0.07	36.10	0.00	0.00	2.60	0.14	0.35	0.12
2	54.88	0.07	40.63	0.00	0.00	2.88	0.18	0.40	0.14
3	74.00	0.03	14.60	0.00	0.00	5.60	3.90	0.00	0.80
4	98.00	0.04	0.78	0.00	0.00	0.15	0.08	0.01	0.02
5	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.39	32.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	56.00
7	0.00	0.00	0.00	77.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	99.99	0.00	0.00	0.00	0.00

جدول ۴. هزینه، حد پایین مصرف، و حد بالای مصرف مواد اولیه.

Raw Material No.	Cost (per unit)	Minimum Usage (%)	Maximum Usage (%)
1	150	0%	100%
2	110	0%	100%
3	230	0%	100%
4	192	0%	100%
5	110	0%	100%
6	105	0%	100%
7	140	0%	100%
8	190	0%	100%

طبق برنامه‌ریزی ریاضی پیشنهادی، فرمول بچ مطابق جدول ۷ به‌دست آمده است.

جدول ۸ نشان می‌دهد که مقدار تابع هدف، یعنی مجموع انحراف‌های زگر اکسیدها از زگر موردنظر برای آن‌ها در روش رایج برابر ۰/۵۸ مول است و این مقدار در روش استفاده از مدل ریاضی برابر ۰/۰۴ مول است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دقت جواب در روش استفاده از مدل ریاضی نسبت به روش رایج، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بهتر شده است. همچنین جدول ۹ نشان می‌دهد که هزینه‌ی فرمول بچ حاصل از مدل ریاضی، از هزینه‌ی فرمول حاصل از روش رایج نیز کمتر بوده است.

۵. اندازه‌ی مدل ریاضی و ابعاد قابل حل برای آن

اگر n بیانگر تعداد مواد اولیه و m بیانگر تعداد اکسیدها باشند، آنگاه تعداد متغیرهای مسئله ۳m+n+۱ و تعداد محدودیت‌های کارکردی (به‌جز محدودیت‌های غیرمنفی) برابر ۲(m+n)+۳ خواهد شد. در مسائل دنیای

جدول ۵. جرم مولکولی اکسیدها.

Oxide	Molecular Weight (g/mol)
SiO_2	60
TiO_2	80
Al_2O_3	102
BaO	153
ZnO	81
K_2O	94
Na_2O	62
MgO	40
CaO	56

واقعی، معمولاً تعداد مواد اولیه‌ی فرمولاسیون لعاب کمتر از ۲۰ ماده و نیز تعداد اکسیدهای موجود در لعاب کمتر از ۱۵ اکسید است. بنابراین سایز مسئله در ابعاد بالای آن حدود ۶۶ متغیر و حدود ۷۳ محدودیت کارکردی می‌شود. مسائل برنامه‌ریزی خطی در چنین ابعادی و حتی ابعادی بسیار بزرگ‌تر از آن با نرم‌افزارهای حل‌کننده‌ی[1] تجاری و صنعتی مانند Gurobi و Cplex در کسری از ثانیه، جواب بهینه‌ی دقیق و سراسری چنین مسائلی را محاسبه و شناسایی می‌کنند. چند مسئله در ابعاد گوناگون که بیشتر آن‌ها بسیار بزرگ‌تر از مسائل واقعی مطرح در صنعت هستند، به‌طور تصادفی تولید و زمان حل آن‌ها ثبت شده است. در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود که اگر سایز مسئله، خیلی بیش از دنیای واقعی نیز باشد، مشکلی در روش حل، دقت عمل و زمان محاسبات به‌وجود نمی‌آید.

نتیجه آنکه حل مدل ریاضی حاصل از نظر زمان محاسبات با استفاده از نرم‌افزارهای حل‌کننده‌ی تجاری و روی یک کامپیوتر معمولی یا لپ‌تاپ، چالش

[1] Solver

جدول۶. جواب حاصل از روش رایج در صنعت.

Raw Material No.	Batch Formula (%)
1	10%
2	8%
3	20%
4	32%
5	18%
6	3%
7	6%
8	3%
Total	**100%**

جدول ۷. جواب حاصل از مدل ریاضی.

Raw Material No.	Batch Formula (%)
1	5%
2	12%
3	21%
4	33%
5	9%
6	16%
7	3%
8	1%
Total	**100%**

جدول ۸ (مقایسه زگرهای حاصل).

Oxide	SiO_2	TiO2	Al_2O_3	BaO	ZnO	K_2O	Na_2O	MgO	CaO
Target Seger	2.90	0.00	0.30	0.05	0.05	0.04	0.06	0.15	0.65
Seger from Traditional Method	2.82	0.00	0.30	0.09	0.11	0.05	0.04	0.28	0.41
Seger from Mathematical Model	2.90	0.00	0.30	0.05	0.05	0.06	0.04	0.15	0.65
Deviation (Traditional)	0.08	0.00	0.00	0.04	0.06	0.01	0.02	0.13	0.24
Deviation (Mathematical)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00
Total Deviation From Traditional Method	0.58								
Total Deviation From Mathematical Model	0.04								

محاسباتی ندارد. این موضوع یکی از مزایای بزرگ مدل‌های خطی است، که نیاز به روش‌های ابتکاری یا فراابتکاری یا سایر روش‌های غیردقیق ندارند.

۶. طراحی و توسعه‌ی نرم‌افزار کاربردی

برای آنکه نتایج حاصل از پژوهش حاضر به‌صورت عملی در صنعت قابل استفاده باشد و کاربران به‌راحتی بتوانند از مزایای آن بهره‌مند شوند، یک نرم‌افزار کاربردی برای آن طراحی و ایجاد شده است. برای مدیریت داده‌ها و مشاهده‌ی گزارش‌ها از نرم‌افزار ACCESS، برای مدل‌سازی ریاضی از نرم‌افزار GAMS، و برای حل مدل از نرم‌افزار CPLEX استفاده شده است. تصویرهای صفحات اصلی نرم‌افزار در شکل‌های ۱ الی ۶ مشاهده می‌شوند. شکل ۱، جدول اطلاعاتی اکسیدها را نشان می‌دهد؛ که از طریق آن می‌توان اطلاعات هر یک از اکسیدها را مشاهده و ویرایش کرد و نیز در صورت نیاز، اکسیدهای جدید را تعریف کرد. در شکل ۲، فرم اطلاعاتی مواد اولیه مشاهده می‌شود؛ که از طریق آن می‌توان مواد اولیه‌ی مختلف و آنالیز شیمیایی آن‌ها را مشاهده و ویرایش کرد و در صورت لزوم، مواد اولیه‌ی جدیدی را به برنامه معرفی کرد. در شکل ۳، فرم اطلاعاتی مربوط به انواع لعاب‌ها، آنالیز شیمیایی، و فرمول زگر آن‌ها مشاهده می‌شود؛ که از طریق آن می‌توان به اطلاعات انواع لعاب‌ها دسترسی داشت و آن‌ها را مشاهده یا ویرایش کرد. همچنین لعاب‌های جدید را به برنامه معرفی کرد. در شکل ۴، اطلاعات مربوط به لعابی که قرار است فرمول بچ آن طراحی شود، به همراه اطلاعات مربوط به مواد اولیه‌ی موردنظر برای استفاده مشاهده می‌شود. با انتخاب کلید "شروع محاسبات"، ابتدا اطلاعات موردنیاز مدل ریاضی به‌صورت اتوماتیک به فرمت نرم‌افزار GAMS تنظیم می‌شود. سپس GAMS نرم‌افزار حل‌کننده‌ی CPLEX را برای حل مدل ریاضی فراخوانی می‌کند. در شکل ۵، روند پیشرفت محاسبات مشاهده می‌شود، که معمولاً کسری از ثانیه می‌شود. پس از اتمام محاسبات، نتایج حاصل از آن اخذ و به‌صورت اتوماتیک وارد فرم مخصوصی می‌شود که در شکل ۶ نتایج آن مشاهده می‌شود.

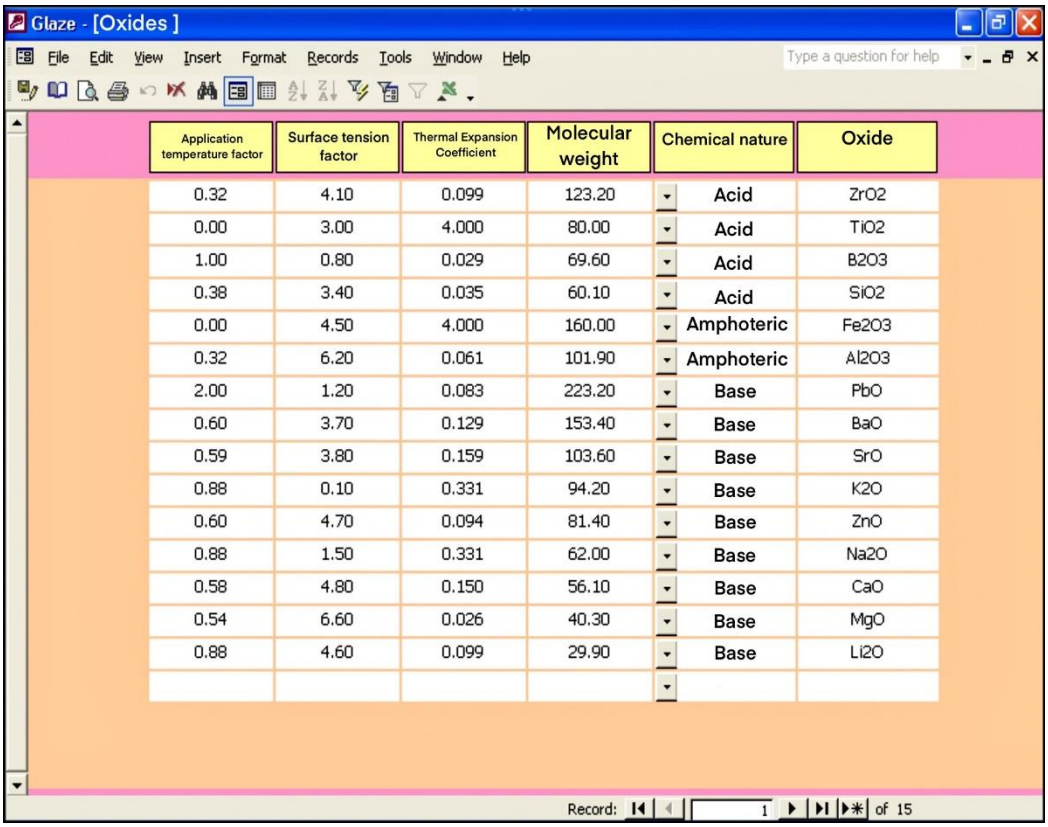
طراحان فرمول بچ با استفاده از فرم مذکور، مناسب‌ترین فرمول را، هم از نظر کیفیت و هم از نظر هزینه می‌توانند شناسایی کنند.

جدول ۹. مقایسه‌ی قیمت تمام‌شده‌ی فرمول بچ.

Raw Material No.	Unit Cost	Usage (%) – Traditional Method	Usage (%) – Mathematical Model
1	150	10%	5%
2	110	8%	12%
3	230	20%	21%
4	192	32%	33%
5	110	18%	9%
6	105	3%	16%
7	140	6%	3%
8	190	3%	1%
Total Cost		—	168.29

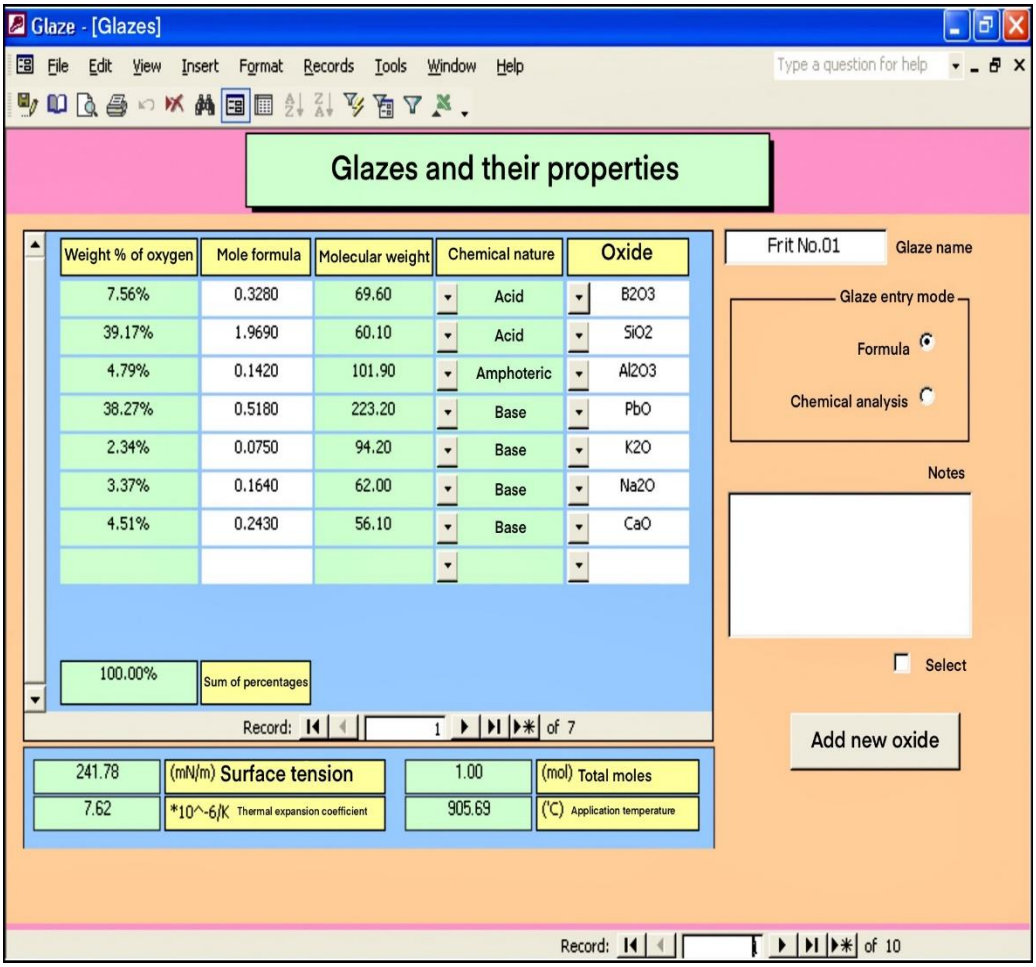
جدول ۱۰. شبیه سازی مسائل و حل با مدل طراحی‌شده.

Problem No.	No. of Raw Materials	No. of Oxides	No. of Variables	No. of Constraints	No. of Non-Zero Coefficients	Iterations	Solution Time (s)	Result
1	12	12	49	51	194	16	0.015	Global Optimum
2	20	12	57	67	329	16	0.015	Global Optimum
3	30	12	67	87	479	16	0.016	Global Optimum
4	40	12	77	107	629	19	0.016	Global Optimum
5	50	12	87	127	779	19	0.017	Global Optimum
6	60	12	97	147	929	19	0.017	Global Optimum
7	70	12	107	167	1079	19	0.017	Global Optimum
8	80	12	117	187	1229	20	0.018	Global Optimum
9	90	12	127	207	1379	20	0.018	Global Optimum
10	100	12	137	227	1529	20	0.018	Global Optimum
11	200	12	237	427	3029	20	0.018	Global Optimum
12	300	12	337	627	4529	20	0.019	Global Optimum
13	400	12	437	827	6029	21	0.019	Global Optimum
14	500	12	537	1027	7529	21	0.019	Global Optimum
15	600	12	637	1227	9029	21	0.019	Global Optimum



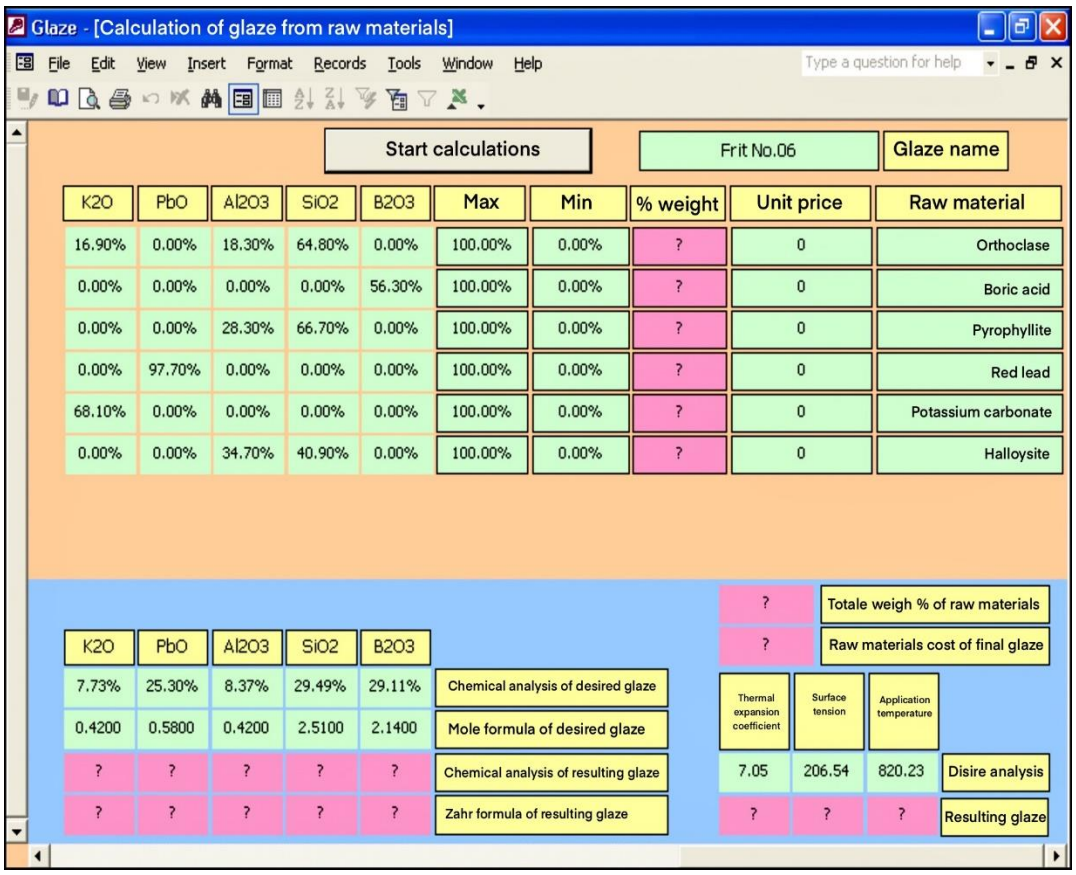
Application temperature factor	Surface tension factor	Thermal Expansion Coefficient	Molecular weight	Chemical nature	Oxide
0.32	4.10	0.099	123.20	Acid	ZrO2
0.00	3.00	4.000	80.00	Acid	TiO2
1.00	0.80	0.029	69.60	Acid	B2O3
0.38	3.40	0.035	60.10	Acid	SiO2
0.00	4.50	4.000	160.00	Amphoteric	Fe2O3
0.32	6.20	0.061	101.90	Amphoteric	Al2O3
2.00	1.20	0.083	223.20	Base	PbO
0.60	3.70	0.129	153.40	Base	BaO
0.59	3.80	0.159	103.60	Base	SrO
0.88	0.10	0.331	94.20	Base	K2O
0.60	4.70	0.094	81.40	Base	ZnO
0.88	1.50	0.331	62.00	Base	Na2O
0.58	4.80	0.150	56.10	Base	CaO
0.54	6.60	0.026	40.30	Base	MgO
0.88	4.60	0.099	29.90	Base	Li2O

شکل ۱. معرفی اکسیدها و ویژگی‌های آن‌ها.

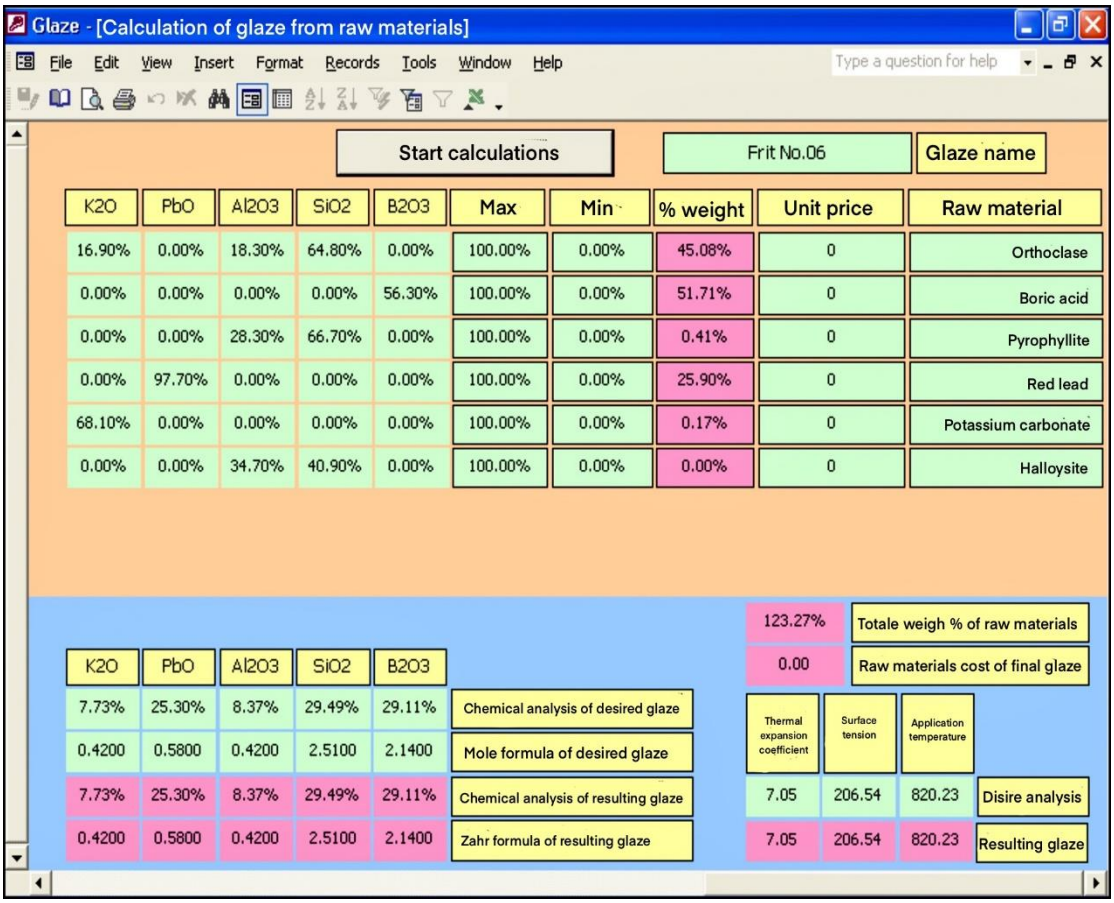


Weight % of oxygen	Mole formula	Molecular weight	Chemical nature	Oxide
7.56%	0.3280	69.60	Acid	B2O3
39.17%	1.9690	60.10	Acid	SiO2
4.79%	0.1420	101.90	Amphoteric	Al2O3
38.27%	0.5180	223.20	Base	PbO
2.34%	0.0750	94.20	Base	K2O
3.37%	0.1640	62.00	Base	Na2O
4.51%	0.2430	56.10	Base	CaO

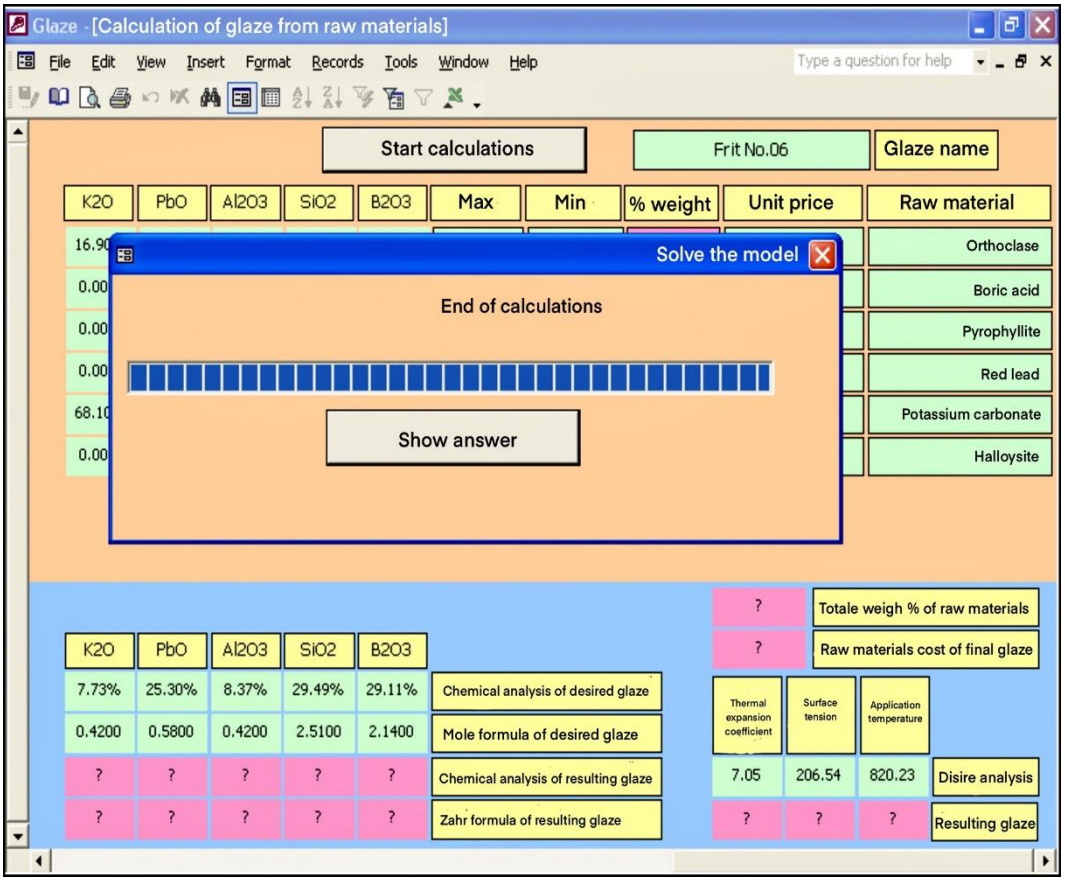
شکل ۲. معرفی مواد اولیه و آنالیز شیمیایی و هزینه‌ی آن‌ها.



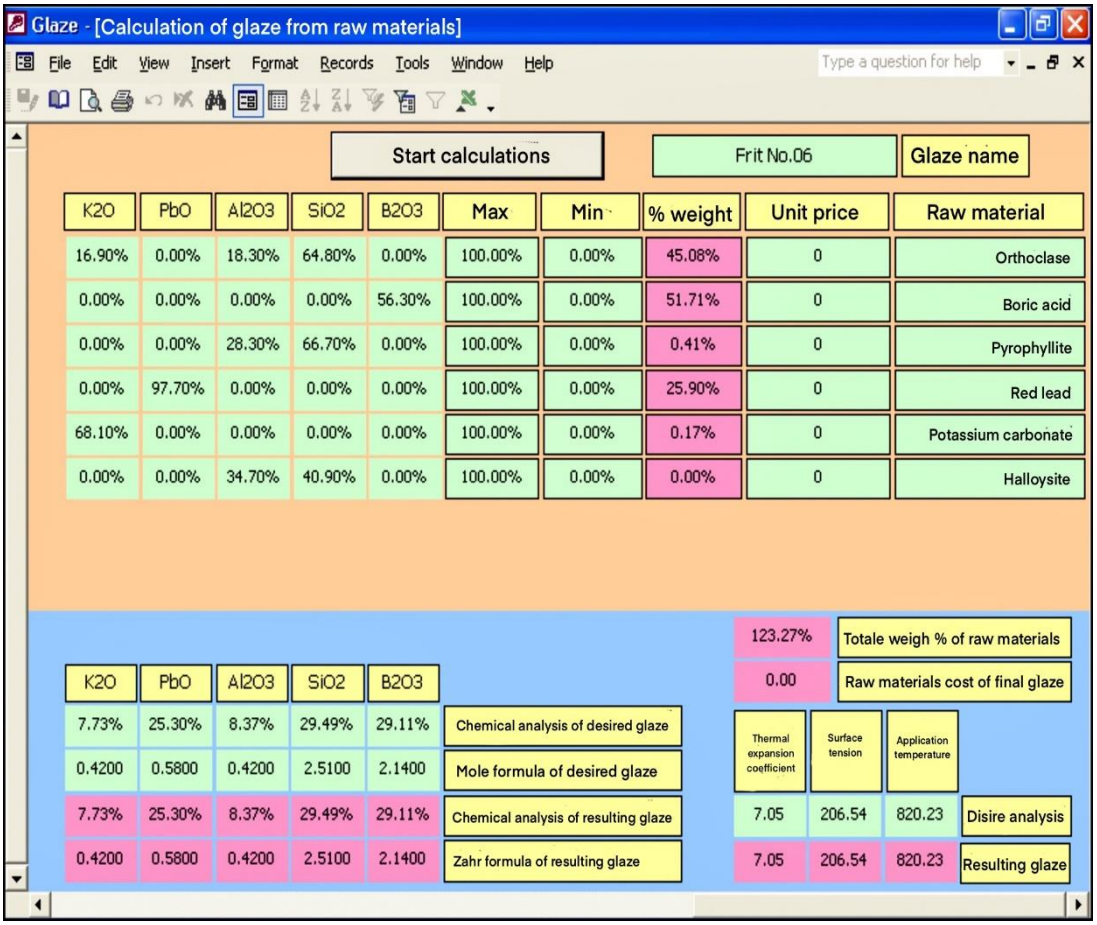
شکل ۳. معرفی لعاب‌ها و خواص آن‌ها.



شکل ۴. انتخاب لعاب موردنظر و مواد اولیه‌ی منتخب برای تولید آن.



شکل ۵. روند انجام محاسبه‌ها براساس برنامه‌ریزی ریاضی.



شکل ۶. نتایج حاصل از اجرای مدل ریاضی.

۷. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در صنعت سرامیک، طراحی فرمول بچ برای تولید لعاب براساس فرمول‌های "زگر" و با بهره‌برداری از تجربه‌ی متخصصان و روش‌های محاسباتی غیربهینه انجام می‌شود. چنین روش‌هایی قادر به یافتن فرمول بهینه از نظر کیفی و نیز از نظر هزینه نیستند. جواب‌هایی که از روش مذکور به‌دست می‌آیند، عمدتاً رضایت نسبی را بر آورده می‌سازند. در پژوهش حاضر، برای اولین بار در ایران و جهان، از رویکرد پژوهش در عملیات برای این موضوع استفاده و مشخص شده است که روش اخیر تحولی شگرف، هم از نظر کیفیت فرمول، هم از نظر کاهش هزینه‌ی تولید و هم از نظر زمان محاسبات به‌وجود می‌آورد. در پژوهش حاضر، اگر چه هدف اصلی بهینه‌سازی فرمولاسیون است، هدف‌های دیگر نیز تأمین شده است، مانند تهیه‌ی ابزاری کارآمد که کارشناسان بتوانند به راحتی فرمولاسیون را با درنظرگرفتن معیارهای مختلف انجام دهند و اثر مواد اولیه‌ی مختلف در یکدیگر را بهتر بررسی کنند. علاوه‌بر این‌ها، ضمن اینکه نیازهای فنی خود را در چارچوب فرمولاسیون مناسب تأمین می‌کنند، هزینه‌ها را نیز محاسبه و کاهش می‌دهند. برای ایجاد برنامه‌ی کاربردی و مدیریت داده‌های مدل از بانک‌اطلاعاتی Access، برای مدل‌سازی ریاضی از نرم‌افزار GAMSUUو برای حل مدل از حل‌کننده‌ی Cplex استفاده شده است. کاربران از طریق یک سیستم کاربرپسند می‌توانند داده‌های لازم را وارد و تحلیل‌های مختلفی را انجام دهند. نتایج حاصل از پژوهش حاضر پس از آزمایش‌های اولیه و تولید نمونه‌های کوچک، وارد خط تولید و سبب افزایش کیفیت و نیز کاهش هزینه‌های تولید لعاب شده و در صنعت از آن استقبال شده است.

References – منابع

1. Teodosiu, C.I., Sima, C., Croitoru, C. and Bode, F., 2022. Experimental investigation and optimization of a glazed transpired solar collector. *Applied Sciences*, *12*(22), p.11392.https://doi.org/10.3390/app122211392
2. Isaia, F., Fiorentini, M., Serra, V. and Capozzoli, A., 2021. Enhancing energy efficiency and comfort in buildings through model predictive control for dynamic façades with electrochromic glazing. *Journal of Building Engineering*, *43*, p.102535. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102535
3. Krarti, M., 2022. Design optimization of smart glazing optical properties for office spaces. *Applied Energy*, *308*, p.118411.https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118411
4. Lantonio, N.A. and Krarti, M., 2022. Simultaneous design and control optimization of smart glazed windows. *Applied Energy*, *328*, p.120239.https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120239
5. Araújo, G.R., Teixeira, H., Gomes, M.G. and Rodrigues, A.M., 2023. Multi-objective optimization of thermochromic glazing properties to enhance building energy performance. *Solar Energy*, *249*, pp.446-456. https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.11.043
6. Yang, R., Li, D., Wei, W. and Wang, F., 2020. A Mie optimization model to determine optical properties of PCM based nanofluids for solar thermal applications of glazing window. *Optik*, *212*, p.164664. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164664
7. Hong, X., Shi, F., Wang, S., Yang, X. and Yang, Y., 2021, December. Multi-objective optimization of thermochromic glazing based on daylight and energy performance evaluation. In *Building Simulation* (Vol. 14, No. 6, pp. 1685-1695). Beijing: Tsinghua University Press.https://doi.org/10.1007/s12273-021-0778-7
8. Zhou, Y. and Zheng, S., 2020. Stochastic uncertainty-based optimisation on an aerogel glazing building in China using supervised learning surrogate model and a heuristic optimisation algorithm. *Renewable Energy*, *155*, pp.810-826. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.122
9. Zhou, Y. and Zheng, S., 2020. Climate adaptive optimal design of an aerogel glazing system with the integration of a heuristic teaching-learning-based algorithm in machine learning-based optimization. *Renewable Energy*, *153*, pp.375-391. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.133
10. He, W., 2020. Fuzzy-PID Control Technology in Glaze Firing Process Control System of Roller Kiln for Bone China. In *Big Data Analytics for Cyber-Physical System in Smart City: BDCPS 2019, 28-29 December 2019, Shenyang, China* (pp. 1587-1593). Springer Singapore. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-2568-1_221
11. Rosendahl, P.L., Staudt, Y., Schneider, A.P., Schneider, J. and Becker, W., 2019. Nonlinear elastic finite fracture mechanics: Modeling mixed-mode crack nucleation in structural glazing silicone sealants. *Materials & Design*, *182*, p.108057.https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108057
12. Yang, X., Li, D., Yang, R., Ma, Y., Duan, Y., Zhang, C., Hu, W. and Arıcı, M., 2023. Parameter global optimization and climatic adaptability analysis of PCM glazed system for long-term application. *Renewable Energy*, *217*, p.119161.https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119161
13. Zhou, Y., 2022. A multi-stage supervised learning optimisation approach on an aerogel glazing system

with stochastic uncertainty. *Energy*, *258*, p.124815. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124815

14. Mirhadi, B., 2001. Glaze theory and technology, in: B. Mirhadi, ed., *Glaze Theory and Technology*, 1st edn., Amirkabir University of Technology Press, Tafresh, Iran, pp. 1–32. [In Persian]

15. Mirhadi, B., 2001. Glaze raw materials, coloring, and calculation, in: B. Mirhadi, ed., *Glaze Raw Materials, Coloring, and Calculation*, 1st edn., Amirkabir University of Technology Press, Tafresh, Iran, pp. 33–60. [In Persian]

16. Burleson, M., 2003. Glaze formulation and application techniques, in: *The Ceramic Glaze Handbook: Materials, Techniques, Formulas*, 1st edn., Lark Books, Asheville, NC, USA, pp. 1–176.

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2025), 41(1), 86-97

Sharif University of Technology

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

Research Article

Investigating the Performance of Two Stock Price Forecasting Models, Based on a Long Short-Term Memory Neural Network and with Two Different Approaches of Feature Selection and Time Series Analysis

Keyvan Haghighi Naeini and Mohammad Ali Rastegar*

Department of Systems and Productivity Management, Faculty of Industrial Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* corresponding author: (ma.rastegar@modares.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:29 April 2024

Revised:14 September 2024

Accepted:8 October 2024

Keywords:

Stock price prediction,
deep learning,
genetic algorithm,
feature selection,
time series decomposition.

Abstract

In the financial literature, the capital market plays an essential role in economic growth through the financing of enterprises, the optimal allocation of resources, the improvement of liquidity of assets, the improvement of company management, and the increase of transparency in the economy. One of the most important challenges that shareholders always face in the market is to make the right decision and be in the right position with buying and selling stocks. Stock forecasting that predicts future stock movements and benefits shareholders has been an attractive research area for financial studies and researchers for the past. In this research, we present two models of neural networks that receive inputs and predict price and movement trends, and finally, the performance of these two models is compared. The data studied in this research includes the price data of the 5 largest shares of the New York market during the years 2000 to 2020, in which 80 percent of the initial samples are used as training data and the remaining 20 percent are used as test data.

In the proposed VMD-LSTM model, first, the stock price time series is decomposed using the variational mode decomposition algorithm (VMD) into the intrinsic mode functions (IMF), and then each of these IMFs is predicted by the LSTM model and After interpreting the results. In the second proposed method, available features, including price and some of the most important technical indicators, are used to predict stock prices. In the GA-LSTM model, the genetic algorithm is first used to select the best features from the entire set of features. Then, the time series of the stock closing price was predicted by an LSTM network using the selected features. The results of the research showed that because both models are very good in price prediction, the proposed GA-LSTM model, which is developed based on feature selection, has less error and more accurate performance.

Funding

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

To Cite this article:

Haghighi Naeini, K. and Rastegar, M.A. 2025. Investigating the performance of two stock price forecasting models, based on a long short-term memory neural network and with two different approaches of feature selection and time series analysis, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, 41(1), 86-97. https://doi.org/10.24200/j65.2024.63935.2392

مجله علمی مهندسی صنایع و مدیریت شریف

https://sjie.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

بررسی عملکرد دو مدل پیش‌بینی قیمت سهام مبتنی بر شبکه‌ی عصبی حافظه‌ی کوتاه‌مدت طولانی و با دو رویکرد متفاوت انتخاب ویژگی و تجزیه‌ی سری زمانی

کیوان حقیقی نائینی و محمدعلی رستگار *

گروه مدیریت سیستم و بهره‌وری، دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (ma_rastegar@modares.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۰۲/۱۰

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۶/۲۴

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۷/۱۷

واژگان کلیدی:

پیش‌بینی قیمت سهام،

یادگیری عمیق،

الگوریتم ژنتیک،

انتخاب ویژگی،

تجزیه‌ی سری زمانی.

چکیده

امروزه توسعه‌ی مدل‌های پیش‌بینی قیمت، با توجه به گسترش روزافزون بازارهای مالی، اهمیت بسیاری دارد. در پژوهش حاضر، دو مدل از ترکیب الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تجزیه‌ی حالت متغیر به‌صورت جداگانه با شبکه‌ی عصبی LSTM ارائه شده است. در رویکرد انتخاب ویژگی، الگوریتم ژنتیک از میان تمام ویژگی‌های ورودی مدل، زیرمجموعه‌ای از ویژگی‌ها را انتخاب و شبکه‌ی عصبی LSTM، با استفاده از ویژگی‌های منتخب، قیمت سهام را پیش‌بینی می‌کند. اما در رویکرد تجزیه‌ی سری زمانی، سری زمانی قیمت سهام به‌عنوان یگانه ورودی مدل توسط الگوریتم VMD تجزیه می‌شود و شبکه‌ی عصبی LSTM با پیش‌بینی توابع تولیدشده و تجمیع نتایج، قیمت سهام را پیش‌بینی می‌کند. در پژوهش حاضر، قیمت ۵ سهم بورس نیویورک با دو مدل پیشنهادی، پیش‌بینی و عملکرد آن‌ها مقایسه شده است. نتایج تجربی، برتری مدل GA-LSTM را نسبت به سایر مدل‌های معیار نشان می‌دهد.

۱. مقدمه

سرمایه‌گذاری در بازار سهام یک فعالیت محبوب و اغلب سودآور است، که هم سهامداران مبتدی و هم متخصصان حوزه‌ی مذکور از آن لذت می‌برند. سرمایه‌گذاران از راهبردهای مختلفی استفاده می‌کنند، که در دوره‌ی نگهداری و خطرپذیری متفاوت هستند. پیش‌بینی عملکرد سهام، یک هدف مهم در دنیای مالی است، زیرا یک پیش‌بینی نسبتاً دقیق این امکان را برای سرمایه‌گذار فراهم می‌کند که همواره منافع مالی بالایی را به همراه داشته باشد و همچنین ریسک‌های بازار را پوشش دهد.

پیش‌بینی بازار سهام و توسعه‌ی مدل‌های معاملاتی سودآور یکی از مسائلی است که همواره پژوهشگران، تحلیلگران اقتصادی، و معامله‌گران بازار سهام به آن توجه کرده‌اند. با این حال، ارائه‌ی مدلی که تحت شرایط مختلف بازار، عملکرد قابل اعتمادی داشته باشد، بسیار چالش‌برانگیز است. در چند دهه‌ی گذشته، به لطف پیشرفت‌های کامپیوتری و فناوری اطلاعات، مدل‌های محاسباتی هوشمند به‌عنوان جایگزین‌های مناسب برای سیستم‌های تصمیم‌گیری سنتی شروع به ظهور کرده‌اند. مدل‌های قبلی عمدتاً مبتنی بر قوانین و تحلیل‌های ایستا بوده و به‌دلیل فعل و انفعال‌های دستی بیش از حد، آن‌ها از احساسات انسانی مصون نبوده و در نتیجه بازدهی ناسازگار و ضعیفی داشته‌اند.[۱] از سوی دیگر، مدل‌های نوظهور هوش مصنوعی، مانند انواع مختلف شبکه‌های عصبی، عملکرد مناسب‌تری در پیش‌بینی قیمت ارائه کرده و در نتیجه به سرعت موردتوجه پژوهشگران حوزه‌ی مذکور قرار گرفته و مدل‌های ترکیبی بسیاری جهت پیش‌بینی قیمت سهام توسعه داده شده است.[۲]

در همین حال، عملکرد روش‌های یادگیری ماشین سنتی تا حد زیادی به طراحی ویژگی‌ها بستگی دارد، که این امر باعث تداخل خاصی در عملکرد پیش‌بینی می‌شود. روش‌های سنتی در فرآیند پیش‌بینی نیز ممکن است با مشکلاتی مانند بیش‌برازش و کندی همگرایی مواجه شوند.[۳] اخیراً، یادگیری عمیق، به‌عنوان یک نسخه‌ی پیشرفته از مدل‌های یادگیری ماشین سنتی، به‌دلیل عملکرد خوب آن در حوزه‌هایی مانند تشخیص تصویر و تشخیص گفتار، توجه زیادی را در این زمینه به خود جلب کرده است. همچنین در زمینه‌ی پیش‌بینی مالی، یک شبکه‌ی عصبی عمیق امکان افزایش دقت پیش‌بینی بازار سهام را فراهم می‌کند. مهم‌ترین مزایای روش‌های یادگیری عمیق، یادگیری خودکار ویژگی‌ها، یادگیری چندلایه‌ی ویژگی‌ها، دقت بالا در نتایج، قدرت تعمیم بالا، و شناسایی داده‌های جدید است.[۴] بنابراین، هدف مطالعه‌ی حاضر، ارائه‌ی مدل پیش‌بینی عملکرد سهام با استفاده از شبکه‌ی عصبی عمیق

استناد به این مقاله:

حقیقی نائینی، کیوان و رستگار، محمدعلی ، ۱۴۰۴. بررسی عملکرد دو مدل پیش‌بینی قیمت سهام مبتنی بر شبکه‌ی عصبی حافظه‌ی کوتاه‌مدت طولانی و با دو رویکرد متفاوت انتخاب ویژگی و تجزیه‌ی سری زمانی . مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۴۱(۱)، صص.۸۶-۹۷. https://doi.org/10.24200/j65.2024.63935.2392

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

LSTM و الگوریتم ژنتیک جهت بهبود عملکرد سرمایه‌گذاری در بازار سهام است.

۲. ادبیات نظری و پیشینه‌ی پژوهش

قیمت سهام تحت تأثیر عوامل متعددی قرار می‌گیرد، که مستقیماً یا غیرمستقیم در عرضه و تقاضا در بازار تأثیر می‌گذارند. یکی از مهم‌ترین عوامل، عملکرد شرکت است. شرکت‌های با سودآوری و رشد بالا معمولاً افزایش قیمت سهام را تجربه می‌کنند.

وضعیت اقتصادی، مانند: نرخ بهره، تورم، و رشد اقتصادی نیز آثار مهمی در قیمت سهام دارند، زیرا عوامل مذکور در تصمیم‌های سرمایه‌گذاران اثر می‌گذارند. همچنین، رویدادهای سیاسی و جهانی، نظیر: بحران‌ها، جنگ‌ها، یا تغییرات سیاست‌های دولتی می‌توانند نوسان‌های شدیدی در بازار ایجاد کنند.

اخبار و شایعه‌های مرتبط با شرکت‌ها یا صنعت خاص نیز تأثیرگذار هستند؛ خبرهای مثبت یا منفی می‌توانند ارزش سهام را بالا یا پایین ببرند. سیاست‌های مالی و پولی دولت و بانک مرکزی، مانند تغییر در نرخ بهره یا مالیات‌ها، از دیگر عوامل مهمی هستند که در قیمت سهام اثر می‌گذارند. درنهایت، وضعیت صنعت، که یک شرکت در آن فعالیت می‌کند، نظیر: تغییرات تکنولوژیکی، رقابت و مقررات، نقش مهمی در تعیین قیمت سهام آن شرکت دارد.

یادگیری عمیق (DL)[1]، شاخه‌ای از یادگیری ماشین (ML)[2]، و هوش مصنوعی (AI)[3] است، که امروزه به‌عنوان هسته‌ی اصلی انقلاب صنعتی چهارم در نظر گرفته می‌شود. به‌دلیل قابلیت یادگیری از داده‌ها، فناوری DL، که از شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN)[4] نشأت گرفته است، به یک موضوع داغ در زمینه‌ی محاسبات و مدل‌سازی‌های ریاضی تبدیل شده و به‌طورگسترده در زمینه‌های مختلف کاربردی، مانند: مراقبت‌های بهداشتی، تشخیص بصری، تجزیه‌وتحلیل متن، امنیت سایبری، پیش‌بینی بازارهای مالی، ریسک اعتباری، و .... استفاده شده است.

روش کار مدل‌های اخیر، براساس مجموعه‌ای از الگوریتم‌هایی است که سعی می‌کنند درک بالایی از داده‌ها را با استفاده از یک نمودار عمیق با لایه‌های پردازشی متعدد، متشکل از تبدیل‌های خطی و غیرخطی متعدد مدل‌سازی کنند. فرآیند یادگیری ماشین با واردکردن داده‌های آموزشی به الگوریتم موردنظر آغاز می‌شود، تا مدل پیش‌بینی نهایی طراحی شود. سپس داده‌های ورودی جدید به الگوریتم یادگیری ماشینی وارد می‌شود و مقدار پیش‌بینی و نتایج با یکدیگر بررسی می‌شوند تا مشخص شود آیا مدل توسعه داده‌شده به درستی کار می‌کند یا خیر. اگر پیش‌بینی و نتایج مطابقت نداشته باشند، الگوریتم چند بار آموزش داده می‌شود تا زمانی که به نتیجه‌ی مطلوب برسد. این امر به الگوریتم یادگیری ماشینی امکان می‌دهد به‌طور مداوم یاد بگیرد و پاسخ بهینه را تولید کند و به‌تدریج دقت آن در طول زمان افزایش یابد.[۵]

همان‌طورکه گفته شد در سال‌های اخیر، روش‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌دلیل عملکرد بهترشان نسبت به مدل‌های اقتصادسنجی سنتی، به موضوع اصلی پژوهش‌های حوزه‌ی اخیر و ابزاری کمکی برای پیش‌بینی سری‌های زمانی مالی بدل شده‌اند. تجزیه‌وتحلیل سری‌های زمانی برای پیش‌بینی مقادیر آینده براساس مقادیر مشاهده‌شده‌ی پیشین، یکی از بهترین ابزارها برای تحلیل روند و پیش‌بینی آینده است. برای هر متغیری که در طول زمان تغییر می‌کند، می‌توان یک سری زمانی در نظر گرفت. سری زمانی، مجموعه‌ای از نقاط داده است که به ترتیب در یک دوره‌ی زمانی رخ می‌دهند. بنابراین، هر مدل پیش‌بینی مبتنی بر داده‌های سری زمانی، زمان را به‌عنوان یک متغیر مستقل خواهد داشت و خروجی هر مدل سری زمانی، مقدار یا طبقه‌بندی پیش‌بینی‌شده در یک زمان خاص خواهد بود. مهم‌ترین مثال سری‌های زمانی در دنیای سرمایه‌گذاری، سری زمانی قیمت اوراق بهادار است، که در یک دوره‌ی زمانی مشخص و در فواصل زمانی معین قیمت سهام ثبت و ردیابی می‌شود. روش‌های پیش‌بینی با استفاده از سری‌های زمانی هم در تحلیل بنیادی و هم در تحلیل تکنیکال استفاده می‌شوند؛ که در ادامه، به بررسی اجمالی تعدادی از پژوهش‌ها در زمینه‌ی مذکور پرداخته شده است:

آدیکاری و آگراوال[5] (۲۰۱۴)،[۶] مدلی را برای پیش‌بینی نرخ ارز و شاخص‌های قیمت سهام با ادغام یک مدل پیاده‌روی تصادفی و یک شبکه‌ی عصبی مصنوعی ایجاد کرده‌اند. نیو و وانگ[6] (۲۰۱۴)،[۷] نیز یک شبکه‌ی عصبی شعاعی پایه‌ی (RBF)[7] مؤثر در زمان داده‌ی تصادفی ایجاد و قیمت نفت خام و شاخص‌های قیمت سهام را پیش‌بینی کرده‌اند. داس[8] و همکاران (۲۰۱۶)،[۸] یک مدل ترکیبی جدید SVM-TLBO را برای پیش‌بینی قیمت بسته‌شدن روزانه‌ی شاخص آتی کالا COMDEX، که در چند بورس کالای هند معامله می‌شود، پیشنهاد کرده‌اند؛ که از یک ماشین بردار پشتیبانی (SVM) و یک بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری (TLBO) تشکیل و عملکرد بهتر آن تأیید شده است.

اگرچه شبکه‌های عصبی ذکرشده، عملکرد پیش‌بینی نسبتاً خوبی داشته‌اند، اما دقت آن‌ها در زمانی که سری‌های زمانی پویا و غیرخطی بوده‌اند، همچنان رضایت‌بخش نبوده است. با برقراری ارتباط بین واحدهای لایه‌ی پنهان، وابستگی داده‌ها در نقاط مختلف زمان را می‌توان با شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN)[9] توضیح داد. ساختار داده‌ی مرتبط قبل و بعد، RNN ها را به شکل ویژه‌ای برای پیش‌بینی داده‌های سری زمانی مناسب می‌کند،[۹] و ادبیات موضوع شاهد کاربرد گسترده‌ی آن‌ها در پیش‌بینی سری‌های زمانی مالی بوده است. با این حال، اطلاعات تاریخی نگهداری‌شده در یک RNN با افزایش بازه‌ی زمانی افزایش می‌یابد و منجر به ناپدیدشدن گرادیان یا افزایش ناگهانی گرادیان می‌شود و نتایج پیش‌بینی RNN را مخدوش می‌کند. با ظهور شبکه‌ی حافظه‌ی کوتاه‌مدت طولانی (LSTM)، ساختار "سلول حافظه" برای جایگزینی واحدهای لایه‌ی پنهان RNN معرفی شده است. هر سلول حافظه از یک مکانیزم "دروازه" ویژه تشکیل شده است، که باعث می شود LSTM اطلاعات تاریخی مهم را حفظ و موارد بی‌اهمیت را فیلتر کند. براساس برتری ویژه‌ی مکانیزم شبکه‌ی عصبی LSTM، از شبکه‌ی عصبی اخیر به‌طورگسترده در پیش‌بینی سری‌های زمانی و به ویژه برای پیش‌بینی سری زمانی قیمت سهام استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، دینگ و کین[10] (۲۰۲۰)،[۱۰] یک مدل شبکه‌ی عصبی عمیق بازگشتی مرتبط با چندین ورودی و خروجی مبتنی بر LSTM را

[1] Deep Learning
[2] Machine Learning
[3] Artificial intelligence
[4] artificial neural network
[5] Adhikari & Agrawal
[6] Niu & Wang
[7] Radial Basis Function
[8] Das
[9] Recurrent Neural Network
[10] Ding & Qin

برای پیش‌بینی قیمت‌های چندگانه، از جمله بالاترین و پایین‌ترین قیمت سهام در روز معاملاتی به‌طورهمزمان پیشنهاد کرده‌اند. در پژوهش لیو[11] (۲۰۱۹)،[۱۱] از الگوریتم LSTM برای پیش‌بینی نوسان‌های شاخص S&P ۵۰۰ و سهم اپل استفاده شده است. در مطالعه‌ی اخیر، از داده‌های تاریخی برای آموزش و اعتبارسنجی مدل استفاده شده است.

با توجه به کاستی‌های مدل‌های تکی به‌کاررفته در پیش‌بینی داده‌های پیچیده، مدل‌های ترکیبی که دو یا چند مدل مجزا را ادغام می‌کنند، برای حل مشکلاتی مانند دقت پایین مدل و پیش‌بینی‌های عقب‌افتاده پیشنهاد شده‌اند. به این ترتیب، روش‌های پیش‌پردازش مختلفی برای کاهش نویز یا بهینه‌سازی داده‌ها و فرآیند مدل معرفی و سپس داده‌های پردازش‌شده برای به‌دست‌آوردن نتیجه‌ی نهایی وارد مدل پیش‌بینی می‌شوند. در ادامه، به بررسی مهم‌ترین پژوهش‌ها با رویکرد ترکیبی و مشابه با مدل پیشنهادی پرداخته شده است.

زنگ[12] و همکاران (۲۰۲۲)،[۱۲]یک مدل ترکیبی AGA-LSTM جهت پیش‌بینی قیمت سهام ارائه کرده‌اند؛ که سهم اصلی آن بهینه‌سازی مدل LSTM با استفاده از الگوریتم ژنتیک تطبیقی (AGA) بوده است. مکانیزم بهینه‌سازی براساس رتبه‌بندی انفرادی با تنظیم خودکار ساختار شبکه‌ی مدل و ترکیبی از فراپارامترها، می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی تعداد دفعه‌های تکرار تنظیم هایپرپارامتر را کاهش دهد. طبق نتایج تحلیل انجام‌شده بر روی ۶ شاخص مختلف بازارهای سهام، مدل پیشنهادی در هر فرم عملکرد بهتری نسبت به LSTM و سایر مدل های یادگیری ماشین داشته است.

التوئیبی[13] (۲۰۲۱)،[۱۳] یک مدل جدید پیش‌بینی بازار سهام را معرفی کرده است، که شامل سه فاز اصلی بوده است: استخراج ویژگی، انتخاب ویژگی بهینه، و پیش‌بینی. در ابتدا، ویژگی‌های آماری، مانند: میانگین، انحراف معیار، واریانس، چولگی، و کشیدگی و مهم‌ترین اندیکاتورهای تکنیکال از داده‌های جمع آوری‌شده‌ی بازار سهام استخراج شده‌اند. برای به‌دست‌آوردن بهترین نتایج پیش‌بینی‌شده، انتخاب مرتبط‌ترین ویژگی‌ها توسط یک مدل ترکیبی جدید با نام (RDAWA) انتخاب شده است. در مرحله‌ی آخر پیش‌بینی، قیمت سهام با استفاده از ویژگی‌های انتخاب‌شده با یک مدل طبقه‌بندی‌کننده، شامل: ماشین بردار پشتیبان (SVM)، جنگل تصادفی ۱ (RF۱)، جنگل تصادفی۲ (RF۲)، و شبکه‌ی عصبی بهینه‌شده (NN) صورت گرفته است. برای پیش‌بینی دقیق‌تر، آموزش شبکه‌ی NN توسط RDAWA پیشنهادی از طریق تنظیم دقیق وزن بهینه انجام شده است. درنهایت، عملکرد کار پیشنهادی نسبت به سایر مدل‌های مرسوم با توجه به معیارهای خاص مقایسه شده است.

چونگ و شین[14] (۲۰۱۸)،[۱۴] یک مدل پیش‌بینی قیمت مبتنی بر مدل ترکیبی GA-LSTM پیشنهاد کرده‌اند؛ که در آن از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی پارامترهای الگوریتم LSTM استفاده شده است. به‌عبارت دیگر، الگوریتم ژنتیک به جستجوی مقدار بهینه یا نزدیک به بهینه برای اندازه‌ی پنجره‌ی زمانی و تعداد واحدهای LSTM در یک شبکه پرداخته است.

در پژوهش نیو[15] و همکاران (۲۰۲۰)،[۱۵] یک مدل ترکیبی VMD-LSTM جهت پیش‌بینی قیمت سهام ارائه شده است. مدل پیشنهادی براساس الگوریتم تجزیه‌ی VMD، که از طریق آن می‌توان سری پیچیده‌ی اصلی را به یک سری زیرمجموعه‌ی محدود تجزیه کرد، ارائه شده است. زیرمجموعه‌های تجزیه‌شده توسط الگوریتم VMD از طریق شبکه‌ی LSTM پیش‌بینی شده و نتیجه‌ی پیش‌بینی سری زمانی اصلی از تجمیع نتایج پیش‌بینی زیرمجموعه‌ها به‌دست آمده است. نتایج به‌دست‌آمده، برتری مدل پیشنهادی را نسبت به مدل پایه و مدل‌های مبتنی بر الگوریتم تجزیه‌ی حالت تجربی (EMD) نشان می‌دهند.

کیو[16] و همکاران (۲۰۲۰)،[۱۶] یک مدل پیش‌بینی جهت پیش‌بینی قیمت بازشدن سهام ارائه کرده‌اند؛ که در آن، ابتدا داده‌های سهام از طریق الگوریتم تبدیل موجک (WT) پردازش و سپس یک شبکه‌ی عصبی مبتنی بر توجه LSTM برای پیش‌بینی قیمت بازشدن سهام توسعه داده شده است.

خان و همکاران (۲۰۲۳)،[۱۷] یک روش ترکیبی جدید پیشنهاد کرده‌اند، که براساس نسخه‌ای بهبودیافته از روش تجزیه‌ی تجربی (EMD) و شبکه‌ی LSTMبوده است. در روش اخیر، ابتدا داده‌های نویزی سهام با استفاده از نسخه‌ی جدید EMD، که از روش درون‌یابی Akima به جای درون‌یابی مکعبی استفاده می‌کند، به چندین مؤلفه‌ی جدا به نام توابع مد ذاتی(IMF) تقسیم می‌شوند. سپس زیرمؤلفه‌های با همبستگی بالا برای ساخت مدل LSTMاستفاده می‌شوند. این مدل ترکیبی با مدل‌های دیگر مثل LSTM ساده، ماشین بردار پشتیبان(SVM ، جنگل تصادفی، و درخت تصمیم مقایسه شده و نتایج نشان داده است که مدل پیشنهادی ترکیبی-Akima-EMD LSTMنسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بهتری داشته و به عنوان یک مدل مؤثر برای پیش‌بینی داده‌های مالی پیچیده و غیرخطی توصیه شده است.

چن و همکاران (۲۰۲۴)،[۱۸] یک رویکرد انتخاب ویژگی بر پایه‌ی الگوریتم LASSOبا شبکه‌ی LSTM آبشاری (Ca-LSTM) ترکیب‌شده پیشنهاد کرده‌اند. ایده‌ی مدل اخیر براساس بازسازی ویژگی‌های داده و تقویت تأثیر ویژگی‌های منفرد از طریق آبشاری‌سازی بوده است. از طریق مقایسه‌ی جامع نتایج به‌دست‌آمده با مدل‌های رایج دیگر مانند: LSTM، XGboost، SVR، و VMD-LSTM در چهار مجموعه‌ی داده با ویژگی‌های مختلف، برتری مدل پیشنهادی اثبات شده است. همچنین عنوان شده است که هر چه دوره‌ی زمانی داده‌های استفاده‌شده برای پیش‌بینی کوتاه‌تر و نوسان‌های سهام کمتر باشد، مدل عملکرد بهتری دارد. همچنین، زمانی که شبکه‌ی LSTM آبشاری در مؤلفه‌هایی که توسط شبکه‌ی VMD تولید شده‌اند، استفاده می‌شود، عملکرد بهتری نسبت به روش‌های مرجع دارد.

گولمز[17] (۲۰۲۳)،[۱۹] یک شبکه‌ی LSTM جدید را که توسط الگوریتم بهینه‌سازی خرگوش مصنوعی (ARO) بهینه شده بود، پیشنهاد کرده است. در مدل اخیر با نام LSTM-ARO، از داده‌های قیمت سهام شاخص DJIA برای پیش‌بینی استفاده و در آن، داده‌ها به فرم جدیدی تبدیل شده‌اند، که از ۲۰ روز گذشته برای پیش‌بینی قیمت روز بعد استفاده می‌کنند. در مدل مذکور، یک شبکه‌ی LSTM جدید با پارامترهای مختلف که به متغیرهای الگوریتم AROمتصل شده‌اند، ایجاد شده است. تغییر متغیرها باعث تغییر در معماری LSTMشده و الگوریتم ARO بهترین معماری را برای دستیابی به نتایج

[11] Liu
[12] Zeng
[13] Alotaibi
[14] Chung & Shin
[15] Niu
[16] Qiu
[17] Gülmez

بهینه پیدا کرده است. برای ارزیابی کیفیت مدل پیشنهادی، مدل اخیر با شبکه‌های LSTM1D، LSTM2D، LSTM3D، ANN، و-LSTM GAمقایسه شده و نتایج نشان داده‌اند که مدل LSTM-ARO، بهترین عملکرد را در میان آن‌ها داشته و پیش‌بینی‌های بسیار دقیقی ارائه داده است.

نصیری و عبادزاده (۲۰۲۳)،[۲۰] دو روش جدید برای پیش‌بینی چندمرحله‌ای قیمت سهام براساس دو روش مختلف تجزیه، یعنی تبدیل خطی کسینوسی گسسته (DCT) و تبدیل غیرخطی تجزیه‌ی حالت‌های متغیر (VMD) ارائه کرده‌اند. روش DCT-MFRFNN براساس DCT و شبکه‌ی عصبی فازی بازگشتی چندمنظوره (MFRFNN) طراحی و از DCT برای کاهش نوسان‌های سری‌های زمانی و ساده‌سازی ساختار آن و از MFRFNN برای پیش‌بینی قیمت سهام استفاده شده است. روش VMD-MFRFNN، که مبتنی بر VMD و MFRFNN است، مزایای هر دو را با هم ترکیب می‌کند. VMD-MFRFNNاز دو مرحله تشکیل شده است: در مرحله‌ی تجزیه، سیگنال ورودی به چند تابع حالت ذاتی (IMF) توسط VMD تجزیه می‌شود. در مرحله‌ی پیش‌بینی، هر IMF به یک MFRFNN جداگانه داده می‌شود و سیگنال‌های پیش‌بینی‌شده برای بازسازی خروجی نهایی جمع می‌شوند.

نتایج تجربی نشان داده است که VMD-MFRFNN عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌های پیشرفته داشته و همچنین، DCT-MFRFNN در تمامی آزمایش‌ها عملکرد بهتری نسبت به MFRFNN و DCT-LSTM داشته است، که تأثیر مثبت DCT در عملکرد MFRFNN را نشان می‌دهد.

با بررسی پژوهش های انجام‌شده مشاهده می‌شود که در مطالعات خارجی و داخلی با گذر زمان، روش‌های یادگیری عمیق جایگزین روش‌های سنتی یادگیری ماشین در مدل‌های پیشنهادی شده‌اند. همان‌طور که پیشتر گفته شده است، مطالعات بررسی‌شده در پژوهش حاضر در دو دسته‌ی کلی مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر رویکرد تجزیه و همچنین مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر رویکرد انتخاب ویژگی قرار می‌گیرند. در مدل‌های مبتنی بر رویکرد تجزیه، از یک الگوریتم تجزیه در ترکیب با مدل پیش‌بینی اصلی استفاده شده است. پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه به مرور زمان و با ظهور الگوریتم‌های تجزیه‌ی جدید به روز شده و نتایج مدل‌های اخیر نیز بهبود یافته‌اند. به‌طورکلی بیشتر پژوهش‌های این حوزه از الگوریتم‌های مشهور EMD و WT در مدل‌های خود استفاده کرده‌اند؛ در حالی که در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های تجزیه‌ی جدیدتری مانند EEMD، CEEMD، و VMD معرفی و کمتر در مدل‌های پیش‌بینی استفاده شده‌اند. بنابراین، یکی از اهداف پژوهش حاضر، مقایسه‌ی عملکردی الگوریتم‌های تجزیه‌ی جدید با الگوریتم‌های تجزیه‌ی EMD و WT است. اما با بررسی پیشینه‌ی پژوهش‌های دسته‌ی دوم، یعنی پژوهش‌های مرتبط یا رویکرد انتخاب ویژگی، که از ترکیب یک الگوریتم فراابتکاری در ترکیب با یک مدل پیش‌بینی توسعه می‌یابند، می‌توان گفت که پژوهش‌های مذکور نسبت به حوزه‌ی مبتنی بر تجزیه‌ی سری زمانی جدیدتر است. به‌طوری که با مرور ادبیات می‌توان دریافت که از الگوریتم های فراابتکاری پیشتر و اکثراً در بهینه‌سازی هایپرپارامترهای مدل استفاده شده است. همچنین، از الگوریتم‌های مذکور جهت انتخاب ویژگی در پژوهش‌های جدیدتر معرفی و استفاده شده است. بررسی پژوهش‌های دو حوزه‌ی اخیر نشان می‌دهد که در آن‌ها جهت بررسی کارآیی مدل‌ها، نتایج پیش‌بینی با نتایج مدل‌های معیار و مدل‌های متشکل از سایر الگوریتم‌های مشابه مقایسه شده‌اند. به‌طور مثال، مدل‌های مبتنی بر تجزیه با مدل‌های تجزیه‌ی دیگر مقایسه شده است؛ در واقع، عملکرد الگوریتم‌های تجزیه‌ی متفاوت بررسی و مقایسه شده‌اند و یا در مدل‌های مبتنی بر انتخاب ویژگی، عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری متفاوت در انتخاب ویژگی مقایسه شده‌اند. اما هدف اصلی پژوهش حاضر، مقایسه‌ی کلی‌تر پژوهش‌های ذکرشده و در واقع، مقایسه‌ی دو رویکرد متفاوت در پیش‌بینی قیمت بوده است، که پیشتر در هیچ پژوهشی انجام نشده است و می‌تواند فارغ از الگوریتم‌های مختلف تجزیه و یا انتخاب ویژگی، رویکرد برتر در پیش‌بینی قیمت سهام را معرفی کند.

۳. روش‌شناسی پژوهش

در ادامه، رویکردهای الگوریتم ژنتیک و شبکه‌ی LSTM و معیارهای خطا، معرفی و چارچوب اصلی مدل ترکیبی پیشنهادی ارائه شده است. سپس در بخش بعد، نتایج پیش‌بینی تجربی قیمت سهام، که با استفاده از مدل پیشنهادی به‌دست آمده است، ارائه و با نتایج مدل پایه مقایسه شده است.

۱.۳. شبکه‌ی عصبی کوتاه‌مدت طولانی (LSTM)

مدت کوتاهی پس از آموزش اولین شبکه‌های عصبی بازگشتی با استفاده از الگوریتم پس‌انتشار، مشکلات یادگیری وابستگی‌های بلندمدت به‌دلیل ناچیزشدن و یا رشد انفجاری گرادیان توجه شده است. یکی از اولین و موفق‌ترین روش‌ها برای حل مشکل گرادیان‌های ناپدیدشونده در قالب مدل حافظه‌ی کوتاه‌مدت طولانی (LSTM) توسط هوکرایتر و اشمید هابر[۱۸] (۱۹۹۷) ارائه شده است. LSTM ها بسیار شبیه به شبکه‌های عصبی بازگشتی استاندارد هستند؛ اما در مدل اخیر، هر گره‌ی معمولی بازگشتی با یک سلول حافظه جایگزین می‌شود و هر سلول حافظه، حاوی یک حالت داخلی است.[۲۱]

همان‌طور که اشاره شد، در شبکه‌های LSTM یک سلول حالت وجود دارد، که وظیفه‌ی آن حفظ و انتقال اطلاعات مهمی است که باید در حافظه‌ی شبکه باقی بمانند و در گذر از هر مرحله ممکن است تغییر کنند و اطلاعاتی به آن‌ها اضافه یا از آن‌ها کاسته شود؛ که این عمل توسط عملگرهای ضرب و جمع انجام می‌شود و در نتیجه‌ی آن، خطای محاسباتی مدل در عمق بسیار زیاد شبکه نیز منتشر می‌شود و مشکل کاهش شدید گرادیان در مدل مذکور اتفاق نمی‌افتد.[۲۲]

اما تفاوت اصلی بین شبکه‌های LSTM و RNN این است که در شبکه‌های LSTM، گیت‌هایی، شامل: فراموشی، ورودی، و خروجی وجود دارد. گیت‌ها همچون دروازه‌هایی هستند که اجازه‌ی عبور اطلاعات را در اختیار دارند و با توابعی همچون سیگموید و عملیات ریاضی مختلف ساخته می‌شوند. تابع سیگموید بر روی ترکیب خروجی لایه‌ی مخفی قبل و ورودی مرحله‌ی جدید اعمال می‌شود و درنهایت، مقداری بین ۰ و ۱ را بر می‌گرداند، که میزان حفظ یا حذف اطلاعات را تعیین می‌کند (رابطه‌ی ۱):

$$f_t = \sigma(W_f * [h_{t-1}, x_t] + b_f) \qquad (۱)$$

در گام بعدی، علاوه‌بر اعمال تابع سیگموید ،تابع tanh هم بر ترکیبی از خروجی لایه‌ی پنهان مرحله‌ی قبل و ورودی مرحله‌ی کنونی اعمال می‌شود تا دانش و اطلاعات جدیدی را بسازد؛ اما این نکته که چند درصد از اطلاعات مذکور برای مرحله‌ی بعد لازم است حفظ شود، توسط تایع سیگموید تعیین

[18] Hochreiter & Schmidhuber

می‌شود و سپس آن‌ها به سلول حالت اضافه می‌شوند. روابط ۲ و ۳، نشان‌دهنده‌ی فرآیند مذکور هستند:

$$i_t = \sigma(w_i * [h_{t-1}.x_t] + b_i) \quad (۲)$$

$$\dot{C}_t = \tanh(W_{\dot{c}} * [h_{t-1}.x_t] + b_{\dot{c}}) \quad (۳)$$

سلول حالت طبق رابطه‌ی ۴ به روزرسانی می‌شود:

$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \dot{C}_t \quad (۴)$$

در مرحله‌ی آخر، برای تولید خروجی، یک تابع tanh بر روی اطلاعات سلول وضعیت اعمال شده است، تا مقادیر بین ۰ تا ۱ ایجاد شود؛ چرا که جمع‌کردن اطلاعات در هر مرحله ممکن است بازه‌ی مقادیر سلول را تغییر دهد. همچنین یک تابع سیگموید بر روی ترکیبی از خروجی لایه‌ی پنهان قبلی و ورودی این مرحله اعمال شود و درنهایت، خروجی سیگموید در خروجی tanh ضرب می‌شود و نتیجه‌ی نهایی مطابق روابط ۵ و ۶ به‌دست خواهد آمد:

$$o_t = \sigma(W_a * [h_{t-1}.x_t] + b_o) \quad (۵)$$

$$h_t = o_t * \tanh(C_t) \quad (۶)$$

۲.۳. الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک (GA)، در واقع از نظریه‌ی تکامل داروین الهام گرفته شده است و کاربردهای بسیار زیادی در یافتن جواب مسائلی از قبیل: بهینه‌سازی، مکان‌یابی، و ... دارد. یکی از نقاط قوت الگوریتم GA، سرعت بالای آن در حرکت به سمت جواب مسئله است، که باعث می‌شود در مسائلی که فضای جواب بسیار وسیعی دارند و بررسی تمام جواب‌ها عملاً غیرممکن است، بسیار استفاده شود. از دیگر ویژگی‌های مثبت الگوریتم GA می‌توان به جستجوی هم‌زمان در چند جهت و همچنین عدم نیاز به ویژگی‌های تحدب و پیوستگی تابع هدف مسئله اشاره کرد.

شیوه‌ی کار الگوریتم GA به بیان ساده به این صورت است که الگوریتم با مجموعه‌ای از نقاط نامزد کار خود را آغاز می‌کند و با استفاده از عملگرهای ژنتیکی در جهت یافتن پاسخ بهتر پیش می‌رود.

هر کروموزوم در الگوریتم، یک نقطه در فضای جستجوی جواب یا به‌عبارت دیگر، یک راه حل مسئله را نشان می‌دهد.کروموزوم‌ها از مجموعه‌ای از ژن‌ها تشکیل می‌شوند و مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها، که با کدهای باینری نمایش داده می‌شوند، یک جمعیت را تشکیل می‌دهند. شیوه‌ی کار الگوریتم ژنتیکی معمولاً به این صورت است که با تولید جمعیتی از کروموزوم‌ها آغاز می‌شود. در گام بعد، کروموزوم‌های ساخته‌شده بررسی و ارزیابی می‌شوند و کروموزوم‌هایی که با توجه به تابع هدف مسئله، پاسخ بهینه‌تری تولید می‌کنند، شانس بیشتری برای تولید مثل پیدا می‌کنند.[۲۳]

الگوریتم ژنتیک تا جایی ادامه می‌یابد که جمعیت همگرا شده باشد؛ به این معنی که الگوریتم فرزندانی که تفاوت قابل‌توجهی با نسل قبلی داشته باشند، تولید نکند. در این مرحله عنوان می‌شود که الگوریتم مجموعه‌ای از پاسخ‌ها را برای مسئله ارائه کرده است.

۳.۳.روش تجزیه‌ی حالت متغیر

روش تجزیه‌ی حالت متغیر (VMD)، یکی از جدیدترین روش‌های تجزیه‌ی سیگنال و مشابه روش تجزیه‌ی حالت تجربی (EMD) است، که برای اولین بار توسط دراگومیرتسکی و زوسو[19] (۲۰۱۳) ارائه شده است.[۲۴] روش VMD، در واقع یک سیگنال نامانا را به توابع حالت ذاتی چندگانه تجزیه می‌کند. بنابراین، روش VMD برای پرداختن به داده‌های پیچیده‌ای، مانند سری‌های زمانی مالی مناسب‌تر بوده و به‌طورگسترده‌ای برای پیاده‌سازی تجزیه‌ی سیگنال‌های چندبسامدی به‌صورت تطبیقی استفاده شده است، که در آن باند بسامد را می‌توان به‌طورهمزمان تخمین زد، تا به‌طورمؤثر خطاها را بین باندهای بسامدی مختلف متعادل سازد. روش VMD با الهام از روش EMD فرض می‌کند که سیگنال اصلی f از تعدادی توابع حالت ذاتی (IMF)، که در رابطه‌ی ۷ با u_k نشان داده شده است، تشکیل شده است:

$$f(t) = \sum_k u_k(t) \sum_k A_k(t) \cos[\varnothing_k(t)] \quad (۷)$$

که در آن، A_k دامنه‌ی آنی u_k و $\varnothing_k(t)$ فاز آنی u_k هستند و بسامد مرکزی هر IMF نیز با بسامد لحظه‌ای آن طبق رابطه‌ی ۲ در نظر گرفته می‌شود.

با شروع یک مسئله‌ی حذف نویز رایج، سیگنال مشاهده‌شده‌ی f به‌صورت رابطه‌ی ۸ فرموله می‌شود، که در آن f ، سیگنال اصلی و η یک افزونه‌ی نوفه‌ی سفید است:

$$f_0 = f + \eta \quad (۸)$$

برای بازیابی سیگنال اصلی f از تنظیم Tikhonov برای کمینه‌سازی f مطابق رابطه‌ی ۹ استفاده می‌شود:

$$\min_f \left\| f - f_0 \right\|_2^2 + \alpha \left\| \partial_t f \right\|_2^2 \quad (۹)$$

سپس معادلات اویلر- لاگرانژ به‌راحتی در حوزه‌ی بسامد به‌دست می‌آیند و مطابق رابطه‌ی ۱۰ حل می‌شوند:

$$\hat{f}(\omega) = \frac{\hat{f}_0}{1 + \alpha\omega^2} \quad (۱۰)$$

که در آن، $\hat{f}(\omega)$ تبدیل فوریه‌ی f و α نشان‌دهنده‌ی واریانس نوفه‌ی سفید هستند. برای ارزیابی پهنای باند یک حالت، مسئله‌ی تغییرات محدود به‌صورت رابطه‌ی ۱۱ فرموله می‌شود؛ که در آن، $\{u_k\} = \{u_1, ..., u_k\}$ مجموعه‌ی IMF ها، $\{\omega_k\} = \{\omega_1, ..., \omega_k\}$ مجموعه‌ی بسامدهای مرکزی، و عبارت $(\sigma(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t)$ نشانگر تبدیل هیلبرت u_k هستند.

$$\text{s.t.} \sum_k u_k = f \quad (۱۱)$$

$$\min_{\{u_k\},\{\omega_k\}} \{ \sum_k \left\| \partial_t [(\sigma(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t)] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \}$$

برای کمینه‌سازی معادله‌ی مذکور، از تابع لاگرانژ تقویت‌شده با معرفی یک جمله‌ی جریمه‌ی درجه‌ی دوم و ضریب لاگرانژی λ مطابق رابطه‌ی ۱۲ استفاده می‌شود:

$$L(\{u_k\},\{\omega_k\},\lambda) := \alpha \sum_k \left\| \partial_t [(\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t)] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t). f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle \quad (۱۲)$$

[19] Dragomiretskiy

نتیجه‌ی نهایی با به روزرسانی بسامد مرکزی و پهنای باند هر IMF در یک دنباله‌ی بهینه‌سازی به نام ADMM به‌دست می‌آید. روش به روزرسانی بسامد را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی ۱۳ بیان کرد:

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega)=\frac{\hat{f}(\omega)-\sum_{i\neq k}\hat{u}_i(\omega)+\hat{\lambda}(\omega)/2}{1+2\alpha(\omega-\omega_k)^2} \qquad (۱۳)$$

که در آن، $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$، $\hat{f}(\omega)$، و $\hat{\lambda}(\omega)$ عبارت‌اند از تبدیل‌های فوریه‌ی عبارت‌های u_k^{n+1} ، $f(t)$، و $\lambda(\omega)$. معادله‌ی اخیر را می‌توان به‌عنوان یک فیلتر وینر شناسایی کرد، که در آن $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$ خروجی فیلتر $\hat{f}(\omega)-\sum_{i\neq k}\hat{u}_i(\omega)+\hat{\lambda}(\omega)/۲$ با سیگنال قبل از $۱+۲\alpha(\omega-\omega_k)^۲$ است. در روش‌های تکراری، بسامد مرکزی هر u_k با روش گرانش طیف توان مجدداً تخمین زده می‌شود. معادله‌های به روزشده‌ی ω_k^{n+1} مطابق رابطه‌ی ۱۴ به‌دست می‌آیند:

$$\omega_k^{n+1}=\frac{\int_0^\infty \omega\left|\hat{u}_k(\omega)\right|^2 d\omega}{\int_0^\infty \left|\hat{u}_k(\omega)\right|^2 d\omega} \qquad (۱۴)$$

فرآیند VMD زمانی متوقف می‌شود که خطای نسبی e کمتر از حد همگرایی ε باشد (مطابق رابطه‌ی ۱۵):

$$e=\frac{\infty\sum_k\left\|\hat{u}_k^{n+1}-\hat{u}_k^{n}\right\|_2^2}{\left\|\hat{u}_k^{n}\right\|_2^2}<\varepsilon \qquad (۱۵)$$

۳.۳. تشریح مدل‌های پیشنهادی

در پژوهش حاضر، یک مدل پیش‌بینی قیمت سهام دو مرحله‌ای با ترکیب شبکه‌ی عصبی حافظه‌ی کوتاه‌مدت طولانی و الگوریتم ژنتیک و با رویکرد انتخاب ویژگی پیشنهاد می‌شود، که در ادامه به شرح مراحل مدل مذکور پرداخته شده است:

– **مرحله‌ی اول:** در ابتدا، با استفاده از الگوریتم ژنتیک به انتخاب ویژگی‌های با اهمیت پرداخته شده است. جهت دسترسی به مهم‌ترین ویژگی‌ها برای پیش‌بینی هر سهم، این گام‌ها به ترتیب انجام می‌شود:

– **گام اول:** مقداردهی اولیه‌ی تصادفی جمعیت. جمعیت الگوریتم ژنتیک با pop مطابق رابطه‌ی ۱۶ بیان می‌شود:

$$pop=\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mk} \end{pmatrix} \qquad (۱۶)$$

که در آن، هر ردیف یک کروموزوم (یا مجموعه‌ی ویژگی) را نشان می‌دهد. طول کروموزوم (k)، تعداد کل ویژگی‌ها را نشان می‌دهد، که در پژوهش حاضر مساوی ۲۵ در نظر گرفته شده است. مقدار m ، اندازه‌ی جمعیت را نشان می‌دهد، که در پژوهش حاضر مساوی ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. همچنین a_{ij} ها یکی از دو مقدار ۰ و ۱ را نشان می‌دهند، که مقدار ۱ نشانگر انتخاب و مقدار ۰ نشانگر عدم انتخاب هر ویژگی است.

– **گام دوم:** از روش رولت برای عملیات انتخاب استفاده می‌شود و تناسب هر کروموزوم در جمعیت محاسبه می‌شود. احتمال انتخاب هر فرد به نسبت تناسب کروموزوم‌هاست و مجموع احتمال انتخاب کروموزوم ۱ است. در طول الگوریتم، جمعیت یک بار در هر دور با توجه به احتمال به روزرسانی می‌شود.

– **گام سوم:** برای انجام عملیات متقاطع از روش تقاطع چندنقطه‌ای[20] استفاده می‌شود و کروموزوم‌ها بین دو فرد با احتمال متقاطع ۰/۸رد و بدل خواهند شد. در فرآیند الگوریتم، یک عملیات متقاطع بر روی هر کروموزوم در هر چرخه انجام می‌شود و روش تولید یک احتمال تصادفی است، که اگر مقدار آن کمتر از احتمال متقاطع باشد، تعویض انجام می‌شود و در غیر این‌صورت، تعویضی صورت نمی‌گیرد.

– **گام چهارم:** این الگوریتم از روش جهش بیت پایه [21] برای انجام عملیات جهش استفاده شده است. در فردهای معاصر، با احتمال کمی‌یک ژن تغییر می‌کند. احتمال تغییر برابر با ۰/۰۲ تنظیم شده است. الگوریتم در هر دور یک احتمال تصادفی تولید می‌کند. اگر احتمال تصادفی کمتر از احتمال تلاقی باشد، جهش انجام می‌شود؛ در غیر این‌صورت، جهش صورت نمی‌گیرد.

در مرحله‌های ۲ تا ۴، الگوریتم ۱۰۰ بار تکرار می‌شود و در پایان الگوریتم، جمعیت بهینه‌ی نزدیک به راه‌حل بهینه تولید می‌شود. پارامترهای الگوریتم ژنتیک در مدل پیشنهادی در جدول ۱ ارائه شده است:

– **مرحله‌ی دوم**

ویژگی‌های انتخاب‌شده توسط الگوریتم ژنتیک در مرحله‌ی قبل به‌عنوان ویژگی‌های ورودی مدل LSTM در نظر گرفته می‌شوند و پیش‌بینی قیمت بسته‌شدن سهم در روز آتی با استفاده از ویژگی‌های ورودی مذکور انجام می‌شود. مقادیر هایپرپارامترهای شبکه‌ی LSTM در مدل پیشنهادی، در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک.

Item	Parameter	Value
1	Chromosome Size	25
2	Population Size	100
3	Crossover Rate	0.8
4	Mutation Rate	0.02
5	Number of Generations	100
6	Fitness Function	MSE

جدول ۲. مقادیر پارامترهای شبکه‌ی عصبی LSTM.

Item	Parameter	Value
1	Model Step	4
2	Number of Hidden Layer Neurons	300
3	Dropout Rate	0.2
4	Activation Function	Relu
5	Optimizer Function	Adam
6	Batch Size	256
7	Number of Epochs	100

[20] Multi point Crossover
[21] Bit Flip Mutation

- مرحله‌ی سوم

برای ارزیابی کیفیت پیش‌بینی یک مدل توسعه‌یافته معمولاً چند معیار عملکرد استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر، از معیارهای میانگین خطای مطلق (MAE)، ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE)، و ضریب تعیین (R^2) برای ارزیابی دقت پیش‌بینی استفاده می‌شود. معیارهای گفته‌شده به ترتیب به‌صورت روابط ۱۷ و ۱۸ محاسبه می‌شوند:

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^{n} |y_t - \hat{y}_t|}{n} \quad (۱۷)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n} (y_t - \hat{y}_t)^2}{n}} \quad (۱۸)$$

که در آن‌ها، y_t نشانگر مقدار واقعی، $\hat{y}_t$ نشان‌دهنده‌ی مقدار پیش‌بینی‌شده‌ی مدل و n برابر با تعداد نمونه است. به‌طورکلی، هر چه مقادیر MAE، و MSE کوچک‌تر باشند، فاصله‌ی بین مقدار پیش‌بینی‌شده و مقدار واقعی کمتر خواهد بود و به‌عبارت دیگر، دقت پیش‌بینی مدل بالاتر است.

۴.۳. ویژگی‌های استفاده‌شده در مدل پیشنهادی

در مدل پیشنهادی برای ۵ سهم موردنظر، مقادیر ۲۵ ویژگی که شامل اطلاعات قیمتی و تعدادی از مهم‌ترین اندیکاتورهای تحلیل تکنیکال است، محاسبه شده است. همچنین برای انتخاب مهم‌ترین ویژگی‌ها در پیش‌بینی، قیمت هر سهم به‌عنوان ورودی به الگوریتم ژنتیک وارد شده و از فهرست ویژگی‌های منتخب الگوریتم ژنتیک در مرحله‌ی دوم برای پیش‌بینی قیمت سهام استفاده شده است. در ادامه و در جدول ۳، فهرست ۲۵ ویژگی مذکور ارائه شده است.

جدول ۳. ویژگی‌های استفاده‌شده در مدل GA-LSTM.

Item	parameter	value
1	High	Highest price of the stock during the trading day
2	Low	Lowest price of the stock during the trading day
3	Open	Opening price of the stock on the trading day
4	TP	Typical price of the stock
5	Adj Close	Adjusted closing price of the stock on the trading day
6	Volume	Trading volume of the stock on the trading day
7	SMA(5)	5-day Simple Moving Average
8	SMA(20)	20-day Simple Moving Average
9	SMA(50)	50-day Simple Moving Average
10	EMA(10)	10-day Exponential Moving Average
11	EMA(20)	20-day Exponential Moving Average
12	EMA(100)	100-day Exponential Moving Average
13	MACD	MACD line (Moving Average Convergence Divergence)
14	Signal_line	Signal line of the MACD indicator
15	ATR	ATR (Average True Range) indicator
16	ROC	ROC (Rate of Change) indicator
17	RSI	RSI (Relative Strength Index) indicator
18	SO%K	Stochastic Oscillator %K indicator
19	William%R	Williams %R indicator
20	Lower_Band	Lower band of the Bollinger Bands indicator
21	Upper_Band	Upper band of the Bollinger Bands indicator
22	SD20	20-day Standard Deviation of price
23	MOM	Momentum indicator
24	SnP_Close	Closing value of the S&P 500 index on the trading day
25	DJIA_Close	Closing value of the Dow Jones Industrial Average (DJIA) index on the trading day

با توجه به عملکرد خوب الگوریتم تجزیه‌ی VMD و شبکه‌ی عصبی LSTM، در پژوهش حاضر، مدل ترکیبی نوآورانه‌ی دوم با عنوان VMD-LSTM توسعه داده شده است؛ که در ادامه، به شرح مراحل مدل مذکور پرداخته شده است:

مرحله‌ی ۱: روش VMD برای تجزیه‌ی سری زمانی اصلی قیمت سهام به K زیرمجموعه‌ی مستقل متقابل استفاده می‌شود؛ که با $IMF_1, IMF_2, ..., IMF_k$ نشان داده می‌شوند، که نشانگر نوسان‌های جزئی مختلف قیمت از بسامد بالا تا بسامد پایین است، یعنی سری زمانی قیمت بر حسب IMF ها به صورت رابطه‌ی ۱۹ بازسازی می‌شود:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{k} IMF_k(t) \qquad (۱۹)$$

جهت کاهش تأثیر نوسان‌ها و تسهیل بهینه‌سازی فرآیند حل، هر IMF به‌دست‌آمده از الگوریتم VMD در محدوده‌ی [۰، ۱] نرمالایز می‌شود. سپس هر سری IMF نرمالایزشده به‌عنوان ویژگی جدید ورودی مدل LSTM در نظر گرفته می‌شود.

مرحله‌ی ۲: هر جزء IMF به‌دست‌آمده توسط VMD به مجموعه‌ی داده‌های آموزشی و آزمایشی با یک نسبت ثابت تقسیم می‌شود و مجموعه‌های ورودی و خروجی براساس اندازه‌ی گام تقسیم می‌شوند. شبکه‌ی LSTM برای آموزش و ساخت مدل پیش‌بینی براساس مجموعه‌ی داده آموزشی استفاده می‌شود، که در آن پارامترهایی از جمله: نرخ یادگیری، اندازه‌ی دسته، تعداد تکرارها، و تعداد لایه‌های پنهان وجود دارد، که برای اطمینان از دقت پیش‌بینی مدل حیاتی هستند و باید از قبل تنظیم شوند. فهرست پارامترهای مذکور و مقادیر آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. اندازه‌ی گام در هر دو مدل با استفاده از نتایج آزمایش‌های تکراری با گام‌های متنوع به‌دست آمده و روی مقدار ۴ تنظیم شده است؛ به این معنا که هم در مجموعه‌ی آموزشی و هم در مجموعه‌ی آزمون، مقدار پیش‌بینی را می‌توان براساس ورودی نقاط داده‌ی چهار مرتبه‌ی قبل به‌دست آورد.

مرحله‌ی ۳: نتیجه‌ی پیش‌بینی نهایی سری زمانی قیمت سهام اصلی با تجمیع خروجی‌های پیش‌بینی‌شده‌ی جداگانه‌ی هر IMF به‌دست می‌آید. در میان ، زیرمجموعه‌ها، IMF های با بسامد پایین معمولاً از مقادیر بزرگی تشکیل شده‌اند که نشانگر روند اصلی سری زمانی هستند. از منظر سطح دقت پیش‌بینی، خطاهای پیش‌بینی IMF های با بسامد پایین، نسبت به خطای پیش‌بینی IMF های با بسامد بالا، تأثیر مهم‌تری در نتیجه‌ی پیش‌بینی نهایی خواهد داشت.

جدول ۴. تنظیم‌های شبکه‌ی عصبی LSTM.

Item	parameter	Value
1	Model Step	4
2	Number of Network Layers	3
3	Number of Hidden Layer Neurons	300
4	Dropout Rate	0.2
5	Activation Function	Relu
6	Optimizer Function	Adam
7	Batch Size	512
8	Number of Epochs	80

مرحله‌ی ۴: در مرحله‌ی آخر، عملکرد این مدل نیز با معیارهای میانگین خطای مطلق (MAE)، ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE)، و ضریب تعیین (R^2) ارزیابی می‌شود.

۴. یافته‌های پژوهش

همان‌طور که پیشتر گفته شد، در پژوهش حاضر از داده‌های قیمتی بازه‌های روزانه، ۵ سهم بزرگ بازار بورس نیویورک، شامل: گلدمن ساکس(GS)، یونایتد هلث (UNH)، جی پی مورگان (JPM)، آی بی ام (IBM)، و جانسون اند جانسون (JNJ) استفاده شده است. بازه‌ی تاریخی بررسی‌شده‌ی هر سهم از تاریخ ۲۰۰۱/۰۱/۰۱ تا ۲۰۲۰/۰۱/۰۱ و به استثناء روزهای تعطیل بوده است. از ۸۰٪ داده‌های ابتدایی نمونه به عنوان داده‌ی آموزشی و از ۲۰٪ باقیمانده به‌عنوان داده‌ی آزمایشی استفاده شده است.

در جدول ۵، ویژگی‌های منتخب هر سهم و در جدول ۶، نتایج مدل GA-LSTM که با استفاده از رویکرد انتخاب ویژگی و با ۲۵ ویژگی ذکرشده، توسعه داده شده است؛ با نتایج مدل پیشنهادی دوم یعنی مدل VMD-LSTM، که با استفاده از تجزیه‌ی سری زمانی ویژگی قیمت بسته‌شدن سهام توسعه داده‌شده مقایسه شده است. علاوه‌بر این، نتایج دو مدل پیشنهادی، با نتایج سایر مدل‌های معیار نیز مقایسه شده است (جدول ۷).

مطابق جدول ۶، علی‌رغم عملکرد مناسب و خطای کم هر دو مدل پیشنهادی، مدل GA-LSTM که مبتنی بر انتخاب ویژگی توسعه داده شده است، در ۴ سهم از ۵ سهم بررسی‌شده، با توجه به تمام معیارهای خطای گزارش‌شده، نتایج دقیق‌تری ارائه کرده و مدل VMD-LSTM نیز در پیش‌بینی قیمت سهم جانسون اند جانسون (JNJ) نسبت به مدل دیگر عملکرد بهتری داشته است.

همچنین نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که مدل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک نسبت به دو مدل EMD-LSTM و WT- LSTM نیز عملکرد بهتری داشته و توانایی پیش‌بینی را در مقایسه با مدل منفرد بسیار افزایش داده است. از نتایج می‌توان استنباط کرد که رویکرد انتخاب ویژگی می‌تواند علاوه‌بر کاهش عملیات مدل با استفاده از ویژگی‌های کمتر، دقت مدل را نیز به شکل چشمگیری افزایش دهد. به‌عنوان مثال، در شکل ۱، نمودار سمت چپ نتیجه‌ی پیش‌بینی مدل GA-LSTM و نمودار سمت راست نتیجه‌ی مدل VMD-LSTM در پیش‌بینی قیمت سهم یونایتد هلث مشاهده می‌شود.

در ادامه، به‌منظور بررسی معناداری تفاوت نتایج دو مدل پیشنهادی، از معیار MAE در آزمون دیبولد- ماریانو[22] استفاده شده است. آزمون اخیر نشان می‌دهد که قدرت پیش‌بینی یکسان تحت فرضیه‌ی (۱ ، ۰) DM~N است. بنابراین، فرضیه‌ی قدرت پیش‌بینی یکسان در سطح ۹۵٪، زمانی که |DM| > ۱/۹۶ باشد، رد می‌شود.

همچنین، آزمون دیبولد- ماریانو برای خطای پیش‌بینی مدل‌های VMD-LSTM و GA-LSTM استفاده شده و DM= ۲/۲۱۷ به‌دست آمده است.بنابراین، مطابق نتایج به‌دست‌آمده، در سطح اطمینان ۹۵٪، قدرت

[22] Diebold-Mariano

جدول ۵. فهرست ویژگی‌های منتخب هر سهم.

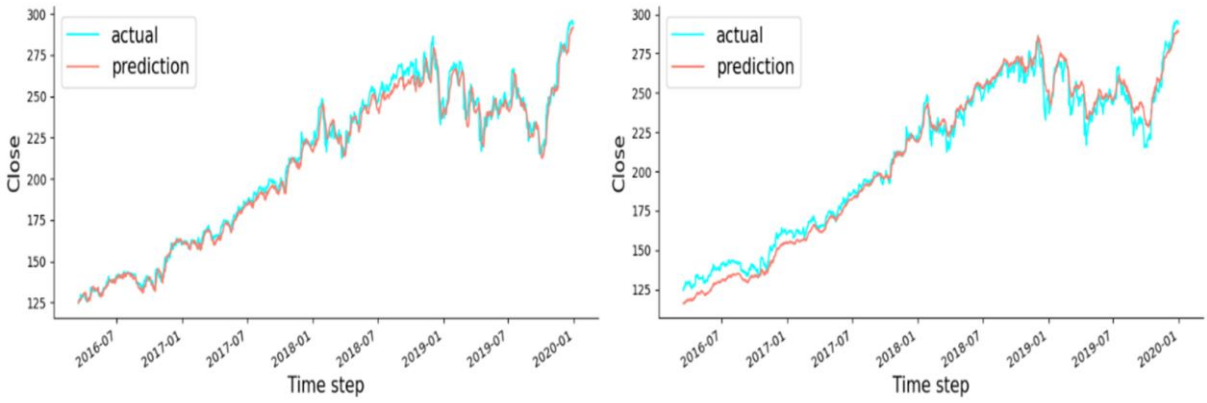
Item	Stock	Selected features
1	(UNH)	['High', 'Low', 'Volume','MACD','Adj Close','WI','ROC','EMA(10)','mom','RSI',' atr','SnP_Close']
2	(GS)	['Adj Close','MA(50)','High','Low','Signal Line','MA(5)','ROC','sd(20)','atr','MACD',' EMA(20)','RSI']
3	(IBM)	['High','Low','Signal Line',' WI', 'MA(5)', 'SMA' ,'sd(20)','atr','MACD','EMA','RSI']
4	(JPM)	['upper_band','lower_band','Low','Signa l Line' ,'WI' ,'MA(5)' ,'EMA(10)' ,'mom', 'RSI' ,'atr']
5	(JNJ)	['Open', 'High','Low','Signal Line','Adj Close' ,'STOK','ROC','EMA(10)','RSI',]

جدول ۶. مقایسه‌ی نتایج دو مدل پیشنهادی.

Item	Stock	VMD-LSTM			GA-LSTM		
		MAE	RMSE	(%) R^2	MAE	RMSE	(%) R^2
1	(UNH)	5.292	6.445	98.15	3.77	5.093	98.84
2	(GS)	3.54	4.409	97.98	2.967	3.996	98.34
3	(IBM)	2.073	2.738	95.80	1.746	2.456	96.62
4	(JPM)	1.705	2.097	98.81	1.44	1.887	99.03
5	(JNJ)	1.284	1.733	96.42	1.295	1.886	96.09

جدول ۷. مقایسه‌ی نتایج مدل‌های پیشنهادی با سایر مدل‌ها.

Item	Model	(UNH)			(GS)			(JPM)		
		MAE	RMSE	(%) R^2	MAE	RMSE	(%) R^2	MAE	RMSE	(%) R^2
1	VMD-LSTM	5.292	6.445	98.15	3.54	4.409	97.98	1.705	2.097	98.81
2	GA-LSTM	3.77	5.093	98.84	2.967	3.996	98.34	1.44	1.887	99.03
3	EMD-LSTM	5.509	7.567	97.45	5.433	6.688	95.37	3.6	4.392	94.78
4	WT-LSTM	10.785	12.99	92.53	4.174	5.389	96.94	2.158	2.827	97.83
5	LSTM	7.508	9.559	95.91	3.615	4.738	97.67	2.718	3.396	96.87



شکل ۱. نتایج پیش‌بینی سهام unh با دو مدل پیشنهادی.

پیش‌بینی مدل GA-LSTM بیشتر بوده و آزمون اخیر درستی آن را تأیید کرده است.

۵. نتیجه‌گیری و بحث

در پژوهش حاضر، دو مدل با دو رویکرد متفاوت انتخاب ویژگی و تجزیه‌ی سری زمانی ارائه شده و نتیجه گرفته شده است که هر دو مدل پیشنهادی، عملکرد مناسب و قابل اتکایی ارائه می‌کنند؛ اما مدل VMD-LSTM نسبت به سایر مدل‌های مشابه، مانند الگوریتم تجزیه‌ی حالت تجربی و الگوریتم تبدیل موجک عملکرد دقیق‌تری را ارائه کرده و همچنین در مقایسه، دو رویکرد تجزیه‌ی سری زمانی قیمت و انتخاب ویژگی، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت که عملکرد مدل GA-LSTM با رویکرد انتخاب ویژگی دقیق‌تر بوده و می‌توان استنباط کرد که به‌طورکلی مدل‌های مبتنی بر رویکرد انتخاب ویژگی، که پیش‌بینی را با استفاده از ویژگی‌های متنوع انجام می‌دهند، عملکرد مناسب‌تری نسبت به مدل‌های مبتنی بر تجزیه‌ی سری زمانی ارائه می‌کنند، که فقط از ویژگی قیمتی جهت پیش‌بینی استفاده می‌کنند. همچنین نتایج پژوهش حاضر، حاکی از آن است که مدل پیشنهادی که در آن از الگوریتم ژنتیک جهت انتخاب ویژگی استفاده شده است، نسبت به مدل پایه که از تمام ویژگی‌ها در پیش‌بینی قیمت سهام بهره برده است، علاوه‌بر کاهش ابعاد و محاسبات مدل در نتیجه‌ی کاهش ویژگی‌های استفاده‌شده در مدل، دقت پیش‌بینی را نیز به شکل چشمگیری افزایش داده است. همچنین می‌توان استنباط کرد که استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در کنار مدل‌های یادگیری عمیق می‌تواند عملکرد مدل‌های مذکور را در پیش‌بینی قیمت سهام بهبود بخشد.

References- منابع

1. Berradi, Z., Lazaar, M., Mahboub, O. and Omara, H., 2021, June. A comprehensive review of artificial intelligence Techniques in Financial Market. In *2020 6th IEEE congress on information science and technology (CiSt)*, pp. 367-371. IEEE. https://doi.org/10.1109/CiSt49399.2021.9357175
2. Le, D.Y.N., Maag, A. and Senthilananthan, S., 2020, November. Analysing stock market trend prediction using machine & deep learning models: A comprehensive review. In *2020 5th International Conference on Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications (CITISIA)*, pp. 1-10. IEEE. https://doi.org/10.1109/CITISIA50690.2020.9371852
3. Arel, I., Rose, D.C. and Karnowski, T.P., 2010. Deep machine learning-a new frontier in artificial intelligence research [research frontier]. *IEEE computational intelligence magazine*, *5*(4), pp.13-18. https://doi.org/10.1109/MCI.2010.938364
4. Guo, Y., Liu, Y., Oerlemans, A., Lao, S., Wu, S. and Lew, M.S., 2016. Deep learning for visual understanding: A review. *Neurocomputing*, *187*, pp.27-48. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.09.116
5. LeCun, Y., Bengio, Y. and Hinton, G., 2015. Deep learning. *nature*, *521*(7553), pp.436-444. https://doi.org/10.1038/nature14539
6. Adhikari, R. and Agrawal, R.K., 2014. A combination of artificial neural network and random walk models for financial time series forecasting. *Neural Computing and Applications*, *24*, pp.1441-1449. https://doi.org/10.1007/s00521-013-1386-y
7. Niu, H. and Wang, J., 2014. Financial time series prediction by a random data-time effective RBF neural network. *Soft computing*, *18*, pp.497-508. https://doi.org/10.1007/s00500-013-1070-2
8. Das, S.P., Achary, N.S. and Padhy, S., 2016. Novel hybrid SVM-TLBO forecasting model incorporating dimensionality reduction techniques. *Applied Intelligence*, *45*, pp.1148-1165. https://doi.org/10.1007/s10489-016-0801-3
9. Guo, T., Xu, Z., Yao, X., Chen, H., Aberer, K. and Funaya, K., 2016, October. Robust online time series prediction with recurrent neural networks. In *2016 IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA)*, pp. 816-825. Ieee. https://doi.org/10.1109/DSAA.2016.92
10. Ding, G. and Qin, L., 2020. Study on the prediction of stock price based on the associated network model of LSTM. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, *11*(6), pp.1307-1317. https://doi.org/10.1007/s13042-019-01041-1
11. Liu, Y., 2019. Novel volatility forecasting using deep learning–long short term memory recurrent neural networks. *Expert Systems with Applications*, *132*, pp.99-109. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.04.038
12. Zeng, X., Cai, J., Liang, C. and Yuan, C., 2022. A hybrid model integrating long short-term memory with adaptive genetic algorithm based on individual ranking for stock index prediction. *Plos one*, *17*(8), p.e0272637. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272637
13. Alotaibi, S.S., 2021. Ensemble technique with optimal feature selection for Saudi stock market prediction: a novel hybrid red deer-grey algorithm. *IEEE Access*, *9*, pp.64929-64944. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3073507
14. Chung, H. and Shin, K.S., 2018. Genetic algorithm-optimized long short-term memory network for stock market prediction. *Sustainability*, *10*(10), p.3765. https://doi.org/10.3390/su10103765

15. Niu, H., Xu, K. and Wang, W., 2020. A hybrid stock price index forecasting model based on variational mode decomposition and LSTM network. *Applied Intelligence*, *50*, pp.4296-4309. https://doi.org/10.1007/s10489-020-01814-0
16. Qiu, J., Wang, B. and Zhou, C., 2020. Forecasting stock prices with long-short term memory neural network based on attention mechanism. *PloS one*, *15*(1), p.e0227222. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227222
17. Ali, M., Khan, D.M., Alshanbari, H.M. and El-Bagoury, A.A.A.H., 2023. Prediction of complex stock market data using an improved hybrid emd-lstm model. *Applied Sciences*, *13*(3), p.1429. https://doi.org/10.3390/app13031429
18. Chen, X., Cao, L., Cao, Z. and Zhang, H., 2024. A multi-feature stock price prediction model based on multi-feature calculation, LASSO feature selection, and Ca-LSTM network. *Connection Science*, *36*(1), p.2286188. https://doi.org/10.1080/09540091.2023.2286188
19. Gülmez, B., 2023. Stock price prediction with optimized deep LSTM network with artificial rabbits optimization algorithm. *Expert Systems with Applications*, *227*, p.120346. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120346
20. Nasiri, H. and Ebadzadeh, M.M., 2023. Multi-step-ahead stock price prediction using recurrent fuzzy neural network and variational mode decomposition. *Applied Soft Computing*, *148*, p.110867. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110867
21. Mandic, D.P. and Chambers, J.A., 1999. Exploiting inherent relationships in RNN architectures. *Neural networks*, *12*(10), pp.1341-1345. https://doi.org/10.1016/S0893-6080(99)00076-3
22. Wang, D., Fan, J., Fu, H. and Zhang, B., 2018. Research on optimization of big data construction engineering quality management based on RNN-LSTM. *complexity*, *2018*(1), p.9691868. https://doi.org/10.1155/2018/9691868
23. Katoch, S., Chauhan, S.S. and Kumar, V., 2021. A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimedia tools and applications*, *80*, pp.8091-8126. https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6
24. Dragomiretskiy, K. and Zosso, D., 2013. Variational mode decomposition. *IEEE transactions on signal processing*, *62*(3), pp.531-544. https://doi.org/10.1109/TSP.2013.2288675

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2025), 41(1), 98-108

Sharif University of Technology

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

Research Article

Developing and Assessing New Models for the Free Patrol Vehicle Routing Problem

Hamed Manshadian, Mohsen Sadegh Amalnick * and Seyed Ali Torabi

School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
* corresponding author: (amalnick@ut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:12 May 2024

Revised:22 September 2024

Accepted:8 October 2024

Keywords:

Vehicle routing problem,
free patrolling,
mixed integer linear programming,
continuous-time mathematical models,
discrete-time mathematical models.

Abstract

Vehicle routing problems are a category of complex mathematical problems in the field of transportation and supply chain management, and a wide variety of these problems have been introduced. One category within this field involves the collaboration of two different types of fleets in a network, where in many cases, one of the fleets must patrol the graph as a support fleet and is not subject to the same constraints as the other fleet, such as only visiting a vertex or an edge once. Examples include refueling fleets or trucks providing services to drones, where these fleets patrol the network so that the other fleet can use their services as needed.

In this paper, the problem of the free movement of such fleets on a graph is examined as a free patrol problem, which can be used as a sub-problem in the modeling and solving of many routing problems. To this end, the problem is modeled as a mixed-integer linear programming (MILP) problem in both discrete and continuous time spaces. Generally, it is expected that the model in continuous time space will exhibit lower computational complexity, but since modeling in continuous time requires changes to the graph, leading to an increase in the number of vertices and edges, its behavior needs to be more thoroughly investigated. On the other hand, another challenge in analyzing this problem is that the objective of the free patrol sub-problem depends on the main problem, as without the main problem, the free patrol problem may lose its objective, with a fleet patrolling the graph within a designated time. Therefore, to decouple and make the free patrol independent of the main problem, five different objective functions have been introduced for each model, covering a wider range of comparisons, leading to ten models in total. Subsequently, all ten models were solved exactly using randomly generated data for ten different graphs. Finally, the behavior of the models was evaluated and compared from various perspectives. The numerical results demonstrate the superior performance of the continuous time model over the discrete time model.

Funding

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

To Cite this article:

Manshadian, H., Sadegh Amalnick, M. and Torabi, S.A. 2025. Developing and assessing new models for the free patrol vehicle routing problem, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, 41(1), 98-108.
https://doi.org/ 10.24200/j65.2024.64520.2405

مجله علمی مهندسی صنایع و مدیریت شریف

https://sjie.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

توسعه و ارزیابی مدل‌های جدید برای مسئله‌ی گشت آزاد وسائط نقلیه

حامد منشادیان، محسن صادق عمل نیک * و سیدعلی ترابی

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (amalnick@ut.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۰۲/۲۳

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۷/۱۷

واژگان کلیدی:

مسیریابی وسیله‌ی نقلیه،

گشت آزاد،

برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط،

مدل‌سازی ریاضی در فضای گسسته،

مدل‌سازی ریاضی در فضای پیوسته.

چکیده

در نوشتار حاضر، مسئله‌ی حرکت آزادانه‌ی ناوگان کمکی، نظیر ناوگان سرویس‌دهنده به پهپاد به‌عنوان یک مسئله‌ی گشت آزاد بررسی شده است، که می‌تواند به‌عنوان یک زیرمسئله در مدل‌سازی و حل بسیاری از مسائل مسیریابی استفاده شود. بدین منظور، مسئله به‌صورت برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط در حالت زمان‌های گسسته و پیوسته مدل‌سازی شده است. معمولاً انتظار می‌رود مدل در فضای زمان پیوسته، پیچیدگی کمتری از خود نشان‌دهد، اما از آنجایی که مدل‌سازی در این حالت نیازمند تغییراتی در گراف است، که منجر به افزایش تعداد رئوس و یال‌های آن می‌شود، رفتار آن باید به‌صورت دقیق‌تری بررسی شود. در نتیجه، برای پوشش ابعاد وسیع‌تری از مدل، ۵ تابع هدف برای هر مدل معرفی شده و سپس هر یک از ۱۰ مدل به‌دست‌آمده برای ۱۰ گراف تصادفی دقیقاً تحلیل و درنهایت، رفتار مدل‌ها از جوانب گوناگون ارزیابی و مقایسه شده است. نتایج حل نشان داده‌اند که مدل زمان پیوسته، عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

۱. مقدمه

مسئله‌ی مسیریابی وسائط نقلیه، معمولاً جزء مسائل پیچیده برای حل در شاخه‌ی پژوهش در عملیات شناخته می‌شود. پژوهشگران تاکنون شاخه‌های متنوعی از مسائل مذکور را معرفی کرده و با الگوریتم‌های گوناگونی سعی در ارائه‌ی روش‌های حل متفاوتی برای این‌گونه مسائل داشته‌اند؛ که یکی از آن‌ها، که به‌تازگی توسط منشادیان و همکاران (۲۰۲۳)،[۱] معرفی شده است، مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه‌ی گشت آزاد است، که به‌منظور همکاری پهپادها و وسائط نقلیه برای ضدعفونی‌کردن مناطق شهری در شرایط بحران تعریف شده است. مسئله‌ی گشت آزاد در مواردی که دو ناوگان با کاربری متفاوت در مسئله وجود داشته باشند، مانند ناوگان‌هایی که به‌منظور پشتیبانی ناوگان دیگر در شبکه حرکت می‌کنند، مسئله‌ای کاربردی محسوب می‌شود. در صورتی که یک ناوگان به‌عنوان خدمت‌دهنده عمل کند، مدل‌سازی مسئله معمولاً با محدودیت‌هایی مانند تعداد دفعه‌های عبور آن ناوگان، بیشینه‌ی یک بار از یک رأس یا یال مواجه است، اما ناوگان دیگر که با هدف خدمت‌رسانی به ناوگان اولی فعالیت می‌کند، می‌تواند در گراف به‌صورت آزادانه گشت بزند. در نتیجه، نویسندگان فرض کرده‌اند که یک وسیله‌ی نقلیه می‌تواند آزادانه در منطقه‌ی شهری حرکت کند و محدودیت برای تعداد دفعه‌های ملاقات یک یال و یا یک رأس وجود ندارد. در نتیجه، یک وسیله‌ی نقلیه می‌تواند به تعداد دلخواه یک رأس را ملاقات و همچنین به مقدار دلخواه در آن رأس توقف کند. این فرض این امکان را به مسئله می‌دهد که یک وسیله‌ی نقلیه‌ی گشت آزاد را در یک گراف تجربه کند و باعث می‌شود بسیاری از محدودیت‌های سایر مسائل حمل‌ونقل، مانند: محدودیت در ملاقات یک رأس، محدودیت در توقف یک رأس، و یا محدودیت در ملاقات یک یال در نظر گرفته نشود. این مسئله می‌تواند یک زیرمسئله‌ی کمکی برای بسیاری از مسائل مسیریابی مخصوصاً مسائل مسیریابی با درنظرگیری هماهنگی بین وسائط نقلیه باشد؛ و همچنین می‌تواند به صورت مجزا مدل‌سازی ریاضی شود و در مسائل مشابه استفاده شود. اما بسته به نحوه‌ی مدل‌سازی، مسئله‌ی اصلی که ممکن است به‌صورت زمان‌های گسسته و یا پیوسته باشد، مدل گشت آزاد می‌تواند رفتارهای متفاوتی از خود نشان دهد. به همین دلیل در نوشتار حاضر سعی شده است برای هر دو حالت، مدل ریاضی مجزا ارائه شود. در مدل ریاضی زمان گسسته، نیازی به تغییر گراف اولیه نیست و زمان پایان عملیات در تعداد محدودیت‌ها و متغیرهای مسئله، مستقیماً تأثیرگذار است؛ اما در مدل زمان پیوسته، در گراف اولیه باید تغییراتی روی دهد

استناد به این مقاله:

منشادیان، حامد، صادق عمل نیک، محسن و ترابی، سیدعلی، ۱۴۰۴. توسعه و ارزیابی مدل‌های جدید برای مسئله‌ی گشت آزاد وسائط نقلیه. مهندسی صنایع و مدیریت شریف ، ۴۱(۱)، صص.۹۸-۱۰۸. https://doi.org/10.24200/j65.2024.64520.2405

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

و تعدادی یال و رأس به آن گراف اضافه شود و زمان پایان عملیات در تعداد متغیرها و محدودیت‌های مسئله به‌صورت غیرمستقیم و با افزایش تعداد یال و رأس گراف تأثیرگذار است. علاوه‌بر تعداد محدودیت‌ها و متغیرها، عوامل دیگری نظیر تابع هدف مسئله و زیرمسئله‌های دیگر موجود در مسئله‌ی اصلی نیز در زمان و سرعت حل تأثیرگذار باشند. به همین دلیل، مدل‌های ارائه‌شده، با توابع هدف و نمونه‌های مختلفی باید آزمون شوند که بتوانند از لحاظ عملکردی مقایسه شوند.

از موارد استفاده‌ی مسئله‌ی پژوهش‌شده می‌توان به مسائلی، همچون: همکاری پهپادها و کامیون‌ها، همکاری کامیون و تریلر، ایستگاه‌های متحرک تعویض باتری در مسائل مسیریابی و یا زنجیره تأمین سبز، ایستگاه‌های متحرک سوخت‌رسانی، گشت پلیس امنیت، گشت آمبولانس، نقشه‌برداری از معابر شهری برای کشف تغییرات ایجادشده و کنترل ترافیک شهری اشاره کرد.

تاکنون مدل‌های گوناگونی برای مسائل مسیریابی با مفروضات متنوعی معرفی شده‌اند، که با توجه به شرایط مسئله، از نوع خطی و یا غیرخطی و با متغیرهایی در فضای گسسته، پیوسته، و یا ترکیبی از آن‌ها بوده‌اند. در مسائل هماهنگی بین پهپادها و وسائط نقلیه، فرض آزادبودن وسیله‌ی نقلیه‌ی زمینی در گراف می‌تواند فرض سودمندی باشد و در عمل استفاده شود. لذ در نوشتار حاضر سعی شده است تا مسئله‌ی مذکور به صورت موشکافانه‌تر بحث و بررسی شود. همچنین، برای آن، توابع هدف گوناگون، و همچنین مدل‌های ریاضی گوناگون در فضاهای گسسته و پیوسته معرفی شود.

۲. مروری بر ادبیات

مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه، یک مسئله‌ی بهینه‌سازی ترکیبی و معمولاً شاخه‌ای از حوزه‌های مطالعاتی حمل‌ونقل و زنجیره‌ی تأمین را در بر می‌گیرد. تمرکز مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه بر روی بهینه‌سازی مجموعه‌ای از مسیرها برای ناوگانی از وسائط نقلیه‌ای است که قصد خدمت‌رسانی به مجموعه‌ای از مشتریان را دارند. معمولاً هدف از مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه، کمینه‌سازی هزینه‌ی مسیرهای پیمایش‌شده است. ادبیات بسیار وسیعی در حوزه‌ی مسیریابی وجود دارد و پژوهشگران بسیار زیادی در بخش‌های گوناگون حوزه‌ی مذکور، مطالعاتی انجام داده‌اند. جمع‌آوری تمام ادبیات انجام‌شده در حوزه‌ی مسیریابی در این مختصر ممکن نبوده است، لیکن سعی شده است ابعاد اصلی مرتبط با مسئله‌ی پژوهش حاضر پوشش داده شوند.

مسائل مسیریابی را می‌توان به‌صورت کلی به دو دسته‌ی مسائل مسیریابی رأس و مسائل مسیریابی یال یا کمان تقسیم‌بندی کرد. در صورتی که در مسئله‌ی مسیریابی، هدف اصلی رساندن خدمت یا ملاقات تمامی رئوس یا زیرمجموعه‌ای از رئوس یک گراف باشد، آن مسئله، مسئله‌ی مسیریابی رأس نامیده می‌شود. کاربردهای گوناگونی از این دسته مسائل مسیریابی می‌توان نام برد؛ مانند: بازرسی از مناطق خاص، تحویل کالا به سوپرمارکت‌ها، پخش روزنامه، جمع‌آوری مواد فاسدشده از فروشگاه‌ها، و ... . اما بیشترین کاربرد مشاهده‌شده در ادبیات مسیریابی رأس، مربوط به حوزه‌ی ارسال و تحویل کالاست. پایه‌ی اصلی مسائل مسیریابی رأس را مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد تشکیل می‌دهد؛ که در آن، یک فروشنده از شهر مبدأ شروع به حرکت و مجموعه‌ای شامل چند شهر را ملاقات می‌کند. برای فهرستی از شهرها، کوتاه‌ترین مسیر ممکن را که یک بار در هر شهر می‌گذرد و به شهر مبدأ باز می‌گردد، تعیین می‌کند. چالش مسئله این است که فروشنده‌ی دوره‌گرد می‌خواهد مسافت کل طی‌شده را به میزان کمینه برساند. می‌توان مواردی نظیر سرویس‌های حمل‌ونقل، توزیع و تحویل کالا، برنامه‌ریزی، و لجستیک را به‌عنوان کاربردهای مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد نام برد. تعداد جواب‌هایی که برای حل مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد وجود دارد، برابر با تعداد دورهای هامیلتونی است، که در یک گراف کامل وجود دارد.[۲] مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد با روش‌های گوناگون، مانند: شبکه‌ی عصبی،[۳] الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده،[۴] الگوریتم ژنتیک،[۵] بهینه‌سازی ازدحام ذرات،[۶] الگوریتم کلونی مورچگان،[۷] و البته بسیاری روش‌های فراابتکاری دیگر و نیز ترکیبی از روش‌های اخیر حل شده است.

مسائل مسیریابی یال مربوط به تعیین مسیرهایی با کمینه‌ی هزینه‌ی پیمایش یال‌هایی از یک گراف با درنظرگرفتن محدودیت‌هایی است. مسائل مذکور عملاً کاربردهای فراوانی، نظیر: تعمیرات و نگهداری جاده‌ها، جمع‌آوری زباله، آبیاری درختان کنار خیابان‌ها، تحویل مرسوله‌های پستی، مسیریابی اتوبوس مدارس، خواند و اندازه‌گیری متراژ، سم‌پاشی و ضدعفونی‌کردن مسیرها، بازرسی مرزها، بازرسی کابل‌های برق، بازرسی لوله‌ها، گشت پلیس، تمیزکردن مسیرها، کنترل ترافیک، مسیریابی گشت پلیس، ماسه‌ی نمک‌پاشی بر روی مسیرهای یخ‌زده، و برف‌روبی جاده‌ها، و ... دارد. برای مشاهده‌ی جزئیات مربوط به کاربردهای مسائل مسیریابی می‌توان به نوشتارهای درور[۱] (۲۰۱۲)،[۸] ایسلت[۲] (۱۹۹۵)،[۹] اسد و گلدن[۳] (۱۹۹۵)،[۱۰] و یو[۴] و همکاران (۲۰۱۹)،[۱۱] مراجعه کرد. پایه‌ی مسائل مسیریابی یال را مسائل پستچی چینی و پستچی روستایی تشکیل می‌دهد. در مسئله‌ی اخیر، یک پستچی می‌خواهد تمامی نامه‌ها را به مقصد آن‌ها برساند؛ در حالی که مسافت طی‌شده کمینه باشد و بعد از پایان کار به نقطه‌ی آغاز برگردد. در این کار، باید هر خیابان را دست‌کم یک بار طی کند و اگر مجبور شود که از مسیری دو بار عبور کند، باید مسیری با کوتاه‌ترین مسافت را انتخاب کند. مسئله‌ی پستچی چینی به مسائل: پستچی چینی غیر جهت‌دار،[۱۲] پستچی چینی جهت‌دار، پستچی چینی مختلط،[۱۳] پستچی چینی بادی،[۱۴] و پستچی چینی سلسله‌مراتبی،[۱۵] دسته‌بندی می‌شود.

مسئله‌ی پستچی روستایی، که برای اولین بار توسط اورلوف[۵] (۱۹۷۴)،[۱۶] مطرح شد و NP-Hard بودن آن بعداً توسط لنسترا و کان[۶] (۱۹۷۴)،[۱۷] اثبات شد، نیز شباهت زیادی به مسئله‌ی پستچی چینی دارد، با این تفاوت که پیمایش باید بر زیرمجموعه‌ای از یال‌ها و کمان‌های گراف انجام پذیرد. مسئله‌ی مذکور، در یک تقسیم‌بندی کلی به مسائل: پستچی روستایی غیر جهت‌دار،[۱۸] پستچی روستایی جهت‌دار،[۱۹] پستچی روستایی مختلط،[۲۰] و پستچی روستایی ظرفیت‌دار،[۲۱] دسته‌بندی می‌شود.

علاوه‌بر دسته‌بندی مسائل مسیریابی وسیله در دو دسته‌ی مسیریابی رأس و مسیریابی یال، دسته‌بندی‌های دیگری نیز در ادبیات یافت می‌شود. پژوهشگران علاقه‌مند می‌توانند به نوشتارهای مروری این گروه، مانند الشائر و آواد[۷]

[1] Dror
[2] Eiselt
[3] Assad & Golden
[4] Yu
[5] Orloff
[6] Lenstra & Kan
[7] Elshaer

(۲۰۲۰)،[۲۲] کنستانتاکوپولوس[8] و همکاران (۲۰۲۰)،[۲۳] و مقدانی[9] و همکاران (۲۰۲۱)،[۲۴] رجوع کنند. همچنین برای درک بهتر کاربردهای مدل مطرح‌شده برای مسئله‌ی گشت آزاد، خوانندگان علاقه‌مند می‌توانند به نوشتارهای مسائل همکاری وسائط نقلیه مانند: رئیسی و همکاران (۲۰۲۰)،[۲۵] وانگ و شیو[10] (۲۰۱۹)،[۲۶] چونگ[11] و همکاران (۲۰۲۰)،[۲۷] و درکسل[12] (۲۰۱۲)،[۲۸] رجوع کنند.

با بررسی ادبیات موجود در حوزه‌ی مسیریابی وسائط نقلیه و همچنین حوزه‌ی هماهنگی در مسیریابی وسائط نقلیه، مشخص می‌شود که روش‌های گوناگونی برای مدل‌سازی و حل آن‌ها استفاده شده است و از طرفی دیگر، روش مدل‌سازی یک مسئله در زمان و روش حل آن می‌تواند بسیار مؤثر باشد. علاوه‌بر آن، در بسیاری از مواقع شکستن یک مسئله به مسائل کوچک‌تر نیز می‌تواند در استفاده از روش های‌دقیق، ابتکاری، و فراابتکاری کمک شایانی کند. روش‌هایی مانند: تجزیه‌ی بندرز، الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری ترکیبی می توانند سرعت حل را افزایش دهند. در نتیجه، در بسیاری از مواقع تفکیک یا تجزیه‌ی مسائل به مسائل کوچک‌تر، گزینه‌های بیشتری را برای حل و احتمالاً بالاتربردن سرعت و دقت آن پیش روی یک پژوهشگر خواهد گذاشت. به‌عنوان مثال، تفکیک و تجزیه‌ی مسئله به چند مسئله‌ی کوچک‌تر، می‌تواند این امکان را به پژوهشگر بدهد که یکی از مسائل را با یک الگوریتم فراابتکاری و مسئله‌ی دیگر را با الگوریتم دیگر حل کند و در هر گام نتایج آن‌ها را به صورت هم‌زمان مقایسه و آزمون کند. برای مسائل هماهنگی در مسیریابی وسائط نقلیه، مسئله‌ی گشت آزاد برای نخستین بار توسط منشادیان و همکاران (۲۰۲۳)[۱] معرفی شده است، که در حل مسئله‌ی همکاری پهپاد و کامیون و به‌منظور مدل‌سازی بخشی از مسئله، یعنی گشت آزاد کامیون در گراف از آن استفاده شده و عملکرد خوبی را در مدل‌سازی و حل آن به جا گذاشته است. اما بررسی عمیق مدل گشت آزاد و روش‌های گوناگون مدل‌سازی آن یعنی مدل‌سازی‌های پیوسته و گسسته، تاکنون در ادبیات بحث و بررسی نشده است. همچنین کارایی مدل‌های گوناگون به‌صورت مجزا در مورد توابع هدف محتمل تاکنون تحلیل نشده است. در پژوهش حاضر، سعی شده است که این شکاف مطالعاتی بررسی شود و مسئله‌ی گشت آزاد به صورت عمیق‌تر از لحاظ نحوه‌ی مدل‌سازی و همچنین با توابع هدف گوناگون مقایسه و تحلیل شود.

مسئله‌ای که در نوشتار حاضر بررسی شده است، می‌تواند در برخی از مسائل حمل‌ونقل استفاده شود. زیرا در آن فرض شده است که وسیله‌ی نقلیه می‌تواند آزادانه در گراف حرکت کند و در رئوس آن به مقدار دلخواه متوقف شود. در نتیجه، در صورتی که شرایط دیگری، مانند: پنجره‌ی زمانی، اجبار در پوشش یال، اجبار در ملاقات رأس به تعداد دفعات معلوم، و ... می‌تواند به‌عنوان شرایط کمکی در مدل تعریف شود. از آنجایی که مسائل مسیریابی بسته به شرایط مسئله به دو صورت مسائل زمان‌های گسسته و پیوسته مدل‌سازی می‌شوند، مسئله‌ی گشت آزاد بررسی‌شده در نوشتار حاضر نیز به هر دو صورت زمان‌های گسسته و پیوسته، مدل‌سازی و با هم مقایسه شده‌اند. در قسمت بعد، تعریف مسئله به‌صورت جامع و با جزئیات بحث و بررسی شده است.

۳. تعریف مسئله و مدل‌سازی

مسئله‌ای که بر طبق مفروضات مطرح‌شده در نوشتار حاضر بررسی شده است، در شرایط عملی و مخصوصاً در مسائل همکاری وسائط نقلیه می‌تواند بسیار کاربردی باشد. محدودیتی که یک مسئله‌ی VRP و یا TSP برای حرکت وسیله‌ی نقلیه قائل است؛ این است که وسیله‌ی نقلیه فقط می‌تواند هر مشتری را یک بار ویزیت کند. ولی در مسئله‌ی ما فرض بر آن است که وسیله‌ی نقلیه می‌تواند به‌صورت آزادانه در گراف حرکت کند. یعنی یک رأس را چند بار پیمایش کند و در هر رأس به مقدار دلخواه متوقف شود.

یکی از نزدیک‌ترین مسائل از لحاظ مفروضات به مسئله‌ی نوشتار حاضر، مسئله‌ی Multi Trip VRP است، که برای اولین بار توسط فلیشمن[13] (۱۹۹۰)،[۲۹] مطرح شده است. در مسئله‌ی VRP در یک دوره‌ی تناوب برنامه‌ریزی، فقط یک بار از یک ناوگان استفاده شده است. ولی در MT-VRP یک ناوگان می‌تواند در یک دوره‌ی تناوب برنامه‌ریزی، چند سفر را داشته باشد. به این ترتیب که ناوگان حرکت خود را از دپو شروع می‌کند و پس از پیمایش یک سفر، به دپو باز می‌گردد و می‌تواند سفر جدیدی را آغاز کند. درنظرگرفتن این شرط، مسئله را به دنیای واقعی، نزدیک‌تر می‌کند و چالش‌های جدیدی را برای حل پیش روی پژوهشگران می گذارد. با توجه به فرضیات مسئله‌ی عنوان‌شده، نزدیک‌ترین پژوهش‌های موجود در ادبیات مربوط به MT-VRP است. در صورتی که این مسئله برای مدل‌سازی مسئله‌ی همکاری کامیون و پهپاد استفاده شود، و فرض بر این باشد که نقش کامیون در مدل فقط سرویس‌رسانی به پهپاد باشد، مدل MT-VRP چند چالش اصلی خواهد داشت؛ که یکی از آن‌ها، تعریف بیشینه‌ی تعداد زیردورهای ممکن برای کامیون خواهد بود. چالش دیگر این است که کامیون پس از هر دور (یا زیردور) سرویس‌دهی، باید مجدداً به دپو باز گردد، که مسئله را از مفروضات واقعی آن دور می‌کند.

مسئله‌ی FP-VRP می‌تواند یک مسئله‌ی بدون هدف باشد و برای هماهنگی بهتر چند ناوگان استفاده شود. به عنوان مثال، در مسئله‌ی هماهنگی کامیون و پهپاد، کامیون‌ها بر روی خیابان‌های شهر آزادانه حرکت می‌کنند و در مواقع لزوم به پهپادها سرویس می‌دهند. بسته به مدلی که تعریف می‌شود، می‌توان مسئله‌ی اخیر را با اهداف خاص و یا بدون هدف و با ترکیب مسائل دیگر مدل‌سازی کرد.

گراف غیرجهت‌دار متصل $G=\{V,E\}$ با ماتریس مجاورت a در نظر گرفته شده است، که یال‌های آن نشانگر خیابان‌ها و رئوس آن، یعنی $V=\{v_i \mid 1\le i\le n\}$، نماینده‌ی نقاط تقاطع خیابان‌هاست. با داشتن یک رأس موهومی (v_0) گراف تشکیل می‌شود. حال رأس شروع v_0 به گراف اضافه و گراف $\hat{G}=\left(\hat{V}=V\cup v_0, \hat{E}=E\cup e_{v_0,v_1}\right)$ تشکیل می‌شود. شایان ذکر است این رأس فقط دو بار و در شروع و پایان مأموریت توسط وسائط نقلیه ویزیت می‌شود. برای مدل‌سازی محدودیت‌های مسئله، ابتدا مجموعه‌ها، پارامترها، و متغیرها تعریف شده‌اند.

- مجموعه‌ها

Adj_i: مجموعه‌ی رئوس مجاور رأس i؛

$\hat{T}$: مجموعه‌ی شامل اعداد صحیح مثبت از صفر تا زمان مجاز برای انجام عملیات پهپاد $\hat{T}=\{۱,۲,\ldots,T\}$؛

[8] Konstantakopoulos
[9] Moghdani
[10] Wang & Sheu
[11] Chung
[12] Drexl
[13] Fleischmann

T^-: مجموعه‌ی شامل اعداد صحیح مثبت از ۰ تا ۱ واحد قبل از زمان مجاز برای انجام عملیات پهپاد $T^- = \{۰,\dots,T-۱\}$؛

T^+: مجموعه‌ی شامل اعداد صحیح مثبت از ۱ تا زمان مجاز برای انجام عملیات پهپاد $T^+ = \{۱,\dots,T\}$؛

F: مجموعه‌ی کل وسائط نقلیه.

- پارامترها

RT_r^f: زمان طی‌کردن رأس i تا j توسط ایستگاه متحرک f، $RT_r^f = \frac{Dis_r}{SPF^f},\ \forall r \in R, f \in F$،

$SP_{(i,j)}$: کوتاه‌ترین مسیر بین دو رأس i و j؛

$Dis_{(i,j)}$: طول یال قرارگرفته بین دو رأس i و j؛

SPF^f: میانگین سرعت وسیله‌ی نقلیه‌ی f در واحد زمان؛

T : بیشینه‌ی زمان مجاز کل عملیات؛

M: عدد بزرگ.

- متغیرها

χ_r^{ft} : اگر وسیله‌ی نقلیه‌ی f در زمان t مسیر r را شروع به پیمایش کند، ۱ و در غیر این صورت ۰؛

ω_i^{ft}: اگر وسیله‌ی نقلیه‌ی f در زمان t در رأس i مشغول استراحت باشد، ۱ و در غیر این صورت صفر.

۱.۳. محدودیت‌های مدل زمان گسسته

مجموعه‌ی محدودیت‌های ۱ و ۲ بیان می‌کنند که هر وسیله‌ی نقلیه در زمان شروع باید رأس موهومی را ترک کند و فقط یک بار می‌تواند این کار را انجام دهد. مجموعه‌ی محدودیت ۳ بیان می‌کند که هر وسیله‌ی نقلیه باید در زمان پایان عملیات در رأس موهومی باشد. مجموعه‌ی محدودیت ۴ بیان می‌کند که تعداد ورودی‌های یک رأس باید برابر با تعداد خروجی‌های آن رأس باشد. مجموعه‌ی محدودیت ۵ بیان می‌کند که در زمان، یک وسیله‌ی نقلیه می‌تواند مشغول توقف باشد و یا حرکت خود را شروع کرده باشد. مجموعه‌ی محدودیت‌های ۶ و ۷ بیان می‌کنند در صورتی که یک وسیله‌ی نقلیه حرکت خود را شروع کند، زمان رسیدن به مقصد باید توقف داشته باشد و یا حرکت بعدی خود را شروع کند. همچنین مجموعه‌ی محدودیت اخیر بیان می‌کند در صورتی که یک وسیله‌ی نقلیه، حرکت خود را شروع کند، در زمان قبل از رسیدن به رأس بعدی، باید در رأس قبلی متوقف باشد و یا حرکت خود را شروع کرده باشد. مجموعه‌ی محدودیت ۸ بیان می‌کند در صورتی که یک وسیله‌ی نقلیه حرکت خود را شروع کرده باشد، تا زمان رسیدن به رأس بعد، نمی‌تواند در حالت توقف باشد و یا حرکت جدیدی را شروع کند. مجموعه‌ی محدودیت ۹ تضمین می‌کند در صورتی که یک وسیله‌ی نقلیه در یک زمان متوقف باشد، در زمان بعد باید یا متوقف باشد و یا حرکت خود را به سمت رأس بعدی شروع کند. مقدار مجاز برای متغیرها توسط مجموعه‌ی محدودیت ۱۰ تعیین می‌شود.

$$\chi_{(v_0,1)}^{f0} = 1 \qquad \forall f \in F \qquad (۱)$$

$$\sum_{t\in\{1,\dots,T\}} \chi_{(v_0,1)}^{ft} = 0 \qquad \forall f \in F \qquad (۲)$$

$$\sum_{t\in T^+} \chi_{(1,v_0)}^{f\left(T-RT_{(1,v_0)}^f\right)} = 1 \qquad \forall f \in F \qquad (۳)$$

$$\sum_{t\in\hat{T}}\sum_{(i,j)\in R} \chi_{(i,j)}^{ft} = \sum_{t\in\hat{T}}\sum_{(j,k)\in R} \chi_{(j,k)}^{ft} \qquad \forall f \in F, j \in \hat{V} \qquad (۴)$$

$$\sum_{r\in R} \chi_r^{ft} + \sum_{i\in V} \omega_i^{ft} \le 1 \qquad \forall f \in F, t \in \hat{T} \qquad (۵)$$

$$\sum_{(j,k)\in R} \chi_{(j,k)}^{f\left(t+RT_{(i,j)}^f\right)} + \omega_j^{f\left(t+RT_{(i,j)}^f\right)} \ge \chi_{(i,j)}^{ft} \quad \forall f \in F, (i,j) \in R,$$
$$\forall t \in \hat{T} \mid t + RT_{(i,j)}^f \le T \qquad (۶)$$

$$\sum_{(i,j)\in R} \chi_{(i,j)}^{f\left(t-RT_{(i,j)}^f\right)} + \omega_j^{f\left(t-RT_{(j,k)}^f\right)} \ge \chi_{(j,k)}^{ft} \qquad \forall f \in F, (j,k) \in R,$$
$$\forall t \in \hat{T} \mid t + RT_{(j,k)}^f > T \qquad (۷)$$

$$\sum_{\substack{t+1\le t\le t+RT_r^f \\ t\in\hat{T}}} \left(\sum_{i\in V} \omega_i^{f\,t} + \sum_{r\in R} \chi_r^{f\,t} \right) \le M\left(1-\chi_r^{ft}\right)$$
$$\forall f \in F, r \in R, t \in \hat{T} \qquad (۸)$$

$$\omega_i^{f(t+1)} + \sum_{(i,j)\in R} \chi_{(i,j)}^{f(t+1)} \ge \omega_i^{ft} \qquad \forall f \in F, r \in R, t \in \hat{T} \qquad (۹)$$

$$\chi_r^{ft}, \omega_i^{ft} \in \{0,1\} \quad \forall r \in R, \forall f \in F, \forall t \in \hat{T}, i \in \hat{V} \qquad (۱۰)$$

۲.۳. محدودیت‌های مدل زمان پیوسته

به‌منظور مدل‌سازی مسئله‌ی گشت آزاد به‌صورت زمان پیوسته، تغییراتی در گراف اصلی ایجاد شده است. بدین صورت که هر رأس به اندازه‌ی p رأس با مشخصات موقعیتی همان رأس تکرار می‌شود. در نتیجه، گراف $\hat{G} = \left(\hat{V}, \hat{E}\right)$ به‌صورت $G' = \left(V', E'\right)$ تغییر خواهد کرد (روابط ۱۱ الی ۱۳) (بدیهی است که $P_{v_i} = ۱$):

$$|V'| = \sum_{i\in\hat{V}} P_i \qquad (۱۱)$$

$$V' = \left\{ v_i^{p_i} \,\middle|\, \begin{array}{l} 1 \le i \le n, \\ 1 \le p_i \le MaxP_i \end{array} \right\} \qquad (۱۲)$$

$$E' = \left\{ e_{i^p j^q} \,\middle|\, \begin{array}{l} i, j \in V, a_{ij} = 1, \\ 1 \le p_i \le MaxP_i, \\ 1 \le q_j \le MaxP_j \end{array} \right\} \qquad (۱۳)$$

که در آن‌ها، V_i^p برابر با تکرار pاُم رأس i است. همچنین در صورتی که مقدار ماتریس مجاورت برابر ۱ باشد، مقدار ماتریس مجاورت تمامی نقاط تکرار آن دو رأس نیز ۱ است (رابطه‌ی ۱۴):

$$\forall i, j \in \hat{V}\ ,\ \forall p \in P_i,\ \forall q \in P_j \qquad a_{ij} = 1 \Rightarrow a'_{v_i^p v_j^q} = 1 \qquad (۱۴)$$

منشادیان و همکاران (۲۰۲۳)،[1] ثابت کرده‌اند که بیشینه‌ی تعداد تکرار هر رأس $i \in V$ از رابطه‌ی ۱۵ تبعیت می‌کند.

$$\max_{f\in F}\left\{\frac{T-2\times\frac{Dis_{(v_0,i)}}{SPF^f}}{2\times\min\limits_{j\in V'|a_{ij}=1}\left\{\frac{SP_{(i,j)}}{SPF^f}\right\}}+1\right\} \quad (۱۵)$$

با فرض اینکه $R'=\{(i,j)|i,j\in V',j\in Adj(i)\}$ برابر با مجموعه‌ی تمامی مسیرهای ممکن برای حرکت ایستگاه‌های متحرک باشد، و با درنظرگرفتن متغیرهای مطرح‌شده، محدودیت‌های مربوط به مسئله‌ی ذکرشده تعریف شده است.

- متغیرها

α_r^f: اگر وسیله‌ی نقلیه‌ی f مسیر r را طی کند، ۱ و در غیر این صورت ۰ ($r\in R'\ \forall f\in F$)؛

β_i^f: زمان رسیدن وسیله‌ی نقلیه‌ی f به رأس i ($\forall f\in F\ i\in V'$)؛

θ_i^f: زمان توقف وسیله‌ی نقلیه‌ی f در رأس i ($\forall f\in F\ i\in V'$)؛

π_i^f: زمان ترک وسیله‌ی نقلیه‌ی f در رأس i ($\forall f\in F\ i\in V'$).

مجموعه‌ی محدودیت‌های ۱۶ و ۱۷، زمان ترک و بازگشت به آشیانه را برای هر وسیله‌ی نقلیه مشخص می‌کنند. مجموعه‌ی محدودیت ۱۸ بیان می‌کند تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها به هر رأس (همچنین رأس موهومی) برابر و کمتر از ۱ است. مجموعه‌ی محدودیت‌های ۱۹ و ۲۰ بیان می‌کنند در صورتی که مسیری طی شود، زمان ورود به رأس مقصد برابر زمان خروج از رأس مبدأ به اضافه‌ی زمان پیمایش مسیر از مبدأ به مقصد است. مجموعه‌ی محدودیت ۲۱ بیان می‌کند زمان خروج از هر رأس برابر مجموع زمان ورود به آن و زمان توقف در آن رأس است. مجموعه‌ی محدودیت ۲۲ بیان می‌کند در صورتی که زمان شروع و ترک یک رأس بیشتر از ۱ باشد، یعنی از آن رأس و یا به آن رأس حتماً حرکتی وجود داشته است. مجموعه‌ی محدودیت‌های ۲۳ و ۲۴، بازه‌ی مجاز متغیرها را نشان می‌دهند.

$$\pi_{v_0}^f=0 \qquad \forall f\in F \quad (۱۶)$$

$$\beta_{v_0}^f=T \qquad \forall f\in F \quad (۱۷)$$

$$\sum_{r=(i,j)\in R'}\alpha_r^f=\sum_{r=(j,i)\in R'}\alpha_r^f\le 1 \qquad \forall f\in F,\forall j\in V' \quad (۱۸)$$

$$\beta_j^f\ge\pi_i^f+\frac{Dis_r}{SPF^f}-M\left(1-\alpha_r^f\right)$$
$$\forall f\in F,\forall r=(i,j)\in R' \quad (۱۹)$$

$$\beta_j^f\le\pi_i^f+\frac{Dis_r}{SPF^f}+M\left(1-\alpha_r^f\right)$$
$$\forall f\in F,\forall r=(i,j)\in R' \quad (۲۰)$$

$$\pi_i^f=\beta_i^f+\theta_i^f \qquad \forall f\in F,\forall i\in V' \quad (۲۱)$$

$$\beta_i^f+\pi_i^f\le M\left(\sum_{r=(i,j)\in R'}\alpha_r^f+\sum_{r=(j,i)\in R'}\alpha_r^f\right)$$
$$\forall f\in F,\forall i\in V' \quad (۲۲)$$

$$\alpha_r^f\in\{0,1\} \qquad r\in R',\forall f\in F \quad (۲۳)$$

$$\beta_i^f,\theta_i^f,\pi_i^f\ge 0 \qquad i\in V',\forall f\in F \quad (۲۴)$$

۳.۳. تعریف توابع هدف

مسئله‌ای که در نوشتار حاضر بررسی شده است، می‌تواند به عنوان یک مسئله‌ی کمکی برای برخی از مسائل مسیریابی وسیله‌ی نقلیه استفاده شود. اما برای اینکه بتوان محدودیت‌های هر دو مسئله را در فضای گسسته و پیوسته ارزیابی و مقایسه کرد، باید تابع هدفی برای آن تعریف شود. همان‌طور که پیشتر بیان شد، توابع هدف متفاوتی برای مسئله‌ی حاضر می‌توان تعریف کرد؛ که با توجه به محدودیت‌های موجود و ذکرشده برای آن، توابع هدف به دو دسته تقسیم شده‌اند:

۱- **توابع هدف محرک:** این دسته توابع هدفی هستند که با توجه به محدودیت‌های موجود، وسائط نقلیه را به گشت در گراف تحریک می‌کنند.

۲- **توابع هدف بازدارنده:** این دسته توابع هدفی را تشکیل می‌دهند که با توجه به محدودیت‌های موجود، وسائط نقلیه را به عدم تحرک و توقف بیشتر در رئوس گراف تشویق می‌کنند.

در مسائلی که توابع هدف بازدارنده وجود دارد، معمولاً محدودیت‌های دیگری نظیر کمینه‌ی تعداد دفعاتی که باید یک رأس یا یک یال ملاقات شود، تأمین تقاضای مشتریان، درنظرگرفتن پنجره‌ی زمانی، و...، مسبب وجود تعادل در مدل می‌شوند. در نوشتار حاضر، چنین شروطی در نظر گرفته نشده است؛ زیرا فقط توابع هدف محرک بررسی شده‌اند. به‌منظور مدل‌سازی موارد اخیر، در برخی از مسائل، تعریف متغیرهای موهومی جدید لازم است، که در ادامه بررسی شده‌اند.

۱.۳.۳. کمینه‌سازی زمان توقف

یکی از توابع هدفی که می‌توان برای مسئله‌ی گشت آزاد مطرح کرد، کمینه‌ساختن زمان توقف است. توابع هدف ۲۵ و ۲۶، به ترتیب توابع هدف برای کمینه‌سازی زمان توقف برای مسائل گسسته و پیوسته هستند.

$$Obj_1^D=Min\sum_{t\in\hat{T}}\sum_{f\in F}\sum_{i\in\hat{V}}\omega_i^{ft} \qquad \text{s.t. (1)-(10)} \quad (۲۵)$$

$$Obj_1^C=Min\sum_{i\in V'}\sum_{f\in F}\theta_i^f \qquad \text{s.t. (16)-(24} \quad (۲۶)$$

۲.۳.۳. بیشینه‌ی پاداش رئوس ملاقات‌شده

در صورتی که WN_i پاداش هر بار ملاقات رأس $i\in V$ باشد، برای بیشینه‌ساختن پاداش رئوس ملاقات‌شده در مدل‌های زمان‌های گسسته و پیوسته از توابع هدف ۲۷ و ۲۸ استفاده می‌شود:

$$Obj_2^D=Max\sum_{t\in\hat{T}}\sum_{f\in F}\sum_{r\in R}\chi_r^{ft}WN_i \qquad \text{s.t. (1)-(10)} \quad (۲۷)$$

$$Obj_2^C=Max\sum_{(v_i,v_j)\in R'}\sum_{f\in F}\alpha_{(v_i,v_j)}^f WN_i \qquad \text{s.t. (16)-(24)} \quad (۲۸)$$

۳.۳.۳. بیشینه‌ی پاداش مسافت طی‌شده

در صورتی که WR_r پاداش پیمایش هر واحد مسیر $r\in R$ باشد و متغیر موهومی σ_r^{ft} بدین صورت تعریف شود: در صورتی که ناوگان f پیمایش مسیر r را در زمان t شروع کند، برابر ۱ و در غیر اینصورت برابر ۰ باشد؛ معادله‌ی ۲۹، تابع هدف را در مدل گسسته نشان می‌دهد و برابر با مجموعه‌ی پاداش

کسب‌شده برای پوشش یال‌ها توسط وسیله‌ی نقلیه است. در مسئله‌ی زمان پیوسته، مجموع امتیازهای کسب‌شده برای پوشش یال‌ها توسط تابع هدف (رابطه‌ی ۳۰) تعیین می‌شود.

$$Obj_3^D = Max \sum_{r\in R}\sum_{t\in T}\sum_{f\in F} \sigma_r^{ft}\, Dis_r\, WR_r \quad \text{s.t. (1)-(10)} \qquad (۲۹)$$

$$Obj_3^C = Max \sum_{r\in R'}\sum_{f\in F} \alpha_r^{f}\, Dis_r\, WR_r \quad \text{s.t. (16)-(24)} \qquad (۳۰)$$

۳.۳.۴. بیشینه‌ی پاداش رئوس منحصربه‌فرد ملاقات‌شده

متغیر باینری τ_i بدین صورت تعریف می‌شود: در صورتی برابر با ۱ خواهد بود که رأس i ملاقات شده باشد (در مسئله‌ی پیوسته، دست‌کم یکی از تکرارهای رأس i ملاقات شده باشد) و در غیر این صورت ۰ خواهد بود (رابطه ۳۴) و مجموع پاداش ها توسط رابطه ۳۱ محاسبه می گردد. مجموعه‌ی محدودیت‌های ۳۲ و ۳۳ نیز مشخص می‌کنند در صورتی که یک رأس توسط هر یک از وسائط نقلیه در هر زمانی ملاقات شود، آن رأس ملاقات شده است. حدود مجاز برای متغیر τ_i توسط محدودیت ۳۴ تعیین می‌شود.

$$Obj_4^D = Max \sum_{i\in v} \tau_i WN_i \quad \text{s.t. (1)-(10)} \qquad (۳۱)$$

$$\sum_{f\in F}\sum_{t\in \hat{T}} \chi_i^{ft} \le M\tau_i, \forall i\in V \qquad \xi_r \in \{0,1\}, \forall r\in R \qquad (۳۲)$$

$$\tau_i \le \sum_{f\in F}\sum_{t\in \hat{T}} \chi_i^{ft}, \forall i\in V \qquad (۳۳)$$

$$\tau_i \in \{0,1\} \qquad (۳۴)$$

مجموع زمان‌های توقف تمامی وسائط نقلیه در تمامی رئوس توسط تابع ۳۵، محاسبه و بیشینه می‌شود. مجموعه‌ی محدودیت‌های ۳۶ و ۳۷، مشخص می‌کنند در صورتی که دست‌کم هر یک از تکرارهای یک رأس یک بار ملاقات شود، آن رأس ملاقات شده است.

$$Obj_4^C = Max \sum_{i\in v} \tau_i WN_i \quad \text{s.t. (16)-(24)} \qquad (۳۵)$$

$$\sum_{f\in F}\sum_{\forall j\in\{1\ldots MaxP_i\}} \beta_{v_i^j}^{f} \le M\tau_i, \forall i\in V \qquad (۳۶)$$

$$\tau_i \le \sum_{f\in F}\sum_{\forall j\in\{1\ldots MaxP_i\}} \beta_{v_i^j}^{f}, \forall i\in V \qquad (۳۷)$$

۳.۳.۵. بیشینه‌ی پاداش یال منحصربه‌فرد طی‌شده

متغیر موهومی ξ_r در صورتی که مسیر r پیمایش شود، برابر ۱ و در غیر این‌صورت برابر ۰ است. معادله‌ی ۳۸، تابع هدف را در مدل گسسته نشان می‌دهد و با مجموعه‌ی پاداش کسب‌شده برای پوشش یال‌ها توسط وسیله‌ی نقلیه برابر است. مجموعه‌ی محدودیت‌های ۳۹ و ۴۰، مسیرهای پیمایش‌شده برای وسیله‌ی نقلیه را مشخص می‌کنند.

$$Obj_5^D = Max \sum_{r\in R} \xi_r\, Dis_r\, WR_r \quad \text{s.t. (1)-(10)} \qquad (۳۸)$$

$$\sum_{f\in F}\sum_{t\in \hat{T}} \sigma_r^{ft} \le M\xi_r, \forall r\in R \qquad (۳۹)$$

$$\xi_r \le \sum_{f\in F}\sum_{t\in \hat{T}} \sigma_r^{ft}, \forall r\in R \qquad (۴۰)$$

در مسئله‌ی زمان پیوسته، مجموع امتیازهای کسب‌شده برای پوشش یال‌ها توسط تابع هدف ۴۱ تعیین می‌شود. محدودیت‌های ۴۲ و ۴۳ بیان می‌کنند در صورتی که یک وسیله‌ی نقلیه، هر یک از تکرارهای یک رأس به هر یک از تکرارهای یک رأس دیگر طی کرده باشد، مسیر اصلی بین آن دو رأس اصلی را ملاقات کرده است. حدود مجاز برای متغیر ξ_r توسط محدودیت ۴۴ تعیین می‌شود.

$$Obj_5^C = Max \sum_{r\in R} \xi_r\, Dis_r\, WR_r \quad \text{s.t. (16)-(24)} \qquad (۴۱)$$

$$\forall (i,j)\in R' \quad \sum_{f\in F}\sum_{1\le p_i\le MaxP_i}\sum_{1\le p_j\le MaxP_j} \alpha_{\left(v_i^{p_i}, v_j^{p_j}\right)}^{f} \le M\xi_r, \qquad (۴۲)$$

$$\forall (i,j)\in R' \quad \xi_r \le \sum_{f\in F}\sum_{1\le p_i\le MaxP_i}\sum_{1\le p_j\le MaxP_j} \alpha_r^{f}, \qquad (۴۳)$$

$$\xi_r \in \{0,1\}, \forall r\in R' \qquad (۴۴)$$

۴. حل مسئله

در بخش قبل در ابتدا محدودیت‌های مربوط به مدل‌های زمان‌های گسسته و پیوسته مطرح و پس از آن چهار نوع تابع هدف برای هر مسئله معرفی شده است. در بخش حاضر، به مقایسه‌ی دو مدل مذکور در مسائل مختلف و با مفروضه‌های متفاوت پرداخته شده است. برای اینکه مقایسه‌ی اخیر منصفانه باشد، واحدها، پارامترها و شرایط در مسائل گوناگون به‌صورت مشابه در نظر گرفته شده‌اند.

برای ساخت مثال‌های تصادفی، ۱۰ گراف هم‌بند به‌صورت تصادفی در یک ناحیه‌ی مربع‌شکل به طول ضلع ۱۰۰۰ متر با تعداد رئوس ۵ تا ۱۴ رأس (با افزایش یک رأس در هر مرحله) ساخته شده‌اند. سپس رأس با مختصات (۰،۰) به‌عنوان رأس موهومی گراف و یال (e_{v_0}, e_{v_1}) به گراف G اضافه و گراف G تشکیل شده است. همچنین برای اینکه مقادیر پارامترها در دو مسئله‌ی زمان‌های گسسته و پیوسته مشابه باشند؛ یک وسیله‌ی نقلیه‌ی نامتناجس برای هر مسئله و با سرعت ۸ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

$$T = \frac{\sum_{e\in E} Dis_e}{\sum_{f\in F} SPF^f \Big/ n(F)} \qquad (۴۵)$$

همچنین پارامترهای مربوط به پاداش یعنی WN و WR به‌صورت تصادفی در بازه‌ی [۱،۱۰] تنظیم شده‌اند. مسئله در دو حالت زمان‌های گسسته و پیوسته و ۵ تابع هدف به‌صورت دقیق با استفاده از موتور CPLEX در نرم‌افزار ۱۲.۱ IBM ILOG Cplex optimization studio مدل‌سازی و با کمک کامپیوترهای پردازش سریع (HPC) دانشگاه صنعتی شریف با تنظیمات nodes=1:ppn=16:mem=16GB حل شده است. برای هر مسئله، ۳۶۰۰ ثانیه حد زمان حل در نظر گرفته شده است (جدول ۱).

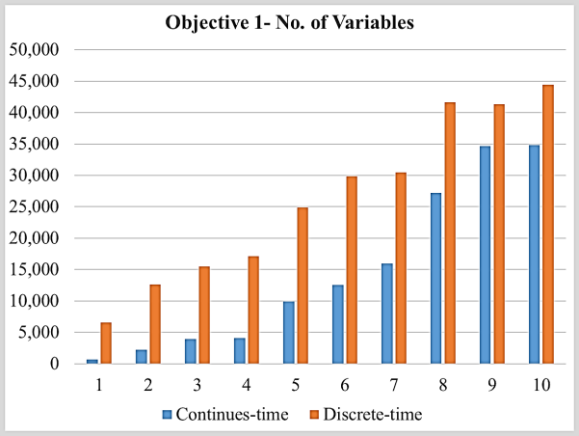
در جدول ۲ ، پنج تابع هدف تعریف و همچنین نمونه‌های ۱ الی ۱۰ از نظر زمان حل، تعداد دفعات دستیابی به جواب بهینه، تعداد متغیرها، و همچنین تعداد محدودیت‌ها در دو حالت زمان‌های گسسته و پیوسته حل و مقایسه شده‌اند. علاوه‌بر آن، جهت درک بهتر تفاوت دو مدل زمان‌های پیوسته و گسسته، شکل‌های ۱ الی ۳ به‌منظور مقایسه‌ی تابع هدف ۱ در ۱۰ نمونه‌ی تصادفی تولیدشده ارائه شده‌اند. توابع هدف دیگر، وضعیت تقریباً مشابهی با تابع هدف ۱ داشته و به‌دلیل جلوگیری از تراکم شکل‌ها، فقط نمودارهای مربوط به تابع هدف ۱ ترسیم شده است.

جدول ۱. نتایج حل دقیق نمونه‌های تصادفی.

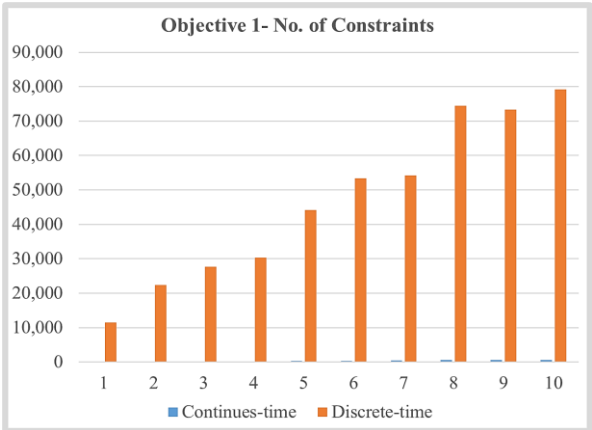
		Continues-Time				Discrete-time			
sample	objective	#Variables	#Constraints	Time (s)	GAP%	#Variables	#Constraints	Time (s)	GAP%
Sample 1	Obj 1	663	67	14.24	0%	6540	11448	34.36	0%
	Obj 2	662	67	52.43	0%	6540	11448	371.32	0%
	Obj3	662	67	44.99	0%	6540	11448	540.50	0%
	Obj 4	667	77	1.60	0%	6546	11460	35.18	0%
	Obj 5	676	95	111.58	0%	6554	11476	776.68	0%
Sample 2	Obj 1	2259	115	46.70	0%	12609	22419	255.52	0%
	Obj 2	2258	115	3600.47	164%	12609	22419	3716.85	-
	Obj3	2258	115	3600.83	295.48%	12609	22419	3617.76	-
	Obj 4	2264	127	0.46	0%	12616	22433	85.60	0%
	Obj 5	2278	155	3601.41	114.43%	12629	22459	3644.23	102.09%
Sample 3	Obj 1	3969	163	48.98	0%	15520	27648	38.08	0%
	Obj 2	3968	163	3600.62	213.73%	15520	27648	3617.23	-
	Obj3	3968	163	3601.61	225.46%	15520	27648	3612.01	-
	Obj 4	3975	177	0.45	0%	15528	27664	105.02	0%
	Obj 5	3992	211	3601.16	71.55%	15544	27696	3617.44	134.47%
Sample 4	Obj 1	4098	184	3.49	0%	17115	30321	109.08	0%
	Obj 2	4097	184	3600.74	294.79%	17115	30321	3615.59	-
	Obj3	4097	184	3600.44	283.29%	17115	30321	3611.66	-
	Obj 4	4105	200	0.53	0%	17124	30339	93.88	0%
	Obj 5	4123	236	3600.48	84.88%	17141	30373	3607.88	118.29%
Sample 5	Obj 1	9924	298	1.56	0%	24880	44165	203.76	0%
	Obj 2	9923	298	3600.51	334.01%	24880	44165	3673.42	-
	Obj3	9923	298	3603.88	405.40%	24880	44165	3672.53	-
	Obj 4	9932	316	1.08	0.00%	24890	44185	3624.25	16.95%
	Obj 5	9953	358	3600.65	105.86%	24910	44225	3629.65	229.74%
Sample 6	Obj 1	12525	331	28.08	0%	29845	53343	617.26	0%
	Obj 2	12524	331	3605.89	364.67%	29845	53343	3685.13	-
	Obj3	12524	331	3600.96	521.69%	29845	53343	3673.34	-
	Obj 4	12534	351	2.08	0%	29856	53365	3616.85	
	Obj 5	12560	403	3602.03	109.87%	29881	53415	3628.24	223.77%
Sample 7	Obj 1	15927	403	18.31	0%	30450	54204	482.38	
	Obj 2	15926	403	3600.96	455.88%	30450	54204	3632.67	-
	Obj3	15926	403	3600.46	485.68%	30450	54204	3633.04	-
	Obj 4	15937	425	1.19	0%	30462	54228	1526.66	0%
	Obj 5	15964	479	3600.86	117.32%	30488	54280	3643.31	184.54%
Sample 8	Obj 1	15927	403	18.31	0%	30450	54204	482.38	
	Obj 2	27176	535	3600.90	458.05%	41610	74463	3647.24	-
	Obj3	27176	535	3600.94	500.65%	41610	74463	3763.38	-
	Obj 4	27188	559	8.24	0%	41623	74489	3754.43	192.59%
	Obj 5	27220	623	3601.21	105.16%	41654	74551	3667.80	-
Sample 9	Obj 1	34665	643	93.82	0%	41296	73339	654.40	0%
	Obj 2	34664	643	3601.89	561.07%	41296	73339	3649.47	-
	Obj3	34664	643	3604.45	683.70%	41296	73339	3699.68	-
	Obj 4	34677	669	2.56	0%	41310	73367	3625.86	2.94%
	Obj 5	34708	731	3601.97	131.54%	41340	73427	3672.57	258.34%
Sample 10	Obj 1	34776	646	40.71	0%	44395	79231	1291.05	0%
	Obj 2	34775	646	3601.67	613.24%	44395	79231	3697.17	-
	Obj3	34775	646	3601.03	471.27%	44395	79231	3664.13	-
	Obj 4	34789	674	8.62	0%	44410	79261	3653.55	135.71%
	Obj 5	34825	746	3601.08	106.61%	44445	79331	3639.09	168.39%

جدول ۲ .مقایسه‌ی مسئله‌ی زمان‌های گسسته و پیوسته با توجه به توابع هدف و نمونه‌های تصادفی.

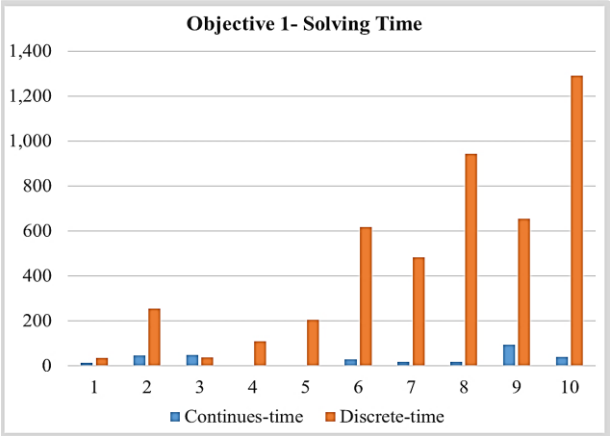
	Continues-time				Discrete-time			
objective	Time(s)	%Optimal	#Variables	#Constraints	Time(s)	%Optimal	#Variables	#Constraints
Obj 1	31.34	100%	13473	325	463.02	100%	25310	45032
Obj 2	3246.61	10%	14597	339	3330.61	10%	26426	47058
Obj 3	3245.96	10%	14597	339	3348.80	10%	26426	47058
Obj 4	2.68	100%	14607	358	2012.13	50%	26437	47079
Obj 5	3252.24	10%	14630	404	3352.62	10%	26459	47123
Sample 1	224.84	100%	666	75	351.61	100%	6544	11456
Sample 2	2169.97	40%	2260	125	2263.99	40%	12614	22430
Sample 3	2170.56	40%	3974	175	2197.96	40%	15526	27661
Sample 4	2161.14	40%	4104	198	2207.62	40%	17122	30335
Sample 5	2161.53	40%	9931	314	2960.72	20%	24888	44181
Sample 6	2167.81	40%	12533	349	3044.16	20%	29854	53362
Sample 7	2164.36	40%	15936	423	2583.61	40%	30460	54224
Sample 8	2165.76	40%	24937	531	3155.42	20%	39389	70434
Sample 9	2180.94	40%	34676	666	3060.39	20%	41308	73362
Sample10	2170.62	40%	34788	672	3188.99	20%	44408	79257
	Average solving time (obtimal results): 23.88 s				Average solving time(obtimal results): 453.61 s			
	Average solving time: 1955.77 s				Average solving time: 2501.45 s			
	No. of obtimal results: 23				No. of obtimal results: 18			
	% of obtimal results: 46%				% of obtimal results: 36%			



شکل ۱. تعداد متغیرها در تابع هدف ۱.



شکل ۲. تعداد محدودیت‌ها در تابع هدف ۱.



شکل ۳. زمان حل در تابع هدف ۱.

از آنجایی که تعداد محدودیت‌ها وابسته به زمان پایان مسئله‌ی مسیریابی است، با افزایش زمان مجاز برای گشت، تعداد محدودیت‌ها و متغیرها در مدل زمان گسسته به‌صورت نمایی افزایش یافته است. معمولاً انتظار می‌رود که با افزایش تعداد محدودیت‌ها و متغیرها، پیچیدگی مدل بیشتر شود و زمان حل افزایش یابد. در بین پارامترهای تعداد محدودیت و متغیر، معمولاً واکنش زمان حل مدل به تعداد محدودیت‌ها بیشتر است. مسئله‌ی حاضر، یکی از دلایل اصلی عملکرد بهتر مدل زمان پیوسته نسبت به مدل زمان گسسته است. در مدل زمان پیوسته، با وجود اینکه هر رأس به تعداد دفعاتی تکرار شده و متناسب با تکرار رئوس، یال‌های گراف نیز افزایش یافته است، ولی به‌دلیل ماهیت مستقل ساخت متغیر

و محدودیت جدید از زمان پایان گشت، تعداد متغیر و محدودیت کمتری نسبت به حالت زمان گسسته تولید شده است.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهاد مطالعات آتی

در نوشتار حاضر، مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه‌ی گشت آزاد بحث و بررسی شده است. در مسئله‌ی مسیریابی گشت آزاد، وسیله‌ی نقلیه می‌تواند به‌صورت آزادانه در گراف حرکت کند، چند بار یک رأس را طی و یا یک یال را پیمایش کند. همچنین می‌تواند به مقدار دلخواه در رئوس گراف توقف کند. مدل‌سازی مسئله‌ی مذکور می‌تواند در مدل‌سازی بسیاری از مسائل مسیریابی دیگر کمک کند. به‌عنوان مثال، مسیریابی گشت امنیت شهری، و مسیریابی همکاری و هماهنگی چند نوع وسیله‌ی نقلیه را می‌توان نمونه‌ای از این دسته مسائل معرفی کرد. پس از تعریف کلی مسئله و مروری بر ادبیات موجود، در بخش سه، مسئله‌ی پژوهش به دو صورت زمان‌های گسسته و پیوسته مدل‌سازی شده است. با توجه به آنکه در مدل زمان گسسته، تعداد محدودیت‌ها و متغیرها به زمان اجرای عملیات وابستگی دارد و همچنین زمان پیوسته نیاز به تغییراتی در گراف اصلی وجود دارد و این تغییرات به افزایش تعداد محدودیت‌ها و متغیرهای مدل می‌انجامد، توابع هدف گوناگونی برای مقایسه‌ی دو مدل اخیر از لحاظ زمان حل تعریف و پس از آن، پنج تابع هدف گوناگون برای مسئله معرفی شده است. در بخش چهار، ۱۰ نمونه‌ی تصادفی تولید و هر ۵ تابع هدف در دو مسئله‌ی زمان‌های پیوسته و گسسته حل شده‌اند. نتایج نشان داده‌اند که مدل زمان پیوسته نسبت به مدل زمان گسسته، عملکرد بهتری از خود ارائه داده است.

در نوشتار حاضر، مسئله‌ی گشت آزاد برای ناوگان‌های زمینی در یک گشت شهری بررسی شده است. اما در حوزه‌هایی مانند گشت هوایی (مانند گشت پهپاد بر فراز شهر)، مدل‌های ارائه‌شده باید طراحی مجدد شوند. همچنین مسئله‌ی گشت آزاد در مناطق برون‌شهری و جاده‌ها، با توجه به اینکه فاصله‌ی رئوس در گراف مرتبط با آن معمولاً زیاد است، توقف آزاد در اواسط یال می‌تواند یکی از شروط اصلی آن مسئله باشد. هر چند که در مسئله‌ی گشت آزاد شهری، که در نوشتار حاضر بررسی شده است، شرط توقف در اواسط یال بررسی نشده است و به عنوان یک پژوهش آتی می‌تواند مدل‌سازی و حل شود. مسئله‌ی دیگر که باید پژوهش شود، بررسی مدل‌های گوناگون توسعه داده‌شده‌ی پیشین در حوزه‌ی مسیریابی وسائط نقلیه، حمل‌ونقل، و زنجیره‌ی تأمین که همکاری دو یا چند ناوگان گوناگون در آن بررسی شده است و یا مسیریابی یک نوع وسیله‌ی نقلیه ولی با امکان اضافه‌شدن فرض گشت آزاد (مانند گشت خودروی پلیس) و حل مجدد مدل‌های بررسی‌شده با این فرض و مدل‌های ارائه‌شده در نوشتار حاضر است. یکی دیگر از کاربردهای پژوهش حاضر، در مورد ارائه‌ی روش‌های حل ابتکاری در مسائل دیگر باشد. به‌عنوان مثال، می‌توان در مرحله‌ی اول، مسئله‌ی اصلی را به دو زیرمسئله تقسیم کرد، که یکی از آن‌ها مسئله‌ی گشت آزاد باشد و پس از آن یک جواب شدنی برای زیرمسئله‌ی دیگر، یک جواب شدنی برای زیرمسئله‌ی گشت آزاد نیز باشد و در غیر این‌صورت آن جواب، قابل قبول نخواهد بود و یا جریمه‌ای برای قبول آن در نظر گرفت. در مجموع، مسئله‌ی گشت آزاد مطرح‌شده در نوشتار حاضر، شاید به تنهایی کاربرد کمتری نسبت به بسیاری از مسائل مسیریابی در دنیای واقعی داشته باشد، اما در صورتی که به عنوان یک مسئله‌ی کمکی و یا زیرمسئله‌ای از یک مسئله‌ی اصلی در نظر گرفته شود، کاربردهای بسیار زیادی در حوزه‌ی مذکور خواهد داشت.

References- منابع

1. Manshadian, H., Amalnick, M. S. and Torabi, S. A., 2023. Synchronized truck and drone routing under disastrous conditions (case study: urban thoroughfares disinfection). *Computers & Operations Research, 106295.* https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106295

2. Schrijver, A., 2005. On the history of combinatorial optimization (till 1960). *Handbooks in operations research and management science, 12, pp. 1-68.* https://doi.org/10.1016/S0927-0507(05)12001-5

3. Xing, Z., Tu, S. and Xu, L., 2020. Solve Traveling Salesman Problem by Monte Carlo Tree Search and Deep Neural Network. *arXiv preprint arXiv:2005.06879.* https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.06879

4. Zhou, A.-H., Zhu, L.-P., Hu, B., Deng, S., Song, Y., Qiu, H. and Pan, S., 2019. Traveling-salesman-problem algorithm based on simulated annealing and gene-expression programming. *Information, 10, 7.* https://doi.org/10.3390/info10010007

5. Ahmed, Z. H., 2020. Adaptive Sequential Constructive Crossover Operator in a Genetic Algorithm for Solving the Traveling Salesman Problem. GAs, 11. https://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110275

6. Guo, J. and Sato, Y., 2020. A Standardized Bare Bones Particle Swarm Optimization Algorithm for Traveling Salesman Problem. International Journal of Machine Learning and Computing, https://doi.org/10.18178/ijmlc.2020.10.3.960

7. Dahan, F., El Hindi, K., Mathkour, H. and Alsalman, H., 2019. Dynamic flying ant colony optimization (DFACO) for solving the traveling salesman problem. *Sensors, 19, 1837.* https://doi.org/10.3390/s19081837

8. Dror, M., 2012. Arc routing: theory, solutions and applications, *Springer Science & Business Media.* https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4495-1

9. Eiselt, H. A., Gendreau, M. and Laporte, G., 1995. Arc routing problems, part II: The rural postman problem. *Operations research, 43, pp. 399-414.* https://doi.org/10.1287/opre.43.3.399

10. Assad, A. A. and Golden, B. L., 1995. Arc routing methods and applications. Handbooks in operations

research and management science, 8, pp. 375-483. https://doi.org/10.1016/S0927-0507(05)80109-4

11. Yu, M., Jin, X., Zhang, Z., Qin, H. and Lai, Q., 2019. The split-delivery mixed capacitated arc-routing problem: Applications and a forest-based tabu search approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 132, pp. 141-162.* https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.09.017

12. Corberán, Á., Erdoğan, G., Laporte, G., Plana, I. and Sanchis, J. M., 2018. The Chinese Postman Problem with load-dependent costs. *Transportation Science, 52, pp. 370-385.* https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0774

13. Christofides, N., Benavent, E., Campos, V., Corberán, A. and MOTA, E., 1984. An optimal method for the mixed postman problem. *System modelling and optimization. Springer.* https://doi.org/10.1007/BFb0008937

14. Minieka, E., 1979. The Chinese postman problem for mixed networks. *Management Science, 25, pp. 643-648.* https://doi.org/10.1287/mnsc.25.7.643

15. Dror, M., Stern, H. and Trudeau, P., 1987. Postman tour on a graph with precedence relation on arcs. *Networks, 17, pp. 283-294.* https://doi.org/10.1002/net.3230170304

16. Orloff, C., 1974. A fundamental problem in vehicle routing. *Networks, 4, pp. 35-64.* https://doi.org/10.1002/net.3230040105

17. Lenstra, J. K. and Kan, A. R., 1976. On general routing problems. *Networks, 6, pp. 273-280.* https://doi.org/10.1002/net.3230060305

18. Hertz, A., Laporte, G. and Hugo, P. N., 1999. Improvement procedures for the undirected rural postman problem. *INFORMS Journal on computing, 11, pp. 53-62.* https://doi.org/10.1287/ijoc.11.1.53

19. Christofides, N., Campos, V., Corberán, A. and Mota, E., 1986. An algorithm for the rural postman problem on a directed graph. Netflow at pisa. *Springer.* https://doi.org/10.1007/BFb0121091

20. Corberán, Á., Plana, I. and Sanchis, J. M., 2014. The rural postman problem on directed, mixed, and windy graphs. Arc Routing: Problems, Methods, and Applications, *MOS-SIAM Series on Optimization, pp. 101-127.* https://doi.org/10.1137/1.9781611973679.ch6

21. Golden, B. L. and Wong, R. T., 1981. Capacitated arc routing problems. *Networks, 11, pp. 305-315.* https://doi.org/10.1002/net.3230110308

22. Elshaer, R. & AWAD, H., 2020. A taxonomic review of metaheuristic algorithms for solving the vehicle routing problem and its variants. *Computers & Industrial Engineering, 140, 106242.* https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106242

23. Konstantakopoulos, G. D., Gayialis, S. P. and Kechagias, E. P., 2020. Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: A literature review and classification. *Operational research, pp. 1-30.* https://doi.org/10.1007/s12351-020-00600-7

24. Moghdani, R., Salimifard, K., Demir, E. and Benyettou, A., 2021. The green vehicle routing problem: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production, 279, 123691.* https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123691

25. Raeesi, R. and Zografos, K. G., 2020. The electric vehicle routing problem with time windows and synchronised mobile battery swapping. *Transportation Research Part B: Methodological, 140, pp. 101-129.* https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.06.012

26. Wang, Z. and Sheu, J.-B., 2019. Vehicle routing problem with drones. *Transportation research part B: methodological, 122, pp. 350-364.* https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.03.005

27. Chung, S. H., Sah, B. and Lee, J., 2020. Optimization for drone and drone-truck combined operations: A review of the state of the art and future directions. *Computers & Operations Research, 123, 105004.* https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105004

28. Drexl, M., 2012. Synchronization in vehicle routing—a survey of VRPs with multiple synchronization constraints. *Transportation Science, 46, pp. 297-316.* https://doi.org/10.1287/trsc.1110.0400

29. Fleischmann, B., 1990. The vehicle routing problem with multiple use of vehicles. *Forschungsbericht Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, Universität Hamburg.* https://www.researchgate.net/publication/221704650_The_vehicle_routing_problem_with_multiple_use_of_vehicles

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2025), 41(1), 109-121

Sharif University of Technology

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

Research Article

Game-Theoretic Approach for Pricing Cloud Computing and Determining the Security Level of Security Provider Companies

Mahdie Sadeghian, Morteza Rasti-Barzoki* and Hossein Khosroshahi

Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan

* corresponding author: (rasti@cc.iut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:15 June 2024

Revised:17 August 2024

Accepted:31 August 2024

Keywords:

Pricing,
investment,
black hat hacker,
cybersecurity,
game theory.

Abstract

Since hardware may experience sudden failure and software solutions are often costly, users need an environment to perform computational and data storage tasks without expensive hardware and software. Cloud computing can provide this capability, but the presence of cyber hackers and their attacks raises user concerns about their data security. As information is precious, losing it can result in significant costs for the information owner. To address this problem, companies have emerged to ensure the safety of cloud computing services, and cloud users can entrust their information security to them. This article aims to examine the competition between security provider companies and cyber hackers using game theory and determine the strategies of each player to determine the game structure. These structures are based on the leader's decision to determine the security level initially or after an attack has occurred. The company decides what price to offer the user based on the value of the information, the amount of effort needed to return the information after a successful attack, the security level it needs to maintain, and the power structure. Similarly, the hacker decides how much effort to put in based on the value of the information. The results show that the price decreases linearly based on the information value when the company is the leader. In addition to the results obtained about the company's profit, it shows that in general, the company's profit, when it is a leader, is more than when it is a follower, and in particular, the company's profit based on the percentage of returned information in the leader's position is much higher than in the position of the follower. The level of security provided is also different according to the position of the company, and when the company is the leader, it is much higher than when the company is the follower, based on the hacker's credibility and the value of the returned information.

Funding

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

To Cite this article:

Sadeghian, M., Rasti-Barzoki, M. and Khosroshahi, H. 2025. A game-theoretic approach for pricing cloud computing and determining the security level of security provider companies, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, 41(1), 109-121. https://doi.org/10.24200/j65.2024.64530.2406

مجله علمی مهندسی صنایع و مدیریت شریف

https://sjie.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

یک رویکرد نظریه‌ی بازی برای قیمت‌گذاری رایانش ابری و تعیین سطح امنیت شرکت‌های ارائه‌دهنده‌ی امنیت

مهدیه صادقیان، مرتضی راستی برزکی* و حسین خسروشاهی

دانشکده‌ی مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

*نویسنده مسئول (rasti@cc.iut.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۰۳/۲۶

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۵/۲۷

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۶/۱۰

واژگان کلیدی:

قیمت‌گذاری،

سرمایه‌گذاری،

هکر کلاه سیاه،

امنیت سایبری،

نظریه‌ی بازی.

چکیده

سخت‌افزارها ممکن است دچار خرابی‌های ناگهانی شوند و راه‌حل‌های نرم‌افزاری اغلب پرهزینه‌اند، بنابراین کاربران به محیطی نیاز دارند که بتوانند بدون نیاز به سخت‌افزار و نرم‌افزار گران‌قیمت، محاسبات و ذخیره‌سازی داده‌ها را انجام دهند. رایانش ابری این امکان را فراهم می‌کند، اما نگرانی‌هایی درباره‌ی امنیت داده‌ها در برابر حملات سایبری وجود دارد. شرکت‌های امنیتی با تعیین سطح امنیت و قیمت‌گذاری براساس ارزش اطلاعات و درصد بازیابی می‌توانند از داده‌های کاربران محافظت کنند. آن‌ها می‌توانند راهبردهای متفاوتی مانند پیشگیری از حملات (ساختار رهبر) یا انتظار برای وقوع حمله و سپس مقابله (ساختار پیرو) را انتخاب کنند. در پژوهش حاضر، دو ساختار ذکرشده با حضور هکر کلاه سیاه بررسی شده است. نتایج نشان داده‌اند که ساختار قدرت، تأثیر زیادی در مقدار قیمت نداشته است، اما سود را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده است. همچنین مشخص شده است که ارزش اطلاعات و کاهش اعتبار شرکت در اثر حمله‌ی موفق، در سود و میزان تقاضا تأثیر زیادی دارد.

۱. مقدمه

چاک رابینز[1]، مدیرعامل سیسکو، می‌گوید اگر جرایم سایبری به‌عنوان یک کشور در نظر گرفته شوند، سومین اقتصاد بزرگ جهان را خواهند داشت[2]. با افزایش تهدیدهای سایبری، انتظار می‌رود تا سال ۲۰۳۱، هر دو ثانیه یک حمله‌ی سایبری رخ دهد. براساس گزارش‌های ارائه‌شده، مهاجمان سایبری بیش از ۴ میلیارد رکورد را در سال ۲۰۲۱ به سرقت برده‌اند[2]. به همین علت، تمرکز شرکت‌ها به‌طورفزاینده‌ای بر روی توسعه‌ی اقدام‌های امنیت سایبری است.[۱] در این راستا، سرمایه‌گذاری در امنیت سایبری با هدف کمینه‌سازی آسیب ناشی از حملات انجام می‌گیرد.[۲] ارائه‌دهندگان امنیت، مسئول ایجاد امنیت برای سایر شرکت‌ها هستند.[۳] شرکت‌های ارائه‌دهنده‌ی امنیت می‌توانند با تعیین سطح امنیت برای جلوگیری از حمله و سپس تعیین قیمت براساس ارزش اطلاعات و درصد قابل بازیابی اطلاعات، رهبری ساختار قدرت را در اختیار بگیرند. از طرف دیگر، شرکت‌های مذکور می‌توانند با انتظار برای وقوع یک حمله، موقعیت پیرو را بگیرند و سپس سطح امنیتی را براساس مهارت هکر و ارزش اطلاعات تعیین کنند. در این حالت، حمله در حال وقوع است و هکر برای دستیابی به اطلاعات تلاش می‌کند و شرکت در حال رسیدگی و ایجاد امنیت است. آمارهای اخیر نشان می‌دهند که فقط ۰/۰۵٪ از شرکت‌ها مایل به گرفتن موقعیت رهبری هستند[2].

در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای در مورد امنیت سایبری، راهبردهای شرکت‌ها و هکرها، مسائل سرمایه‌گذاری و قیمت‌گذاری در امنیت سایبری انجام شده است.[۴] قیمت‌گذاری از مسائل مهمی است که نه فقط در حوزه‌ی امنیت سایبری، بلکه در حوزه‌های مختلف دیگری، از جمله: حوزه‌ی زنجیره‌ی تأمین چندکاله صورت می‌گیرد.[۵] چن[3] و همکاران (۲۰۲۲)،[۶] به قیمت‌گذاری زنجیره‌ی تأمین چندکاله با استفاده از قرارداد تقسیم درآمد پرداخته‌اند. در حوزه‌ی امنیت سایبری نیز، بارتلوما[4] (۲۰۱۸)،[۷] مدل شای (۲۰۰۱)،[۸] را توسعه داده است، که در سه سطح گسترش یافته است. در مدل ذکرشده، شرکت قیمت را در سطح اول ارائه می‌کند و سپس براساس آن، اندازه‌ی شبکه تعیین می‌شود.[۹] در زمینه‌ی قیمت‌گذاری، ابتدا مدلی ارائه می‌شود، که قیمت براساس تقاضا و عرضه‌ی واقعی ابر تعیین می‌شود.

[1] Chuck Robbins

[2] cybersecurityventures.com

[3] Chen

[4] Bartholomae

استناد به این مقاله:

صادقیان ، مهدیه، راستی برزکی، مرتضی، و خسروشاهی، حسین، ۱۴۰۴. **یک رویکرد نظریه‌ی بازی برای قیمت‌گذاری رایانش ابری و تعیین سطح امنیت شرکت‌های ارائه‌دهنده‌ی امنیت**. مهندسی صنایع و مدیریت شریف ، ۴۱(۱)، صص.۱۰۹-۱۲۱. https://doi.org/10.24200/j65.2024.64530.2406

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

ماهیت جرایم سایبری در مقایسه با گذشته به‌دلیل پیچیدگی روزافزون هکرها پیچیده‌تر شده است. چنگ[1] و همکاران (۲۰۲۲)،[۱۰] هکرها را به ۱۳ نوع دسته‌بندی کرده‌اند. سپس، ۷ انگیزه و راهبرد مرتبط با آن‌ها را بررسی و از آن به‌عنوان چارچوبی برای کمک به تحلیل‌گران و مهندسان امنیتی استفاده کرده‌اند. طبقه‌بندی دیگر هکرها مربوط به سه دسته‌ی: کلاه سفید، کلاه خاکستری، و کلاه سیاه است. کالدول[2] (۲۰۱۱)،[۱۱] در مورد هکرهای اخلاقی یا کلاه سفید، بحث کرده و آن‌ها را برخلاف هکرهای کلاه سیاه دانسته‌اند، که به بهبود شرکت‌ها و افزایش امنیت با افزایش قابلیت‌های آن‌ها کمک می‌کنند. کهن[3] و همکاران (۲۰۲۲)،[۱۲] همکاری و عدم همکاری هکرهای کلاه خاکستری تصمیم به همکاری با ارائه‌ی جزئیات آسیب‌پذیری به شرکت ارائه‌دهنده‌ی امنیت می‌کند، شرکت مذکور نیز مایل است تا با هکر همکاری کند و آسیب‌پذیری خود را کاهش دهد.

یکی از راه‌های بررسی سطوح امنیت و اشتراک‌گذاری اطلاعات، استفاده از رویکرد نظریه‌ی بازی است.[۱۳] نظریه‌ی بازی، پتانسیل بالایی برای ایجاد یک محیط تحلیلی در حوزه‌ی امنیتی دارد، که با درنظرگرفتن حملات و دفاع، تعاملات بین هکر و شرکت را بررسی می‌کند.[۱۴] همچنین، طبق یک نظرسنجی، نظریه‌ی بازی می‌تواند درک پژوهشگران از مسائل امنیتی و حریم خصوصی را تسهیل کند،[۱۵] و چارچوبی است که به مهندسان امنیتی کمک می‌کند تا راهبردهای بهینه را برای کاهش آسیب حملات سایبری به‌کار گیرند.[۱۶] در این حوزه، پژوهش‌های بسیاری انجام شده است.[۷، ۸، ۱۲، و ۱۷-۱۹]

در برخی پژوهش‌های پیشین، کاربر ابری به‌عنوان بازیکنی بوده است که بین دو راهبرد اشتراک و عدم اشتراک اطلاعات خود، تصمیم‌گیری کرده است؛ در صورتی که ارزش اطلاعات آن مشاهده نشده است.[۱۹] علاوه‌بر این، اگرچه بارتلوما (۲۰۱۸)،[۷] بازی هکر و شرکت را با استفاده از رویکرد استکلبرگ حل کرده است، اما فقط موقعیت رهبر برای شرکت بیان شده است. در صورتی که براساس گزارش‌های اعلام‌شده[2]، شرکت می‌تواند در جایگاه پیرو نیز باشد. همچنین در نوشتارهای ارائه‌شده، نوع هکر نیز مطرح نبوده است.

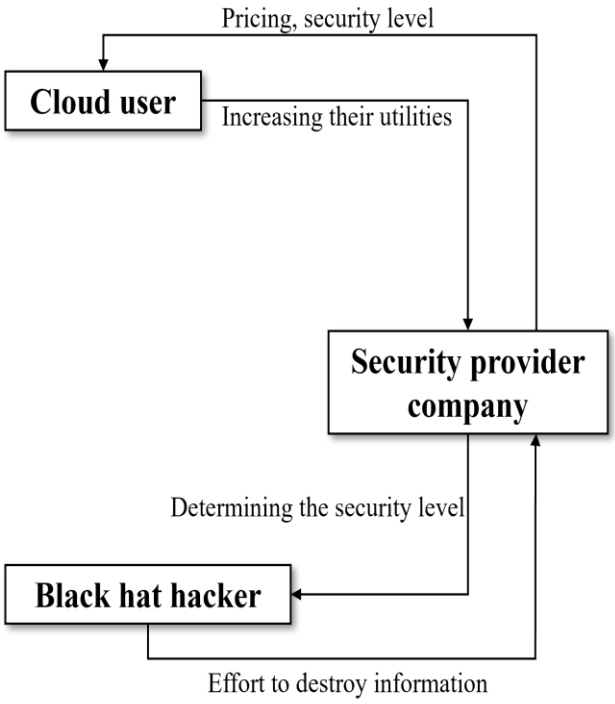
نوآوری پژوهش حاضر، وجود کاربر ابری به‌عنوان بازیکن خارجی است، که ارزش اطلاعات وی در به‌دست‌آمدن مقدار تقاضا مؤثر است. علاوه‌بر این، نوشتار حاضر ارزش اطلاعات از دست‌رفته را در تعیین موقعیت یک شرکت براساس میزان تلاش هکر در نظر می‌گیرد. همچنین نوع هکر و میزان تلاش او برای دستیابی به اطلاعات نیز مد نظر بوده است؛ تا توابع سود، دقیق‌تر مدل‌سازی شوند. وجود دو ساختار قدرت برای قیمت‌گذاری و تعیین سطح امنیت نیز از دیگر نوآوری‌های پژوهش حاضر به حساب می‌آیند. سؤال‌های پژوهش که بررسی شده‌اند، به این شرح هستند:

- قیمت تعادلی و سطح امنیت برای زمانی که شرکت تأمین‌کننده‌ی امنیت، رهبر باشد، چقدر است؟
- قیمت تعادلی و سطح امنیت برای زمانی که شرکت تأمین‌کننده‌ی امنیت، پیرو باشد، چقدر است؟
- درصد اطلاعات بازگشت‌شده پس از حمله‌ی موفق و ارزش اطلاعات کاربر ابری چه تأثیری در سود شرکت دارد؟

در ادامه‌ی پژوهش حاضر، در بخش ۲، مسئله‌ی بررسی‌شده تشریح و نمادها تعریف شده‌اند. در ادامه، مدل‌سازی مربوط به هر بازیکن صورت گرفته و جواب‌های تعادلی ارائه شده است. در بخش ۳، با استفاده از مثال عددی، به تجزیه‌وتحلیل مسئله پرداخته شده و نتیجه‌گیری صورت گرفته است. درنهایت در بخش ۰ نتیجه‌گیری کلی و پیشنهادهای آتی بیان شده است.

۲. بیان مسئله و مدل‌سازی

ساختارهای قدرت بازی موردمطالعه به گونه‌ای است که در ابتدا کاربر با افزایش مطلوبیت خود، اهمیت امنیت اطلاعات خود را مشخص می‌کند. در واقع، کاربر، یک بازیکن خارجی[4] است. سپس زمانی که مطلوبیت کاربر مثبت شود، تقاضا به‌دست می‌آید، که این مطلوبیت از توزیع یکنواخت پیروی می‌کند. متعاقباً، برای قیمت‌گذاری، هکر و شرکت تأمین‌کننده‌ی امنیت درگیر یک بازی استکلبرگ[5] می‌شوند، که در آن شرکت تأمین‌کننده‌ی امنیت به‌عنوان رهبر عمل می‌کند یا برعکس؛ و این مسئله به روش استقرا به عقب[6] حل می‌شود. مسئله‌ی بررسی‌شده، شامل دو گروه بازیکن است: گروه اول، شامل هکرهایی است که با حملات خود، امنیت سرویس ابری را مختل می‌کنند و به‌دنبال به‌دست‌آوردن اطلاعات کاربر هستند. گروه دوم، شامل شرکت‌های ارائه‌ی دهنده امنیت است، که قصد مبارزه با حملات هکرها را دارند. هر چه شرکت‌ها در ایجاد امنیت سرمایه‌گذاری بیشتری کنند، سطح امنیت بیشتر می‌شود و تعداد کاربرانی که از خدمات آن‌ها استفاده می‌کنند، افزایش می‌یابد و باعث افزایش سود شرکت می‌شود. درشکل ۱، توپولوژی مسئله و فعالیت هر بازیکن مشاهده می‌شود. این تذکر لازم است که در نوشتار حاضر، فقط به بررسی هکرهای کلاه سیاه پرداخته شده است.



شکل ۱. شماتیک مسئله.

[1] Chng
[2] Caldwell
[3] Cohen
[4] exogenous player
[5] Stackelberg game
[6] backward induction

۱.۲. نمادها

در ابتدا نمادهای به کاررفته در مسئله معرفی شده‌اند.

- اندیس‌ها

C اندیس کاربر ابری

F اندیس شرکت تأمین‌کننده‌ی امنیت

H اندیس هکر کلاه سیاه

- پارامترها

V متغیر تصادفی مربوط به ارزش بیشینه‌ی اطلاعات کاربر است، که از یک توزیع یکنواخت پیروی می‌کند (واحد پولی).

δ درصد آسیب واردشده به اطلاعات بعد از حمله‌ی موفق (بدون واحد).

$d(p)$ تقاضای کاربر ابری.

M کل پولی که هکر برای هک‌کردن دریافت می‌کند.

y درصد پولی که هکر قبل از حمله دریافت می‌کند (بدون واحد).

O اعتبار هکر با توجه به اطلاعاتی که در سایت تور ۱ از آن هکر موجود است.

λ درصد افزایش اعتبار هکر بعد از یک حمله‌ی موفق که در بازه‌ی ۰ و ۱ است (بدون واحد).

θ درصد اطلاعاتی که شرکت بعد از حمله‌ی موفق می‌تواند بازیابی کند (بدون واحد).

N تعداد کاربران ابری.

k ضریب تبدیل هزینه‌ی سطح امنیت در تابع سود شرکت.

k_1 ضریب تبدیل هزینه‌ی تلاش هکر در تابع سود هکر.

μ ضریب تبدیل موفقیت حمله به واحد پولی.

α ضریب کاهش اعتبار شرکت در صورت موفقیت حمله.

γ ضریب تبدیل اعتبار هکر به واحد پولی.

- متغیرهای تصمیم

q سطح امنیت ایجادشده، که عددی بین ۰ و ۱ است.

p قیمتی که شرکت به کاربر ابری ارائه می‌دهد (واحد پولی).

e میزان افزایش تلاش هکر برای هک موفق، که تابعی از زمان و عددی بین ۰ و ۱ است.

- توابع وابسته

u_C تابع مطلوبیت کاربر ابری (واحد پولی).

u_F تابع سود شرکت تأمین‌کننده‌ی امنیت (واحد پولی).

u_H تابع سود هکر (واحد پولی).

۲.۲. مفروضات مسئله

در مورد مدل مربوط به کاربران ابری، متغیر تصمیم‌گیری وجود ندارد و فقط مطلوبیت مثبت تعیین می‌شود، که باعث می‌شود امنیت خود را به شرکت ارائه‌دهنده‌ی امنیت بسپارند. تقاضا برای شرکت تأمین‌کننده‌ی امنیت پس از تصمیم‌گیری در مورد این محدوده و درنظرگرفتن توزیع یکنواخت به‌دست می‌آید. در مدل هکر، از آنجایی که هکرهای کلاه سیاه موردتوجه هستند؛ متغیر تصمیم، میزان تلاش موردنیاز برای به‌دست‌آوردن اطلاعات براساس ارزش اطلاعات کاربر است. مدل نهایی مربوط به شرکت تأمین‌کننده‌ی امنیت، دو متغیر تصمیم دارد. متغیر تصمیم اول، با قیمتی مرتبط است که کاربران ابری باید ارائه دهند تا امنیت خود را تضمین کنند و متغیر تصمیم دوم، سطح امنیت ایجادشده است. هکرها اعتبار دارند و به ازاء هر هک موفق، اعتبار آن‌ها افزایش می‌یابد و بالعکس.

۳.۲. تابع مطلوبیت و سود بازیکنان

رابطه‌ی ۱، تابع مطلوبیت کاربر ابری را نشان می‌دهد، که به‌طورکلی شامل سطح امنیت ایجادشده برای حفظ اطلاعات کاربر و هزینه‌ای است که باید برای ایجاد آن بپردازد.

$$u_c = V - p - (1-q+e)(1-\theta)\delta V \qquad (۱)$$

که در آن، V متغیر تصادفی است که بیشینه‌ی ارزش اطلاعات کاربر را نشان می‌دهد و از یک توزیع یکنواخت پیروی می‌کند.[۲۰] p هزینه‌ای است که کاربر برای برقراری سطح امنیت به شرکت می‌پردازد. پارامتر q سطح امنیت ایجادشده در یک شرایط عادی را نشان می‌دهد، که براساس نوشتار فنگ و همکاران،[۱۸] عددی بین ۰ و ۱ خواهد داشت. پارامتر e نشانگر تلاش اضافی موردنیاز یک هکر برای افزایش احتمال یک حمله‌ی موفق است. بخش‌های اول و دوم تابع ۱، بیشینه‌ی ارزش و پولی را که کاربر باید پرداخت کند، نشان می‌دهند. بخش سوم، مربوط به موفقیت حمله است، که باعث آسیب به اطلاعات و کاهش رضایت مشتری و در نتیجه کاهش مطلوبیت می‌شود. کاهش مطلوبیت به‌علت حمله‌ی موفق زمانی اتفاق می‌افتد که مشتریان از حمله مطلع شوند و این در صورتی است که اطلاعات‌شان آسیب ببیند یا از بین برود و بازیابی نشود. حمله در صورتی موفق است که هکر تلاش کند و سطح امنیت شکسته شود یا به‌عبارتی برقرار نشود. برقراری سطح امنیت با متغیر تصمیم q نشان داده می‌شود و چون عددی بین ۰ و ۱ است، عدم برقراری آن به‌صورت $1-q$ خواهد بود. تلاش هکر نیز چون مؤثر است، به احتمال اخیر اضافه می‌شود. تمامی این بخش به‌صورت $1-q+e$ نوشته شده است. حال در صورت موفقیت حمله، شرکت تلاش می‌کند تا اطلاعات آسیب‌دیده را بازیابی کند. درصد اطلاعات بازیابی‌شده با پارامتر θ نشان داده شده است و در نتیجه، عدم بازیابی اطلاعات $1-\theta$ خواهد بود. پس اگر حمله موفق باشد و اطلاعات بازیابی نشود، با توجه به درصد آسیب اطلاعات، که با δ نشان داده شده است، تقاضا کاهش می‌یابد. این استدلال منجر به تشکیل بخش سوم تابع مطلوبیت کاربر می‌شود. این تذکر لازم است که درصد δ در بیشینه‌ی ارزش کل ضرب می‌شود تا میزان آسیب اطلاعات به‌دست آید.

[1] The Onion Router

کاربر زمانی امنیت اطلاعات خود را به شرکت تأمین‌کننده‌ی امنیت می‌سپارد که مطلوبیت مثبتی داشته باشد. بنابراین لازم است تا $u_c \geq ۰$ باشد و سپس V از روش اخیر به‌دست آورده شود. کمترین حالتی که ممکن است کاربر امنیت خود را به شرکت تأمین‌کننده‌ی امنیت بسپارد، در حالت $u_C = ۰$ است. در نتیجه، مطابق رابطه‌ی ۲، تقاضا مشخص می‌شود. معادله‌ی ۳، میزان تقاضا برای شرکت تأمین‌کننده‌ی امنیت را نشان می‌دهد؛ که براساس روابط موجود در کتاب فیلیپس (۲۰۲۱)،[۲۱] نوشته شده است؛ که در آن، برای به‌دست‌آوردن تابع تقاضا، از تمایل مشتری برای خرید استفاده می‌شود و برای سادگی فرض می‌شود که تمایل مشتری به پرداخت، دقیقاً برابر قیمت است؛ که این مقدار، حد پایین انتگرال را خواهد داد و سپس با به‌دست‌آوردن تابع تجمعی مربوط به تابع چگالی احتمال یکنواخت، تقاضا به‌دست می‌آید.

$$u_c = 0$$

$$V = \frac{p}{1-\delta-e\delta+q\delta+2\delta\theta+2e\delta\theta-2q\delta\theta} \tag{۱}$$

$$V \sim U(0,1) \tag{۲}$$

$$d(p) = N\int_{V\to\frac{p}{1-\delta-e\delta+q\delta+2\delta\theta+2e\delta\theta-2q\delta\theta}}^{1} dx$$
$$= 1-\frac{p}{1+\left(1+e-q\right)\delta\left(-1+2\theta\right)} \tag{۳}$$

در ادامه، براساس رابطه‌ی اخیر، تابع سود شرکت مطابق معادله‌ی ۴ به‌دست می‌آید. برای سهولت حل، در ادامه، تعداد کاربران ابری نرمال و N، ۱ در نظر گرفته شده است. معادله‌ی ۵، تابع سود هکر با توجه به موفقیت و عدم موفقیت حمله را نشان می‌دهد. برای تبدیل توابع سود به واحد پولی، نیاز به ضرایب تبدیل است. بدین منظور ضرایب تبدیل برای هر عبارت به توابع اضافه شده‌اند، که در بخش ۱.۲. **نمادها** نیز معرفی شده‌اند.

$$u_F = d(p) * p - \frac{(kq^2)}{2} - (1-q+e)\alpha\mu \tag{۴}$$

$$u_H = My + (۱-q+e)(۱-y)M + (۱-q+e)$$
$$\lambda O\gamma - (q-e)(۱-\lambda)O\gamma - \frac{(k_۱e^۲)}{۲} \tag{۵}$$

حال باید با توجه به ساختارهای مختلف، مسئله را حل کرد. در ابتدا فرض بر این است که تأمین‌کننده‌ی امنیت، تصمیم‌گیر اول و رهبر است و در مورد سطح امنیت موردنیاز، تصمیم و قیمت را به کاربر اعلام می‌کند. مقادیر تعادلی براساس اثبات‌های صورت‌گرفته در ۱۰ و با روش استقرا به عقب به‌دست آمده است. روابط ۶ الی ۸، مقادیر تعادلی را نشان می‌دهند.

برای بررسی ساختار قدرت دیگر بازی، باید هکر در ابتدا تصمیم‌گیرنده باشد و شرکت تأمین‌کننده‌ی امنیت به عنوان پیرو عمل کند. مقادیر تعادلی براساس اثبات‌های صورت‌گرفته در پیوست ۱ و با روش استقرا به عقب به‌دست آمده است. روابط ۹ الی ۱۱، مقادیر تعادلی در این ساختار قدرت را نشان می‌دهند.

$$q^* = \frac{\delta-2\delta\theta+4\alpha\mu-4\alpha\theta\mu}{4k} \tag{۱۰}$$

$$e^* = \frac{M-My+O\gamma-O\gamma\lambda}{k_1}) \tag{۱۱}$$

۳. مثال عددی و تحلیل حساسیت

در ادامه، با استفاده از مثال عددی سعی شده است تا مسئله‌ی موردنظر تحلیل شود. شایان ذکر است علاوه‌بر مثال عددی اخیر، ۱۹ مثال عددی دیگر بررسی شده است، تا راستی‌آزمایی به‌دست‌آمده بررسی شود. برای بررسی میزان تفاوت مقادیر سود در نمونه‌های مختلف، از آزمون آماری فریدمن استفاده شده است. براساس نتیجه‌ی آزمون فریدمن و مقایسه با مقدار p-value که برابر ۰/۰۰۹۵۵ بوده است، فرض تفاوت بین نتایج، رد شده و در نتیجه بین مقادیر سود، تفاوت چشم‌گیری براساس نمونه‌های ایجادشده وجود نداشته است. محاسبات مربوط به این آزمون در ۲۰ ارائه شده است.

۱.۳. مثال عددی

جهت فهم بهتر مسئله، یک مثال عددی از مسئله ارائه و سپس به تحلیل حساسیت توابع سود نسبت به پارامترهای مختلف پرداخته و نکات مهم آن بیان شده است. در جدول ۱، مقادیر استفاده‌شده برای پارامترها ارائه شده‌اند. شایان ذکر است برای اینکه تمام مقادیر یک واحد شوند، با توجه به منابع هر یک، نرمال شده‌اند.

با حل مسئله‌ی حاصل از پارامترهایی که مقادیر آن در جدول ۱ ارائه شده است، این نتایج به‌دست آمده است: در شکل ۲، سود شرکت در دو سناریو براساس پارامتر ضریب کاهش اعتبار شرکت مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، براساس پارامتر مذکور، سود شرکت در حالت پیروبودن بیشتر است. در شکل ۳، سود شرکت براساس درصد بازگشت اطلاعات مشاهده می‌شود. در این حالت نیز سود شرکت در جایگاه پیرو بیشتر بوده و هر چه درصد بازگشت اطلاعات بیشتر بوده

$$p^* = \frac{1}{8}\left(4+\frac{\delta\left(-1+2\theta\right)\left(4k-\delta+2\delta\theta-4\alpha\mu\right)}{k}-\frac{4\delta\left(-1+2\theta\right)\left(M\left(-1+y\right)-O\gamma\lambda\right)}{k_1}\right) \tag{۶}$$

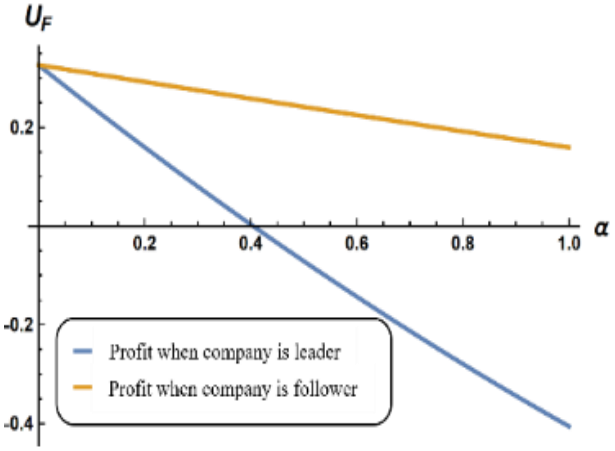
$$q^* = \frac{\delta-2\delta\theta+4\alpha\mu}{4k} \tag{۷}$$

$$e^* = \frac{M-My+O\gamma\lambda}{k_1} \tag{۸}$$

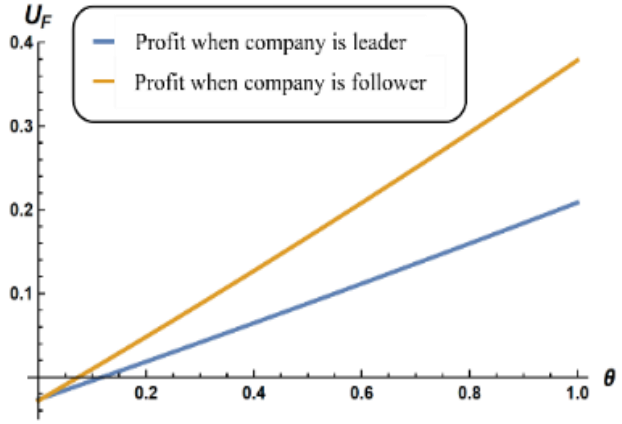
$$p^* = \frac{1}{8}\left(4+\frac{\delta\left(-1+2\theta\right)\left(4k+\delta\left(-1+2\theta\right)+4\alpha\left(-1+\theta\right)\mu\right)}{k}-\frac{4\delta\left(-1+2\theta\right)\left(M\left(-1+y\right)+O\gamma\left(-1+\lambda\right)\right)}{k_1}\right) \tag{۹}$$

جدول ۱. مقادیر در نظر گرفته‌شده برای پارامترها در مثال‌ها و تحلیل حساسیت‌ها.

Parameter	Value	Ref
k	1	[22]
α	3	Interview
k_1	3	[22]
O	0.4	[22]
γ	0.2	[22]
δ	0.3	[22]
λ	0.2	Interview
μ	1.5	Interview
M	4	[16]
y	0.5	Interview

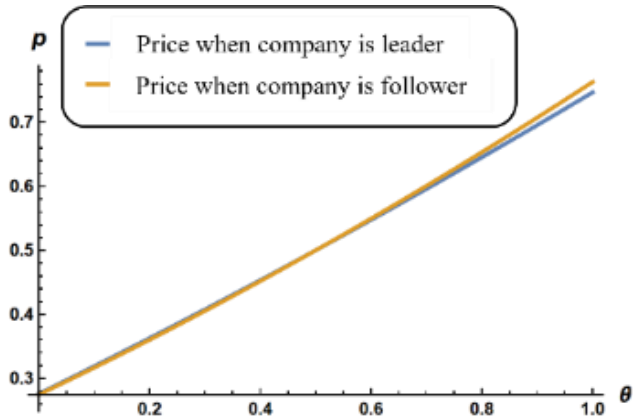


شکل۲. مقایسه‌ی سود شرکت براساس کاهش اعتبار شرکت در حمله‌ی موفق.

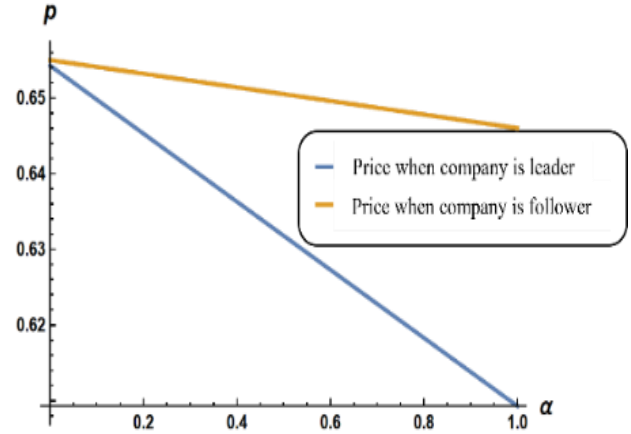


شکل۳. مقایسه‌ی سود شرکت براساس درصد اطلاعات بازگشتی.

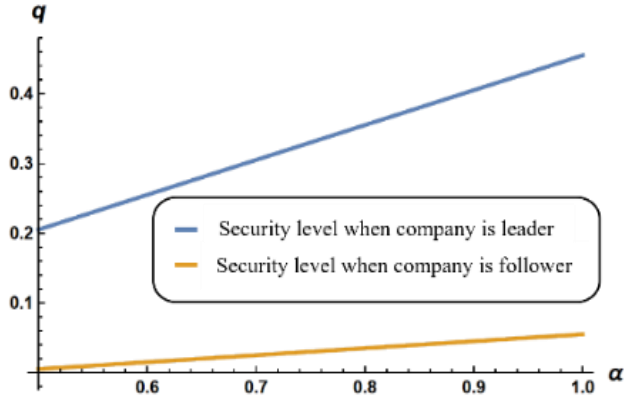
است، سود افزایش یافته است. درشکل ۴، مقایسه‌ی قیمت در دو ساختار قدرت مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشخص است، قیمت‌ها در دو ساختار مذکور، تقریباً یکسان تعیین شده است. در ادامه، در شکل ۵، قیمت براساس ضریب کاهش اعتبار شرکت مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، براساس پارامتر مذکور، قیمت تعیین‌شده در وضعیتی که شرکت رهبر است، کمتر از حالتی بوده است که شرکت پیرو باشد. در شکل ۶، متغیر تصمیم سطح امنیت ایجادشده براساس



شکل ۴. قیمت شرکت براساس درصد اطلاعات بازگشتی.



شکل ۵. قیمت تعیین‌شده توسط شرکت براساس کاهش اعتبار شرکت هنگام حمله‌ی موفق.



شکل ۶. سطح امنیت تعیین‌شده براساس کاهش اعتبار شرکت هنگام حمله‌ی موفق.

ضریب کاهش شرکت مشاهده می‌شود. بدیهی است که هر چقدر ضریب کاهش شرکت بیشتر باشد، لازم است تا سطح امنیت بالاتری تعیین شود تا اعتبار شرکت کمتر آسیب ببیند.

براساس نمودارهای اخیر و همچنین تحلیل‌های صورت‌گرفته، این نتایج به‌دست آمده است:

۱) با توجه به نمونه‌های مختلف شبیه‌سازی‌شده و مقادیر به‌دست‌آمده و همچنین نمونه‌ی ارائه‌شده در پژوهش حاضر، دو پارامتر درصد بازیابی اطلاعات

و ضریب کاهش اعتبار شرکت، دو پارامتر اساسی در مقدار سود هستند. شرکت‌های تأمین‌کننده‌ی امنیت، با توجه به دو پارامتر مذکور و اهمیت هر یک، می‌توانند ساختار قدرت و قیمت خود را تعیین کنند.

۲) در شکل ۴ مشاهده می‌شود زمانی که تصمیم براساس درصد اطلاعات بازیابی شده باشد، قیمت تعیین‌شده توسط شرکت، در درصد بازیابی پایین در دو ساختار تفاوتی ندارند. هر چه درصد بازیابی افزایش یابد، قیمت تعیین‌شده در حالت پیرو، بیشتر خواهد بود؛ اما این تغییر زیاد نیست و می‌توان گفت قیمت در دو ساختار تقریباً یکسان تعیین می‌شود. با وجود این، مطابق شکل ۳، سود شرکت براساس پارامتر اخیر، در ساختار رهبربودن شرکت، تفاوت زیادی با سود در حالت پیرو دارد. این تغییر با وجود یکسان‌بودن تقریبی قیمت‌ها، ناشی از تفاوت سطح امنیت ایجادشده و تلاش هکر در دو ساختار است. تفاوت سطح امنیت ایجادشده در سود شرکت مطابق با نتایج مطالعه‌ی بارتلوما (۲۰۱۸)،[۷] است.

۳) درشکل ۵، قیمت تعیین‌شده براساس پارامتر ضریب کاهش اعتبار شرکت در صورت موفقیت حمله مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن مشخص است که هر چه میزان کاهش اعتبار بیشتر باشد، قیمت کاهش یافته است. زیرا با توجه به کاهش اعتبار، شرکت محبوبیت کمتری در بین مشتریان خود خواهد داشت. بنابراین، لازم است شرکت برای جذب مشتری، قیمت خود را کاهش دهد و از این طریق، زیان وارده را جبران کند. همچنین در شکل اخیر مشاهده می‌شود که قیمت در حالت رهبربودن، بسیار کمتر تعیین شده است. درشکل ۲، تفاوت سود براساس پارامتر کاهش اعتبار در دو ساختار مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، سود در حالت رهبربودن نیز کاهش بسیاری نسبت به حالت پیروبودن داشته است.

۴) سطح امنیت تعیین‌شده براساس پارامتر ضریب کاهش اعتبار شرکت، زمانی که شرکت پیرو باشد، بسیار کمتر از زمانی است که شرکت رهبر باشد. این امر به وضوح در شکل ۶ مشاهده می‌شود. این نتیجه، یکی دیگر از دلایلی است که باعث می‌شود سود در حالت رهبربودن کمتر از حالت پیروبودن باشد؛ زیرا سطح امنیت در حالت رهبربودن شرکت، بالاتر است و در نتیجه، هزینه‌ای که شرکت برای تأمین سطح امنیت متحمل می‌شود، بسیار بیشتر است و باعث کاهش سود می‌شود.

۵) بالاتربودن سطح امنیت ایجادشده در حالت رهبربودن شرکت، به این علت است که شرکت باید قبل از حمله و بدون اطلاع از وضعیت حمله و مهارت هکر، سطح امنیت را ایجاد کند و قیمت را ارائه دهد.[۷] بنابراین، لازم است تا در حد امکان با توجه به ارزش اطلاعات، امنیت ایجاد شود و در نتیجه ممکن است سطح امنیت بسیار بالاتر از حد موردنیاز تعیین شود و این می‌تواند دلیل دیگری باشد که فقط ۰/۰۵٪ از شرکت‌ها ساختار اخیر را انتخاب می‌کنند[۲].

۶) تحلیل پارامتریک متغیر تصمیم مربوط به سطح امنیت ایجادشده نشان می‌دهد اگر تمامی پارامترهای موجود در متغیر تصمیم مذکور، مثبت باشد، همواره سطح امنیت ایجادشده در حالت رهبربودن شرکت، بیشتر از حالت پیروبودن آن است.

۷) تحلیل پارامتریک متغیر تصمیم تلاش هکر نشان می‌دهد اگر $\lambda > \frac{1}{2}$ و بقیه‌ی پارامترها مثبت باشد، تلاش هکر زمانی که شرکت رهبر باشد، بیشتر از زمانی است که شرکت پیرو باشد.

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در نوشتار حاضر، به بررسی رابطه‌ی بین هکرها و یک شرکت ارائه‌دهنده‌ی امنیت پرداخته شده است، تا قیمت و سطح امنیتی موردنیاز شرکت بسته به ساختار قدرت تعیین کند. پس از مدل‌سازی و بررسی ساختارهای مختلف قدرت و با استفاده از داده‌های موجود در ادبیات و مصاحبه با کارشناسان امنیت سایبری، قیمت‌ها و سود در موقعیت‌های مختلف شرکت مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند جایگاه شرکت در ساختار قدرت، تأثیر زیادی در قیمت ارائه‌شده براساس درصد بازیابی اطلاعات ندارد. با وجود این، سود در حالت پیروبودن براساس همین پارامتر و همچنین پارامتر ضریب کاهش اعتبار شرکت، همواره بالاتر از جایگاه رهبر است.

از محدودیت‌های پژوهش حاضر، درنظرگرفتن فقط یک نوع هکر و یک شرکت است. همچنین نوع تابع تقاضا در نظر گرفته‌شده، خطی بوده است و فقط از تعدادی از پارامترهای تأثیرگذار تبعیت می‌کند. برای مطالعات آینده، علاوه‌بر پوشش‌دادن محدودیت‌های این مسئله، می‌توان بودجه‌ی کاربر ابری برای سرمایه‌گذاری امنیت سایبری را در نظر گرفت و آن را به‌عنوان محدودیت وارد مسئله کرد. همچنین درنظرگرفتن انواع دیگر هکر، برای نوشتن توابع سود می‌تواند نتایج متفاوتی را ارائه دهد. به‌عنوان مثال، هکرهای کلاه خاکستری را در نظر گرفت که می‌توانند راهبردهای افشا یا همکاری با شرکت را داشته باشند. درنهایت در این مسئله می‌توان به جای درنظرگرفتن درصد بازگشت اطلاعات، از بیمه‌ی ابری استفاده کرد، که در صورت حمله و آسیب به اطلاعات کاربر، شرکت مبلغی را به‌عنوان بیمه به کاربر پرداخت کند. این مورد نیز در توابع سود مربوط به شرکت و کاربر تأثیر خواهد داشت.

References- منابع

1. O'Connor, S., Hasshu, S., Bielby, J., Colreavy-Donnelly, S., Kuhn, S., Caraffini, F. and Smith, R., 2021. Scips: A serious game using a guidance mechanic to scaffold effective training for cyber security, *Information Sciences, 580,* pp.524-540 DOI: https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.08.098.

2. Chronopoulos, M., Panaousis, E. and Grossklags, J., 2017. An options approach to cybersecurity investment, *IEEE Access, Vol. 6*, pp. 12175 – 12186 DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2773366

3. Whaiduzzaman, M. and Gani, A., 2013, Measuring security for cloud service provider: A third party approach, in *2013 International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT)*, pp. 1-6. IEEE. DOI: 10.1109/EICT.2014.6777855

4. Che, J., Duan, Y., Zhang, T. and Fan, J., 2011. Study on the security models and strategies of cloud computing, *Procedia Engineering, Vol. 23*, pp. 586-593 DOI: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2551.

5. Hsieh, C., Chang, Y. and Wu, C., 2014. Competitive pricing and ordering decisions in a multiple-channel supply chain, *International journal of production economics, Vol. 154*, pp. 156-165 DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.04.024.

6. Chen, Z., Wu, S., Govindan, K., Wang, J., Chin, K. and Martíınez, L., 2022, Optimal pricing decision in a multi-channel supply chain with a revenue-sharing contract, *Annals of Operations Research, Vol. 318*, pp. 67-102, DOI: https://doi.org/10.1007/s10479-022-04748-7.

7. Bartholomae, F., 2018, Cybercrime and cloud computing. A game theoretic network model, *Managerial and Decision Economics, Vol. 39*, pp. 297-305, DOI: https://doi.org/10.1002/mde.2904.

8. Shy, O., 2001, The economics of network industries, *Cambridge university press*, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-04623-4_17.

9. Cong, P., Li, L., Zhou, J., Cao, K., Wei, T., Chen, M. and HU., S, 2018, Profit-driven dynamic cloud pricing for multiserver systems considering user perceived value, *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst, Vol. 29*, pp. 2742-2756, DOI: 10.1109/TPDS.2018.2843343.

10. Chng, S., Lu, H.Y., Kumar, A. and Yau, D., 2022, Hacker types, motivations and strategies: A comprehensive framework, *Computers in Human Behavior Reports, Vol. 5,* pp. 100167, DOI: https://doi.org/10.1016/j.chbr.2022.100167

11. Caldwell, T., 2011, Ethical hackers: Putting on the white hat, *Network Security, Vol. 2011*, pp. 10-13, DOI: https://doi.org/10.1016/S1353-4858(11)70075-7.

12. Cohen, D., Elalouf, A. and Zeev, R., 2022, Collaboration or separation maximizing the partnership between a "gray hat" hacker and an organization in a two-stage cybersecurity game, *International Journal of Information Management Data Insights, Vol. 2*, pp. pages 100073, DOI: https://doi.org/10.1016/j.jjimei.2022.100073.

13. Rachamalla, S. and Fatima, S.H., 2020, Game theory and cyber security, *Annual Workshop on Cyber Security, Vol. 2,* pp. 978- 990, DOI: https://doi.org/10.1145/1852666.1852704.

14. Shiva, S., Roy, S. and Dasgupta, D., 2010. Game theory for cyber security, in *Proceedings of the Sixth Annual Workshop on Cyber Security and Information Intelligence Research*, pp. 1-4, [In Persian] DOI: https://doi.org/10.1145/1852666.1852704,

15. Do, C., Tran, N., Hong, C., Kamhoua, C.A., Kwiat, K.A., Blasch, E. and Lyengar., S., 2017. Game theory for cyber security and privacy, *ACM Computing Surveys (CSUR), Vol. 50*, pp. 1-37, DOI: https://doi.org/10.1145/3057268.

16. Hyder, B. and Govindarasu, M., 2020. Optimization of cybersecurity investment strategies in the smart grid using game-theory, in *2020 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, pp. 1-5, DOI: 10.1109/ISGT45199.2020.9087634.

17. Xiao, P. and Tang, Z., 2015, Game theory–based resource pricing model in cloud platforms, *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, Vol. 14*, pp. 256-271, DOI: https://doi.org/10.1504/IJCNDS.2015.068666.

18. Feng, S., Xiong, Z., Niyato, D., Wang, P., Wang, S., and Shen, S., Joint pricing and security investment in cloud security service market with user interdependency, *IEEE Transactions on Services Computing, Vol. 15*, pp. 1461-1472, DOI: 10.1109/TSC.2020.2996382.

19. Ge, H., Zhao, L., Yue, D., Xie, X., Xie, L., Gorbachev, S., Corovin., I. and Ge., Y., 2024, A game theory based optimal allocation strategy for defense resources of smart grid under cyber-attack, *Information Sciences, Vol. 652,* pp. 1197-1220, DOI: https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.119759.

20. Huang, J., Leng, M. and Parlar, M., 2021, Demand functions in decision modeling: A comprehensive survey and research directions, *Decision Sciences, Vol. 44,* pp. 557-609, DOI: https://doi.org/10.1111/deci.12021

21. Phillips, R., 2021, *Pricing and revenue optimization*, Stanford university press, 2021. In Electrical, DOI: https://doi.org/10.1515/9781503614260

22. Gao, X., Qiu, M., Wang, Y. and Wang, X., 2023, Information security investment with budget constraint and security information sharing in resource-sharing environments, *Journal of the Operational Research Society, Vol. 74,* pp. 1520-1535, DOI: https://doi.org/10.1080/01605682.2022.2096506 .

پیوست ۱

در ادامه، اثبات مربوط به حل مسئله براساس ساختار قدرت اول، یعنی رهبربودن شرکت تأمین‌کننده‌ی امنیت، بیان شده است.

در ابتدا لازم است مشخص شود که تابع مقعر است. در صورت منفی‌بودن مشتق دوم تابع، می‌توان با استفاده از مشتق اول، نقاط تعادلی را به‌دست آورد. با توجه به اینکه از روش استقرا به عقب برای حل مسئله استفاده شده است، لازم است تا ابتدا تابع مربوط به پیرو حل شود. سپس با قراردادن مقادیر به‌دست‌آمده در تابع رهبر، مسئله‌ی مربوط به رهبر حل شود (روابط ۱۲ الی ۱۵):

$$\frac{\partial^2 u_H}{\partial e^2} = -k \tag{۱۲}$$

$$\frac{\partial u_H}{\partial e} = M\left(1-y\right) + O\gamma\lambda - ek_1 \tag{۱۳}$$

$$4M\left(1-y\right) + O\gamma\lambda - ek_1 = 0 \tag{۱۴}$$

$$e^* = \frac{M - My + O\gamma\lambda}{k_1} \tag{۱۵}$$

با قراردادن مقدار اخیر (e^*) در تابع رهبر، تابع رهبر جدید ساخته می‌شود. سپس با درنظرگرفتن ماتریس هسین مربوط به تابع رهبر، می‌توان راجع به مقعربودن آن نظر داد. با فرض $۲\theta > ۱$، مینور اول ماتریس هسین منفی خواهد بود. با محاسبه‌ی مینور دوم ماتریس هسین رابطه‌ی ۲۱ به‌دست خواهد آمد. با توجه به مثبت‌بودن قسمت‌های مختلف رابطه‌ی اخیر و همچنین مثبت‌بودن مخرج کسر، می‌توان با ساده‌سازی آن را به رابطه‌ی ۲۲ تبدیل کرد. با علم به آنکه تمامی پارامترهای موجود در رابطه‌ی ۲۲ مثبت هستند، با فرض $k\left(Y\right)^۳ > ۳S + J\left(U\right)$، مینور دوم ماتریس هسین منفی می‌شود و در نتیجه تابع مقعر است. شایان ذکر است در مقداردهی پارامترهای مسئله، این مورد درنظر گرفته شده است. در ادامه، با توجه به مقعربودن توابع سود، با استفاده از مشتق اول مقادیر تعادلی مطابق روابط ۱۶ الی ۲۵ به‌دست می‌آیند.

$$u_F = p\left(1 - \frac{p}{1+\delta\left(-1+2\theta\right)\left(1-q+\frac{M-My+O\gamma\lambda}{k_1}\right)}\right) - \alpha\mu\left(1-q+\frac{M-My+O\gamma\lambda}{k_1}\right) - \frac{kq^2}{2} \tag{۱۶}$$

$$\frac{\partial^2 u_F}{\partial p^2} = -\frac{2}{1+\delta\left(-1+2\theta\right)\left(1-q+\frac{M-My+O\gamma\lambda}{k_1}\right)} \tag{۱۷}$$

$$\frac{\partial^2 u_F}{\partial q^2} = -k - \frac{2p^2\delta^2\left(-1+2\theta\right)^2}{\left(1+\delta\left(-1+2\theta\right)\left(1-q+\frac{M-My+O\gamma\lambda}{k_1}\right)\right)^3} \tag{۱۸}$$

$$\begin{pmatrix} -\frac{2}{1+\delta\left(-1+2\theta\right)\left(1-q+\frac{M-My+O\gamma\lambda}{k_1}\right)} & -\frac{2p\delta\left(-1+2\theta\right)}{\left(1+\delta\left(-1+2\theta\right)\left(1-q+\frac{M-My+O\gamma\lambda}{k_1}\right)\right)^2} \\ -\frac{2p\delta\left(-1+2\theta\right)}{\left(1+\delta\left(-1+2\theta\right)\left(1-q+\frac{M-My+O\gamma\lambda}{k_1}\right)\right)^2} & -k-\frac{2p^2\delta^2\left(-1+2\theta\right)^2}{\left(1+\delta\left(-1+2\theta\right)\left(1-q+\frac{M-My+O\gamma\lambda}{k_1}\right)\right)^3} \end{pmatrix} \tag{۱۹}$$

$$\det = \frac{2\left(\begin{array}{l} -3p^2\delta^2\left(1-2\theta\right)^2 + k\left(1+\delta\left(-1+2\theta\right)\left(1-q+\frac{M-My+O\gamma\lambda}{k_1}\right)\right)^3 - \\ p^2\delta^3\left(-1+2\theta\right)^3\left(1-q+\frac{M-My+O\gamma\lambda}{k_1}\right) \end{array}\right)}{\left(1+\delta\left(-1+2\theta\right)\left(1-q+\frac{M-My+O\gamma\lambda}{k_1}\right)\right)^4} \tag{۲۰}$$

$$\frac{\partial u_F}{\partial p} = 1 - \frac{2p}{1+\delta\left(-1+2\theta\right)\left(1-q+\frac{M-My+O\gamma\lambda}{k_1}\right)} \tag{۲۱}$$

$$\det = 2\left(-3S + k\left(Y\right)^3 - J\left(U\right)\right) \tag{۲۲}$$

$$\frac{\partial u_F}{\partial q} = -kq + \alpha\mu - \frac{p^2\delta\left(-1+2\theta\right)}{\left(1+\delta\left(-1+2\theta\right)\left(1-q+\frac{M-My+O\gamma\lambda}{k_1}\right)\right)^2} \tag{۲۳}$$

$$p^* = \frac{1}{8}\left(4 + \frac{\delta\left(-1+2\theta\right)\left(4k-\delta+2\delta\theta-4\alpha\mu\right)}{k} - \frac{4\delta\left(-1+2\theta\right)\left(M\left(-1+y\right)-O\gamma\lambda\right)}{k_1}\right) \tag{۲۴}$$

$$q^* = \frac{\delta - 2\delta\theta + 4\alpha\mu}{4k} \tag{۲۵}$$

با قراردادن مقادیر تعادلی در معادله‌ی ۱۵، مقدار تعادلی متغیر تصمیم هکر مطابق رابطه‌ی ۲۶ به‌دست خواهد آمد.

$$e^* = \frac{M - My + O\gamma\lambda}{k_1} .\square \tag{۲۶}$$

پیوست ۲

در ادامه، اثبات مربوط به حل مسئله براساس ساختار قدرت دوم یعنی پیروبودن شرکت تأمین‌کننده‌ی امنیت بیان شده است (روابط ۲۷ الی ۴۱).

در ابتدا لازم است تا مشخص شود تابع مقعر است. برای این منظور از ماتریس هسین استفاده شده است. برای منفی‌بودن مینور اول، همان فرض پیوست ۱ برای منفی‌بودن مینور اول در نظر گرفته شده است. با محاسبه‌ی مینور دوم ماتریس هسین، عبارت ۳۰ به‌دست خواهد آمد. با توجه به مثبت‌بودن قسمت‌های مختلف رابطه‌ی اخیر و همچنین مثبت‌بودن مخرج کسر، می‌توان با ساده‌سازی آن را به‌عبارت ۳۱ تبدیل کرد. با علم به آنکه تمامی پارامترهای موجود در رابطه‌ی اخیر مثبت هستند، با فرض $2\left(kA\right)^3 > B\left(C\right)$، مینور دوم ماتریس هسین منفی می‌شود و در نتیجه تابع مقعر است. شایان ذکر است در مقداردهی پارامترهای مسئله، این مورد در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه از روش استقرا به عقب برای حل مسئله استفاده شده است، لازم است تا ابتدا تابع مربوط به پیرو حل شود و سپس با قراردادن مقادیر به‌دست‌آمده در تابع رهبر، مسئله‌ی مربوط به رهبر حل شود. با قراردادن روابط ۳۴ و ۳۵ در تابع هدف هکر (رابطه‌ی ۶) تابع هدف هکر به‌دست خواهد آمد. سپس با جای‌گذاری رابطه‌ی ۴۱ در روابط ۳۴ و ۳۵ مقادیر تعادلی شرکت به‌دست می‌آیند.

$$\frac{\partial^2 u_F}{\partial p^2} = -\frac{2}{1+\left(1+e-q\right)\delta\left(-1+2\theta\right)} \tag{۲۷}$$

$$\frac{\partial^2 u_F}{\partial q^2} = -k - \frac{2p^2\delta^2\left(-1+2\theta\right)^2}{\left(1+\left(1+e-q\right)\delta\left(-1+2\theta\right)\right)^3} \tag{۲۸}$$

$$\begin{pmatrix} -\frac{2}{1+\left(1+e-q\right)\delta\left(-1+2\theta\right)} & -\frac{2p\delta\left(-1+2\theta\right)}{\left(1+\left(1+e-q\right)\delta\left(-1+2\theta\right)\right)^2} \\ -\frac{2p\delta\left(-1+2\theta\right)}{\left(1+\left(1+e-q\right)\delta\left(-1+2\theta\right)\right)^2} & -k-\frac{2p^2\delta^2\left(-1+2\theta\right)^2}{\left(1+\left(1+e-q\right)\delta\left(-1+2\theta\right)\right)^3} \end{pmatrix} \tag{۳۹}$$

$$\det = \frac{2\left(k\left(1+\left(1+e-q\right)\delta\left(-1+2\theta\right)\right)^3 - p^2\delta^2\left(1-2\theta\right)^2\left(3+\left(1+e-q\right)\delta\left(-1+2\theta\right)\right)\right)}{\left(1+\left(1+e-q\right)\delta\left(-1+2\theta\right)\right)^4} \tag{۳۰}$$

$$\det = 2\left(kA\right)^3 - B\left(C\right) \tag{۳۱}$$

$$\frac{\partial u_F}{\partial p} = 1 - \frac{2p}{1+\left(1+e-q\right)\delta\left(-1+2\theta\right)} \tag{۳۲}$$

$$\frac{\partial u_F}{\partial q} = -kq - \frac{p^2\delta\left(-1+2\theta\right)}{\left(1+\left(1+e-q\right)\delta\left(-1+2\theta\right)\right)^2} + \alpha\left(1-\theta\right)\mu \tag{۳۳}$$

$$p = \frac{k\left(4+4\left(1+e\right)\delta\left(-1+2\theta\right)\right)+\delta\left(-1+2\theta\right)\left(\delta\left(-1+2\theta\right)+4\alpha\left(-1+\theta\right)\mu\right)}{8k} \tag{۳۴}$$

$$q = \frac{\delta - 2\delta\theta - 4\alpha\left(-1+\theta\right)\mu}{4k} \tag{۳۵}$$

$$p^* = \frac{1}{8}\begin{pmatrix} 4+\frac{\delta\left(-1+2\theta\right)\left(4k+\delta\left(-1+2\theta\right)+4\alpha\left(-1+\theta\right)\mu\right)}{k} - \\ \frac{4\delta\left(-1+2\theta\right)\left(M\left(-1+y\right)+O\gamma\left(-1+\lambda\right)\right)}{k_1} \end{pmatrix} \tag{۳۶}$$

$$q^* = \frac{\delta - 2\delta\theta + 4\alpha\mu - 4\alpha\theta\mu}{4k} \tag{۳۷}$$

$$u_H = My - \frac{O\gamma\lambda\left(\delta-2\delta\theta+4\alpha\mu-4\alpha\theta\mu\right)}{4k} + M\left(1-y\right)\left(1+e-\frac{\delta-2\delta\theta+4\alpha\mu-4\alpha\theta\mu}{4k}\right) + O\gamma\left(1-\lambda\right)\left(1+e-\frac{\delta-2\delta\theta+4\alpha\mu-4\alpha\theta\mu}{4k}\right) - \frac{e^2k_1}{2} \tag{۳۸}$$

$$\frac{\partial^2 u_H}{\partial e^2} = -k_1 \tag{۳۹}$$

$$\frac{\partial u_H}{\partial e} = M\left(1-y\right) + O\gamma\left(1-\lambda\right) - ek_1 \tag{۴۰}$$

$$e^* = \frac{M - My + O\gamma - O\gamma\lambda}{k_1}.\square \tag{۴۱}$$

پیوست ۳

آزمون فریدمن

در پژوهش حاضر، ۱۹ نمونه‌ی دیگر با توجه به محدودیت‌های هر پارامتر، ایجاد شده و براساس آن‌ها مقادیر تابع هدف به‌دست آمده است. سپس با استفاده از آزمون فریدمن، نتایج ارزیابی شده است. آزمون فریدمن، یک آزمون آماری ناپارامتریک است، که توسط میلتون فریدمن توسعه یافته است. روش مذکور، هر سطر را رتبه‌بندی می‌کند و سپس رتبه‌بندی در ستون‌ها را در نظر می‌گیرد. در ادامه، روند انجام آزمون فریدمن ارائه شده است.

فرض صفر، تفاوت بین نتایج در نظر گرفته شده است. برای انجام آزمون فریدمن و رد یا تأیید فرض صفر، ۱۹ نمونه در نظر گرفته شده‌اند، که با تغییر هر یک از پارامترها ایجاد شده‌اند. به‌عنوان مثال، در نمونه‌ی اول، درصد آسیب اطلاعات در حمله‌ی موفق، کم، در نمونه‌ی دوم، متوسط، و در نمونه‌ی سوم در حد بالا مقداردهی شده است. بقیه‌ی نمونه‌ها نیز با تغییر مقدار پارامترها به کم، متوسط و زیاد ایجاد شده و مقادیر تابع سود در دو سناریو به‌دست آمده است. مقادیر سود در جدول ارائه شده است. سپس براساس روند انجام آزمون فریدمن، مقادیر سود، رتبه‌بندی و رتبه‌ها در هر ستون با یکدیگر جمع شده‌اند. میانگین رتبه‌ها به‌دست آمده و براساس آماره‌ی آزمون فریدمن که در رابطه‌ی ۴۲ نشان داده شده است، مقدار آماره‌ی اخیر به‌دست آمده است (جدول ۳).

$$Q = \frac{12n}{k(k+1)} \sum_{j=1}^{k} (\bar{r}_j - \frac{(k+1)}{2})^2 \tag{۴۲}$$

که در آن، n تعداد نمونه‌ها و k تعداد سناریوهای بررسی‌شده است. پس از به‌دست‌آوردن آماره‌ی Q، مقدار p-value محاسبه و برابر ۰/۰۰۹۵۵ شده است، که برای p-value ، مقدار کمی بوده و درنتیجه فرض صفر رد شده است.

جدول ۲. مقادیر سود با نمونه‌های مختلف.

Sample	Leader structure	Follower structure
1	0.090479	0.066986
2	0.184317	0.121533
3	0.278779	0.189106
4	0.288779	0.167106
5	0.692112	-0.720228
6	0.296279	0.150606
7	0.300215	0.256686
8	0.267487	0.103126
9	0.283679	0.177886
10	0.283729	0.177996
11	0.388867	0.276893
12	0.325139	0.216946
13	0.284713	0.177592
14	0.284312	0.177812
15	0.284179	0.177886
16	0.283979	0.177996
17	0.203759	-0.160794

جدول ۳. رتبه‌بندی مقادیر سود و محاسبه‌ی میانگین.

Sample	Leader structure	Follower structure	Sum	Average
1	1	4	5	0.45
2	2	6	8	0.72
3	6	14	20	1.81
4	14	8	22	2
5	19	1	20	1.81
6	15	7	22	2
7	16	16	32	2.9
8	5	5	10	0.9
9	7	12	19	1.72
10	8	13	21	1.9
11	18	17	35	3.18
12	17	15	32	2.9
13	12	10	22	2
14	12	11	23	2.09
15	11	12	23	2.09
16	10	13	23	2.09
17	3	2	5	0.45
18	4	3	7	0.63
19	9	9	18	1.63

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2025), 41(1), 122-137

Sharif University of Technology

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

Research Note

Hub Location with the Backup Approach by Considering the Capacity Constraint in Critical Situations

Hasan Ziarati, Ali Shahandeh Nookabadi* and Mohammad Reisi-Nafchi

Department of Industrial &Systems Engineering, Isfahan University of Tech, Isfahan, Iran
* corresponding author: (ali-nook@iut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:29 October 2023

Revised:25 May 2024

Accepted:23 July 2024

Keywords:

Hub location,
backup hub,
capacity constraint,
direct link,
genetic algorithm.

Abstract

The efficient transportation of goods and passengers from origin to destination is a crucial aspect of supply chain management. The design of transportation systems plays a key role in determining system costs and customer satisfaction. In cases where direct communication between all points is not feasible, the hub and spoke system can be utilized. The design of the hub network is a strategic decision that faces uncertainties such as demand, costs, and system reliability. Natural and unnatural events can impact the efficiency of hub facilities, leading to additional costs for the system. Capacity limitations in hub facilities may necessitate crisis management strategies, such as transferring flows to backup hubs during emergencies. This study explores the use of single backup and multiple backup approaches to address hub unavailability and meet demand requirements. A mathematical model is presented to investigate and solve the single and multiple backup strategies. Due to the complexity of the problem, a genetic algorithm approach is employed for optimization. The performance of the algorithms is evaluated using the CAB dataset, demonstrating the effectiveness of the proposed solutions. Comparing the results of single backup and multiple backup strategies reveals that the latter is more advantageous in terms of system costs and congestion in hub nodes. This study highlights the importance of strategic planning in transportation systems and the benefits of implementing backup solutions to ensure efficient operations. This research underscores the critical role that transportation systems play in the overall success of supply chains and the significant impact that effective logistics management can have on customer satisfaction and operational costs. The strategic decisions made in designing transportation networks can have far-reaching implications on the overall efficiency and reliability of the system. By exploring different backup strategies and utilizing a mathematical model, organizations can better prepare for disruptions and ensure continuity of operations. The use of genetic algorithms and data analysis tools can provide valuable insights into the performance of transportation systems and help identify opportunities for improvement. Overall, this study emphasizes the importance of proactive planning and the adoption of innovative solutions in the field of logistics and transportation management.

Funding

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

To Cite this article:

Ziarati, H., Shahandeh Nookabadi, A. and Reisi-Nafchi, M. 2025. Hub location with the backup approach by considering the capacity constraint in critical situations, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, 41(1), 122-137. https://doi.org/10.24200/j65.2024.62721.2365

مجله علمی مهندسی صنایع و مدیریت شریف

https://sjie.journals.sharif.edu

یادداشت فنی

مکان‌یابی هاب با رویکرد پشتیبان‌گیری و لحاظ محدودیت ظرفیت تحت شرایط وقوع بحران

حسن زیارتی، علی شاهنده * و محمد رئیسی نافچی

گروه مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

*نویسنده مسئول (ali-nook@iut.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۰۸/۰۷

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۳/۰۵

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۵/۰۲

واژگان کلیدی:

مکان‌یابی هاب،

شرایط بحران،

هاب پشتیبان،

محدودیت ظرفیت،

ارتباط مستقیم،

الگوریتم ژنتیک.

چکیده

طراحی شبکه‌ی هاب با عدم قطعیت‌هایی در تقاضا، هزینه‌ها، و قابلیت اطمینان مواجه است. بروز حوادث، کارایی تسهیلات هاب را متأثر می‌سازد و موجب تحمیل هزینه‌های اضافی می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر، احتمال از دسترس خارج‌شدن هاب وجود دارد. به‌منظور تأمین تقاضای شبکه‌ی هاب، دو رویکرد پشتیبان‌گیری یگانه و چندگانه با امکان برقراری ارتباط مستقیم بین گره‌ها پیشنهاد شده است. برای حل راهبردهای‌های مذکور، مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه شده و از آنجا که مسئله از نوع NP-hard بوده است، برای حل آن از رویکرد مبتنی بر الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. جهت بررسی عملکرد الگوریتم‌ها، نمودهایی از مجموعه‌ی داده‌ی CAB حل شده است، که خطای پایین روش‌های پیشنهادی حاکی از عملکرد مطلوب آن‌هاست. حسب نتایج به‌دست‌آمده، افزایش جریان ورودی به هاب پشتیبان در رویکرد پشتیبان‌گیری چندگانه، ۱۸ الی ۳۶ درصد کمتر از رویکرد یگانه در شرایط وقوع بحران بوده است. این روند مدیریت و تداوم عملیات در مواقع اضطراری را بیشتر تضمین می‌کند.

۱. مقدمه

ارسال کالا و مسافر از نقاط مبدأ به مقصد از مهم‌ترین مباحث در سیستم‌های حمل‌ونقل و لجستیک است. چگونگی طراحی سیستم‌های حمل‌ونقل نقش عمده‌ای در زنجیره‌ی تأمین دارد و تأثیر مستقیم در هزینه‌های سیستم و رضایت مشتریان می‌گذارد. در شرایطی که امکان استفاده از ارتباط مستقیم بین تمامی نقاط مبدأ و مقصد وجود ندارد و یا بسیار پرهزینه باشد، می‌توان از سیستم هاب و اسپوک استفاده کرد. امروزه مکان‌یابی هاب در انواع سیستم‌های جابجایی کالا و مسافر و انتقال اطلاعات مانند شبکه‌های حمل‌ونقل ریلی و هوایی، سیستم‌های پستی، سیستم‌های مخابراتی کاربرد دارد. در شبکه‌های هاب، جریان‌ها از مبدأهای متفاوت در هاب‌ها جمع‌آوری و پس از مرتب‌سازی به مقاصد مختلف ارسال می‌شوند.

در دنیای واقعی، عوامل متعددی، از جمله: بدی آب و هوا، بلایای طبیعی از قبیل سیل، و زلزله، و غیره، شیوع بیماری‌ها، اعتصاب کارگری، و ... منجر به اختلال در شبکه‌ی هاب می‌شود. اتحادیه‌ی بین‌المللی حمل‌ونقل هوایی (IATA)[1] زیان‌های ناشی از بروز حوادث طبیعی را برای یک روز در سراسر دنیا برابر ۱۴۸ میلیون دلار برآورد کرده است.[۱] به‌عنوان مثال، در سه روز آخر هفته‌ی کریسمس[2] (۲۰۲۱) به‌دلیل گسترش نوع اُمیکرون ویروس کرونا و بدی آب و هوا نزدیک به ۸۰۰۰ پرواز در سراسر جهان لغو شده است، که باعث ایجاد اختلال بزرگ در بازگشت از سفر کریسمس آن سال شد.[۲]

انجام پژوهش درخصوص مسئله‌ی مکان‌یابی هاب، سابقه در علوم مکان‌یابی و تجزیه‌وتحلیل شبکه دارد. مدل‌های ارائه‌شده برای مسئله‌ی مکان‌یابی هاب، انواع مختلفی هستند، که به‌طورکلی در چهار بخش اصلی مسئله‌ی مکان‌یابی p- هاب میانه، مکان‌یابی هاب با هزینه‌ی ثابت، مکان‌یابی p- هاب مرکز، و مکان‌یابی پوشش هاب تقسیم‌بندی می‌شوند.[۳]

اُکلی[3] (۱۹۸۷)،[۴] مدل ریاضی مربوط به مسئله‌ی مکان‌یابی هاب با تخصیص تکی را برای مطالعه‌ی شبکه‌ی حمل‌ونقل هوایی شرکت‌های هواپیمایی ارائه کرده است. ارنست و کریشنامورتی[4] (۱۹۹۶)،[۵] برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط

[1] International Air Transport Association

[2] Three-day Christmas weekend

[3] O'kelly

[4] Ernst & Krishnamoorthy

استناد به این مقاله:

زیارتی، حسن، شاهنده، علی و رئیسی نافچی، محمد، ۱۴۰۴. مکان‌یابی هاب با رویکرد پشتیبان‌گیری و لحاظ محدودیت ظرفیت تحت شرایط وقوع بحران. مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۴۱(۱)، صص.۱۲۲-۱۳۷. https://doi.org/10.24200/j65.2024.62721.2365

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

متفاوتی برای مسئله‌ی مکان‌یابی هاب با تخصیص چندگانه و ظرفیت محدود (SApHMP[5]) ارائه کرده‌اند، که به متغیرها و محدودیت‌های کمتری نیاز داشته است. کمپبل[6] (۱۹۹۲)،[۶] اولین مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را برای مسئله‌ی مکان‌یابی هاب با ظرفیت محدود (MApHMP[7]) ارائه داده است، که ۴ اندیس داشته است. ابری[8] و همکاران (۲۰۰۰)،[۷] با بهره‌گیری از مدل ارائه‌شده‌ی ارنست و کریشنامورتی (۱۹۹۶)،[۵] یک مدل عدد صحیح مختلط جدید برای مسئله‌ی مکان‌یابی هاب با تخصیص چندگانه و ظرفیت محدود ارائه کرده‌اند. مراکلی و یامان[9] (۲۰۱۷)،[۸] یک مدل مکان‌یابی هاب با تخصیص چندگانه و ظرفیت محدود در شرایط وجود عدم قطعیت در تقاضای گره‌ها ارائه داده‌اند؛ که در آن، محدودیت ظرفیت فقط بر جریان‌هایی که مستقیماً از گره‌های غیرهاب به گره‌ی هاب وارد می‌شوند، اعمال می‌شود.

سیستم‌های لجستیکی و از جمله سیستم‌های هاب با بسیاری از عدم قطعیت‌ها، مانند تقاضا، هزینه‌ها، و قابلیت اطمینان سیستم مواجه هستند. کارایی و توانایی تسهیلات در نظر گرفته‌شده در هاب‌ها و مسیرهای ارتباطی بین نقاط، وابسته به شرایط محیطی آن‌هاست. به‌عنوان مثال، در سیستم حمل‌ونقل هوایی، شرایط آب و هوایی ناپایدار به‌راحتی می‌تواند دسترسی به فرودگاه‌های هاب را تحت تأثیر قرار دهد و با به تأخیرافتادن و یا لغو پروازهای از پیش برنامه‌ریزی‌شده، باعث تحمیل هزینه‌های بسیار سنگین شود.[۹] از جمله عواملی که باعث کاهش کارایی و یا از کارافتادگی کامل سیستم‌های هاب می‌شوند، می‌توان به بدی آب و هوا، بلایای طبیعی از قبیل سیل و زلزله و غیره، شیوع بیماری‌ها، اعتصاب کارگری، و دیگر حوادث غیرمترقبه اشاره کرد.

در نوشتار حاضر، به بررسی مسئله‌ی مکان‌یابی هاب تک‌تخصیصه با احتمال اختلال در گره‌های هاب پرداخته شده است. همچنین، دو راهبرد پشتیبان‌گیری‌های یگانه و چندگانه با امکان برقراری ارتباط مستقیم با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها با وجود محدودیت ظرفیت هاب‌ها معرفی شده است. با توجه به ابعاد بزرگ مسئله و سختی ذاتی مسائل مکان‌یابی برای حل هر یک از مسائل، یک الگوریتم فراابتکاری ژنتیک توسعه داده شده است.

ساختار نگارش نوشتار حاضر بدین صورت است که در بخش بعد، مروری بر ادبیات مسئله‌ی مکان‌یابی هاب با تأکید بر اختلال در گره‌های هاب صورت گرفته است. مدل‌سازی مسئله در بخش ۳ و روش حل در بخش ۴ تشریح شده است. نتایج عددی حاصل از حل مسئله در بخش ۵ و درنهایت، در بخش ۶ جمع‌بندی نوشتار و پیشنهادهایی برای مطالعات آتی ارائه شده است.

۲. مروری بر پژوهش‌های پیشین

در بیشتر مطالعات انجام‌شده در ارتباط با مکان‌یابی تسهیلات هاب فرض بر این است که مراکز انتخاب‌شده به‌عنوان هاب، در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی، وظایف عملکردی خود را کاملاً انجام می‌دهند. اما عملاً، هاب‌ها به دلایل مختلفی می‌توانند با اختلال مواجه شوند. اسنایدر و داسکین[10] (۲۰۰۵)،[۱۰] با این فرض که هر گره، احتمال شکست به صورت از پیش تعیین‌شده‌ای دارد، یک مدل عدد صحیح برای مسئله‌ی p- میانه با هزینه‌ی ثابت تصادفی ارائه داده‌اند. ایشان از راهبرد تخصیص چندسطحی جهت مواجهه با شکست استفاده کرده‌اند، به این صورت که هر گره در هر سطح می‌تواند به یک هاب اختصاص یابد؛ در نتیجه، با از دسترس خارج‌شدن هاب‌های سطوح بالاتر، جابجایی کالاها از طریق هاب‌های سطوح بعدی مسیریابی خواهد شد. کیو[11] و همکاران (۲۰۱۰)،[۱۱] مدل اسنایدر و داسکین را با درنظرگرفتن احتمال خرابی وابسته به مکان تسهیل بهبود داده و مدل‌های گسسته و پیوسته‌ی آن را ارائه داده‌اند. کیم و اکلی[12] (۲۰۰۹)، مسئله‌ی مکان‌یابی p- میانه با تخصیص یگانه و چندگانه با هدف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان را مطالعه کرده‌اند. در این مسئله برای هاب‌ها و مسیرهای ارتباطی، احتمال از کارافتادگی در نظر گرفته شده است. معصوم زاده (۲۰۱۶)،[۱۳] با در نظرگرفتن امکان اختلال در گره‌های هاب، یک مدل دوهدفه ارائه کرده‌اند؛ که هدف اول آن بیشینه‌سازی کمترین مقدار پتانسیل جریان در بین کلیه‌ی جفت گره‌های مبدأ مقصد و هدف دوم آن، کمینه‌سازی هزینه‌ی استقرار تسهیلات هاب‌ها بوده است.. در مدل اخیر، تعداد گره‌های هاب اصلی و پشتیبان از پیش تعیین شده است و یک گره نمی‌تواند به‌طورهمزمان به عنوان هاب اصلی و هاب پشتیبان انتخاب شود.

آن[13] و همکاران (۲۰۱۵)،[۹] مدل ارائه‌شده‌ی توسط کیم و اکلی (۲۰۰۹)،[۱۲] را گسترش داده و با درنظرگرفتن احتمال خرابی هاب‌ها، برای هر دو راهبرد تخصیص یگانه و چندگانه مدل‌سازی کرده و پس از اختلال در یک هاب، برای هر جفت مبدأ- مقصد، که از طریق هاب مذکور مسیریابی شده‌اند، به واسطه‌ی دیگر هاب‌های موجود، یک مسیر پشتیبان در نظر گرفته‌اند. تابع هدف مدل پیشنهادی، کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل در شرایط عادی، هزینه‌های حمل‌ونقل در زمان بروز اختلال، و هزینه‌ی جریان از دست‌رفته بوده و هزینه‌ی انتقال در زمان بروز اختلال توسط مسیرهای پشتیبان، دو برابر هزینه‌ی انتقال در شرایط عادی فرض شده است و ضمناً در هر مقطع زمانی، فقط یک هاب می‌تواند از دسترس خارج شود. علاوه‌بر این، ایشان از رویکردهای حل آزادسازی لاگرانژ و شاخه و کران برای یافتن جواب نزدیک به بهینه و بهینه استفاده کرده‌اند. پسندیده و همکاران (۲۰۱۵)،[۱۴] یک مدل چندهدفه برای مسئله‌ی بیشینه‌سازی پوشش p- هاب ارائه کرده‌اند، که در آن هر هاب و مسیر ارتباطی، احتمال از دسترس خارج‌شدن از پیش تعیین‌شده‌ای داشته است. ایشان به دنبال استقرار هاب‌ها و تعیین تخصیص‌ها به نحوی بوده‌اند که جریان پوشش داده‌شده در کنار قابلیت اطمینان سیستم بیشینه شود.

مدنی و همکاران (۲۰۱۸)،[۱۵] یک مدل دوهدفه‌ی عدد صحیح با درنظرگرفتن احتمال خرابی مسیرهای ارتباطی و هاب‌ها ارائه کرده‌اند، که تابع هدف اول، جریان تحت پوشش را بیشینه می‌ساخت و تابع هدف دوم، میزان جریان عبوری از هاب‌ها را متعادل می‌کرد و برای مواجهه با شرایط بحران، دو رویکرد پشتیبان‌گیری‌های یگانه و چندگانه پیشنهاد داده‌اند. محمدی و همکاران (۲۰۱۹)،[۱۶] به بررسی مسئله‌ی مکان‌یابی p-Hub با هدف کاهش هزینه‌ها و کمینه‌ساختن بیشینه‌ی زمان حمل‌ونقل با تخصیص یگانه و وجود عدم قطعیت در کمان‌ها پرداخته‌اند. ایشان برای حل مدل پیشنهادی، یک کران پایین برای مرز پارتو پیشنهاده کرده و توسط یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی به حل مدل پرداخته‌اند. یحیایی و همکاران (۲۰۱۹)،[۱۷] با درنظرگرفتن امکان خرابی بیش از یک هاب در یک مسیر، یک مدل دو هدفه‌ی درجه دو ارائه کرده‌اند. ایشان

[5] Single Allocation p-Hub Median Problem
[6] Campbell
[7] Multiple Allocation p-Hub Median Problem
[8] Ebery
[9] Meraklı & Yaman
[10] Snyder & Daskin
[11] Cui
[12] Kim & O'Kelly
[13] An

برای هر مسیر مبدأ به مقصد در شرایط عادی و پس از وقوع بحران، حالت‌های ممکن را به ۶ دسته تقسیم کرده‌اند، که در ۴ حالت جریان از طریق مسیرهای عادی و یا پشتیبان برقرار و در دو حالت جریان از دست رفته است. در مسئله‌ی اخیر، تابع هدف اول، بیشینه‌سازی تقاضا و تابع هدف دوم، کمینه‌ساختن هزینه‌ها را پوشش داده‌اند.

کُرانی و عیدی (۲۰۲۱)،[۱۸] به بررسی مسئله‌ی دوسطحی برای کمینه‌سازی هزینه‌های شبکه‌ی هاب در سطح اول تصمیم‌گیری و کاهش خدمات از دست‌رفته به‌دلیل اختلال و شکست در فرآیندهای خدمات، در سطح دوم تصمیم‌گیری پرداخته و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح در شرایط بحران ارائه کرده‌اند. برای حل مسئله‌ی ذکرشده از روش کاروش–کون–تاکر (KKT)[14] و از داده‌های ۳۷ شهر بزرگ از سازمان هواپیمایی جمهوری اسلامی ایران برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی استفاده شده است.

در مطالعه‌ی حاضر، به‌منظور نزدیک‌کردن مدل‌های موجود به دنیای واقعی، امکان از دسترس خارج‌شدن هاب در نظر گرفته شده است. در صورت از دسترس خارج‌شدن یک هاب، کلیه‌ی جریان عبوری از آن هاب از دست‌رفته تلقی می‌شود، که موجب واردشدن هزینه‌های سنگینی به سیستم خواهد شد. به‌منظور کاهش هزینه‌های اخیر، در مطالعه‌ی حاضر برای هر هابی که از دسترس خارج می‌شود، هاب/ هاب‌های پشتیبان در نظر گرفته شده و طراحی سیستم به نوعی بوده است؛ که در صورت وقوع شرایط بحرانی، کمینه‌ی زیان به سیستم تحمیل خواهد شد. در این راستا، دو رویکرد در مواجهه با هاب از دسترس خارج‌شده در نظر گرفته شده است: ۱) پشتیبان‌گیری یگانه ۲) پشتیبان‌گیری چندگانه با امکان برقراری ارتباط مستقیم.

همچنین در مطالعات انجام‌شده‌ی پیشین درخصوص مسائل مکان‌یابی هاب تحت شرایط بحران فرض بر نامحدودبودن ظرفیت تسهیلات هاب بوده است؛ در صورتی که در دنیای واقعی، تسهیلات هاب، ظرفیت محدودی داشته است. بیشتر پژوهش‌ها در زمینه‌ی پشتیبان‌گیری‌های یگانه و چندگانه به‌صورت جداگانه انجام گرفته و مقایسه‌ای بین دو مورد اخیر انجام نشده است. زیارتی و همکاران (۲۰۲۰)،[۱۹] با درنظرگرفتن ظرفیت محدود برای گره‌های هاب به بررسی مسئله‌ی مکان‌یابی هاب تحت شرایط بحران با راهبردهای پشتیبان‌گیری یگانه و چندگانه با امکان برقراری ارتباط مستقیم پرداخته‌اند.

۳. تعریف و مدل‌سازی مسئله

در بخش حاضر، مسئله‌ی مکان‌یابی هاب با تخصیص تکی با احتمال اختلال در گره‌های هاب بررسی شده است. در این راستا، دو راهبرد پشتیبان‌گیری‌های یگانه و چندگانه با امکان برقراری ارتباط مستقیم با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها با وجود محدودیت ظرفیت هاب‌ها معرفی شده است.

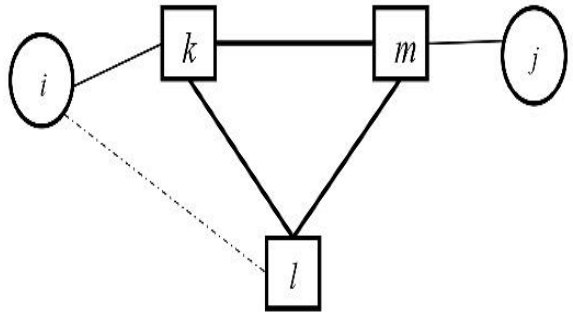
مفروضات در نظر گرفته‌شده عبارت‌اند از:

- شبکه (گراف) بین هاب‌ها کامل است.
- تعداد هاب‌ها از قبل مشخص شده و مدل از نوع برون‌زاد بوده است.
- گره‌های غیرهاب فقط به یک هاب تخصیص داده می‌شوند (تخصیص یگانه).
- در هر لحظه امکان از دسترس خارج‌شدن فقط یک هاب وجود دارد.
- احتمال از دسترس خارج‌شدن هر هاب مشخص است.
- در هنگام اختلال، از بین هاب‌های موجود برای هاب از دسترس خارج‌شده پشتیبان انتخاب می‌شود.
- در صورت بروز اختلال در یک گره‌ی هاب، تمام ظرفیت هاب از دست خواهد رفت (اختلال کامل).
- به هنگام از دسترس خارج‌شدن هاب (و تبدیل به یک گره‌ی معمولی)، ممکن است بخشی از تقاضای گره‌ی مذکور برآورده شود، که در این حالت بخش دیگر جریان، از دست‌رفته در نظر گرفته می‌شود.
- در رویکرد پشتیبان‌گیری یگانه، هر هاب یک هاب پشتیبان خواهد داشت و با از دسترس خارج‌شدن هاب، تمامی جریان‌های عبوری از آن به هاب پشتیبان منتقل خواهند شد.
- در رویکرد پشتیبان‌گیری چندگانه، امکان برقراری ارتباط مستقیم بین دو گره‌ی مبدأ و مقصد نیز وجود دارد. در این حالت، با از دسترس خارج‌شدن هر هاب، هر یک از جریان‌های مبدأ- مقصد عبوری از آن هاب می‌تواند به یکی از هاب‌های پشتیبان منتقل و یا ارتباط مستقیم بین مبدأ- مقصد برقرار شود.
- هاب‌ها ظرفیت محدود دارند.

در ادامه، با درنظرگرفتن فرضیات ذکرشده، مدل‌های پیشنهادی برای مسئله‌ی مکان‌یابی هاب با پشتیبان‌گیری یگانه و ظرفیت محدود گره‌های هاب (CSApHMLP-SB)[15] و مسئله‌ی مکان‌یابی هاب با پشتیبان‌گیری چندگانه و امکان ارتباط مستقیم و ظرفیت محدود گره‌های هاب (CSApHMLP-MB&DL)[16] ارائه شده است.

اگر احتمال خرابی گره‌ها صفر باشد و ظرفیت هر یک از گره‌های شبکه به اندازه‌ی مجموع جریان‌های کل شبکه در نظر گرفته شود، مسئله‌های CSApHMLP-SB و CSApHMLP-MB&DL را می‌توان به مسائل کلاسیک هاب کاهش داد. در مسئله‌ی CSApHMLP-MB&DL با صفر درنظرگرفتن احتمال خرابی گره‌ها، امکان برقراری ارتباط مستقیم، که برای شرایط بحران در نظر گرفته شده است، نیز وجود ندارد.

به جهت نزدیک‌ترشدن مسئله به شرایط دنیای واقعی، جریمه‌ی استفاده از مسیر جایگزین فقط برای بخش‌هایی از مسیر که نسبت به شرایط عادی تغییر کرده است، در نظر گرفته شده است. درشکل ۱، در شرایط عادی (پیش از بحران) برای جابجایی جریان‌ها از مبدأ i به مقصد j از دو هاب k و m استفاده می‌شود، در صورت از دسترس خارج‌شدن هاب k، هاب l پشتیبان هاب اول مسیر i به j خواهد شد.



شکل ۱. مسیر مبدأ به مقصد قبل و پس از بحران در یک شبکه‌ی هاب و کمان.

[14] Karush–Kuhn–Tucker

[15] Capacitated Single Allocation p-Hub Median Location Problem with Single Backup

[16] Capacitated Single Allocation p-Hub Median Location Problem with Multiple Backup Hubs and Direct Links

اگر c_{ik} هزینه‌ی جابجایی یک واحد جریان از گره‌ی i به k گره باشد، در شرایط عادی هزینه‌ی جابجایی هر واحد جریان از مبدأ i به مقصد j مطابق رابطه‌ی ۱ خواهد بود:

$$C_{ikmj} = c_{ik} + \alpha c_{km} + c_{mj} \qquad (۱)$$

که در آن، α نرخ تخفیف مسافرت بین هاب‌هاست.

در مطالعه‌ی حاضر، دو ضریب جریمه‌ی متفاوت برای بخش‌هایی از مسیر مبدأ به مقصد، که نسبت به شرایط عادی تغییر کرده است، مطابق رابطه‌ی ۲ در نظر گرفته شده است:

$$C_{ilmj} = \tau_1 c_{il} + \tau_2 \quad \alpha c_{lm} \quad + c_{mj} \qquad (۲)$$

ضریب جریمه‌ی اول (τ_1) برای یال مبدأ به هاب اول است، که از آن قبل از بحران استفاده نمی‌شده است، اما یال مربوط به هاب پشتیبان (l) به هاب دوم (m) پیش از بحران استفاده می‌شده و پس از بحران، ترافیک بیشتری از آن عبور می‌کند؛ به همین دلیل از دو ضریب جریمه‌ی متفاوت استفاده شده است، که همواره $\tau_1 \geq \tau_2$ است.

در مطالعه‌ی حاضر، G(N,E) یک شبکه‌ی کاملاً متصل در نظر گرفته شده است، که N مجموعه‌ی گره‌ها و E مجموعه‌ی مسیرهای ارتباطی بین گره‌های شبکه هستند. پارامترها و متغیرهای تصمیم استفاده‌شده برای ارائه‌ی دو مدل ذکرشده، به این صورت هستند (N تعداد گره‌ها در شبکه است و تمامی اندیس‌ها زیرمجموعه‌ی N هستند).

- پارامترها

c_{ij} هزینه/ فاصله بین گره‌های i و j

d_{ij} هزینه/ فاصله بین گره‌های i و j

w_{ij} میزان جریان از گره‌ی i به گره‌ی j

P تعداد هاب‌ها

Q_k ظرفیت هاب k

f_k احتمال از دسترس خارج‌شدن هاب k

f_m^k احتمال اختلال در هاب m، که اگر k=m باشد، مقدار صفر می‌گیرد؛ در غیر این‌صورت برابر با f_k است.

β_k درصدی از جریان‌های هاب k، که پس از خرابی برآورده خواهد شد.

δ ضریب جریمه‌ی تقاضای از دست‌رفته

γ ضریب جریمه‌ی استفاده از مسیر مستقیم

τ_1 ضریب جریمه‌ی مربوط به مسیر پشتیبان از گره‌ی مبدأ به هاب پشتیبان و یا هاب پشتیبان به مقصد

τ_2 ضریب جریمه‌ی مربوط به مسیر پشتیبان از هاب پشتیبان به هاب دوم و یا هاب اول به هاب پشتیبان

- متغیرها

x_{ik} اگر گره‌ی i به هاب k تخصیص یابد، مقدار ۱ و در غیر این‌صورت مقدار ۰ می‌گیرد.

x_{kk} اگر در گره‌ی k ، هاب استقرار یابد، مقدار ۱ و در غیر این‌صورت مقدار ۰ می‌گیرد.

y_{ij}^{km} در صورتی که جهت انتقال جریان از گره‌ی i به گره‌ی j از هاب‌های k و m استفاده شود، مقدار ۱ اختیار می‌کند و در غیر این‌صورت برابر ۰ خواهد بود.

u_{kl} اگر هاب l به‌عنوان پشتیبان هاب k انتخاب شود، مقدار ۱ و در غیر این‌صورت مقدار ۰ می‌گیرد.

۱.۳. مدل ریاضی (CSApHMLP-SB)

مدل مکان‌یابی p- هاب میانه با پشتیبان‌گیری یگانه و درنظرگرفتن محدودیت ظرفیت برای گره‌های هاب به صورت روابط ۳ الی ۱۳ ارائه شده است:

$$\min \sum_i \sum_{k \neq i} \sum_m \sum_{j \neq m} c_{ij}^{km} w_{ij} \quad 1 - \qquad (A) \qquad (۳)$$

$$f_k - f_m^k \Big] y_{ij}^{km}$$

$$+ \sum_i \sum_j \Bigg[\sum_{m \neq j} \delta \quad 1 - \beta_i \quad c_{ij}^{im} w_{ij} f_i y_{ij}^{im} \qquad (B)$$

$$+ c_{ij}^{im} w_{ij} \Big[1 - f_i - f_m^i \Big] y_{ij}^{im}$$

$$+ \sum_{k \neq i} \delta \quad 1 - \beta_j \quad c_{ij}^{kj} w_{ij} f_i y_{ij}^{kj}$$

$$+ c_{ij}^{kj} w_{ij} \Big[1 - f_j - f_k^j \Big] y_{ij}^{kj}$$

$$+ c_{ij}^{ij} w_{ij} \Big[1 - f_i - f_j^i \Big] y_{ij}^{ij}$$

$$+ \delta \Big[1 - \beta_i \Big] c_{ij}^{ij} w_{ij} f_i y_{ij}^{ij}$$

$$+ \delta \Big[1 - \beta_i \Big] c_{ij}^{ij} w_{ij} f_j y_{ij}^{ij} \Big]$$

$$+ \sum_{i \neq k} \sum_k \sum_{m \neq k} \sum_{j \neq k} \sum_{l \neq k} \Bigg[\tau_1 d_{il} \qquad (C-۱)$$

$$+ \tau_2 \pi \Big[\alpha d_{lm} \Big] + d_{mj} \Big]$$

$$\Big[w_{ij} + w_{ji} \Big] f_k u_{kl} y_{ij}^{km}$$

$$+ \sum_{i \neq k} \sum_k \sum_{j \neq k} \sum_{l \neq k} \tau_1 \Big[d_{il} + d_{lj} \Big]$$

$$w_{ij} f_k u_{kl} y_{ij}^{kk}$$

$$+ \sum_k \beta_k \Bigg[\sum_j \sum_{m \neq k} \sum_l \Bigg[\tau_1 d_{kl} \qquad (C-۲)$$

$$+ \tau_2 \Big[\alpha d_{lm} \Big] + d_{mj} \Bigg] \Big[w_{kj} + w_{jk} \Big]$$

$$f_k u_{kl} y_{kj}^{km}$$

$$+ \sum_{j \neq k} \sum_{l \neq k} \tau_1 \Big[d_{kl} + d_{lj} \Big]$$

$$\Big[w_{kj} + w_{jk} \Big] f_k u_{kl} y_{kj}^{kk} \Bigg]$$

$$\sum_k x_{ik} = 1 \qquad \forall i \qquad (۴)$$

$$\sum_k x_{kk} = p \qquad (۵)$$

$$x_{ik} \leq x_{kk} \qquad \forall i, k \qquad (۶)$$

$$\sum_k \sum_m y_{ij}^{km} = 1 \qquad \forall i, j \qquad (۷)$$

$$2y_{ij}^{km} \le x_{ik} + x_{jm} \qquad \forall i,j,k,m \qquad (۸)$$

$$\sum_{l \ne k} u_{kl} = x_{kk} \qquad \forall k \qquad (۹)$$

$$u_{kl} \le x_{ll} \qquad \forall k, l \ne k \qquad (۱۰)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_{m \ne l} w_{ij} + w_{ji} \quad y_{ij}^{lm} + \sum_i \sum_j w_{ij} y_{ij}^{ll} \le Q_l x_{ll} \qquad \forall l \qquad (۱۱)$$

$$\begin{aligned} &\sum_i \sum_j \sum_{m \ne l} w_{ij} + w_{ji} \quad y_{ij}^{lm} \\ &+ \sum_i \sum_j w_{ij} y_{ij}^{ll} - \sum_i \sum_j w_{ij} + w_{ji} \quad y_{ij}^{lk} \\ &+ \sum_{i \ne k} \sum_{j \ne k} \sum_{m \ne k} w_{ij} + w_{ji} \quad u_{kl} y_{ij}^{km} \\ &+ \sum_{i \ne k} \sum_{j \ne k} w_{ij} u_{kl} y_{ij}^{kk} \\ &+ \sum_{i \ne k} \sum_{j \ne k} \sum_{m \ne l} w_{ij} + w_{ji} \quad u_{km} y_{ij}^{kl} \\ &+ \beta_k \left(\sum_j \sum_m w_{kj} + w_{jk} \quad u_{kl} y_{kj}^{km} \right. \\ &\left. + \sum_j \sum_{m \ne l} w_{kj} + w_{jk} \quad u_{km} y_{kj}^{kl} \right) \le Q_l x_{ll} \end{aligned} \qquad \forall k, l \qquad (۱۲)$$

$$x_{ik}, y_{ij}^{km}, u_{km} \in 0,1 \qquad \forall i,j,k,m \qquad (۱۳)$$

تابع هدف ۳، میانگین هزینه‌های جابجایی جریان‌ها و هزینه‌ی تقاضای از دست‌رفته را کمینه می‌سازد. بخش A تابع هدف، هزینه‌ی انتقال جریان پیش از وقوع بحران و در حالتی که هر دو گره‌ی مبدأ و مقصد غیرهاب هستند، را محاسبه می‌کند. اگر برای انتقال جریان از مبدأ i به مقصد j از دو هاب k و m استفاده شود و احتمال اختلال در دو گره‌ی مذکور هاب به ترتیب q_k و q_m باشد، در این صورت احتمال در دسترس‌بودن این مسیر از طریق رابطه‌ی ۱۴ محاسبه می‌شود:

$$\text{احتمال در دسترس بودن مسیر} = 1 - f_k \quad 1 - f_m \quad = 1 - f_k - f_m + f_k f_m \qquad (۱۴)$$

از آنجا که در هر مقطع زمانی فقط یک هاب می‌تواند از دسترس خارج شود، مقدار عبارت $f_k f_m$ صفر خواهد بود.

بخش B تابع هدف، هزینه‌ی انتقال جریان پیش از وقوع بحران و هزینه‌ی تقاضای از دست‌رفته پس از وقوع بحران، هنگامی که مبدأ یا مقصد و یا هر دو هاب باشند، را نشان می‌دهد؛ عبارت‌های مربوط به هزینه‌ی تقاضای از دست‌رفته در ضریب جریمه‌ی δ ضرب شده‌اند.

بخش C تابع هدف، هزینه‌ی انتقال جریان با استفاده از مسیرهای پشتیبان را نشان می‌دهد. عبارت‌های بخش C-۱، هزینه‌ی انتقال جریان مربوط به تمام گره‌ها به جز گره‌ی هاب از دسترس خارج‌شده و عبارت‌های بخش C-۲، هزینه‌ی انتقال جریان مربوط به گره‌ی هاب از دسترس خارج‌شده را نشان می‌دهند.

محدودیت‌های ۴ الی ۸، محدودیت‌های کلاسیک مسئله‌ی p- هاب میانه با تخصیص تکی هستند. محدودیت ۹ تضمین می‌کند گره‌ای که از دسترس خارج شده است، یک گره‌ی هاب است و برای آن یک پشتیبان انتخاب شود. محدودیت ۱۰ بیان می‌کند هاب پشتیبان باید از بین هاب‌های موجود باشد. رابطه‌ی ۱۱ تضمین می‌کند پیش از وقوع بحران و در دسترس‌بودن تمام هاب‌ها، میزان جریان عبوری از هر یک از هاب‌ها بیشتر از ظرفیت آن‌ها نشود. معادله‌ی ۱۲ تضمین می‌کند میزان جریان عبوری از هاب l زمانی که هاب k از دسترس خارج شده است، بیش از ظرفیت آن نباشد. عبارت‌های اول و دوم، میزان جریان عبوری از هاب l پیش از وقوع بحران و اختلال در گره‌ی k را محاسبه می‌کند. عبارت سوم، تمام جریان‌هایی که از طریق هاب‌های k و l مسیریابی می‌شده‌اند و به هنگام وقوع بحران استفاده از مسیرهای مذکور امکان‌پذیر نبوده است، را از ظرفیت هاب مدنظر (l) کم می‌کند. سه عبارت توضیح داده‌شده را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۱۵ نیز نمایش داد.

$$\sum_i \sum_j \sum_{m \ne l,k} w_{ij} + w_{ji} \quad y_{ij}^{lm} + \sum_i \sum_j w_{ij} y_{ij}^{ll} \qquad (۱۵)$$

عبارت‌های چهارم و پنجم در رابطه‌ی ۱۲، نشان‌دهنده‌ی میزان جریان‌هایی هستند که از طریق هاب k منتقل می‌شده و پس از اختلال در هاب k، از طریق هاب l به عنوان هاب پشتیبان منتقل خواهد شد، به جز جریان‌هایی که هاب k مبدأ یا مقصد بوده باشد. عبارت ششم، میزان جریان‌هایی که پیش از اختلال توسط هاب‌های k و l مسیریابی می‌شده و با اختلال در گره‌ی k از طریق هاب m (به‌عنوان پشتیبان هاب k) و هاب l مسیریابی خواهد شد، را محاسبه می‌کند. عبارت‌های هفتم و هشتم به ترتیب میزان جریان‌هایی که مبدأ/ مقصد هاب k (هابی که از دسترس خارج شده است) باشد، را در حالتی که هاب پشتیبان، هاب l باشد و یا هاب پشتیبان هابی به غیر از هاب l باشد، اما مقصد/ مبدأ گره‌ی l باشد، را محاسبه می‌کند.

۲.۳. مدل ریاضی (CSApHMLP-MB&DL)

متغیرهایی که در مدل قبلی تعریف شده‌اند، در این مدل نیز استفاده می‌شوند. همچنین در مدل ذکرشده از این متغیرها استفاده می‌شود:

g_{ij}^{kl} اگر هاب l به عنوان پشتیبان هاب اول (k) مسیر i به j انتخاب شود، مقدار ۱ در غیر این صورت ۰ خواهد بود.

s_{ijk} اگر پس از اختلال، بین دو گره‌ی i و j، زمانی که k هاب اول در این مسیر بوده است، ارتباط مستقیم برقرار شود، مقدار ۱ و در غیر این‌صورت ۰ خواهد بود.

فرمول‌بندی مدل مکان‌یابی p- هاب میانه با پشتیبان‌گیری چندگانه و امکان برقراری ارتباط مستقیم با درنظرگرفتن محدودیت ظرفیت برای گره‌های هاب به صورت روابط ۱۶ الی ۲۵ ارائه شده است:

$$\begin{aligned} &\min \sum_i \sum_{k \ne i} \sum_m \sum_{j \ne m} c_{ij}^{km} w_{ij} \\ &\left[1 - f_k - f_m^k\right] y_{ij}^{km} \\ &+ \sum_i \sum_j \left[\sum_{m \ne j} \delta \left[1 - \beta_i\right] c_{ij}^{im} w_{ij} f_i y_{ij}^{im} \right. \\ &+ c_{ij}^{im} w_{ij} \left[1 - f_i - f_m^i\right] y_{ij}^{im} \\ &+ \sum_{k \ne i} \delta \left[1 - \beta_j\right] c_{ij}^{kj} w_{ij} f_j y_{ij}^{kj} \end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
&+c_{ij}^{kj} w_{ij}\left[1-f_j-f_k^j\right] y_{ij}^{kj} \\
&+{}_{ij}^{ij} w_{ij}\left[1-f_i-f_j^i\right] y_{ij}^{ij} \\
&+\delta\left[1-\beta_i\right] c_{ij}^{ij} w_{ij} f_j y_{ij}^{ij} \\
&+\delta\left[1-\beta_j\right] c_{ij}^{ij} w_{ij} f_j y_{ij}^{ij}\Bigg] \\
&+\gamma\Bigg[\sum_{i\neq k}\sum_{k}\sum_{m\neq k}\sum_{j\neq m} d_{ij}\left[w_{ij}+w_{ji}\right] \\
&f_k s_{ijk} y_{ij}^{km}+\sum_{i\neq k}\sum_{j\neq k}\sum_{k} d_{ij} \\
&w_{ij} f_k s_{ijk} y_{ij}^{kk}\Bigg] \\
&+\sum_{i\neq k}\sum_{k}\sum_{m\neq k}\sum_{j\neq k}\sum_{l\neq k}\Bigg[\tau_1 d_{il}+ \\
&\tau_1\left[\alpha d_{lm}\right]+d_{mj}\Bigg] \\
&\left[w_{ij}+w_{ji}\right] f_k g_{ij}^{kl} y_{ij}^{km} \\
&+\sum_{i\neq k}\sum_{k}\sum_{j\neq k}\sum_{l\neq k}\tau_1\left[d_{il}+d_{lj}\right] \\
&w_{ij} f_k g_{ij}^{kl} y_{ij}^{kk} \\
&+\sum_{k}\beta_k\Bigg[\sum_{j}\sum_{m}\sum_{l}\Bigg[\tau_1 d_{kl}+ \\
&\tau_2\left[\alpha d_{lm}\right]+d_{mj}\Bigg] \\
&\left[w_{kj}+w_{jk}\right] f_k g_{kj}^{kl} y_{kj}^{km}\Bigg]
\end{aligned}
\tag{۱۶}
$$

$$s_{ijk}+\sum_{l\neq k} g_{ij}^{kl}=\sum_{m} y_{ij}^{km} \qquad \forall i,j\neq k,k \tag{۱۷}$$

$$2g_{ij}^{kl}\leq x_{ll}+\sum_{m} y_{ij}^{km} \qquad \forall i,j,k,l \tag{۱۸}$$

$$s_{ijk}+x_{ii}\leq 1 \qquad \forall i,j,k \tag{۱۹}$$

$$s_{ijk}+x_{jj}\leq 1 \qquad \forall i,j,k \tag{۲۰}$$

$$s_{ijk} y_{ij}^{kk}=s_{ijk} y_{ji}^{kk} \qquad \forall i,j,k \tag{۲۱}$$

$$g_{ij}^{kl} y_{ij}^{kk}=g_{ji}^{kl} y_{ji}^{kk} \qquad \forall i,j,k,l \tag{۲۲}$$

$$
\begin{aligned}
&\sum_{i}\sum_{j}\sum_{m\neq l} w_{ij}+w_{ji}\quad y_{ij}^{lm}+ \\
&\sum_{i}\sum_{j} w_{ij} y_{ij}^{ll}\leq Q_l x_{ll}
\end{aligned}
\qquad \forall l \tag{۲۳}
$$

$$
\begin{aligned}
&\sum_{i}\sum_{j}\sum_{m\neq l} w_{ij}+w_{ji}\quad y_{ij}^{lm} \\
&+\sum_{i}\sum_{j} w_{ij} y_{ij}^{ll}-\sum_{i}\sum_{j} w_{ij}+w_{ji}\quad y_{ij}^{lk} \\
&+\sum_{i\neq k}\sum_{j\neq k}\sum_{m\neq k} w_{ij}+w_{ji}\quad g_{ij}^{kl} y_{ij}^{km} \\
&+\sum_{i\neq k}\sum_{j\neq k} w_{ij} g_{ji}^{kl} y_{ij}^{kk} \\
&+\sum_{i\neq k}\sum_{j}\sum_{m\neq l} w_{ij}+w_{ji}\quad g_{ji}^{kl} y_{ij}^{kl} \qquad \forall k,l \\
&+\beta_k\sum_{j}\sum_{m} w_{kj}+w_{jk} \\
&g_{kj}^{kl} y_{kj}^{kl}+\sum_{j}\sum_{m\neq l} w_{kj} \\
&+w_{jk}\quad g_{kj}^{kl} y_{kj}^{km}\leq Q_l x_{ll}
\end{aligned}
\tag{۲۴}
$$

$$x_{ik}, y_{ij}^{km}, g_{ij}^{km}, s_{ijk}\in 0,1 \qquad \forall i,j,k,m \tag{۲۵}$$

همانند مدل CSApHMLP-SB، تابع هدف ۱۶ امید ریاضی هزینه‌ها را کمینه می‌سازد.

معادله‌ی ۱۷ الزام می‌کند که اگر گره‌ی k هاب اول در مسیر i به j باشد، برای شرایط بحران یا گره‌ای غیر از k ($l\neq k$) به‌عنوان هاب پشتیبان این مسیر در نظر گرفته می‌شود و یا مسیر مستقیم بین گره‌های i و j برقرار می‌شود. معادله‌ی ۱۸ تضمین می‌کند در صورتی گره‌ی l می‌تواند به‌عنوان پشتیبان هاب اول (k) در مسیر گره‌ی i به گره‌ی j انتخاب شود که گره‌ی l هاب باشد و همچنین برای انتقال جریان از گره‌ی i به گره‌ی j، هاب k به‌عنوان هاب اول انتخاب شده باشد.

معادله‌های ۱۹ و ۲۰ نشان می‌دهند در صورتی می‌توان بین گره‌های i و j ارتباط مستقیم برقرار کرد که هیچ‌یک از دو گره‌ی مذکور هاب نباشند، می‌توان دو معادله‌ی اخیر را به صورت رابطه‌ی ۲۶ نوشت:

$$2s_{ijk}+x_{ii}+x_{jj}\leq 2 \qquad \forall i,j,k \tag{۲۶}$$

رابطه‌ی ۲۱ بیان می‌کند هنگامی که هر دو گره‌ی i و j به یک هاب تخصیص یافته‌اند و این هاب از دسترس خارج شده است، اگر برای مسیر رفت از ارتباط مستقیم استفاده شود، برای مسیر برگشت نیز باید از ارتباط مستقیم استفاده شود. رابطه‌ی ۲۲، تضمین می‌کند هنگامی که دو گره‌ی i و j به یک هاب تخصیص یافته‌اند و این هاب از دسترس خارج شود، فقط از یک هاب پشتیبان برای انتقال جریان دو گره‌ی i و j استفاده شود.

معادله‌ی ۲۳ تضمین می‌کند پیش از وقوع بحران، میزان جریان عبوری از هر هاب بیش از ظرفیت آن نشود. معادله‌ی ۲۴ اطمینان می‌دهد میزان جریان عبوری از هاب l زمانی که هاب k از دسترس خارج شده باشد، بیش از ظرفیت آن نباشد. در معادله‌ی ۲۴، دو عبارت نخست، مجموع جریان عبوری از هاب l پیش از خرابی هاب k را محاسبه می‌کند. عبارت سوم، تمام جریان‌های هاب k (هاب از دسترس خارج‌شده) و هاب l را کم می‌کند و درنهایت، عبارت‌های دیگر، جریان‌هایی که به هنگام وقوع بحران، بازسازی و از طریق هاب l خدمت‌دهی می‌شوند، اضافه می‌کنند.

مدل به‌دست‌آمده، یک مدل غیرخطی عدد صحیح، با تعداد $2n^4+n^3+n^2$ متغیر و $2n^4+3n^3+3n^2+2n+1$ محدودیت است.

مدل ارائه‌شده با ضرب دو متغیر صفر و یک g_{ij}^{kl} و y_{ij}^{km} در تابع هدف و محدودیت‌های ۲۲ و ۲۴ و متغیرهای صفر و یک s_{ijk} و y_{ij}^{km} در تابع هدف و محدودیت ۲۱ غیرخطی شده است. به‌منظور برطرف‌شدن عامل غیرخطی، از دو متغیر b_{ij}^{kml} و r_{ij}^{km} و محدودیت‌های ۲۷ الی ۳۰ استفاده می‌شود.

$$y_{ij}^{km}+g_{ij}^{kl}\le b_{ij}^{kml}+1 \qquad \forall i,j,k,m,l \tag{۲۷}$$

$$2b_{ij}^{kml}\le y_{ij}^{km}+g_{ij}^{kl} \qquad \forall i,j,k,m,l \tag{۲۸}$$

$$y_{ij}^{km}+s_{ijk}\le r_{ij}^{km}+1 \qquad \forall i,j,k,m \tag{۲۹}$$

$$2r_{ij}^{km}\le y_{ij}^{km}+s_{ijk} \qquad \forall i,j,k,m \tag{۳۰}$$

۴. روش حل فراابتکاری

مسئله‌ی مکان‌یابی p- هاب با تخصیص یگانه به‌عنوان یک مسئله‌ی NP-hard شناخته می‌شود. در حقیقت حتی با مشخص‌بودن مکان هاب‌ها، مسئله‌ی تخصیص بهینه‌ی گره‌های غیرهاب به گره‌های هاب، یک مسئله‌ی NP-hard است. مسائل CSApHMLP-SB وCSApHMLP-MB&DL را می‌توان به مسائل پایه‌ی هاب کاهش داد، اگر احتمال خرابی گره‌ها صفر باشد و ظرفیت هر یک از گره‌های شبکه به اندازه‌ی مجموع جریان‌های کل شبکه در نظر گرفته شود. در مسئله‌ی CSApHMLP-MB&DL با صفر درنظرگرفتن احتمال خرابی گره‌ها، امکان برقراری ارتباط مستقیم که برای شرایط بحران در نظر گرفته شده است، نیز وجود ندارد. بنابراین دو مدل ارائه‌شده، NP-hard هستند و حل دقیق آن‌ها برای مسائل در اندازه‌های بزرگ بسیار زمانبر و در خیلی مواقع غیرممکن است. لذا در پژوهش حاضر، برای حل مدل‌های ارائه‌شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک، روش حل ارائه شده است.[۱۹] از مهم‌ترین عوامل در طراحی الگوریتم‌های فراابتکاری، شیوه‌ی نمایش جواب است، که بتواند به شکلی مؤثر فضای جواب را جستجو کند. هر جواب در فضای حل مسئله معمولاً در یک رشته از علامت‌های محدود نمایش داده می‌شود، که هر رشته، کروموزوم نامیده می‌شود و یک جواب برای مسئله است، که این جواب می‌تواند امکان‌پذیر (شدنی) یا غیرممکن (نشدنی) باشد.

کروموزوم‌های ارائه‌شده برای مسئله‌ی اخیر، علاوه‌بر تعیین گره‌های هاب و تخصیص گره‌های باقی‌مانده به تسهیلات هاب، مسیرهای پشتیبان در شرایط وقوع بحران را نیز مشخص می‌کنند. جواب‌های تولیدشده در هر یک از گام‌های الگوریتم، ممکن است به‌دلیل نقض محدودیت ظرفیت تسهیلات هاب، نشدنی باشند؛ بنابراین شدنی‌بودن جواب‌های تولیدشده در هر مرحله بررسی می‌شود.

همه‌ی جواب‌های تولیدشده در فرآیند الگوریتم حفظ می‌شوند. در صورت نقض محدودیت (ظرفیت)، تابع برازندگی برابر با تابع هدف مسئله به‌علاوه‌ی جریمه نقض است، که این جریمه خود ضریبی از تابع هدف است (همواره ضریب جریمه بزرگ‌تر از ۱ است).

- ساختار جواب

ساختار جواب استفاده‌شده برای حل مسئله‌ی CSApHMLP-SB توسط الگوریتم یک ماتریس ۲×N مطابق شکل ۲ است، که در آن، N تعداد

Nodes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hub selection	0.79	0.66	0.85	0.68	0.74	0.66	0.71	0.28	0.10	0.69
Backup & allocation	0.96	0.04	0.93	0.76	0.39	0.17	0.03	0.05	0.82	0.32

شکل ۲. ساختار جواب تصادفی برای مسئله‌ی CSApHMLP-SB با ۱۰ گره.

Hubs	1st	2st	3st
Node	3	1	5

الف

node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Allocated hub	1	1	3	5	5	1	5	3	3	5

ب

شکل ۳. (الف) تعیین گره‌های هاب، (ب) تخصیص گره‌های غیرهاب به هاب‌ها.

Hubs	1st	2st	3st
Node	3	1	5
Backup hub	5	5	3

شکل ۴. تعیین هاب پشتیبان.

گره‌هاست. سطر اول ماتریس برای انتخاب گره‌های هاب و تخصیص گره‌های غیرهاب به هاب و سطر دوم آن برای انتخاب هاب پشتیبان است.

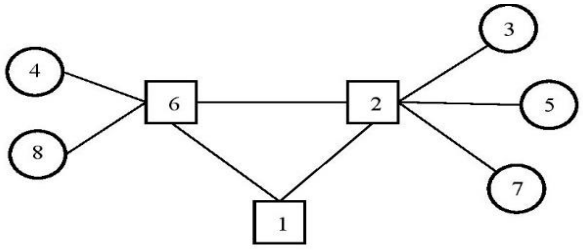
ماتریس ذکرشده با اعداد تصادفی در بازه‌ی [۰,۱) تولید می‌شود، که با مرتب‌کردن اعداد سطر نخست به صورت غیرصعودی، p گره‌ی اول با بالاترین مقدار، به عنوان هاب انتخاب می‌شوند. اگر p مساوی ۳ در نظر گرفته شود، مطابق شکل ۳- الف به ترتیب گره‌های ۳، ۱، و ۵ به عنوان هاب انتخاب می‌شوند. سپس اعداد مربوط به گره‌های غیرهاب در سطر نخست در عدد p ضرب و عدد به‌دست آمده به سمت بالا گرد می‌شود. عدد مذکور به عنوان شماره‌ی هاب منتخب برای گره‌ی غیرهاب در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۳- ب، تخصیص گره‌های غیرهاب به هاب‌ها برای مثال اخیر مشاهده می‌شود.

به‌منظور تخصیص هاب پشتیبان به هر هاب، ابتدا برای هر یک از هاب‌ها مجموعه‌ی A تشکیل می‌شود، که شامل هاب‌هایی است که می‌توانند به‌عنوان پشتیبان هاب مدنظر انتخاب شوند. تعداد اعضاء مجموعه‌ی A برای هر هاب p-1 است. سپس اعداد مربوط به گره‌های هاب در سطر دوم در عدد p-۱ ضرب می‌شوند و اگر b برابر عدد حاصل از گردکردن به سمت بالای آن عدد در نظر گرفته شود، b نشان‌دهنده‌ی شماره‌ی هاب پشتیبان هاب مذکور در مجموعه‌ی A است. هاب‌های پشتیبان مثال اخیر در شکل۴ مشاهده می‌شوند.

ساختار جواب استفاده‌شده برای حل مسئله‌ی CSApHMLP-MB&DL، یک ماتریس N×N مطابق شکل ۵ است، که N تعداد گره‌هاست. ماتریس اخیر با اعداد تصادفی در بازه‌ی [۰,۱) تولید می‌شود و در آن، اعداد مربوط به قطر اصلی به‌منظور انتخاب هاب‌ها و تخصیص گره‌های غیرهاب به هاب‌ها (این عمل

0.63	0.12	0.05	0.54	0.21	0.62	0.86	0.33
0.66	0.86	0.49	0.70	0.57	0.57	0.79	0.47
0.73	0.48	0.19	0.50	0.64	0.05	0.51	0.65
0.89	0.84	0.12	0.54	0.42	0.93	0.18	0.03
0.98	0.21	0.21	0.45	0.21	0.73	0.40	0.84
0.77	0.55	0.15	0.12	0.95	0.74	0.13	0.56
0.58	0.63	0.19	0.49	0.08	0.06	0.03	0.85
0.93	0.03	0.04	0.85	0.11	0.86	0.94	0.35

شکل ۵. ساختار جواب تصادفی برای مسئله‌ی CSApHMLP-MB&DL با ۱۰ گره.



شکل ۶. شبکه‌ی هاب و کمان.

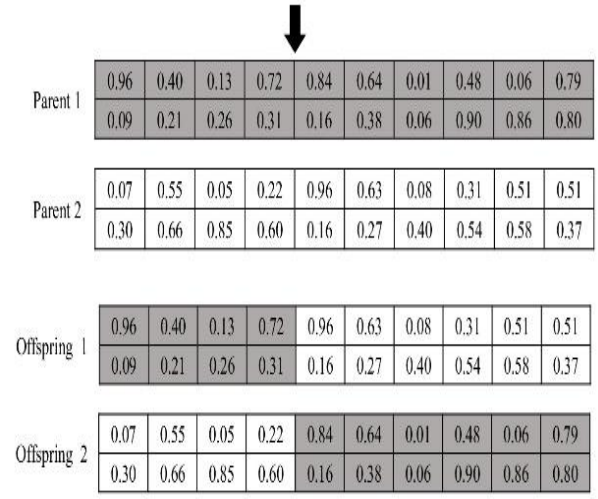
جدول ۱. تعیین مجموعه‌ی A جهت انتخاب مسیر پشتیبان.

Origin-Destination route	Members of set A
Rout 3 to 2	{**1,6**}
Rout 5 to 2	{**1,6**}
Rout 3 to 1	{**1,6**}
Rout 3 to 6	{**1,6**}
Rout 3 to 4	{**1,6,DR**}
Rout 3 to 8	{**1,6,DR**}

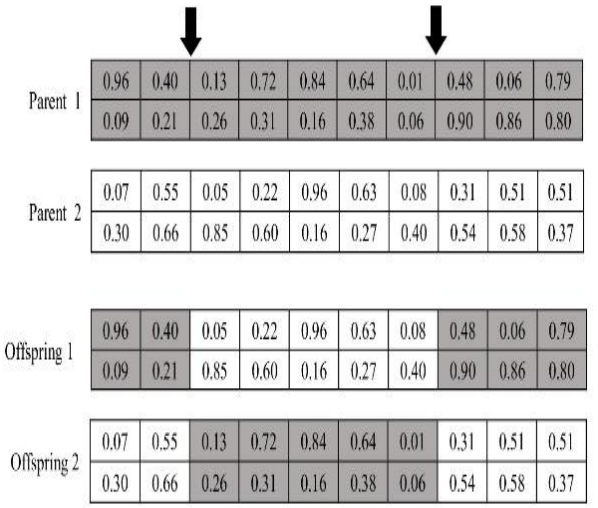
مشابه سطر اول نمایش جواب مسئله‌ی CSApHMLP-SB صورت می‌گیرد) و مابقی اعداد به‌منظور تعیین مسیر پشتیبان در هنگام وقوع بحران استفاده می‌شود.

به‌منظور انتخاب مسیر پشتیبان، ابتدا برای هر مسیر، مجموعه‌ی A تشکیل می‌شود. مجموعه‌ی A شامل p-1 هاب است که می‌توانند به‌عنوان هاب پشتیبان برای هاب اول در مسیر در نظر گرفته شوند و اگر امکان برقراری ارتباط مستقیم برای مسیر مد نظر وجود داشته باشد، عضو p اُم این مجموعه، برقراری مسیر مستقیم بین مبدأ و مقصد (DR) خواهد بود. در صورتی که مبدأ یا مقصد، هاب باشند؛ امکان برقراری ارتباط مستقیم وجود نخواهد داشت و مجموعه‌ی A دارای p-1 عضو خواهد بود. بدین صورت برای تعیین مسیر پشتیبان، عدد مربوط به هر مسیر در تعداد اعضاء مجموعه‌ی A ضرب می‌شود و عدد حاصل از گردکردن آن به سمت بالا، مسیر پشتیبان را مشخص می‌سازد. برای درک بهتر این موضوع، بخشی از شبکه‌ی مثال اخیر در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

با فرض از دسترس خارج‌شدن هاب شماره‌ی ۲، مجموعه‌ی A برای بخشی از مسیرها، که هاب شماره‌ی ۲، هاب اول در مسیر مبدأ و مقصد است، در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۷ عملگر تقاطع تک‌نقطه‌ای.



شکل ۸. عملگر تقاطع دونقطه‌ای.

منظور از DR، امکان برقراری ارتباط مستقیم است.

در هر مرحله (نسل) از الگوریتم ژنتیک، تعداد pop size کروموزوم وجود دارد؛ که در مرحله‌ی اول با اعداد تصادفی در بازه‌ی [۰,۱) تولید می‌شوند.

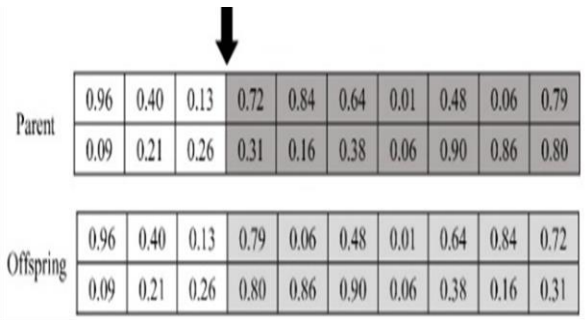
۱.۴. عملگرهای مسئله‌ی CSApHMLP-SB

- عملگرهای تقاطع

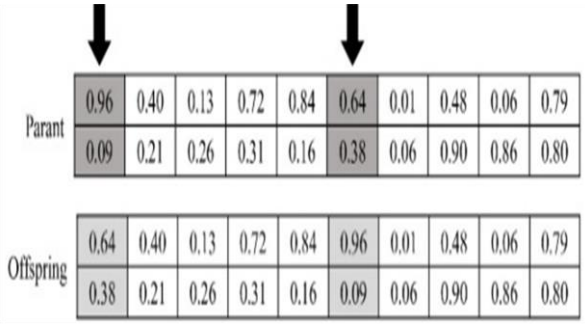
در مسئله‌ی CSApHMLP-SB از دو عملگر تقاطع تک‌نقطه‌ای و دونقطه‌ای استفاده شده است، که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شوند.کروموزوم‌های والد در هر دو عملگر تک‌نقطه‌ای و دونقطه‌ای، به صورت تصادفی از جمعیت انتخاب می‌شوند.

- عملگرهای جهش

در این الگوریتم از عملگرهای جهش تک‌نقطه‌ای و دونقطه‌ای و دو عملگر جهش جدید استفاده شده است، که کروموزوم والد در آن‌ها به‌صورت تصادفی از جمعیت انتخاب می‌شود. در جهش تک‌نقطه‌ای، ابتدا یک نقطه در طول رشته‌ی جواب به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود، سپس مطابق شکل ۹ از آن ستون به بعد، مقادیر تمام ستون‌ها برعکس می‌شوند. در جهش دونقطه‌ای نیز دو عدد به‌صورت تصادفی در طول رشته‌ی جواب انتخاب و ستون‌های مربوط به دو عدد مذکور مطابق شکل ۱۰ جابجا می‌شوند.



شکل ۹. عملگر جهش تک‌نقطه‌ای.



شکل ۱۰. عملگر جهش دونقطه‌ای.

دو عملگر جدید با هدف ایجاد تغییرات تصادفی کوچک در سطر اول کروموزوم به منظور تغییرات در هاب‌ها و تخصیص گره‌های غیرهاب به هاب‌ها و سطر دوم کروموزوم به‌منظور تغییر در هاب‌های پشتیبان استفاده می‌شود. برای ایجاد تغییرات، ابتدا به‌صورت تصادفی، عددی در بازه‌ی [۱, p] انتخاب می‌شود، که r نام‌گذاری شده است، که نشانگر تعداد ژن‌های انتخاب‌شده است. سپس برای عملگر جهش جدید سطر اول، r ژن از سطر اول به‌صورت تصادفی انتخاب و در بازه‌ی [۰,۱) دوباره مقداردهی می‌شوند. عملگر جهش جدید سطر دوم نیز به همین صورت خواهد بود، با این تفاوت که ژن‌های انتخاب‌شده از سطر دوم و فقط شامل گره‌های هاب هستند.

۲.۴. عملگرهای مسئله‌ی CSApHMLP-MB&DL

در مسئله‌ی CSApHMLP-MB&DL، علاوه‌بر عملگرهای استفاده‌شده برای مسئله‌ی CSApHMLP-SB، که در آن‌ها ستون‌های ساختار جواب برش داده می‌شد، عملگرهایی مشابه همان عملگرها (به غیر از دو عملگر جهش جدید معرفی‌شده) اما با اعمال بر روی سطرها استفاده شده‌اند؛ به‌عبارتی، به ازاء هر عملگر در الگوریتم ژنتیک برای مسئله‌ی CSApHMLP-SB، در الگوریتم ژنتیک برای مسئله‌ی CSApHMLP-MB&DL دو عملگر وجود دارد. به‌عنوان مثال، برای جهش تک‌نقطه‌ای با اعمال بر روی سطرها، در پژوهش حاضر، یکی از سطرها به تصادف انتخاب و از آن سطر به بعد، مقادیر تمام ستون‌ها برعکس شده است.

در الگوریتم ذکرشده نیز با توجه پیچیدگی ساختار جواب از یک عملگر جهش جدید برای ایجاد تغییرات کوچک در کروموزوم والد استفاده شده است؛ بدین صورت که با انتخاب تصادفی تعداد مشخصی از ژن‌های کروموزوم والد، به هر یک از آن‌ها به‌صورت جداگانه یک عدد تصادفی در بازه‌ی [۰,۱) تعلق می‌گیرد. این عملگر از ابتدای الگوریتم استفاده نمی‌شود و با عدم بهبودهای متوالی از آن استفاده خواهد شد. تعداد عدم بهبودهای متوالی برای شروع عملگر جهش جدید از پارامترهای الگوریتم است.

مکانیزم جایگزینی یا انتخاب بازمانده، پس از تولید فرزندان توسط عملگرهای تقاطع و جهش اجرا می‌شود. در این الگوریتم اندازه‌ی جمعیت ثابت است، بنابراین باید مشخص شود که کدام افراد در نسل بعد حضور دارند. برخلاف انتخاب والد که تصادفی است، انتخاب بازمانده معمولاً قطعی است. در اینجا برای انتخاب نسل بعد براساس تابع برازندگی عمل می‌شود. به این گونه که پس از مرتب‌سازی غیرنزولی کروموزوم‌های والد و فرزند براساس تابع برازندگی، به تعداد اعضاء جمعیت با کمترین مقدار تابع برازندگی، نسل جدید را تشکیل می‌دهند.

در مسئله‌ی CSApHMLP-SB از عدم بهبود متوالی جواب‌های به‌دست‌آمده در تعداد تکرار مشخصی، برای توقف الگوریتم استفاده شده است. در مسئله‌ی CSApHMLP-MB&DL علاوه‌بر شرط اخیر، از بیشینه‌ی تعداد تکرار نیز به‌عنوان شرط دوم توقف الگوریتم استفاده شده است.

۵. نتایج محاسباتی

پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری در کارایی الگوریتم بسیار مؤثر هستند، به گونه‌ای که تعیین مقدار نامناسب برای آن‌ها می‌تواند منتج به نتایج ضعیف‌تری نسبت به توانایی بالقوه‌ی الگوریتم شود. برای تنظیم پارامترهای الگوریتم و به‌منظور تعیین کمترین تعداد آزمایش با شرایط نزدیک به بهینه، از روش تاگوچی استفاده شده است.

در جدول‌های ۲ و ۳ به ترتیب سطوح مختلف پارامترهای الگوریتم ژنتیک برای مسئله‌های CSApHMLP-SB و CSApHMLP-MB&DL و سطح بهینه‌ی هر یک ارائه شده‌اند. سطح بهینه‌ی هر پارامتر با توجه به نمودارهای میانگین تنظیم پارامترها و سیگنال به نویز تعیین شده است.

جدول ۲. پارامترهای الگوریتم ژنتیک برای مسئله‌ی CSApHMLP-SB و سطوح آن‌ها.

Optimal Level	L 3	L 2	L 1	Factor	Factor Symbol
L2	10N	8N	6N	Population Size	A
L3	40N	30N	20N	No-improvement Counter (NIC)	B
L2	0.9	0.7	0.5	Crossover Rate	C
L2	0.7 NIC	0.5 NIC	0.3 NIC	No-improvement threshold for mutation increase	D
L2	0.8	0.6	0.4	Secondary Mutation Rate	E

جدول ۳. پارامترهای الگوریتم ژنتیک برای مسئله‌ی CSApHMLP-MB&DL و سطوح آن‌ها.

Optimal Level	L 3	L 2	L 1	Factor	Factor Symbol
L3	10N	8N	6N	Population Size	A
L3	30N	20N	10N	Number of Iterations	B
L2	4N	3N	2N	No-improvement Counter (NIC)	C
L3	0.9	0.7	0.5	Crossover Rate	D
L1	0.7 NIC	0.5 NIC	0.3 NIC	No-improvement threshold for mutation increase	E
L1	0.8	0.6	0.4	Secondary Mutation Rate	F
L2	$3\sqrt{N}$	$2\sqrt{N}$	$\sqrt{N}$	Number of perturbations by the secondary mutation	G

جهت بررسی کارایی الگوریتم‌های ارائه‌شده، از مجموعه‌ی داده‌ی CAB با ابعاد ۷ تا ۲۵ گره استفاده شده است. به‌منظور حل مدل‌های پیشنهادی از نرم‌افزار GAMS ۲۷.۳.۰ با حل‌کننده‌ی Gurobi و برای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی از نرم‌افزار متلب (نسخه‌ی a ۲۰۱۹) در سیستمی با مشخصات ۴GHz، CPU: Core i۷ و RAM: ۳۲GB استفاده شده است.

داده‌های مربوط به ظرفیت هاب‌ها، در ابعاد ۷ و ۸ گره از بازه‌ی [۰/۷,۰/۹] (ضربدر مجموع جریان‌های شبکه) و ابعاد بالاتر بازه‌ی [۰/۵,۰/۷] (ضربدر مجموع جریان‌های شبکه) استفاده شده است. برخی دیگر از پارامترها به این صورت تولید و ارائه شده‌اند:

- پارامترهای τ_1 و τ_2 مربوط به جریمه‌ی استفاده از مسیرهای پشتیبان به ترتیب ۲ و ۱/۵ در نظر گرفته شده‌اند.
- برای هر دو پارامتر δ (ضریب جریمه‌ی تقاضای از دست‌رفته) و γ (ضریب جریمه‌ی استفاده از ارتباط مستقیم)، مقدار ۳ در نظر گرفته شده است.
- f: احتمال از دسترس خارج‌شدن هر هاب است، که برای آن یک عدد تصادفی در بازه‌ی [۰/۰۵,۰/۱] در نظر گرفته شده است.

مسائل طراحی‌شده برای هر دو مسئله یکسان بوده و در هر سطح، از داده‌های یکسان به‌منظور حل آن‌ها استفاده شده است.

حل‌کننده‌ی Gurobi در محدودیت زمانی ۳ ساعت (۱۰, ۸۰۰ ثانیه)، فقط قادر است نمودهای با بیشینه‌ی ۱۱ و ۸ گره را به ترتیب برای مسائل CSApHMLP-SB و CSApHMLP-MB&DL حل کند. لذا، نتایج عددی دو مسئله‌ی اخیر برای نمودهای با ۷ و ۸ گره در جدول ۴ و نتایج عددی مسئله‌ی CSApHMLP-SB برای نمودهای ۹ تا ۱۱ گره در جدول ۵ ارائه شده‌اند. برای هر گره، سه سطح (۰,۰/۵,۰/۷) برای پارامتر β و دو سطح (۰/۵,۰/۷) برای ضریب تخفیف α در نظر گرفته و حل شده‌اند.

نتایج مشاهده‌شده در جدول‌های ۴ و ۵، درصد خطای محاسبه‌شده برای هر نمونه، بیانگر عملکرد مناسب الگوریتم‌های پیشنهادی در ابعاد پایین است. درصد خطا مطابق رابطه‌ی ۳۱ محاسبه می‌شود، که در آن $f(method)$ نشان‌دهنده‌ی مقدار تابع هدف الگوریتم و $f(best)$ نشان‌دهنده‌ی تابع هدف بهینه است.

$$\text{درصدخطا} = \frac{f(method)-f(best)}{f(best)} * 100 \qquad (۳۱)$$

در جدول ۶، نتایج الگوریتم‌های پیشنهادی برای مسئله‌های CSApHMLP-SB و CSApHMLP-MB&DL در ابعاد بالا ارائه شده است. در مسائل بررسی‌شده β = ۵/۰ در نظر گرفته شده است. بخش‌هایی که با علامت * مشخص شده‌اند، نشانگر عدم توانایی الگوریتم برای یافتن جواب شدنی برای مسائل مذکور با ظرفیت ذکرشده و p= ۳ است.

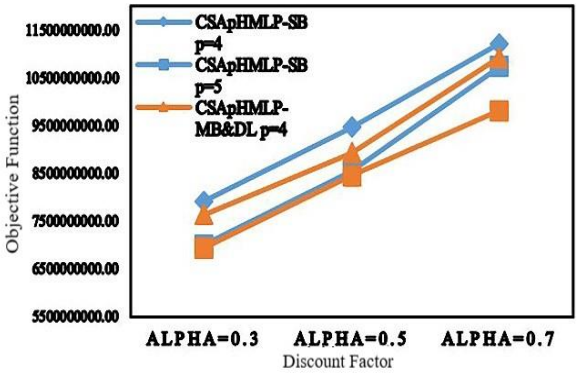
- تحلیل حساسیت

۱.۵. عامل تخفیف

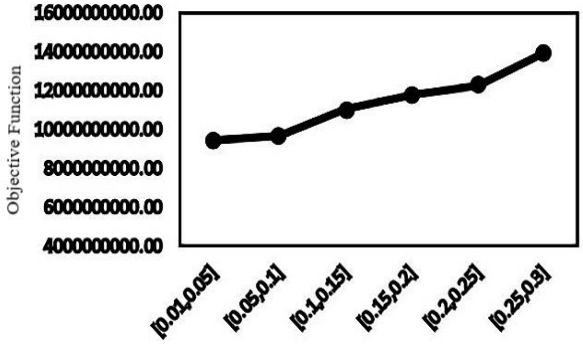
عامل تخفیف بیانگر میزان تخفیف در هزینه‌ی جابجایی جریان بین دو گره‌ی هاب است.[۱۱] با درنظرگرفتن سه سطح (۰/۳,۰/۵,۰/۷) برای عامل تخفیف α و تعداد ۴ و ۵ هاب برای ۲۵ گره‌ی مسئله‌ی CAB، به بررسی اثر تغییرات عامل تخفیف در تابع هدف مسئله‌های CSApHMLP-SB و CSApHMLP-MB&DL پرداخته شده است. در شکل۱۱، اثر تغییرات عامل تخفیف در تابع هدف مسائل طراحی‌شده مشاهده می‌شود.

۲.۵. احتمال از دسترس خارج‌شدن هاب

تأثیر افزایش احتمال از دسترس خارج‌شدن هاب‌ها در هزینه‌ها در شکل۱۲ مشاهده می‌شود. به‌منظور بررسی احتمال از دسترس خارج‌شدن هاب‌ها بر روی تابع هدف برای مسئله‌ی CSApHMLP-MB&DL، شش مثال با مقادیر



شکل ۱۱. تأثیر افزایش ضریب تخفیف هزینه در سود موردانتظار.



شکل ۱۲. تأثیر افزایش احتمال از دسترس خارج‌شدن هاب‌ها.

جدول ۴. نتایج عددی مدل ریاضی و الگوریتم‌های پیشنهادی مسئله‌های CSApHMLP-SB و CSApHMLP-MB&DL.

N	β	α	*CSApHMLP-SB problem*					*CSApHMLP-MB&DL* problem					Objective Function Difference (%)
			Exact Solution	Genetic Algorithm	Relative Error	Exact Solution Time (s)	GA Time (s)	Exact Solution	Genetic Algorithm	Relative Error	Exact Solution Time (s)	GA Time (s)	
7	0	0.5	344894917.6	344894917.6	0	29.4	3.6	341451666.9	341451666.9	0	1116.0	3.4	1
		0.7	380528049.7	380528049.7	0	33.8	2.7	376324769.3	376324769.3	0	903.4	2.9	1.1
	0.5	0.5	345003166.0	345003166.0	0	32.9	2.6	339889758.3	340134817.0	0.07	409.9	2.5	1.5
		0.7	374248542.5	374248542.5	0	31..0	2.3	368199904.2	368918496.8	0.19	343.4	3.7	1.6
	1	0.5	387207025.3	387207025.3	0	47.0	2.3	340268066.0	340268066.0	0	663.9	4.7	13.7
		0.7	417175855.6	417175855.6	0	49.4	4.6	358532515.8	358532515.8	0	906.4	3.0	16.3
8	0	0.5	490478128.1	491551366.1	0.21	98.3	3.4	488934204.5	488934204.5	0	6181.9	4.8	1.1
		0.7	535926561.5	535926561.5	0	71.1	3.5	527989060.7	527989060.7	0	3952.2	5.2	1.5
	0.5	0.5	503744979.8	503744979.8	0	103.4	4.0	479519946.9	479519946.9	0	6569.5	5.0	5
		0.7	528775499.8	528775499.8	0	102.8	3.5	518988864.5	518988864.5	0	3794.5	6.8	1.8
	0	0.5	544017331.1	544017331.1	0	156.9	3.6	474593040.4	474614084.8	0.0	4004.8	6.6	14.6
		0.7	582804865.6	582804865.6	0	129.5	4.2	509988668.4	510011298.4	0.0	3064.6	7.1	14

مختلف پارامتر مذکور و تعداد ۲۵ گره، ۴ هاب، $\alpha = ۷/۰$ و $\beta = ۵/۰$ حل شده است. مطابق شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که با افزایش احتمالات ذکرشده، هزینه‌های سیستم افزایش یافته‌اند.

۳.۵. میزان جریان تحت پوشش با/ بدون هاب پشتیبان

متوسط جریان تحت پوشش را می‌توان به‌عنوان معیار مناسبی برای سنجش کیفیت عملکرد شبکه‌های مختلف در نظر گرفت. در مدل‌های پایه‌ای، مسئله‌ی مکان‌یابی هاب کلیه‌ی هزینه‌ها با فرض پایداربودن شرایط عادی در نظر گرفته می‌شود؛ اما در مدل‌سازی و طراحی شبکه‌های پویا، هزینه‌های مربوط به شرایط بروز اختلال نیز در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور نشان‌دادن اهمیت طراحی شبکه‌های پویا در شرایط بروز اختلال، ۱۲ مثال برای مسئله‌ی CSApHMLP-SB با ۵ هاب و $\alpha = ۷/۰$ بررسی و نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است؛ که مطابق آن، در صورت درنظرگرفتن هاب پشتیبان و مسیرهای جایگزین برای زمان‌هایی که اختلالی در عملکرد شبکه ایجاد می‌شود، می‌توان جریان تحت پوشش را افزایش داد.

۴.۵. ظرفیت هاب‌ها

در بخش حاضر، به بررسی تأثیر استفاده از راهبردهای پشتیبان‌گیری یگانه و چندگانه در میزان جریان‌های ورودی به هاب‌ها و لزوم درنظرگرفتن ظرفیت طراحی‌شده‌ی هاب‌ها در مسائل مکان‌یابی هاب با وجود اختلال پرداخته شده است. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده شد، در مسئله‌ی CSApHMLP-SB، الگوریتم ژنتیک ارائه‌شده برای تمام نمودهای طراحی‌شده با $p = ۳$ ، قادر به یافتن جواب شدنی نبوده و در همه‌ی نمودها محدودیت ظرفیت نقض شده است؛ با توجه به این نکته، نیاز به بررسی بیشتر جریان‌های ورودی به هاب‌ها پیش و پس از وقوع بحران است. در ادامه، با معرفی چند شاخص به بررسی این موضوع پرداخته شده است.

میانگین افزایش جریان ورودی به هاب‌ها نسبت به پیش از وقوع اختلال، معیار مناسبی برای مقایسه‌ی راهبردهای پشتیبان‌گیری یگانه و چندگانه (به‌دلیل تأثیر مستقیم میزان ترافیک ورودی در عملکرد و سرویس‌دهی مناسب این مراکز) است. به‌منظور انجام بهتر مقایسه‌ی مذکور، حالت ساده‌تری با حذف

جدول ۵. نتایج عددی مدل ریاضی و الگوریتم پیشنهادی مسئله‌ی *CSApHMLP-SB* برای ۹ تا ۱۱ گره.

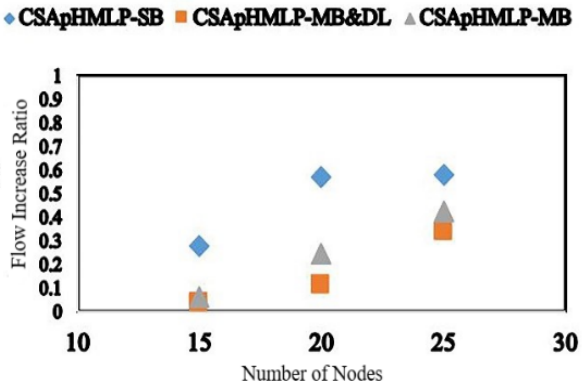
N	β	α	Exact Solution	Genetic Algorithm	Relative Error	Exact Solution Time (s)	GA Time (s)
9	0	0.5	604452699.7	608127341.6	0.6	244.9	5.7
		0.7	658946986.1	658946986.1	0	251.9	5.4
	0.5	0.5	609097319.5	609097319.5	0	261.0	5.3
		0.7	651716489.8	651716489.8	0	257.8	8.6
	1	0.5	613520708.5	613520708.5	0	560.9	5.5
		0.7	645540583.6	645540583.6	0	263.4	5.2
10	0	0.5	718664173.0	718664173.0	0	463.8	10.1
		0.7	803584995.4	804976825.8	0.17	582.5	11.4
	0.5	0.5	770589710.5	770589710.5	0	661.1	9.3
		0.7	853374023.0	853374023.0	0	828.4	10.8
	1	0.5	889723733.6	889723733.6	0	6923.4	11.2
		0.7	980861092.0	988504006.2	0.7	5765.5	10.1
11	0	0.5	844900021.9	844900021.9	0	1235.5	13.4
		0.7	934466522.6	934466522.6	0	1351.2	13.4
	0.5	0.5	860597271.8	860597271.8	0	1242.4	12.0
		0.7	942040689.9	942040689.9	0	1423.2	13.1
	1	0.5	939229463.0	939229463.0	0	2003.5	12.9
		0.7	1023269325.2	1023269325.2	0	8545.9	11.4

جدول ۶. نتایج الگوریتم‌های پیشنهادی برای مسائل با ابعاد بالا.

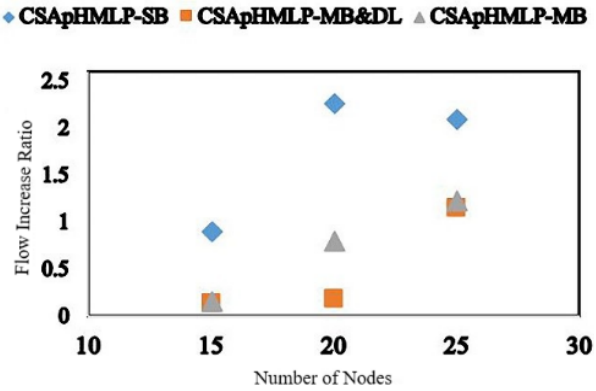
N	p	α	*CSApHMLP-SB* problem		*CSApHMLP-MB&DL* problem		اختلاف
			GA	Time (s)	GA	Time (s)	
15	3	0.3	*		2376258945.2	155.5	
		0.5	*		2640662795.1	212.5	
		0.7	*		2899801136.7	220.0	
	4	0.3	2432132435.9	97.7	2128921764.6	220.5	0.14
		0.5	2629242662.5	166.1	2445633432	218.1	0.07
		0.7	2862695041.8	114.3	2757351073	225.5	0.03
	5	0.3	1891225585.9	120.8	1821829328.8	240.6	0.03
		0.5	2265579278.7	134.9	2190716018.0	233.7	0.03
		0.7	2639559384.1	228.4	2597356424.6	286.9	0.01
20	3	0.3	*		6414613436.0	371.1	
		0.5	*		6685037156.5	268.6	
		0.7	*		7141627797.5	335.3	
	4	0.3	5601064674.4	110.2	5265272287.8	508.5	0.06
		0.5	6768489735.9	85.9	6017563666.4	442.7	0.12
		0.7	6855967405.6	105.0	6610346774.8	497.5	0.03
	5	0.3	4642986393.1	125.1	4570886916.3	555.5	0.01
		0.5	5662695423.3	112.4	5500665669.4	555.1	0.03
		0.7	6294517267.0	142.8	6179716043.4	645.2	0.18
25	3	0.3	*		8534227028.5	617.4	
		0.5	*		10773156256.4	605.5	
		0.7	*		11371977068.4	734.2	
	4	0.3	7921740589.1	312.6	7643130162.8	1216.7	0.03
		0.5	9469152660.7	430.6	8939523115.4	1189.8	0.05
		0.7	11226235624.2	683.8	10937292781.3	1107.1	0.02
	5	0.3	7006781269.1	334.2	6935067608.8	1424.3	0.01
		0.5	8556715488.2	306.1	8449400435.7	1412.3	0.01
		0.7	10737465417.4	311.8	9818706330.2	1472.0	0.09

جدول ۷. مقایسه‌ی میزان جریان تحت پوشش با/ بدون هاب پشتیبان.

Improvement in Covered Flow (%)	Maximum Network Flow	Covered Flow with Backup Hubs	Covered Flow Without Backup Hubs	β	N
7.8	833470	770987.16	715284.2	0	9
12.2	833470	802228.58	715284.2	0.5	
16.5	833470	833470	715284.2	1	
7.4	2364942	2181988.9	2031757.9	0	15
11.9	2364942	2278777.7	2036980.9	0.5	
14.6	2364942	2364942	2063626.6	1	
7.4	5754594	5353261.0	4984580.7	0	20
11.4	5754594	5548998.3	4981767.2	0.5	
14.9	5754594	5754594	5008903.1	1	
6	8540006	7980571.4	7531481.9	0	25
10.2	8540006	8326826.5	7554750.6	0.5	
12.4	8540006	8540006	7598147.9	1	



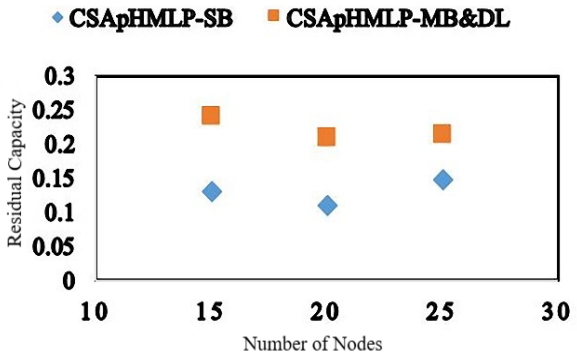
شکل ۱۳. میانگین افزایش جریان ورودی به هاب‌ها نسبت به پیش از وقوع اختلال.



شکل ۱۴. بزرگ‌ترین نسبت افزایش جریان ورودی به هاب‌ها نسبت به پیش از وقوع اختلال.

فرض امکان برقراری ارتباط مستقیم از مسئله‌ی CSApHMLP-MB&DL و تعریف مسئله‌ی مکان‌یابی هاب میانه با پشتیبان‌گیری چندگانه و ظرفیت محدود گره‌های هاب (CSApHMLP-MB)[17] نیز در نظر گرفته شده است. تفاوت مسئله‌های CSApHMLP-MB و CSApHMLP-MB&DL فقط در عدم امکان برقراری ارتباط مستقیم در مسئله‌ی CSApHMLP-MB است.

[17] Capacitated single allocation p-hub median location problem with multiple backup hubs



شکل ۱۵. میانگین ظرفیت استفاده‌نشده‌ی هاب‌ها.

به‌منظور بررسی میانگین افزایش جریان ورودی به هاب‌ها نسبت به پیش از وقوع اختلال، نمودهایی با تعداد گره‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰، $\beta = ۰$ ، $\alpha = ۷/۰$ و ۴ هاب طراحی و برای هر سه مسئله حل شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، در تمامی ابعاد بررسی‌شده، میانگین افزایش جریان‌های ورودی به هاب‌ها در مسئله‌ی CSApHMLP-SB نسبت به دو مسئله‌ی دیگر بالاتر است.

دیگر معیار بررسی‌شده در مثال‌های ذکرشده، بزرگ‌ترین نسبت افزایش جریان ورودی به هاب‌ها نسبت به پیش از وقوع اختلال است، که در شکل۱۴ مشاهده می‌شود. بزرگ‌بودن نسبت اخیر، نشان‌دهنده‌ی ورود ترافیک بالا به هاب نسبت به پیش از وقوع اختلال و در نتیجه ازدحام زیاد در هاب است.

معیار سوم، میانگین ظرفیت استفاده‌نشده‌ی هاب‌هاست. ظرفیت استفاده‌نشده‌ی هر هاب از تفاضل ظرفیت هاب و بیشینه‌ی جریان ورودی هاب (پیش یا پس از وقوع اختلال) به‌دست می‌آید. در شکل ۱۵، میانگین ظرفیت استفاده‌نشده برای مسئله‌های CSApHMLP-SB و CSApHMLP-MB&DL مشاهده می‌شود.

۶. بحث

همان‌گونه که در بخش‌های پیشین اشاره شد، به‌دلیل هزینه‌ی بالا و یا عدم امکان استفاده از ارتباط مستقیم بین تمامی نقاط مبدأ و مقصد، از شبکه‌های هاب و اسپوک استفاده می‌شود. از مهم‌ترین کاربردهای مسئله‌ی مکان‌یابی هاب

می‌توان به صنعت هوایی اشاره کرد، که عوامل متعددی از جمله: بدی آب و هوا، بلایای طبیعی، شیوع بیماری‌ها، اعتصاب کارگری، و خرابکاری می‌تواند منجر به توقف پروازها در هاب شود. راه‌حل ارائه‌شده برای مواجهه با شرایط ذکرشده، استفاده از هاب پشتیبان و یا بهره‌گیری از ارتباط مستقیم است. با توجه به مثال‌های حل‌شده (جدول ۷)، به میزان ۶ الی ۱۶/۵ درصد از کل جریان شبکه با استفاده از رویکرد پشتیبان‌گیری یگانه نسبت به حالت عدم استفاده از هاب پشتیبان بهبود داشته است، که این میزان بهبود در صنعت هوایی چشمگیر است. جنبه‌ی مهم دیگری که در مطالعه‌ی حاضر بررسی شده است، مربوط به ظرفیت هاب‌هاست، که از سه شاخص: میانگین افزایش جریان‌های ورودی به هاب‌ها، بزرگ‌ترین نسبت افزایش جریان ورودی به هاب‌ها، و میانگین ظرفیت استفاده‌نشده‌ی هاب‌ها استفاده شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در هر سه شاخص، مدل CSApHMLP-MB عملکرد بهتری نسبت به مدل CSApHMLP-SB داشته است.

۷. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، مسئله‌ی مکان‌یابی هاب با لحاظ محدودیت ظرفیت بررسی شده است. در پژوهش حاضر، فرض شده است که در شرایط بحران و احتمال اختلال در گره‌های هاب، دو رویکرد پشتیبان‌گیری یگانه و چندگانه با امکان برقراری ارتباط مستقیم وجود دارد. دو مدل ریاضی عدد صحیح با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل ارائه و برای حل مسائل مطرح‌شده، دو روش حل بر پایه‌ی الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. خطای پایین الگوریتم‌های حل پیشنهادی نسبت به جواب‌های بهینه‌ی به‌دست‌آمده حاکی از عملکرد مطلوب روش‌های مذکور است. جواب‌های حاصل از اتخاذ پشتیبان‌گیری‌های یگانه و چندگانه و مقایسه‌ی آن‌ها با هم بیانگر آن است که پشتیبان‌گیری چندگانه از نظر هزینه‌های سیستم و ازدحام درگره‌های هاب بهتر است. همان‌گونه که در بخش ۵.۴ نشان داده شده است، در شرایط بحران در رویکرد پشتیبان‌گیری یگانه، بین ۱۵ الی ۴۵ درصد با ازدحام بیشتر نسبت به رویکرد پشتیبان چندگانه و برقراری ارتباط مستقیم، در گره‌های هاب مشاهده می‌شود. در ادامه‌ی پژوهش حاضر به‌عنوان پیشنهاد مطالعات آتی، این موارد توصیه شده است:

الف) به‌منظور جلوگیری از ازدحام در هاب‌ها، لحاظ متعادل‌سازی جریان‌ها نسبت به ظرفیت هاب در نظر گرفته شود.

ب) امکان اختلال در بیش از یک هاب به‌صورت هم‌زمان مد نظر قرار گیرد.

ج) لحاظ تغییرات تقاضا پس از وقوع بحران در مدل‌سازی موردتوجه باشد.

References- منابع

1. Tan, P.Z. and Kara, B.Y., 2006. A hub covering model for cargo delivery systems. *Networks*, *49*(1), pp.28–39. doi: https://doi.org/10.1002/net.20139

2. ZALUBOWSKI, D. 2021. Airlines cancel more flights after 8,000 were scrapped over Christmas weekend. https://www.euronews.com/embed/1781164 [Online].

3. Naderali. and Nookabadi, A. S., 2015. A multi-objective maximal covering hub location problem which minimizes the total distance, number of vehicles and servers used by each hub. *Isfahan University of Technology* [In persian].

4. O'kelly, M.E., 1987. A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, *32*(3), pp.393–404. doi: https://doi.org/10.1016/S0377-2217(87)80007-3

5. Ernst, A.T. and Krishnamoorthy, M., 1996. Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem. *Location Science*, *4*(3), pp.139–154. doi: https://doi.org/10.1016/S0966-8349(96)00011-3

6. Campbell, J.F. 1994., Integer programming formulations of discrete hub location problems. *European Journal of Operational Research*, *72*(2), pp.387–405. doi: https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90318-2

7. Ebery, J., Krishnamoorthy, M., Ernst, A. and Boland, N., 2000. The capacitated multiple allocation hub location problem: Formulations and algorithms. *European Journal of Operational Research*, [online] *120*(3), pp.614–631. doi: https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00395-6

8. Meraklı, M. and Yaman, H., 2017. A capacitated hub location problem under hose demand uncertainty. *Computers & Operations Research*, *88*, pp.58–70. doi: https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.06.011

9. An, Y., Zhang, Y. and Zeng, B., 2015. The reliable hub-and-spoke design problem: Models and algorithms. *Transportation Research Part B: Methodological*, [online] *77*, pp.103–122. doi: https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.02.006

10. Snyder, L.V. and Daskin, M.S., 2005. Reliability models for facility location: The expected failure cost case. *Transportation Science*, *39*(3), pp.400–416. doi: https://doi.org/10.1287/trsc.1040.0107

11. Cui, T., Ouyang, Y. and Shen, Z.-J.M., 2010. Reliable facility location design under the risk of disruptions. *Operations Research*, *58*(4-part-1), pp.998–1011. doi: https://doi.org/10.1287/trsc.1040.0107

12. Kim, H. and O'Kelly, M.E., 2009. Reliable p-Hub location problems in telecommunication networks. *Geographical Analysis*, *41*(3), pp.283–306. doi: https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2009.00755.x

13. Masoumzadeh, S., solimanpur, M. and kamran, M., 2016. A multi-objective fuzzy goal programming P-hub location and protection model with back-up hubs considering hubs establishment fixed costs. *Scientia Iranica*, *23*(4), pp.1941–1951. doi: 10.24200/sci.2016.3939

14. Pasandideh, S.H.R., Niaki, S.T.A. and Sheikhi, M., 2015. A bi-objective hub maximal covering location problem considering time-dependent reliability and the second type of coverage. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, *11*(4), pp.195–202. doi: https://doi.org/10.1080/17509653.2015.1056265

15. Madani, S. R., Nookabadi, A. S. and Hejazi, S. R., 2018. A bi-objective, reliable single allocation p-hub maximal covering location problem: Mathematical formulation and solution approach. *Journal of Air Transport Management*, *68*, 118-136. doi: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2017.09.001

16. Mohammadi, M., Jula, P. and Tavakkoli-Moghaddam, R., 2019. Reliable single-allocation hub location problem with disruptions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *123*, pp.90–120. doi: https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.01.008

17. Yahyaei, M., Bashiri, M. and Randall, M., 2019. A model for a reliable single allocation hub network design under massive disruption. *Applied Soft Computing*, *82*, p.105561. doi: https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105561

18. Korani, E. and Eydi, A., 2021. Bi-level programming model and KKT penalty function solution approach for reliable hub location problem. *Expert Systems with Applications*, *184*, p.115505. doi: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115505

19. Ziarati, H., Nookabadi, A. S. and Nafchi, M. R., 2020. Hub location with the backup approach by considering capacity constraint in critical situations. *Isfahan University of Technology* [In persian].

20. Sohn, J. and Park, S., 2000. The single allocation problem in the interacting three-hub, *network. Networks*, *35*(1), pp.17–25. doi: https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0037(200001)35:1<17::AID-NET2>3.0.CO;2-N

21. Kara, B.Y. and Tansel, B.Ç., 2000. On the single-assignment p-hub center problem. *European Journal of Operational Research*, *125*(3), pp.648–655. doi: https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00274-X

22. Kara,B. and Tansel,B., 1998. On the allocation phase of the p-hub location problem, *Department of Industrial Engineering, Bilkent University, Tech. Rep*.

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2025), 41(1), 138-151

Sharif University of Technology

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

Research Note

Optimization of Hospital Bed Allocation by a Hybrid Simulation-MCDM Approach

Sara Motevali Haghighi and Ali Ghorbanian*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, Iran
* corresponding author: (a.ghorbanian@esfarayen.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:5 May 2024

Revised:1 October 2024

Accepted:4 November 2024

Keywords:

Optimization,
resource allocation,
hospital bed,
computer simulation,
multi-criteria decision making.

Abstract

Hospitals are one of the key parts of the health system that are responsible for providing services to patients. The optimal allocation of hospital beds is one of the important issues that plays a significant role in the financial and clinical performance of hospitals. Therefore, in this article, an algorithm in six main steps, including data collection, simulation, scenario definition, simulation model execution, calculation of the importance degree of output variables, and ranking of scenarios, has been developed using a computer simulation approach and considering the bed-sharing policy among different hospital departments. The main criteria considered in this study include patient rejection (PR), the percentage of resource utilization (RU), and the length of the queue (LQ). Due to the nature of uncertainty in the problem, a fuzzy DEMATEL method has been used for ranking scenarios. Finally, the best scenarios have been identified from the total scenarios considered, which can be taken into account by hospital managers in decision-making to improve the overall performance of their medical unit using optimal scenario assumptions. The presented algorithm has been investigated on a case study, and its results have been analyzed and reviewed. The considered case study hospital has two inpatient departments. The first department is designated for triage patients and first-type clinic patients, while the second department is for second-type clinic patients. In the conducted case study, the weights of each decision criterion are 0.33, 0.09, 0.27, and 0.30 ,respectively. A total of 36 scenarios have been defined for the case study. In the end, based on the developed model, scenario number 20 has been chosen as the best scenario. In this scenario, the percentage of patient rejection for triage is 9/5%, the resource utilization percentage is 70%, and the average number of people waiting in line for first and second-type clinic patients is 19.73 and 1.27, respectively.

Funding

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

To Cite this article:

Motevali Haghighi, S. and Ghorbanian, A. 2025. Optimization of hospital bed allocation by a hybrid Simulation-MCDM approach, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, 41(1), 138-151.
https://doi.org/10.24200/j65.2024.64305.2402

مجله‌ی علمی مهندسی صنایع و مدیریت شریف، دوره‌ی ۴۱، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۴، صص.۱۳۸-۱۵۱.

مجله علمی مهندسی صنایع و مدیریت شریف

https://sjie.journals.sharif.edu

یادداشت فنی

بهینه‌سازی تخصیص تخت بیمارستانی با رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی فازی

سارا متولی حقیقی و علی قربانیان *

گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی برق و کامپیوتر، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، اسفراین، ایران.

*نویسنده مسئول (a.ghorbanian@esfarayen.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۰۲/۱۶

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۷/۱۰

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

واژگان کلیدی:

بهینه‌سازی،

تخصیص منابع،

تخت بستری،

شبیه‌سازی کامپیوتری،

تصمیم‌گیری چندمعیاره.

چکیده

تخصیص بهینه‌ی تخت بیمارستان از جمله مسائلی است که نقش مهمی در عملکرد مالی و درمانی بیمارستان دارد. در نوشتار حاضر، با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی و درنظرگرفتن سیاست به اشتراک‌گذاری تخت بین بخش‌های مختلف بیمارستان، یک الگوریتم در شش گام توسعه داده شده است. معیارهای در نظر گرفته‌شده، شامل: درصد عدم پذیرش بیمار، استفاده از منبع، و طول صف در بخش‌های مختلف هستند. با توجه به ماهیت غیرقطعی‌بودن مسئله، به‌منظور رتبه‌بندی سناریوها از روش دیمتل فازی استفاده و بهترین سناریو از مجموع سناریوهای ایجادشده انتخاب شده است. سناریوهای مربوط به سطوح مختلف اشتراک‌گذاری، ارزیابی شده و بهترین سناریو و میزان درصد اشتراک‌گذاری تخت به‌دست آمده است. در بهترین سناریوی انتخابی، میزان چهار معیار اصلی انتخابی به ترتیب برابر با: ۹/۵٪، ۷۰٪، ۱۹، و ۱/۲ نفر به‌دست آمده است. مدیران بیمارستان می‌توانند با استفاده از نتایج سناریوهای بهینه، عملکرد کلی واحد درمانی را بهبود بخشند.

۱. مقدمه

بیمارستان‌ها، مهم‌ترین واحد از بخش سلامت و مراقبت‌های بهداشتی هستند، که با ارائه‌ی خدمات بالینی به بیماران، سلامت جامعه را تضمین می‌کنند. لذا، برنامه‌ریزی صحیح مدیران در واحدهای درمانی، افزایش بهره‌وری و استفاده‌ی بهینه از منابع، افزایش رضایت‌مندی بیماران، افزایش درآمد بیمارستان، و سلامت افراد را به دنبال خواهد داشت. از جمله چالش‌های مهمی که بیمارستان‌ها با آن روبرو هستند، بحث مربوط به استفاده‌ی بهینه از تجهیزات است. مدیریت تخت و تخصیص بهینه‌ی آن از جمله چالش‌هایی است که مدیران با آن روبرو هستند. یکی از راه‌کارهایی استفاده‌شده به‌منظور افزایش بهره‌وری و استفاده‌ی بهینه از ظرفیت تخت و افزایش رضایتمندی بیماران، استفاده‌ی مشترک از درصدی از ظرفیت منابع موجود در بخش‌های مختلف است. در نوشتار حاضر، با استفاده از ابزار شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی فازی به مدل‌سازی سناریوهای مختلف، از نحوه‌ی تخصیص تخت و سیاست به اشتراک‌گذاری آن در بین بخش‌های مختلف پرداخته شده است. در این راستا، در ادامه به بررسی ادبیات موضوع، و سپس در بخش دوم، به تعریف مسئله و ارائه‌ی چارچوب پیشنهادی پرداخته شده و نتایج به‌دست‌آمده از فاز شبیه‌سازی و رتبه‌بندی سناریوها و درنهایت، تحلیل نتایج به‌دست‌آمده، به ترتیب در بخش‌های چهار و پنج بیان شده‌اند.

مدیریت و برنامه‌ریزی تخت بیمارستانی از گروه مسائل مهمی است که مدیران و تصمیم‌گیران سیستم سلامت با آن روبرو هستند. درخصوص بهبود سیاست، مطالعات متعددی جهت بهینه‌سازی آن صورت گرفته است، که عمده‌ی مطالعات بر پایه‌ی مدل‌سازی ریاضی و تئوری صف بوده است.[۱-۳] در همین راستا، بهادری و همکاران (۲۰۱۷)، به ارائه‌ی یک مدل ریاضی در یک بیمارستان نظامی جهت تخصیص تخت پرداخته‌اند، که بهینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی و توسعه‌ی تخت‌ها جهت سرویس‌دهی مناسب‌تر بیمارستان از اهداف مدل پیشنهادی ایشان بوده است. درنهایت، با بررسی امکان جابجایی تخت‌ها در بین بخش‌های بیمارستان به ارزیابی سناریوهای موجود پرداخته و براساس نتایج به‌دست‌آمده، هزینه‌های عملیاتی با پیاده‌سازی مدل پیشنهادی، کاهش چشمگیری داشته است.[۴] در مطالعه‌ی دیگری، ژو[1] و همکاران (۲۰۲۲)، به بررسی چیدمان تخت‌های بیمارستانی به‌منظور استفاده‌ی بهینه از این منبع برای کمینه‌سازی زمان خدمت‌رسانی درمانی به بیمار، بهبود کیفیت خدمات، و کاهش هزینه‌های عملیاتی بیمارستان پرداخته‌اند.[۵] پیش‌نماززاده و همکاران

[1] Xue

استناد به این مقاله:

متولی حقیقی، سارا و قربانیان، علی، ۱۴۰۴. بهینه‌سازی تخصیص تخت بیمارستانی با رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی فازی. مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۴۱(۱)، صص. ۱۳۸-۱۵۱. https://doi.org/10.24200/j65.2024.64305.2402

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

(۲۰۲۳)، یک مدل ریاضی جهت تخصیص بهینه‌ی تخت با هدف کاهش طول صف بیماران ارائه داده‌اند، که از روش‌های دقیق جهت حل مسئله بهره گرفته‌اند.[۶] کرزبور[۲] و نهاوندی (۲۰۲۴)، یک مدل ریاضی دو هدفه برای مکان‌یابی بیمارستان و تخصیص بیماران به بیمارستان در شرایط پاندمیک در نظر گرفته‌اند. هدف اول، کمینه‌سازی کمبود تخت بوده است؛ در حالی که، هدف دوم کمینه‌سازی هزینه‌هایی، شامل: هزینه‌های ثابت و متغیر تسهیلات، هزینه‌ی افزودن تخت‌های قابل‌افزایش به امکانات موجود، و هزینه‌ی خدمات برای سرویس‌ها و تخت‌های مختلف بوده است.[۷] حسین‌زاده و همکاران (۲۰۲۴)، روند جریان بیمار را در بیمارستان‌های دولتی با استفاده از شبیه‌سازی سیستم داینامیک برای استفاده‌ی مناسب منابع در بخش مراقبت‌های ویژه در دوران پاندمیک کرونا بررسی کرده‌اند. سناریوهای مختلف براساس راهبردهای-های ممکن برای مدیریت ظرفیت تخت بیمارستان نیز ارزیابی شده است.[۸] یو[۳] و همکاران (۲۰۲۴)، جهت افزایش کیفیت و کارایی خدمات پزشکی، به بهینه‌سازی تخت بیمارستانی با ارائه‌ی الگوریتمی با اهداف هزینه‌ای و کیفیت خدمات پزشکی پرداخته‌اند، که در راستای تصمیم‌های مدیریتی بوده است.[۹] لی و همکاران (۲۰۲۴)، به مطالعه‌ی مسئله‌ی زمان‌بندی جراحی، با محدودیت منابع به‌منظور بهینه‌سازی زمان‌بندی و تخصیص مناسب تخت‌های بیمارستانی به بیماران و در اسرع وقت پرداخته‌اند. بدین منظور از مدل‌سازی اعداد صحیح مختلط استفاده کرده‌اند.[۱۰] آزاده و همکاران (۲۰۱۳)، به بررسی یک مرکز درمانی پرداخته و جهت افزایش سطح کیفیت خدمات درمان از روش شبیه‌سازی و تحلیل پوششی داده استفاده کرده‌اند.[۱۱]

همان‌طور که اشاره شد، یکی از حیاتی‌ترین منابع در مؤسسات بهداشتی و درمانی، تخت‌های بیمارستانی هستند، که تصمیم‌های نامناسب درخصوص تخصیص آن‌ها منجر به عدم استفاده‌ی بهینه از تخت‌ها یا نسبت عدم پذیرش بالای بیماران می‌شود.[۱۲] با توجه به اینکه تخصیص مناسب تخت در بیمارستان تحت عواملی، همچون: عدم قطعیت در زمان بستری‌بودن بیمار، وضعیت بهبودی بیمار، و مسائلی مرتبط به نرخ پذیرش بیمار است؛ این مسئله را به یک مسئله‌ی پیچیده تبدیل کرده است؛[۱۳] بنابراین بهره‌گیری از رویکردهایی که بر این عدم قطعیت غلبه کند، راه‌گشا خواهد بود. در این راستا، ونگ و همکاران (۲۰۲۰)، جهت حل مسئله‌ی ذکرشده، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی اعداد صحیح مختلط، با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های وزنی عدم پذیرش بیماران و منتظر نگهداشتن آن‌ها بنا نهاده‌اند.[۱۲] هه[۴] و همکاران (۲۰۱۹)، به بررسی مروری درخصوص مدل‌هایی که در زمینه‌ی مدیریت تخت بیمارستانی مطرح است، پرداخته و دریافته‌اند که مدل‌سازی شبیه‌سازی، یک روش غالبی است، که در مدیریت تخت بستری استفاده می‌شود.[۱۳] وو[۵] و همکاران (۲۰۱۹)، راهکارهایی جهت تخصیص تخت با درنظرگرفتن تعامل بین بخش‌های مجاور و همچنین اولویت‌های بخش‌های مختلف ارائه داده‌اند، تا در دسترس‌نبودن تخت، انتقال از بخش‌های اورژانس به بخش‌های بستری را مختل نکند. بدین منظور از شبیه‌سازی جهت مدل‌سازی استفاده کرده‌اند.[۱۴] همچنین، گوهرانی و همکاران (۲۰۲۱)، به تخصیص بهینه‌ی تخت‌های بخش مراقبت‌های ویژه‌ی مغز و اعصاب با استفاده از شبیه‌سازی و روش‌های طراحی آزمایش‌ها پرداخته‌اند. براساس نتایج به‌دست‌آمده از مدل آن‌ها، متوسط زمان انتظار بیماران، کاهش و بهره‌وری تخت‌ها افزایش یافته است.[۱۵] پورمحمد و همکاران (۲۰۱۹)، در مطالعه‌ی بهینه‌سازی تخصیص تخت‌های بخش اورژانس بیمارستان شهید مدنی تبریز از برنامه‌ریزی آرمانی استفاده کرده و دریافته‌اند که زمان استفاده از تخت توسط بیمار, مدت زمان انتظار و تعداد تخت‌های خالی کمینه شده و استفاده از پتانسیل نیروی انسانی به میزان بیشینه رسیده است.[۱۶] ترابی‌پور و همکاران (۲۰۱۶)، در برنامه‌ریزی ظرفیت تخت بیمارستانی با استفاده از شبیه‌سازی احتمالی، از مدل رگرسیون استفاده و عواملی را که در مدت زمان در بیمارستان‌بودن بیمار تأثیر داشته‌اند، را بررسی کرده‌اند.[۱۷] ژو[۶] و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندهدفه را جهت تخصیص ظرفیت بخش‌های بیمارستانی با دو هدف بیشینه‌سازی درآمد و برابری ارائه داده‌اند.[۱۸] هو[۷] و همکاران (۲۰۲۱)، به تخصیص تخت بیمارستان در زمان پاندمیک کرونا پرداخته‌اند، بدین منظور از رویکرد تئوری صف استفاده و به‌گونه‌ای تخصیص تخت را مدیریت کرده‌اند، که انتقال بیماری عفونی کاهش یابد.[۱۹] واشیشتا[۸] و همکاران (۲۰۲۳)، به بررسی مسئله‌ی تخصیص تخت بیمارستانی با استفاده از رویکرد صف در جهت کاهش زمان انتظار پرداخته‌اند.[۲۰] باردت و همکاران(۲۰۲۳)، از رویکرد برنامه‌ریزی پویا به‌منظور ظرفیت بهینه‌ی منابع بیمارستان استفاده کرده‌اند.[۲۱] باردت[۹] و همکاران (۲۰۲۳)، نیز به‌منظور شناسایی ظرفیت و تخصیص منابع از یک مدل ریاضی استفاده کرده‌اند.[۲۲] کبیری نائینی و همکاران (۲۰۲۱)، به ارائه‌ی یک مدل ریاضی جهت تخصیص بهینه‌ی تخت در بیمارستان شهید فقیهی شیراز پرداخته‌اند. ایشان تحت یک مدل صف مارکوفی، به دنبال بیشینه‌سازی خدمت‌دهی و کاهش عدم پذیرش به‌وسیله‌ی تخصیص بهینه‌ی تخت بوده‌اند. براساس مدل پیشنهادی آن‌ها، زمان انتظار بیماران کاهش و نرخ پذیرش بیماران افزایش یافته است.[۲۳]

تعداد قابل‌توجهی از مطالعات به‌علت ماهیت پیچیدگی مسئله از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری استفاده کرده‌اند. در همین راستا، تقوی و منعم (۲۰۱۸)، با استفاده از بهینه‌سازی و ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک و رقابت استعماری به بهینه‌سازی تخصیص تخت‌های بخش مراقبت‌های ویژه‌ی بیمارستان شهید فقیهی شیراز پرداخته‌اند. ایشان، عوامل: جنسیت/ سن بیماران، وضعیت پزشکی بیماران، و نام پزشک معالج را مدنظر قرار داده و دریافته‌اند که الگوریتم رقابت استعماری نسبت به الگوریتم ژنتیک کارایی بیشتری دارد و الگوریتم ترکیبی از دو الگوریتم ذکرشده به نسبت الگوریتم استعماری، کارایی بالاتری درخصوص تخصیص بهینه‌ی تخت داشته است.[۲۴] بلسیوگ و گورونسکو[۱۰](۲۰۱۶)، یک مدل ترکیبی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تئوری صف جهت بهینه‌سازی استفاده از تخت و هزینه‌های مرتبط با آن ارائه داده‌اند.[۲۵] بکر[۱۱] و همکاران (۲۰۱۷)، در مورد نحوه‌ی تخصیص تخت‌های بستری در بیمارستان به مطالعه پرداخته و به‌دنبال پاسخ مناسب برای اینکه چگونه تعداد ثابتی از تخت‌های بیمارستانی را در واحدهای مختلف توزیع کنند، بوده‌اند. ایشان بحث انعطاف‌پذیری را مدنظر قرار داده و بر این اساس، سیاست‌های مختلف تخصیص تخت را تحلیل کرده‌اند.[۲۶] ای اولیویرا[۱۲] و همکاران (۲۰۲۰)، به برنامه‌ریزی

[2] Korzebor
[3] Yu
[4] He
[5] Wu
[6] Zhou
[7] Hu
[8] Vashishth
[9] Burdett
[10] Belciug & Gorunescu
[11] Bekker
[12] E Oliveira

تخت‌های بیمارستانی با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی پرداخته و از الگوریتم تکاملی NSGA-II استفاده کرده‌اند.[۲۷] آقاعبداللهیان و بیجاری (۲۰۲۰)، با معرفی یک مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی چندهدفه و با استفاده از رویکردهای فراابتکاری، تعداد تخت بهینه در هر بخش را تعیین کرده‌اند، که نتایج به‌دست‌آمده حاکی از کمینه‌شدن هزینه‌ها بوده است.[۲۸] همچنین محمد و حسین (۲۰۲۱)، نیز از این رویکرد به‌منظور مدیریت تخت‌های بیمارستانی استفاده کرده‌اند.[۲۹] ون[۱۳] و همکاران (۲۰۲۳)، در بررسی و تخصیص تخت بخش مراقبت‌های ویژه برای بیماران اورژانسی، الکتیو و بیمارانی که در حال حاضر بستری هستند، به ارائه‌ی یک مدل بهینه‌سازی دومرحله‌ای با هدف کمینه‌سازی تعداد تخت‌های بخش مراقبت‌های ویژه و بیشینه‌سازی استفاده از منابع و تعداد بیماران پذیرش‌شده با استفاده از رویکرد الگوریتم ژنتیک پرداخته‌اند.[۳۰]

اهمیت مسئله‌ی تخصیص تخت در بیمارستان،غیرقابل‌انکار و چالشی است که بیمارستان‌ها و واحدهای ارائه‌ی خدمات بهداشتی- بالینی با آن روبرو هستند. تخصیص تخت به‌دلیل ظرفیت محدود، نوسان‌های نرخ ورود بیمار، و تعامل‌های خدماتی بین واحدهای مختلف، یک فرآیند تصمیم‌گیری حیاتی است.[۳۱] لذا، اهمیت موضوع بر کسی پوشیده نیست. مدیران مراکز سلامت به لحاظ حساسیت، همیشه نیازمند تصمیم‌های دقیق در حوزه‌ی سلامت هستند. با بررسی‌های انجام‌شده بر روی ادبیات موضوع، مشخص شده است که عمده‌ی مطالعات انجام‌شده درخصوص این مسئله، با استفاده از روش‌ها و مدل‌سازی‌های ریاضی صورت گرفته و در بیشتر مطالعات انجام‌شده، اهدافی چون نرخ رد و پذیرش بیمار، زمان انتظار، و درصد استفاده از منابع در نظر گرفته شده است. در مطالعه‌ی حاضر، سناریوهایی درخصوص بهینه‌سازی تخصیص تخت مطرح شده است، که با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری چندمعیاره، نحوه‌ی تخصیص بهینه را به مدیران ارائه کرده است. رویکرد تلفیقی شبیه‌سازی و دیمتل فازی در عین حال که ماهیت غیرقطعی‌بودن مسئله را در نظر می‌گیرد، پیچیدگی مدل‌های ریاضی بهینه‌سازی را نیز ندارد.

در ادبیات موضوع به بحث بهینه‌سازی یکپارچه با استفاده از تصمیم‌گیری فازی درخصوص این‌گونه مسائل با درنظرگرفتن سیاست به اشتراک‌گذاری تخت بین بخش‌های مختلف بیمارستان پرداخته نشده است. لذا در نوشتار حاضر به موضوع اخیر به‌صورت یک سیاست درخصوص استفاده‌ی بهینه از منابع با توجه به ماهیت غیرقطعی‌بودن مسئله پرداخته شده است. ویژگی‌ها و نوآوری پژوهش حاضر در مقایسه با سایر مطالعه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

همچنین در مطالعه‌ی حاضر از مفهوم مهندسی تاب‌آوری جهت ساخت سناریوها استفاده شده است. سیستمی تاب‌آور است که درنهایت، نه فقط نرخ عدم پذیرش بیمار را کمینه سازد، بلکه با استفاده‌ی درست از منابع، مدت زمان انتظار و در سیستم‌ماندن بیمار را نیز کاهش دهد؛ که این مهم با درنظرگرفتن سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده و امتیاز تاب‌آوری هر سناریو با استفاده از روش دیمتل[۱۴] فازی محاسبه شده است.

همان‌طور که در جدول ۱ به آن اشاره شده است، در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از روش شبیه‌سازی کامپیوتری و دیمتل فازی به‌عنوان یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره، علاوه‌بر اینکه برهم‌کنش معیارها بر روی یکدیگر را در شرایط عدم قطعیت در نظر می‌گیرد، پیچیدگی مدل‌های ریاضی بهینه‌سازی را ندارد. همچنین با استفاده از سیاست به اشتراک‌گذاری تخت بین بخش‌های مختلف، به بهینه‌سازی یکپارچه با درنظرگرفتن نرخ عدم پذیرش از تریاژ، به درصد استفاده از منابع و میانگین تعداد انتظار بیمار پرداخته شده است.

۲. تعریف مسئله

افزایش بهره‌وری و استفاده‌ی بهینه از منابع، افزایش رضایتمندی بیماران، و افزایش درآمد بیمارستان، همگی از اهداف مدیران شبکه‌ی بهداشت و درمان هستند. بیمارستان‌های خصوصی معمولاً با دو طیف از بیماران روبرو هستند. طیف اول، معمولاً بیمارانی هستند که اولویت درمانی بالایی دارند. در واقع، آن‌ها فقط به‌منظور درمان یک بیماری، نیاز به بستری‌شدن در واحدهای درمانی را دارند و با اولویت بالایی از تریاژ بیمارستان و با اولویت کمتری از کلینیک بیمارستان به‌منظور بستری وارد بخش بستری بیمارستان می‌شوند. بیماران واردشده از تریاژ با توجه به اولویت بالای بستری‌شدن، در صورتی که منابع لازم جهت بستری‌شدن فراهم نباشد، به واحدهای درمانی نزدیک‌تر انتقال داده می‌شوند. اما بیماران معرفی‌شده از کلینیک در صف انتظار به‌منظور بستری‌شدن در بخش بستری قرار می‌گیرند. نوع دوم بیماران، معمولاً آن‌هایی

جدول ۱. ویژگی‌های پژوهش انجام‌شده در مقایسه با مطالعات پیشین.

	Bed sharing policy	Integrated optimization	Considering uncertainty	Multicriteria decision making	Considering relation between variables	Simulation optimization
Current study	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Bahadori et al. (2017)	–	✓	–	–	–	–
Xue et al. (2022)	–	–	–	–	–	✓
Pishnamazzadeh at al. (2023)	✓	✓	–	–	–	–
Naeini et al. (2021)	–	✓	–	–	–	–
Wan et al. (2023)	–	✓	–	–	–	–
Azadeh et al. (2013)	–	✓	–	✓	–	✓

[13] Wan

[14] DEMATEL

هستند که درمان، هدف اصلی آن‌ها نیست؛ به‌عنوان مثال، جراحی‌های مربوط به زیبایی.

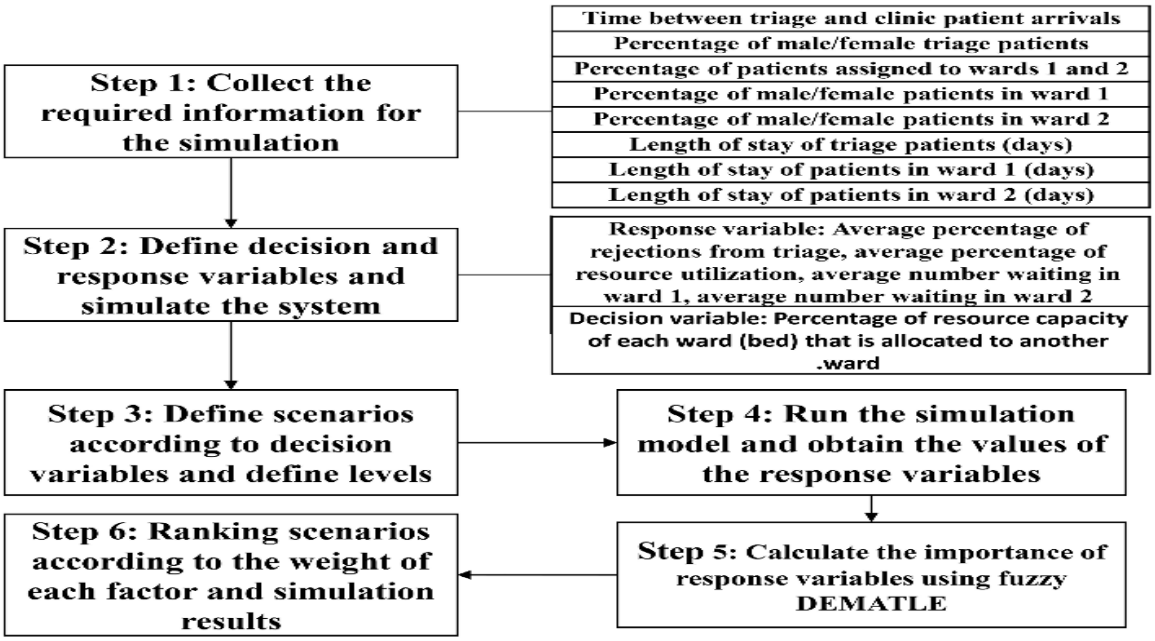
در بیمارستان‌ها، بخش‌های بستری در نظر گرفته‌شده برای بیماران مختلف با توجه به نوع بیماری با یکدیگر متفاوت هستند. یکی از راه‌کارهایی استفاده‌شده به‌منظور افزایش بهره‌وری و استفاده‌ی بهینه از منابع و افزایش رضایتمندی بیماران، استفاده‌ی مشترک از درصدی از ظرفیت منابع موجود در بخش‌های مختلف است. به اشتراک‌گذاری درصدی از ظرفیت بستری یک بخش ممکن است باعث افزایش رضایتمندی بیماران بخش‌های دیگر و همچنین باعث استفاده‌ی بهینه از منابع شود. اما از طرفی می‌تواند باعث افزایش زمان انتظار برای بستری‌شدن بیماران همان بخش و در نتیجه، کاهش رضایت و کاهش درآمد بیمارستان نیز شود. متغیرهای تصمیم در مسئله‌ی اخیر، درصدی از ظرفیت منابع هر بخش (تخت) هستند، که به بخش دیگری اختصاص داده خواهد شد، که جهت ساخت سناریوهای مختلف استفاده شده است. در مطالعه‌ای از پیش‌نمازززاده و همکاران (۲۰۲۳)، نیز بحث اشتراک‌گذاری تخت در نظر گرفته شده است. متغیرهای پاسخ در مسئله نیز درصد استفاده از منابع، میزان رضایت بیماران، و درآمد بیمارستان در نظر گرفته شده است. باید در نظر داشت متغیرهای پاسخ در نظر گرفته‌شده می‌توانند به شکل‌های مختلف بیان شوند. در پژوهش حاضر، به‌منظور ارزیابی متغیر رضایت بیماران، شاخص زمان انتظار/ تعداد بیمار در نظر گرفته شده است. در این خصوص می‌توان به مطالعات واشیشتا و همکاران (۲۰۲۳)،[۲۰] و کبیری نائینی و همکاران (۲۰۲۱)،[۲۳] اشاره کرد. درخصوص متغیر درآمد نیز تعداد بیماران پذیرش‌شده (ون و همکاران (۲۰۲۳)،[۳۰] یا به عبارتی، نرخ پذیرش/ عدم پذیرش بیمار در نظر گرفته شده است.

۱.۲. چارچوب پیشنهادی

روش پژوهش حاضر از منظر هدف، یک پژوهش کاربردی محسوب می‌شود. با استفاده از علم شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری چندمعیاره به بهینه‌سازی یک سیستم سلامت پرداخته شده است. همچنین از منظر روش گردآوری داده از دسته‌ی مطالعات موردی محسوب می‌شود، که براساس یک واحد درمانی واقعی اعتبارسنجی شده است.

مسئله‌ی موردنظر، پارامترهای احتمالی نسبتاً زیادی دارد، لذا بهره‌گیری از یک مدل بهینه‌ی ریاضی، پیچیدگی بالایی خواهد داشت و دستیابی به جواب دقیق را دشوار خواهد ساخت. لذا، برای حل مسئله‌ی پژوهش، یک رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی کامپیوتری همراه با تصمیم‌گیری چندهدفه‌ی فازی ارائه شده است. رویکرد پیشنهادی شامل این گام‌هاست، که به‌صورت شماتیک در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

- **گام اول (جمع‌آوری داده).** با توجه به اینکه یکی از مراحل اصلی مدل پیشنهادی، شبیه‌سازی است، جمع‌آوری اطلاعات لازم جهت اجرای مدل شبیه‌سازی، اولین گام است، که جمع‌آوری دقیق اطلاعات مذکور، نقش مهمی در نتایج شبیه‌سازی و همچنین تصمیم‌گیری نهایی دارد.
- **گام دوم (شبیه‌سازی).** با توجه به اطلاعات جمع‌آوری‌شده، تعریف متغیرهای تصمیم و متغیرهای پاسخ مدل شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ارنا[۱۵] ایجاد می‌شود.
- **گام سوم (تعریف سناریوها).** در این مرحله با توجه به متغیرهای تصمیم و تعریف سطوح مشخص برای هر کدام چندین سناریوی منطقی برای حل مدل ایجاد می‌شود.
- **گام چهارم (اجرای مدل شبیه‌سازی).** در این مرحله با توجه به سناریوهای ایجادشده، مدل شبیه‌سازی چند بار برای هر یک از سناریوها اجرا و نتایج مربوط به متغیرهای تصمیم برای هر سناریو ثبت می‌شود.
- **گام پنجم (محاسبه‌ی درجه‌ی اهمیت متغیرهای خروجی شبیه‌سازی).** در این گام با استفاده از روش دیمتل فازی، وزن هر یک از متغیرهای خروجی مشخص می‌شود.
- **گام ششم (رتبه‌بندی سناریوها).** در این گام با توجه به وزن هر یک از عوامل و نتایج شبیه‌سازی برای هر سناریو، رتبه‌ی نهایی تعیین می‌شود.



شکل ۱. فلوچارت چارچوب پیشنهادی مسئله.

[15] Arena

۳. مطالعه‌ی موردی

به‌منظور درک بهتر مسئله، یک مورد مطالعاتی در نظر گرفته شده است؛ که یکی از مراکز درمانی و خدماتی شهر مشهد در استان خراسان رضوی است؛ که دو بخش بستری دارد: بخش یک، برای بیماران تریاژ[۱۶] و بیماران نوع اول[۱۷] کلینیک در نظر گرفته شده است؛ بخش دوم بستری، نیز برای بیماران نوع دوم کلینیک در نظر گرفته شده است. در بخش ۱، در مجموع ۲۱ تخت (۱۱ تخت برای آقایان و ۱۰ تخت برای بانوان) در ۴ اتاق (۲ اتاق برای آقایان و ۲ اتاق برای بانوان) در نظر گرفته شده است. همچنین در بخش ۲ نیز ۲۴ تخت (۱۰ تخت برای آقایان و ۱۴ تخت برای بانوان) در ۵ اتاق (۲ اتاق برای آقایان و ۳ اتاق برای بانوان) در نظر گرفته شده است. در مسئله‌ی حاضر، دو متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است: متغیر اول، درصدی از بخش ۱ است، که برای بیماران بخش تریاژ در نظر گرفته می‌شود. متغیر دوم، نیز مقداری از بخش ۲ است، که به‌صورت مشترک با بخش اول استفاده می‌شود. برای مدل مذکور، ۴ متغیر پاسخ در نظر گرفته شده است، که عبارت‌اند از: ۱) درصدی از بیماران تریاژ که به مراکز دیگر انتقال داده می‌شوند؛ ۲) میزان استفاده از منابع؛ ۳) میانگین تعداد انتظار برای بستری‌شدن بیماران بخش یک؛ و ۴) میانگین تعداد انتظار برای بستری‌شدن بیماران بخش دو. در شکل ۲، شماتیک مورد مطالعاتی مشاهده می‌شود؛ که در آن، رنگ قرمز مقدار متغیر اول و رنگ زرد، متغیر دوم را نشان می‌دهد. یکی از نکات و محدودیت‌های موجود در مدل، جنسیت است. در واقع، اتاق‌ها یا به بانوان یا آقایان تعلق دارد و قابلیت استفاده به‌صورت هم‌زمان را ندارند. همچنین از قبل جنسیت مربوط به هر اتاق مشخص شده است.

با توجه به مدل ارائه‌شده، مسئله دو متغیر اصلی دارد: متغیر اول، درصدی از بخش یک است، که برای بیماران بخش تریاژ در نظر گرفته می‌شود؛ متغیر دوم، نیز مقداری از بخش دو است، که به‌صورت مشترک با بخش اول استفاده می‌شود. برای هر متغیر، شش حالت ۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ و ۱۰۰ درصد نظر گرفته شده است. در مجموع برای دو متغیر، ۳۶ سناریو با توجه به ۶ حالت معرفی‌شده به‌وجود آمده است. این تذکر لازم است با توجه به اینکه منابع موجود از قبل به بانوان یا آقایان تخصیص داده شده‌اند؛ درصد متغیرها برای هر دو در سناریوهای مختلف یکسان در نظر گرفته شده است. به‌عنوان مثال، اگر مقدار متغیر یک مساوی ۲۰٪ است، این مقدار هم برای منابع آقایان و هم منابع خانم‌ها در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۲، سناریوهای ایجادشده ارائه شده‌اند. با توجه به مقدار هر متغیر، تعداد منابع برای آقایان و خانم‌ها در بخش‌های مختلف مشخص شده است. در جدول مذکور، ستون یک، شماره‌ی سناریو را نمایش می‌دهد. ستون‌های ۲ و ۳ به ترتیب مقدار متغیرهای ۱ و ۲ را نمایش می‌دهند. با توجه به اینکه تعداد اتاق یک متغیر عدد صحیح است، با استفاده از متغیرهای ۱ و ۲، که به‌صورت درصد هستند و تعداد اتاق‌های موجود برای آقایان و بانوان در هر بخش، تعداد اتاق‌های به اشتراک گذاشته‌شده برای هر بخش به ترتیب برای آقایان و بانوان مشخص می‌شود. در واقع، چهار ستون آخر از ضرب مقدار هر متغیر در تعداد اتاق‌های موجود برای هر جنسیت به‌دست آمده است، که در مدل شبیه‌سازی‌شده استفاده شده است.

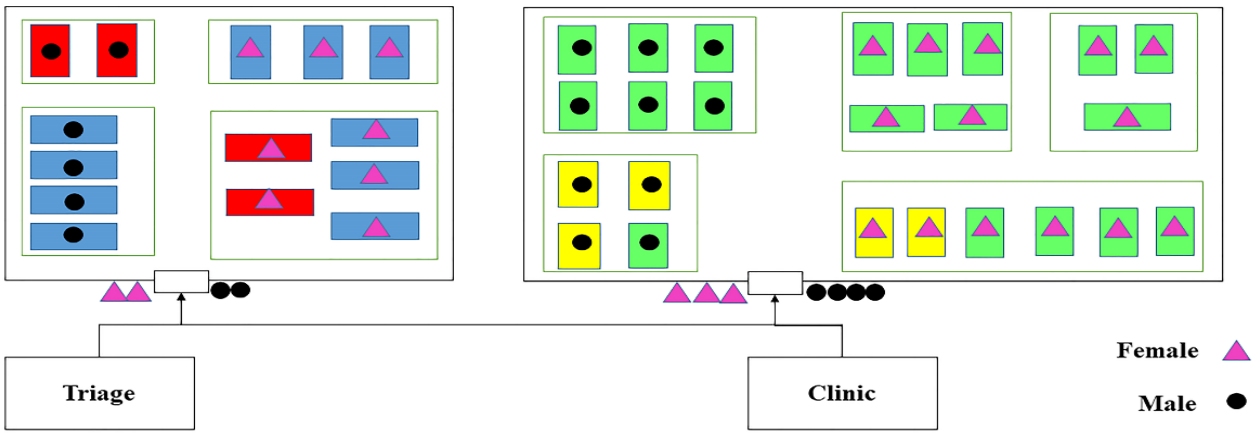
۴. نتایج موردی

در بخش کنونی، ابتدا مدل شبیه‌سازی انجام‌شده دقیقاً توضیح داده شده است، و در ادامه، به بررسی نتایج شبیه‌سازی پرداخته شده است. سپس، بهترین سناریو با توجه به نتایج شبیه‌سازی و وزن‌های هر یک از معیارها مشخص شده است.

۱.۴. شبیه‌سازی کامپیوتری

به‌منظور شبیه‌سازی مدل از نرم‌افزار ارنا استفاده شده است؛ که یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارها در حوزه‌ی شبیه‌سازی کامپیوتری است. از نرم‌افزار ارنا، به‌صورت قابل‌توجهی در شبیه‌سازی مسائل تولیدی،[۳۲] زنجیره‌ی تأمین،[۳۳] مدیریت موجودی،[۳۴] ترافیک،[۳۵] و به‌خصوص حوزه‌ی درمان استفاده شده است.[۳۶-۳۸] در مجموع، از ۱۷۳ ماژول مختلف به‌منظور شبیه‌سازی استفاده شده است. مدت زمان شبیه‌سازی، ۳۶۵ روز و همچنین ۲۰ روز نیز به‌منظور وارم‌آپ[۱۸] در نظر گرفته شده است. مدل برای هر سناریو ۲۰ بار اجرا شده و نتایج مربوط به متوسط ۲۰ تکرار گزارش شده است. در شکل ۳، طرح کلی شبیه‌سازی مشاهده می‌شود.

همان‌گونه که قبلاً بیان شده است، در مورد مطالعاتی انتخاب‌شده، بیماران از دو طریق تریاژ و کلینیک وارد بخش بستری می‌شوند. نرخ ورود بیماران،



شکل ۲. موردمطالعاتی به‌صورت شماتیک.

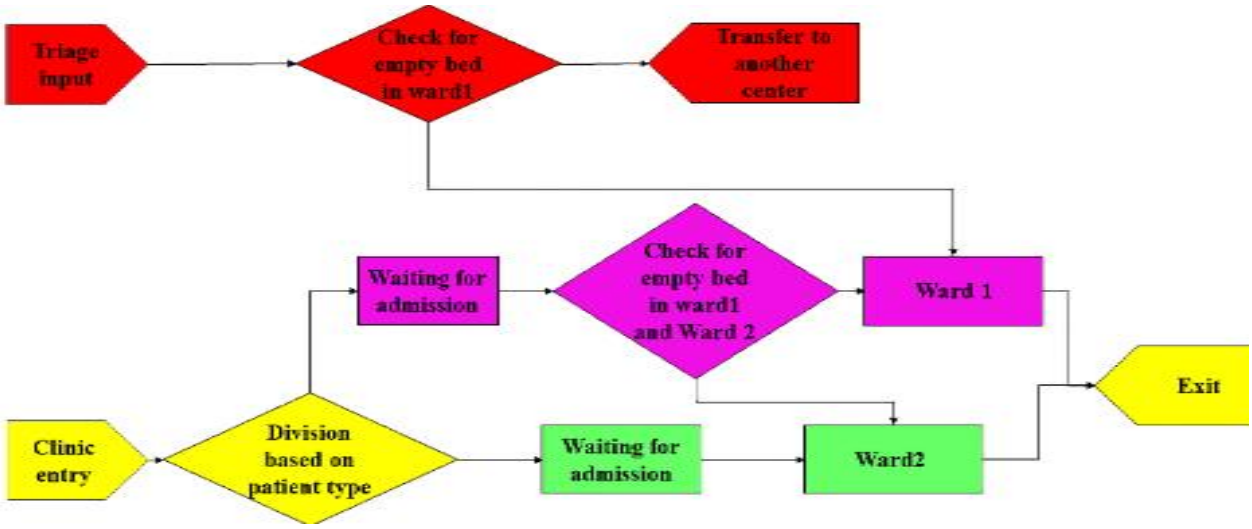
[16] بیمارانی که از اورژانس بستری می‌شوند.

[17] بیمارانی که با وقت قبلی از کلینیک با اولویت بالای درمان مراجعه می‌کنند.

[18] Warm up

جدول۲. سناریوهای مختلف جهت بهینه‌سازی.

Ward 2		Ward 1		Variable 2 (%)	Variable 1 (%)	Scenario
Female	Male	Female	Male			
-	-	-	-	0	0	1
3	2	-	-	20	0	2
6	4	-	-	40	0	3
8	6	-	-	60	0	4
11	8	-	-	80	0	5
14	10	-	-	100	0	6
-	-	2	2	0	20	7
3	2	2	2	20	20	8
6	4	2	2	40	20	9
8	6	2	2	60	20	10
11	8	2	2	80	20	11
14	10	2	2	100	20	12
-	-	4	4	0	40	13
3	2	4	4	20	40	14
			4	40	40	15
8	6	4	4	60	40	16
11	8	4	4	80	40	17
14	10	4	4	100	40	18
-	-	6	7	0	60	19
3	2	6	7	20	60	20
6	4	6	7	40	60	21
8	6	6	7	60	60	22
11	8	6	7	80	60	23
14	10	6	7	100	60	24
-	-	8	9	0	80	25
3	2	8	9	20	80	26
6	4	8	9	40	80	27
8	6	8	9	60	80	28
11	8	8	9	80	80	29
14	10	8	9	100	80	30
-	-	10	11	0	100	31
3	2	10	11	20	100	32
6	4	10	11	40	100	33
8	6	10	11	60	100	34
11	8	10	11	80	100	35
14	10	10	11	100	100	36



شکل ۳. طرح کلی شبیه‌سازی مسئله.

جدول ۳. اطلاعات ورودی جهت اجرای مدل شبیه‌سازی.

Value	Parameter	Value	Parameter
Exponential (schedule)	The time between the patient's arrival at Cilinc	Exponential (μ=8.5 h)	The time between patients' arrival at triage
45	Percentage of female patients in triage	55	Percentage of male patients in triage
55	Percentage of patients assigned to ward 2	45	Percentage of patients assigned to ward 1
35	Percentage of female patients in ward 1	65	Percentage of male patients in ward 1
70	Percentage of female patients in ward 2	30	Percentage of male patients in ward 2
		Tr(2,3,4)	Duration of hospitalization of patients (clinic ward 1)
		Tr(2,3,5)	Duration of hospitalization of patients (triage)
		Tr(2,4,5)	Duration of hospitalization of patients (clinic ward 2)

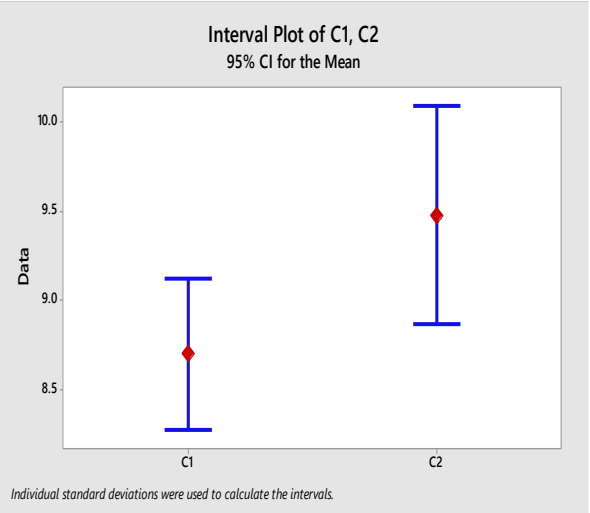
جنسیت بیماران، نوع بیمار، و مدت زمان بستری، پارامترهای احتمالی مدل هستند. درجدول ۳، اطلاعات مربوط به پارامترهای اخیر ارائه شده است. زمان کار کلینیک ۸ صبح الی ۶ بعدازظهر در نظر گرفته شده است. نرخ ورود بیماران از کلینیک برای بستری‌شدن، بسته به زمان روز، بین ۱ تا ۲ نفر در ساعت است. مدت زمان بستری برای همه‌ی بیماران، یک تابع مثلثی با سه پارامتر است.

درنهایت، مطابق گام‌های مدل ارائه‌شده در بخش حاضر، مدل شبیه‌سازی‌شده برای هر ۳۶ سناریو اجرا شده است. در جدول ۴ ، نتایج به‌دست‌آمده ارائه شده است.

با توجه به اطلاعات جدول ۳ می‌توان مشاهده کرد که متغیرهای پاسخ با یکدیگر در تناقض هستند. در واقع، انتخاب سناریوی بهتر به‌راحتی امکان‌پذیر نیست. به‌عنوان نمونه، سناریوی ۱، میانگین تعداد بیماران در صف در دو بخش ۱ و ۲ به ترتیب ۰/۱۱ و ۰/۱۹ است، که بسیار خوب است؛ اما در سناریوی اخیر، درصد عدم پذیرش برابر با ۱۰۰ و استفاده از منابع نیز برابر با ۵۴٪ بوده است، که نتایج خوبی برای دو معیار مذکور نیست. به‌عنوان نمونه‌یی دیگر، در سناریوی ۲۵، که درصد عدم پذیرش و میانگین بیماران در صف دوم در حالت خوبی قرار دارد و به ترتیب برابر با ۲/۵٪ و ۰/۱۹ هستند؛ اما دو معیار دیگر یعنی استفاده از منابع و همچنین میانگین بیماران در صف اول در وضعیت خوبی قرار ندارند. به‌طورکلی، مورد مذکور را می‌توان در همه‌ی سناریوها با درجه‌های کمتر و بیشتر مشاهده کرد. لذا، به‌کارگیری رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره ضروری به‌نظر می‌رسد.

۱.۱.۴. اعتبارسنجی مدل

به‌منظور اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی‌شده، میانگین زمانی که هر نفر در سیستم بوده است، در نظر گرفته شده است. این زمان شامل ورود به کلینیک یا اورژانس تا زمان ترخیص است. برای این منظور، میانگین زمان بیماران در یک سال اخیر مورد مطالعاتی در نظر گرفته شده است. باید توجه داشت در حال حاضر در مرکز درمانی سیستم پیشنهادی، اشتراک‌گذاری تخت وجود ندارد؛ به همین سبب فقط به‌منظور اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی‌شده‌ی سیستم موجود در مورد مطالعاتی شبیه‌سازی صورت گرفته و نتایج آن بررسی و تحلیل شده است. برای بررسی دقیق‌تر برای هر دو حالت، اطلاعات موجود و اطلاعات شبیه‌سازی‌شده، یک فاصله‌ی اطمینان ۹۵ درصدی تشکیل شده



شکل ۴. فاصله‌ی اطمینان برای میانگین زمان انتظار در سیستم برای دو حالت واقعی و شبیه‌سازی‌شده.

است. در شکل ۴، دو فاصله‌ی اطمینان مذکور مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، میانگین زمان انتظار در دو حالت، اختلاف معناداری با یکدیگر ندارند و درواقع می‌توان ادعا کرد خروجی مدل شبیه‌سازی، قابل‌اعتماد است. با وجود این مشاهده می‌شود که میانگین زمان در حالت واقعی کمتر از یک روز بیشتر از زمان شبیه‌سازی است. دلیل این مورد را می‌توان مسائل ناخواسته در دنیای واقعی بیان کرد. در واقع، در مدل شبیه‌سازی‌شده به سبب امکان‌پذیرنبودن، بعضی از جزئیات حذف شده و همین امر باعث اختلاف این زمان‌ها بوده است.

۲.۴. تحلیل نتایج شبیه‌سازی

با توجه به اطلاعات جدول ۳ می‌توان مشاهده کرد که درصد عدم پذیرش بیماران از تریاژ کاملاً به مقدار متغیر ۱ بستگی دارد. در واقع، هر چه مقدار متغیر ۱ بیشتر شود و قسمت بیشتری از بخش ۱ به تریاژ تعلق گیرد، باعث کاهش فاکتور خروجی اخیر می‌شود. با توجه به اطلاعات موجود در جدول های ۲ و ۴ مشاهده می‌شود که در ۳۶ سناریوی معرفی‌شده به ترتیب شماره‌ی مقدار متغیر ۱ از مقدار صفر تا ۱۰۰ درصد افزایش یافته و در همین حال مقدار معیار عدم پذیرش، روندی کاملاً معکوس داشته و ۱۰۰ تا ۰/۴ درصد در حال کاهش بوده است. از طرفی، افزایش بیش از اندازه‌ی متغیر ۱، کمبود منابع استفاده‌شده

جدول ۴. نتایج حاصل از اجرای شبیه‌سازی.

Average number in queue(ward 2)	Average number in queue(ward 1)	Average percentage of resource usage (%)	Average percentage of rejections from triage (%)	Scenario
0.19	0.11	54.90	100	1
1.27	0.03	55.10	100	2
43.59	0.01	51.10	100	3
100.30	0.00	47.10	100	4
223.68	0.00	37.90	100	5
350.73	0.00	23.10	100	6
0.19	0.41	61.20	62.50	7
1.27	0.10	61.80	62.50	8
43.59	0.03	57.90	62.50	9
100.30	0.01	53.80	62.50	10
223.68	0.00	44.70	62.50	11
350.73	0.00	29.90	62.50	12
0.19	3.18	65.40	32.60	13
1.27	0.40	66.70	32.60	14
43.59	0.10	63.00	32.60	15
100.30	0.03	58.80	32.60	16
223.68	0.01	49.60	32.60	17
350.73	0.00	34.80	32.60	18
0.19	75.70	64.00	9.50	19
1.27	19.74	69.80	9.50	20
43.59	0.88	68.10	9.50	21
100.30	0.19	63.50	9.50	22
223.68	0.06	54.10	9.50	23
350.73	0.02	39.20	9.50	24
0.19	174.40	58.50	2.40	25
1.27	74.28	67.70	2.40	26
43.59	19.71	69.10	2.40	27
100.30	0.88	65.70	2.40	28
223.68	0.19	56.20	2.40	29
350.73	0.06	41.10	2.40	30
0.19	286.19	51.30	0.40	31
1.27	147.33	63.50	0.40	32
43.59	74.07	66.20	0.40	33
100.30	19.71	65.60	0.40	34
223.68	0.88	57.30	0.40	35
350.73	0.19	42.30	0.40	36

در بخش ۱ را برای بیماران نوع اول کلینیک به همراه خواهد داشت و نتیجه‌ی آن، افزایش زمان انتظار بیماران نوع دوم کلینیک است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، همچنین می‌توان مشاهده کرد که مقدار متغیر دوم هیچ ارتباط معناداری با درصد عدم پذیرش بیماران تریاژ ندارد. میانگین تعداد بیماران نوع دوم کلینیک در صف نیز فقط با متغیر دوم در ارتباط است. هر چه مقدار متغیر دوم، افزایش یابد؛ میانگین طول صف بیماران نوع دوم کلینیک نیز افزایش می‌یابد. با افزایش متغیر ۲، تعداد منابع اختصاص داده‌شده به بیماران کاهش می‌یابد و به طبع آن، باعث افزایش طول صف و زمان انتظار بیماران مذکور می‌شود. اما طول صف بیماران نوع اول کلینیک، هم‌زمان به متغیرهای اول و دوم بستگی دارد. هر چه میزان متغیر نوع اول، کم و متغیر نوع دوم، افزایش داشته باشد، طول صف بیماران نوع اول کلینیک کاهش می‌یابد. در این حالت، منابع کمتری به بیماران تریاژ تخصیص می‌یابد و از طرفی قسمتی از منابع بخش دوم نیز به آن‌ها تخصیص پیدا می‌کند؛ که این امر باعث افزایش منابع اختصاصی به این بیماران تریاژ می‌شود و به طبع طول صف و زمان انتظار آن‌ها کاهش خواهد یافت. برعکس، هر چه دو متغیر مذکور، مقادیر برعکس را اختیار کنند، طول صف و زمان انتظار بیماران تریاژ افزایش می‌یابد. درصد استفاده از منابع متغیر، یک نوع خروجی است که نمی‌توان به‌راحتی آن را تحلیل کرد. درواقع، متغیر مذکور با توجه متغیرهای ۱ و ۲، رفتار مشخصی ندارد. اما تا

حدودی زیادی می‌توان گفت هر چه مقدار متغیر یک افزایش داشته است، مقدار متغیر ۲ کاهش یافته و میزان استفاده از منابع بهتر شده است.

۳.۴. رتبه‌بندی سناریوها

جهت رتبه‌بندی سناریوهای شبیه‌سازی با درنظرگرفتن چهار معیار درصد عدم پذیرش از تریاژ، درصد استفاده از منابع، میانگین تعداد انتظار بخش ۱، و میانگین تعداد انتظار بخش ۲، از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شده است. جهت اولویت‌بندی و شناسایی معیارهای تخصیص تخت از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شده است، که می‌توان به مطالعه‌ی نجیبی و همکاران (۲۰۲۳)،[۳۹] که از روش دیمتل و تحلیل شبکه‌ای بهره گرفته‌اند، اشاره کرد. روش دیمتل از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، در شناسایی عوامل مؤثر در عملکرد سیستم در حوزه‌ی سلامت بسیار استفاده شده است، که می‌توان به مطالعات شیه[19] و همکاران (۲۰۱۰)، سی و همکاران (۲۰۱۷)، روی و همکاران (۲۰۱۸)، جیانگ و همکاران (۲۰۲۰) اشاره کرد.[۴۰-۴۳] روش دیمتل، که بر پایه‌ی تئوری گراف است، در بین سال‌های ۱۹۷۲ و ۱۹۷۶ میلادی برای حل مسائل پیچیده استفاده می‌شده است. با استفاده از روش دیمتل، وابستگی و ارتباط بین معیارها و همچنین درجه‌ی اهمیت هر معیار (وزن معیار) قابل‌شناسایی خواهد بود. لذا، در مطالعه‌ی حاضر، با توجه به نبود قطعیت در نظرسنجی از خبرگان و همچنین اثر متقابل عوامل در یکدیگر، جهت انتخاب سناریوی بهینه و تعیین درجه‌ی اهمیت هر چهار معیار از روش دیمتل فازی استفاده شده است. بر این اساس، متغیرهای زبانی جهت بررسی اثر متقابل معیارها در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

گام‌های روش دیمتل فازی به این شرح هستند:

گام ۱ (محاسبه‌ی ماتریس مستقیم): از کارشناسان درخصوص درجه‌ی تأثیرگذاری شاخص i بر شاخص j نظرسنجی و ماتریس مقایسه‌ی زوجی آثار برای هر کارشناس مشخص می‌شود. درجه‌ی تأثیرگذاری به‌صورت عبارت زبانی مطابق جدول ۴، همان متغیرهای زبانی اثر متقابل معیارها (ژو و همکاران، ۲۰۱۱)،[۳۹] در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس، ماتریس مستقیم $\tilde{X}^{(k)}$ (رابطه‌ی ۱) برای کارشناس k اُم تشکیل می‌شود.

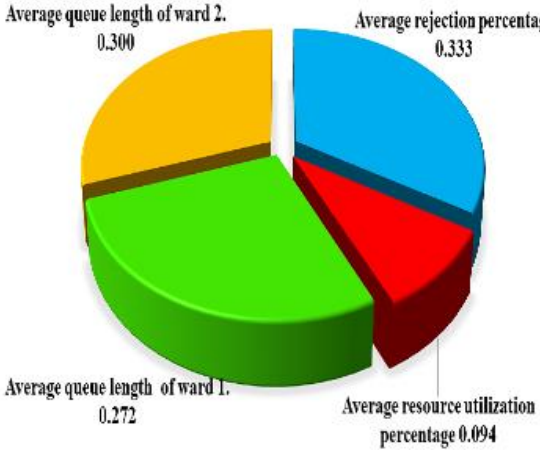
$$\tilde{X}^{(k)} = \begin{bmatrix} 0 & \tilde{x}_{12}^{(k)} & . & . & . & \tilde{x}_{1n}^{(k)} \\ \tilde{x}_{21}^{(k)} & 0 & . & . & . & \tilde{x}_{2n}^{(k)} \\ . & . & . & & & . \\ . & . & & . & & . \\ . & . & & & . & . \\ \tilde{x}_{n1}^{(k)} & \tilde{x}_{n2}^{(k)} & . & . & . & 0 \end{bmatrix} \quad (۱)$$

پس از تشکیل ماتریس $\tilde{X}^{(k)}$ برای هر کارشناس، ماتریس میانگین آثار محاسبه می‌شود، بنابراین $\tilde{X}$ به‌عنوان ماتریس میانگین به‌دست می‌آید.

گام ۲: ماتریس به‌دست‌آمده در گام ۱، نرمالایز خواهد شد. بدین منظور که جمع شدت اثر سطری هر ماتریس $\tilde{X}$ به دست می‌آید و مطابق روابط ۲ و ۳، ماتریس استانداردشده‌ی $\tilde{Z}$ محاسبه می‌شود، که فرض بر آن است دست‌کم برای یک معیار مثل i، رابطه‌ی $s > \sum_j x_{ij}^u$ برقرار باشد.

جدول ۵. متغیرهای زبانی اثر متقابل معیارها (ژو و همکاران، ۲۰۱۱) [۴۴].

Corresponding triangular fuzzy number	Linguistuc judgments
(0,0,0.25)	No influence (N)
(0,0.25,0.5)	Very low influence (VL)
(0.25,0.5,0.75)	Low influence (L)
(0.5,0.75,1)	High influence (H)
(0.75,1,1)	Very high influence (VH)



شکل ۵. وزن معیارهای مسئله (درجه‌ی اهمیت).

$$s = \max_{1 \le i \le n} \left\{ \sum_{j=1}^{n} x_{ij}^u \right\} \quad (۲)$$

$$\tilde{z}_{ij} = \frac{\tilde{x}_{ij}}{s} \quad (۳)$$

گام ۳: محاسبه‌ی ماتریس رابطه‌ی کلی که مطابق رابطه‌ی ۴ به‌دست می‌آید؛ و درنهایت ماتریس دفازی‌شده و قطعی براساس رابطه‌ی ۵ به‌دست می‌آید.

$$\tilde{T} = \tilde{Z}(I - \tilde{Z})^{-1} \quad (۴)$$

$$t_{ij} = defuzzy(\tilde{t}_{ij}) = \frac{t_{ij}^l + 4t_{ij}^m + t_{ij}^u}{6} \quad (۵)$$

گام ۴ (محاسبه‌ی وزن هر یک از عوامل): پس از محاسبه‌ی ماتریس دفازی کلی T در گام ۳، که در آن، D_i بیانگر مجموع عناصر سطر i اُم ماتریس کلی و R_i بیانگر مجموع عناصر ستونی i اُم هستند، به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مجموع آثار مستقیم و غیرمستقیم عامل i در سایر عوامل و مجموع آثار مستقیم و غیرمستقیم سایر عوامل در عامل i است. با توجه به مطالعه‌ی ژو[20] و همکاران (۲۰۱۸)،[۴۵] اهمیت هر عامل به‌صورت رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود و درنهایت، وزنه‌ی به‌دست‌آمده نرمالایز خواهد شد.

$$w_i = \left[(D_i - R_i)^2 + (D_i + R_i)^2 \right]^{1/2} \quad (۶)$$

در نهایت، با استفاده از روش ارائه‌شده در مطالعه‌ی ژو و همکاران (۲۰۱۸)،[۴۵] به محاسبه‌ی وزن هر معیار پرداخته شده است (نمودار درصد وزن هر معیار در شکل ۵ مشاهده می‌شود).

19 Shieh

20 Zhou

جدول ۶. رتبه‌بندی سناریوهای شبیه‌سازی‌شده.

Scenario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Score	0.363	0.364	0.408	0.465	0.589	0.727	0.225	0.225	0.269	0.326	0.450	0.588
Rank	26	27	30	32	35	36	18	17	21	23	31	34
Scenario	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Score	0.120	0.115	0.159	0.216	0.340	0.478	0.114	0.050	0.072	0.129	0.253	0.392
Rank	10	9	13	15	24	33	7	1	3	11	20	29
Scenario	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Score	0.195	0.083	0.064	0.101	0.226	0.365	0.310	0.154	0.115	0.113	0.217	0.356
Rank	14	4	2	5	19	28	22	12	8	6	16	25

جدول ۷. بهترین و بدترین سناریوها.

Response variables				**Decision variables**						Scenario	
				Value of variable 2		**Value of variable 1**		variable 2 (%)	variable 1 (%)		
Average number in queue (ward 2)	Average number in queue (ward 1)	Percentage of resource usage (%)	Percentage of rejection (%)	Woman	Man	Woman	Man				
1.27	19.736	69.80	9.50	3	2	6	7	20	60	20	Best
43.586	19.711	69.10	2.40	6	4	8	9	40	80	27	
43.586	0.883	68.10	9.50	6	4	6	7	40	60	21	
350.729	0	29.90	62.50	14	10	2	2	100	20	12	Worst
223.683	0	37.90	100	11	8	0	0	80	0	5	
350.729	0	23.10	100	14	10	0	0	100	0	6	

سپس جهت انتخاب سناریوی بهینه با توجه به نتایج شبیه‌سازی و وزن‌های به‌دست‌آمده، امتیاز مجموع وزنی هر سناریو محاسبه شده است. شایان ذکر است، هر ۴ معیار موردنظر ابتدا همسو و نرمالایز شده و سپس با استفاده از وزن‌های به‌دست‌آمده، مجموع وزنی هر سناریو محاسبه و رتبه‌بندی انجام شده است. در جدول ۶ ، رتبه‌بندی سناریوها ارائه شده است.

با توجه به نتایج حاصل از رتبه‌بندی، سناریوهای ۲۰ و ۲۷ از مجموع ۳۶ سناریوی در نظر گرفته‌شده به ترتیب در اولویت‌های ۱ و ۲ قرار گرفته‌اند. بنابراین، با تنظیم درصد به اشتراک‌گذاری مربوط به سناریوی ۲۰ (رتبه‌ی یک)، می‌توان به‌طور هم‌زمان هر ۴ معیار در نظر گرفته‌شده را بهینه ساخت. در جدول ۷، تعداد سه سناریو که بهترین امتیاز و سه سناریو که کمترین امتیاز را داشته‌اند، ارائه شده است. با توجه به اطلاعات جدول ۵ ، سناریوی ۲۰ امتیاز ۰/۰۵ داشته است، که کمینه‌ی مقدار در بین ۳۶ سناریو است. همچنین سناریوهای ۲۷ و ۲۱، که به ترتیب امتیاز نهایی ۰/۰۶۴ و ۰/۰۷۲ را داشته‌اند، در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفته‌اند. از طرف دیگر، بیشترین امتیاز نهایی محاسبه‌شده برابر با ۰/۷۲۷ بوده است، که مربوط به سناریوی ۶ است. در نتیجه، سناریوی ۶ به‌عنوان بدترین حالت ممکن انتخاب شده است. همچنین دو سناریوی ۵ و ۱۲، که به ترتیب امتیاز ۰/۵۸۹ و ۰/۵۸۸ را داشته‌اند، در رده‌های دوم و سوم بدترین سناریوها قرار می‌گیرند.

۴.۳.۱. تحلیل نتایج سناریوها

سناریوی ۲۰، به‌عنوان بهترین سناریو انتخاب شده است؛ که در آن، به ترتیب ۶۰ و ۲۰ درصد از منابع به اشتراک گذاشته شده‌اند. در سناریو ی اخیر، متغیر پاسخ درصد عدم پذیرش رقمی نزدیک به ۱۰٪ است، که در میان نتایج به‌دست‌آمده، رتبه‌ی دوم را داشته است. از طرفی، درصد استفاده از منابع نیز مساوی ۷۰٪ بوده است، که رتبه‌ی اول را در میان این متغیر نیز به خود اختصاص داده است. میانگین تعداد افراد در صف در سناریوی ۲۰، برای هر دو بخش نیز عددی معقول بوده است. در سناریوی ۲۷، می‌توان از درصد پایین‌تر عدم پذیرش استفاده کرد، اما در مقابل تعداد افراد در صف بخش ۲ نسبتاً قابل‌توجه خواهد بود. در سناریوی ۲۱ نیز می‌توان به درصد عدم پذیرش ۱۰ رسید، اما در مقابل میانگین زمان انتظار در بخش دوم به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای افزایش خواهد داشت. همچنین درصد استفاده از منابع مقدار اندکی افزایش می‌یابد. باید توجه داشت در بین سه سناریو با بهترین رتبه، سناریوی اول کمترین مقدار اشتراک‌گذاری منابع را داشته است. سه سناریوی ۱۲، ۵، و ۶

به‌عنوان بدترین سناریوها انتخاب شده‌اند؛ که در آن‌ها می‌توان مشاهده کرد که در سه متغیر پاسخ درصد عدم پذیرش، درصد استفاده از منابع و طول صف بخش ۲ نتایج بسیار ضعیفی هستند و تنها معیار مثبت، طول صف بخش دوم است. در سناریوهای اخیر، فقط اشتراک‌گذاری مربوط به بخش دوم بوده و این مسئله سبب افزایش عدم پذیرش بیماران تریاژ شده است. از طرفی، با توجه به اینکه تقریباً بخش عظیمی از منابع بخش دوم نیز به بیماران نوع اول کلینیک اختصاص داده شده و تعداد بیماران مراجعه‌کننده کمتر از منابع بوده است، درصد استفاده از منابع افت شدیدی داشته است. همچنین این امر باعث افزایش شدید زمان انتظار بیماران در نوع دوم کلینیک شده است.

۵. نتیجه‌گیری

یکی از چالش‌هایی که مدیران بیمارستان‌ها با آن روبرو هستند، مسئله‌ی تخصیص تخت بیمارستانی است. کمبود تخت یا تخصیص نامناسب آن، سلامت و جان بیماران را تحت تأثیر قرار خواهد داد. سیاست اشتراک‌گذاری تخت بین بخش‌ها می‌تواند رویکرد کارآمدی جهت غلبه بر کمبود منبع مذکور باشد. در نوشتار حاضر، با توسعه‌ی یک الگوریتم در شش گام اصلی بر مبنای سیاست اشتراک‌گذاری تخت بین بخش‌ها و اجرای شبیه‌سازی کامپیوتری و دیمتل فازی، سناریوهایی به مدیران و تصمیم‌گیران حوزه‌ی سلامت معرفی شده است، که نه فقط روند درمان را بهبود می‌بخشند، بلکه از نقطه‌نظر مسائل اقتصادی و اجتماعی نیز کارا هستند. یکی از معیارهای انتخاب سناریوی بهینه، درصد عدم پذیرش بیمار و درصد استفاده از منبع در نظر گرفته شده است، که می‌تواند بیانگر مسائل اقتصادی و مالی مهم باشد. همچنین، معیار طول صف، که در تصمیم‌گیری مد نظر قرار داده شده است، می‌تواند در رضایتمندی بیمار مؤثر واقع شود. بنابراین، نتایج مطالعه‌ی حاضر می‌تواند به‌عنوان راهنمایی جهت استفاده‌ی مدیران در تصمیم‌گیری‌های تخصیص بهینه‌ی تخت بیمارستانی قرار گیرد. الگوریتم توسعه داده‌شده روی یک مورد مطالعاتی انجام شده است؛ که در آن، وزن هر یک از معیارهای تصمیم به ترتیب برابر با ۰/۳۳، ۰/۰۹، ۰/۲۷، و ۰/۳۰ بوده است. در انتها با توجه به مدل توسعه داده‌شده، سناریوی ۲۰ به‌عنوان بهترین سناریو انتخاب شده است؛ که در آن، مقدار عدم پذیرش بیماران تریاژ مسلوی ۱۰٪، درصد استفاده از منابع مساوی ۷۰، و میانگین افراد منتظر در صف برای بیماران نوع اول و دوم کلینیک برابر با ۱۹/۷۱ و ۱/۲۷ نفر بوده است.

بهینه‌سازی منابع بیمارستانی، یکی از دغدغه‌های مدیران و تصمیم‌گیران حوزه‌ی سلامت است. براساس نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه‌ی حاضر، بحث بهینه‌سازی تخصیص تخت بیمارستانی با درنظرگرفتن سیاست اشتراک‌گذاری می‌تواند قابل‌حل باشد. همچنین با اجرای سیاست‌های در نظر گرفته‌شده اشتراک‌گذاری تخت در پژوهش حاضر، مدیران و تصمیم‌گیران حوزه‌ی سلامت می‌توانند یک سیستم تاب‌آور در شرایط بحران را به وجود آورند، که علاوه‌بر افزایش رضایت بیمار، مباحث مالی و هزینه را نیز بهینه سازد. همچنین، نه فقط نرخ عدم پذیرش بیمار با اجرای این سیاست کمینه خواهد شد، بلکه با استفاده‌ی درست از منابع، مدت زمان انتظار و در سیستم ماندن بیمار نیز کاهش می‌یابد.

References – منابع

1. Khalili, S., Ghodoosi, M. and Hasanpour, J., 2018. The optimal number of hospital beds under uncertainty: a costs management approach. *Journal of Optimization in Industrial Engineering, 11*(2), pp.129-138. DOI: 10.22094/joie.2017.542.43.
2. Wu, J., Chen, B., Wu, D., Wang, J., Peng ,X. and Xu, X., 2020. Optimization of Markov queuing model in hospital bed resource allocation. *Journal of Healthcare Engineering, 2020*(1), pp.1-12. DOI: https://doi.org/10.1155/2020/6630885.
3. Rathore, R., 2023. A Study of bed occupancy management in the healthcare system using the M/M/C Queue and probability. *International Journal for Global Academic Scientific Research, 2*(1), pp.01-06. DOI: https://doi.org/10.55938/ijgasr.v2i1.36.
4. Bahadori, M., Teymourzadeh, E. and Kazemi, R., 2017. Mathematical modeling for bed allocation in a military hospital. *Journal of Military Medicine, 19*(4), pp.390-399. DOI: http://eprints.bmsu.ac.ir/id/eprint/211. [In Persian].
5. Xue, Q., Fan, Y., Wang, J., Kuang, Y. and Chen, Y., 2022. An Optimization Model and Computer Simulation for Allocation Planning of Hospital Bed Resources. *Mathematical Problems in Engineering, 2022*(1), pp.1-9 DOI: https://doi.org/10.1155/2022/3469641.
6. Pishnamazzadeh, M., Sepehri, M. M. and Ostadi, B., 2023. Inpatient bed management considering collaboration strategy to enhance hospital resilience. *Journal of Industrial Systems Engineering, 15*(2), pp.1-19. DOI: 20.1001.1.17358272.2023.15.2.1.5.
7. Korzebor, M. and Nahavandi, N., 2024. A bed allocation model for pandemic situation considering general demand: A case study of Iran. *Risk Analysis, 44*(11), pp.2660-2676. DOI: https://doi.org/10.1111/risa.14339.
8. Hosseinzadeh, S., Ketabi, S., Atighehchian, A. and Nazari, R., 2024. Hospital bed capacity management during the COVID-19 outbreak using system dynamics: A case study in Amol public hospitals, Iran. *International Journal of Healthcare Management, 17*(1), pp.63-75. DOI: https://doi.org/10.1080/20479700.2022.2149083.
9. Yu, H., Shen, T., and Zhong, L., 2024. Optimizing hospital bed allocation for coordinated medical efficiency and quality improvement. *Journal of Combinatorial Optimization*, *48*(4), pp.32-42. DOI: https://doi.org/10.1007/s10878-024-01210-1.

10. Li, Z., Yu, H. and Zhou, Z., 2024. Scheduling of elective operations with coordinated utilization of hospital beds and operating rooms. *Journal of Combinatorial Optimization, 47*(5), p.75.DOI: https://doi.org/10.1007/s10878-024-01167-1.

11. Azadeh, A., Sepahi, M., Haghighi, S. M. and Benchmarking, 2013. An integrated simulation-DEA approach to improve quality care of medical centres. *International Journal of Process Management, 3*(3), pp.352-370. DOI: https://doi.org/10.1504/IJPMB.2013.058160.

12. Wang, X., Gong, X., Geng, N., Jiang, Z. and Zhou, L., 2020. Metamodel-based simulation optimisation for bed allocation. *International Journal of Production Research, 58*(20), pp.6315-6335. DOI: https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1677962.

13. He, L., Madathil, S. C., Oberoi, A., Servis, G. and Khasawneh, M., 2019. A systematic review of research design and modeling techniques in inpatient bed management. *Computers Industrial Engineering, 127*(1), pp.451-466. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.033.

14. Wu, X., Xu, R., Li, J. and Khasawneh, M., 2019. A simulation study of bed allocation to reduce blocking probability in emergency departments: A case study in China. *Journal of the Operational Research Society, 70*(8), pp.1376-1390. DOI: https://doi.org/10.1080/01605682.2018.1506430.

15. Ghorbani, R., Shafagh, S. O., Nateghinia, S., Hajiesmaeli, M., Alibabaei, A. and Shafigh, N., 2021. Neuro-critical Care Unit Bed Allocation Optimization based on Hybrid Approach: Designing of Experiments and Simulation. *Journal of Safety Promotion and Injury Prevention,* 1), pp.9-17. DOI: https://doi.org/10.5812/archneurosci.64855 [In Persian].

16. Pourmahmoud, J. and Jafari, E., 2019. Goal programming for optimal allocation of hospital beds (case study: emergency department of Shahid Madani hospital in Tabriz). *Journal of Operational Research In Its Applications, 16*(1), pp.131-141. DOI: https://doi.org/10.33140/jcrr.02.01.01. [In Persian].

17. Torabipour, A., Zeraati, H., Mohammad, A., Rashidian, A., Sari, A. A. and Sarzaiem, M. R., 2016. Bed capacity planning using stochastic simulation approach in cardiac-surgery department of teaching hospitals, Tehran, Iran. *Iranian Journal of Public Health, 45*(9), p.1208. PMID: 27957466; PMCID: PMC5149475.

18. Zhou, L., Geng, N., Jiang, Z. and Wang, X., 2018. Multi-objective capacity allocation of hospital wards combining revenue and equity. *Omega, 81*(1), pp.220-233. DOI: https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.11.005.

19. Hu, J., Hu, G., Cai, J., Xu, L. and Wang, Q., 2021. Hospital bed allocation strategy based on queuing theory during the covid-19 epidemic. *Computers, Materials & Continua, 66*(1), pp.793-803. DOI: https://doi.org/10.32604/cmc.2020.011110.

20. Vashishth, T. K., Chaudhary, S. and Sharma, V., 2023. Optimum Utilization of Bed Resources in Hospitals: A Stochastic Approach, in *Artificial Intelligence-based Healthcare Systems*: Springer, 2023, pp. 101-110. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-41925-6_7.

21. Burdett, R. L., Corry, P., Spratt, B., Cook, D. and Yarlagadda, P., 2023. A stochastic programming approach to perform hospital capacity assessments. *Plos One, 18*(11), p.e0287980. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0287980

22. Burdett, R. L., Corry, P., Yarlagadda, P., Cook, D., Birgan, S. and McPhail, S. M., 2023. A mathematical framework for regional hospital case mix planning and capacity appraisal. *Operations Research Perspectives, 10*(1), p.100261. DOI: https://doi.org/10.1016/j.orp.2022.100261.

23. Naeini, M. K., Elahi, Z. and Esfandabadi, A. M., 2021. Providing a model for the optimal allocation of hospital beds based on Markov chain approach (case study: Shiraz-Shahid-Faghihi Hospital). *Quarterly Journal of Management Strategies in Health System, 6*(1), pp.18-27. DOI: https://doi.org/10.18502/mshsj.v6i1.6505. [In persian].

24. Taghavi, A. and Monem, H. 2018. Increasing the efficiency of using CCU beds of hospitals through optimization and combination of genetic algorithm and imperialist competitive. *Journal of Health and Biomedical Informatics, 4*(4), pp.253-265. DOI: http://jhbmi.ir/article-1-258-en.html. [In persian].

25. Belciug, S. and Gorunescu, F., 2016. A hybrid genetic algorithm-queuing multi-compartment model for optimizing inpatient bed occupancy and associated costs. *Artificial Intelligence in Medicine, 68*(1), pp.59-69. DOI: https://doi.org/10.1016/j.artmed.2016.03.001.

26. Bekker, R., Koole, G. and Roubos, D., 2017. Flexible bed allocations for hospital wards. *Health Care Management Science, 20*(1), pp.453-466. DOI: https://doi.org/10.1007/s10729-016-9364-4.

27. E Oliveira, B., De Vasconcelos, J., Almeida, J. and Pinto, L., 2020. A simulation-optimisation approach for hospital beds allocation. *International Journal of Medical Informatics, 141*(1), p.104174. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2020.104174.

28. Aghaabdellahian, Z. and Bijari, M., 2020. Bed management considering bed-blocking and elective patient admissions using simulation optimisation.

International Journal of Simulation Process Modelling, 15(3), pp.278-294. DOI: https://doi.org/10.1504/IJSPM.2020.107330.

29. Mohamed, I. and Hussein, R., 2021. A simulation optimisation approach for managing bed capacity in an intensive care unit. *Journal of Information Knowledge Management, 20*(1), p.2150001. DOI: https://doi.org/10.1142/S0219649221500015.

30. Wan, F., Fondrevelle, J., Wang, T. and Duclos, A., 2023. Two-stage multi-objective optimization for ICU bed allocation under multiple sources of uncertainty. *Scientific Reports, 13*(1), p.18925. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-023-45777-x.

31. Wu, X., Li, J. and Chu, C.-H., 2019. Modeling multi-stage healthcare systems with service interactions under blocking for bed allocation. *European Journal of Operational Research, 278*(3), pp.927-941. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.05.004.

32. Sundararajan, N. and Terkar, R., 2022. A roadmap to improving productivity in a fastener manufacturing unit by process optimization using ARENA. *Materials Today: Proceedings, 62*(1), pp.1017-1025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.265.

33. Bentalha, B., Hmioui, A. and Alla, L., 2020. The global performance of a service supply chain: a simulation-optimization under arena. In *The Proceedings of the Third International Conference on Smart City Applications*, pp. 489-502.Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-66840-2_37.

34. Sridhar, P., Vishnu, C. and Sridharan, R., 2021. Simulation of inventory management systems in retail stores: A case study. *Materials Today: Proceedings, 47*(1), pp.5130-5134. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.314.

35. Bakhsh, A., 2020. Traffic simulation modeling for major intersection. *Sakarya University Journal of Science, 24*(1), pp.37-44. DOI:https://doi.org/10.16984/saufenbilder.490984.

36. Tavakoli, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Mesbahi, R., Ghanavati-Nejad, M. and Tajally, A., 2022. Simulation of the COVID-19 patient flow and investigation of the future patient arrival using a time-series prediction model: a real-case study. *Medical Biological Engineering Computing, 60*(4), pp.969-990. DOI: https://doi.org/10.1007/s11517-022-02525-z.

37. Sasanfar, S., Bagherpour, M. and Moatari-Kazerouni, A., 2020. Improving emergency departments: Simulation-based optimization of patients waiting time and staff allocation in an Iranian hospital. *International Journal of Healthcare Management, 14*(4), pp.1449-1456. DOI:https://doi.org/10.1080/20479700.2020.1765121.

38. Hejazi, T.-H., 2021. State-dependent resource reallocation plan for health care systems: A simulation optimization approach, *Computers Industrial Engineering, 159*(1), pp.107-502. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107502.

39. Najibi, S. M., Lotfi, F., Kharazmi, E., Farhadi, P., Shojaei, P., Bastani, P. and Kavosi, Z., 2023. Identification and prioritization of indicators of hospital bed allocation in Iran. *World Medical Health Policy, 15*(4), pp.356-379. DOI: https://doi.org/10.1002/wmh3.550.

40. Shieh, J.-I., Wu, H.-H. and Huang, K.-K., 2010. A DEMATEL method in identifying key success factors of hospital service quality. *Knowledge-Based Systems, 23*(3), pp.277-282. DOI: https://doi.org/10.1016/j.knosys.2010.01.013.

41. Si, S.-L., You, X.-Y., Liu, H.-C., Huang, J. and health, p., 2017. Identifying key performance indicators for holistic hospital management with a modified DEMATEL approach, *International Journal of Environmental Research, 14*(8), p.934. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph14080934.

42. Jiang, S., Shi, H., Lin, W. and Liu, H.-C., 2020. A large group linguistic Z-DEMATEL approach for identifying key performance indicators in hospital performance management. *Applied Soft Computing, 86*(1), p.105900. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105900.

43. Roy ,J., Adhikary, K., Kar, S. and Pamucar, D., 2018. A rough strength relational DEMATEL model for analysing the key success factors of hospital service quality. *Decision Making: Applications in Management, 1*(1), pp.121-142. DOI: https://doi.org/10.31181/dmame1801121r.

44. Zhou, Q., Huang, W. and Zhang, Y., 2011. Identifying critical success factors in emergency management using a fuzzy DEMATEL method. *Safety science, 49*(2), pp.243-252. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.08.005.

45. Zhou, F., Wang, X., Lim, M. K., He, Y. and Li, L., 2018. Sustainable recycling partner selection using fuzzy DEMATEL-AEW-FVIKOR: A case study in small-and-medium enterprises (SMEs). *Journal of Cleaner Production, 196*(1), pp.489-504. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.247.

راهنمای نگارش مقالات مجله‌ی علمی و پژوهشی

شریف

مجله‌ی علمی و پژوهشی «شریف»، از انتشارات دانشگاه صنعتی شریف است که هدف آن فراهم آوردن بستری مناسب برای تبادل اطلاعات در زمینه‌ی پژوهش‌های علمی، فنی و تخصصی در میان استادان و دانشمندان و اعتلای سطح دانش نظری و علمی آنان و نیز تهیه‌ی مجموعه‌یی مفید است. چاپ مقالات در مجله‌ی شریف منوط به دارا بودن یکی از ویژگی‌های زیر است:

۱. مقالاتی که حاوی مطالب بدیع در زمینه‌های علمی و فنی بوده و در مجله‌ی دیگری به چاپ نرسیده باشند؛ مقاله‌های ارائه شده در کنفرانس، از این امر مستثنی هستند و مانند سایر مقالات، ارزیابی شده و در صورت تایید به چاپ می‌رسند.

۲. مقالات مبتنی بر تحقیقات نظری و علمی پیشرفته، دارای یکی از مشخصات زیر:

۱.۲. با نقد و بررسی در موضوعات فنی و مهندسی، به طرح نظرهای جدیدی پرداخته و به نتایج تازه‌یی دست یافته باشند.

۲.۲. به اختصار و در زمینه‌های فنی، صنعتی و پژوهشی تدوین شده باشند.

۳.۲. پژوهش، تلخیص و استنتاج از برخی آثار برجسته‌ی علمی و فنی باشند.

* **مشخصات مقالات ارسالی:**

مقاله به‌صورت دوستونی (طول سطر ۸/۵ سانت) در قالب نرم افزار Word با قلم نازنین پوینت ۱۲ با فاصله سطر مناسب (تمامی معادلات، علائم ریاضی، رابطه‌ها الزاما فقط در محیط Mathtype ارائه شود) و منضم به نامه معرفی مقاله از سوی استاد راهنما به نشانی سایت مجله http://journal.sharif.ir به دفتر مجله ارسال شود.

* ضمن معرفی نویسنده مسؤول مقاله، نشانی پست الکترونیکی کلیه نویسندگان قید شود.

* صفحه عنوان شامل: عنوان مقاله، اسامی نویسندگان و ذکر نویسنده مسئول، درج آخرین درجه علمی کلیه نویسندگان، نشانی پست الکترونیکی ایشان، چکیده فارسی بین ۱۳۰ تا ۱۵۰ کلمه، چکیده انگلیسی در حد یک صفحه A4 کامل (قلم Times فونت ۱۲) و کلمات کلیدی فارسی و انگلیسی ارائه شود.

* سایر اجزای اصلی مقاله، نظیر مقدمه، عناوین بخش‌های اصلی و زیربخش‌ها، نتیجه‌گیری به صورت شماره بندی و کاملاً مشخص باشد، حجم مقاله نیز بین ۷ - ۱۵ صفحه ــ با احتساب شکل و نمودار ــ باشد.

* کلیه‌ی عبارات، اصطلاحات و اعداد و ارقام در جداول، نمودارها و شکل‌ها باید به فارسی باشد و موضوع جداول در بالای آنها و موضوع شکل‌ها و نمودارها در زیر آنها درج شود.

نکته: از آنجا که مطالب مجله در ستون‌های ۸/۵ سانتی‌متری آراسته می‌شوند، لازم است اصل (اورژینال) شکل و نمودار در عرض ۸ یا ۱۶ سانتی‌متر با ضخامت کادر ۸px و خط نمودار px ۶ تهیه شوند. پذیرش اصل شکل‌ها و نمودارها فقط در محیط فتوشاپ با Resolution 600 با پسوند JPG یا Tif امکان‌پذیر است.

* از به کار بردن کلمات و اصطلاحات لاتین که دارای معادل متداول فارسی می‌باشند، اجتناب شود. در صورت ضرورت استفاده از واژه‌ی لاتین، معادل انگلیسی آن نیز داده شود.

یادآوری مهم و ضروری: با توجه به یکسان سازی شکل‌های کلیه مقالات در محیط فتوشاپ، لازم است **اعداد** تصاویری که دارای راهنمای رنگی و کانتور (فشار، سرعت، تنش و...) هستند، با **فرمت جنرال (عدد معمولی)** ارائه شود (**طبق شکل های نمونه**) و از آوردن **اعداد** به صورت نماد علمی و سایر نمادها جدا خودداری شود.

* کلیه‌ی منابع 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 ارائه شود. باتوجه به مثال‌های زیر نوشته شوند. (مراجع فارسی نیز به انگلیسی ترجمه شده و در انتها واژه‌ی (In Persian) داخل پرانتز قید شده و سال آنها نیز به میلادی برگردان شوند).

Examples:

Journals:

Mirghafoori, S.H., Sadeghi Arani, Z. and Jafarnejad, A. "Forcasting success of commercialization of innovative ideas using artificial neural networks; the case of inventors and innovations in Yazd province", *Journal of Science and Technology Policy*, **4**(1), pp. 63-76 (In Persian) (2011).

Journals:

Johnson, W. and Mamalis, A.G. "The preforation of circular plat with four sided pyramidally - headed square-section punches", *Int. J. of Mech. Sci.*, 20 (3), pp.801-820 (1990).

Books:

Hindmarsh, J. "The electrical-circuit viewpoint", *In Electrical Machines and their Applications*, P. Hammond, Ed., 4th Edn., pp. 57-130, Pergamon Press, Oxford, UK (1975).

Proceedings and reports:

Walker, L.K. and Morgan, J.R. "Field performance of firm silty clay", *9th Int. Conf. on Soil Mech. And Found. Engrg.*, 1, Tokyo, Japan, pp.341-346 (1977).

Barksdale, R.D. and Bachus, R.C. "Design and construction of stone columns", Report SCEGIT 83-10, Georgia Inst. of Tech., Atlanta, GA, submitted to Fed. Highway Admin (1983).

Bhandari, R.K.M. "Behavior of tank founded on soil reinforced with stone columns", *VIII European Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Helsinki (1983).

Industrial Engineering and Management
Sharif

Summer
2025

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

1 **The Impact of Marketing Capabilities on Export Performance by Considering the Role of Competitive Advantage Using the Structural Equations Method (Case Study: Food Export Companies in Tehran Province)**
Taha Keshavarz and Mohammad Reza Amuzadeh

12 **Designing a Decision Support System for Portfolio Management Using Data Science Methods (Tehran Stock Exchange)**
Navid Javaheri, Najmeh Neshat and Abbass Ali Jafari Nodushan

28 **Locating Telecommunications Masts for Mobile Network Coverage Considering Sustainable Development Indices by Using GIS and BWM Technique: Case Study of Urmia**
Ronak Abbasi Ghasemloei, Saeed Fazayeli and Reza Babazadehounty

39 **Investigating Big Data Investment in a Three-Level Green Supply Chain: A Game Theoretic Approach**
Zahra Esmaeeli, Naser Mollaverdi and Soroush Safarzadeh

57 **Analysis of Customers' Lifetime Value with a Clustering Approach Based on Som Artificial Neural Networks and Markov Chain (Case Study: Pasargad Digital Bank)**
Maral Mirzaei Moradi, Hossein Razavi Haji Agha, Hanan Amouzad Mehdirji and Ali Alikhani

73 **A Novel Method for Designing Glaze Formulation Using Mathematical Programming**
Hossein Shams Shemirani and Hamid Reza Zahedi Neiestani

86 **Investigating the Performance of Two Stock Price Forecasting Models, Based on a Long Short-Term Memory Neural Network and with Two Different Approaches of Feature Selection and Time Series Analysis**
Keyvan Haghighi Naeini and Mohammad Ali Rastegar

98 **Developing and Assessing New Models for the Free Patrol Vehicle Routing Problem**
Hamed Manshadian, Mohsen Sadegh Amalnick and Seyed Ali Torabi

109 **Game-Theoretic Approach for Pricing Cloud Computing and Determining the Security Level of Security Provider Companies**
Mahdie Sadeghian, Morteza Rasti-Barzoki and Hossein Khosroshahi

RESEARCH NOTES:

122 **Hub Location with the Backup Approach by Considering the Capacity Constraint in Critical Situations**
Hasan Ziarati, Ali Shahandeh Nookabadi and Mohammad Reisi-Nafchi

138 **Optimization of Hospital Bed Allocation by a Hybrid Simulation-MCDM Approach**
Sara Motevali Haghighi and Ali Ghorbanian