



Forecasting the budgeting system in Tehran Municipality based on designing a robust mathematical model under conditions of uncertainty with a multiple regression approach

Azam Gholami Zarezadeh¹  | Sevan Sohraiee^{2*}  | Maryam Khademi³  | Ehsan Sadeh⁴ 

1. Department of Industrial Management, NT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: azam.gholami0176@iau.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Mathematics, NT. C., Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: sohraiee@iau.ac.ir

3. Department of Mathematics, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: Maryam_khademi@iau.ac.ir

4. Department of Industrial Management, NT. C., Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: ehsan.sadeh@iau.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received 25 March 2026

Revised 05 May 2026

Accepted 05 June 2026

Published Online 23 September 2026

Keywords:

Budgeting,
Municipality,
Budget Planning,
Forecasting,
Robust Optimization Mathematical Model,
Multivariate Regression.

ABSTRACT

This research was conducted with the aim of designing a robust mathematical model for forecasting and budget planning at the Tehran Municipality under conditions of economic uncertainty. The main research gap was the lack of an integrated and localized model for converting historical data into optimal budget decisions, as well as the failure to localize indicators affecting revenue and expenditure for an Iranian metropolis. The novelty of this article lies in integrating three approaches within a single framework: forecasting with regularized regressions (Ridge, Lasso, Elastic Net), robust optimization using the Bertsimas-Sim approach, and multiple-choice goal programming (MCGP), which had not previously been applied to Tehran Municipality's budgeting. The robust model, with appropriate adjustment of the protection level, provided optimal solutions in which the transportation sector received the highest priority while the shares of other missions were maintained. Scenario analysis demonstrated that the model is resilient against economic fluctuations and can serve as an effective tool for budgetary decision-making under uncertainty.

Cite this article: Gholami Zarezadeh, A.; Sohraiee, S.; Khademi, M. & Sadeh, E. (2026). Forecasting the budgeting system in Tehran Municipality based on designing a robust mathematical model under conditions of uncertainty with a multiple regression approach. *Urban Development Policy Making*, 3 (3), 495-516. DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.587729.1126>



© Authors retain the copyright and full publishing rights.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.587729.1126>

Introduction

Budgeting has evolved from a simple tool for estimating revenues and costs into a critical mechanism for governance, policy-making, and organizational control. It serves as the primary financial document that quantifies plans and priorities, guiding limited resources toward unlimited needs. Performance-based budgeting, a key modern approach, shifts allocation from inputs toward measurable outcomes, linking resources to efficiency, effectiveness, and accountability. Despite its theoretical appeal and legislative support, practical implementation in many Iranian organizations faces significant obstacles. Existing models often rely on calculating full costs a process that is complex, unreliable, and fails to account for differing operational conditions. Moreover, decision-making environments are inherently uncertain, with revenues and costs subject to economic fluctuations and volatility. In this context,

robust optimization offers solutions that remain reliable under data variability, while multivariate regression provides a scientific basis for forecasting financial parameters. The core problem is that organizations possess historical data yet lack a systematic model for optimal budget allocation. This research develops a two-stage robust mathematical model for the Tehran Municipality. The first stage forecasts revenues and costs using regression, while the second stage allocates the budget via robust multi-objective programming, considering constraints, priorities, and uncertainty to enhance performance and transparency.

Methods and Materials

This research aims to develop and improve existing mathematical models for organizational budgeting, positioning it as developmental research. It also has descriptive aspects, as it identifies and analyzes key cost and revenue drivers using regression algorithms to describe causal and correlational relationships under uncertainty. The study is applied in nature, focusing on operational modeling for real organizations, using Tehran Municipality as a case study.

The methodology integrates advanced forecasting techniques (multivariate Ridge and Lasso regression) with robust multi-objective optimization (Bertsimas-Sim approach and hybrid NSGA-III algorithms). Input data consists of nine years of historical revenue and cost data from the Tehran Municipality, along with key indicators and uncertainty parameters such as inflation and exchange rates. Data preprocessing includes managing missing values, Min-Max normalization, and ADF stationarity tests using Python. Regression models (Ridge, Lasso, Elastic Net, Random Forest) are fitted separately for revenue and cost, with 10-fold cross-validation selecting the best model. Forecasts with 95% confidence intervals are produced. Finally, a robust optimization model with Bertsimas-Sim approach (adjustable protection level Γ) is formulated, considering multiple objectives: maximizing net profit, minimizing budget deviation, and minimizing maximum regret, while respecting legal constraints.

Results

The Elastic Net and Lasso models outperformed other methods in forecasting municipal revenues and expenditures, demonstrating that regularization techniques effectively handle multiple collinearity between financial predictors. The predicted values showed a difference of less than 0.3% compared to the figures of the 2025 supplementary budget (1404), indicating the high reliability of the forecasting stage. In the optimization stage, the robust model generated feasible Pareto-efficient allocation plans that prioritize essential expenditures under uncertainty while meeting the minimum mission requirements. Among the solutions, the “Transportation and Traffic” sector consistently received the highest budget share, indicating its strategic importance, while other key missions such as social services and urban environment maintained their required thresholds. Scenario-based sensitivity analysis showed that increasing the Bertsimas-Sim protection level significantly increases fiscal resilience to severe economic fluctuations by creating more conservative but stable allocations and reducing the risk of non-feasibility or large deviations during budget execution. However, this increased robustness is accompanied by a modest decrease in objective optimality.

Conclusion

The present study was conducted with the aim of designing and implementing a robust mathematical model for forecasting and budget planning at the Tehran Municipality under conditions of economic uncertainty. The main research gap was the lack of a coherent and localized model for converting historical data into optimal budget decisions, as well as the failure to localize indicators affecting revenue and expenditure through qualitative methods for an Iranian metropolis. The novelty of this article lies in integrating three approaches within a single framework, including forecasting with regularized regressions, robust optimization using the Bertsimas-Sim approach, and multiple-choice goal programming (MCGP), which had not previously been applied to Tehran Municipality's budgeting. Furthermore, the localization of indicators through a meta-synthesis of the literature and fuzzy Delphi represents a novel step in this field. Among the most important qualitative findings were the identification and screening of key influential indicators, such as economic growth rate, consumer price index, demographic changes, tax base value, as well as qualitative indicators including legal

policies and expert judgment, which are consistent with the findings of previous research. The analysis of probable, optimistic, and pessimistic scenarios demonstrated that the model is resilient against fluctuations in inflation, revenue changes, and government grants, and that increasing the protection level creates greater stability under critical conditions. Overall, the proposed framework has the potential to be extended to other metropolises and public organizations in Iran and can serve as a basis for developing intelligent decision support systems in budgeting. It is suggested that future research develop this model towards more sustainable, transparent, and intelligent budgeting by utilizing more detailed data, more advanced metaheuristic algorithms, and incorporating environmental objectives and citizen satisfaction indicators.



پیش‌بینی نظام بودجه‌ریزی در شهرداری تهران بر اساس طراحی مدل ریاضی استوار در شرایط عدم قطعیت با رویکرد رگرسیون چندگانه

اعظم غلامی زارع‌زاده^۱ | سوان سهرایی^{۲*} | مریم خادمی^۳ | احسان ساده^۴

۱. گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: azam.gholami0176@iau.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه ریاضی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: sohraiee@iau.ac.ir

۳. گروه ریاضی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: Maryam_khademi@iau.ac.ir

۴. گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: ehsan.sadeh@iau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

این پژوهش با هدف طراحی یک مدل ریاضی استوار برای پیش‌بینی و برنامه‌ریزی بودجه شهرداری تهران در شرایط عدم قطعیت اقتصادی انجام شد. شکاف پژوهشی اصلی، نبود مدل یکپارچه و بومی به منظور تبدیل داده‌های تاریخی به تصمیمات بودجه‌ای بهینه و عدم بومی‌سازی شاخص‌های مؤثر بر درآمد و هزینه برای کلان‌شهری ایرانی بود. نوآوری مقاله در تلفیق سه رویکرد در یک چارچوب واحد است: پیش‌بینی با رگرسیون‌های منظم‌شده (Ridge, Lasso, Elastic Net)، بهینه‌سازی استوار با رویکرد Bertsimas-Sim و برنامه‌ریزی آرمانی چندانتخابی (MCGP) که پیش از این برای بودجه‌ریزی شهرداری تهران به کار گرفته نشده بود. مدل استوار با تنظیم سطح حفاظت مناسب، راه‌حل‌های بهینه‌ای ارائه کرد که در آن بخش حمل‌ونقل بیشترین اولویت را داشت و سهم سایر مأموریت‌ها حفظ شد. تحلیل سناریوها نشان داد مدل در برابر نوسانات اقتصادی مقاوم است و می‌تواند ابزاری مؤثر برای تصمیم‌گیری بودجه‌ای در شرایط عدم قطعیت باشد.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

کلیدواژه:

بودجه‌ریزی،

شهرداری،

برنامه‌ریزی بودجه،

پیش‌بینی،

مدل ریاضی بهینه‌سازی استوار،

رگرسیون چندمتغیره.

استناد: غلامی زارع‌زاده، اعظم؛ سهرایی، سوان؛ خادمی، مریم و ساده، احسان (۱۴۰۵). پیش‌بینی نظام بودجه‌ریزی در شهرداری تهران بر اساس طراحی مدل ریاضی استوار در شرایط عدم قطعیت با رویکرد رگرسیون چندگانه. *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۳(۳): ۴۹۵-۵۱۶.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.587729.1126>

© نویسندگان

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.587729.1126>



۱. مقدمه

در دنیای امروز، بودجه‌ریزی دیگر فقط ابزاری برای برآورد درآمدها و هزینه‌ها نیست، بلکه یکی از سازوکارهای مهم راهبری، سیاستگذاری و کنترل در سازمان‌ها به شمار می‌آید [۱]. بودجه به عنوان مهم‌ترین سند مالی هر سازمان، بیان کمی و مالی برنامه‌ها، اولویت‌ها و اهداف آن در یک دوره زمانی مشخص است و نقش اساسی در هدایت منابع محدود به سمت نیازهای نامحدود ایفا می‌کند. در واقع، نظام بودجه‌ریزی نشان می‌دهد یک سازمان تا چه اندازه می‌تواند میان منابع، فعالیت‌ها، نتایج و اهداف راهبردی خود پیوند برقرار کند. از این منظر، بودجه‌ریزی نه فقط یک فرایند حسابداری، بلکه یک نظام مدیریتی برای ارتقای کارایی، اثربخشی، شفافیت و پاسخ‌گویی است. در ادبیات مدیریت مالی عمومی، تحول از بودجه‌ریزی سنتی به بودجه‌ریزی نوین، پاسخی به نیاز روزافزون سازمان‌ها و دولت‌ها برای استفاده بهینه از منابع و ارزیابی‌پذیر شدن عملکرد بوده است [۲]. بودجه‌ریزی صحیح و اصولی درنهایت می‌تواند به ارتقای مشارکت شهروندان در فرایند بودجه‌ریزی منجر شود [۳]. یکی از رویکردهای مهم نوین در این حوزه، بودجه‌ریزی مبتنی بر عملکرد است؛ رویکردی که تخصیص اعتبارات را از ورودی‌ها و هزینه‌ها به سمت خروجی‌ها، نتایج و پیامدها سوق می‌دهد. مبنای نظری این رویکرد بر این فرض استوار است که منابع عمومی باید نه فقط بر اساس ساختارهای اداری، بلکه متناسب با عملکرد واحدها، میزان تحقق اهداف، کیفیت خدمات و ارزش‌آفرینی سازمانی تخصیص یابند. در چنین سیستمی، بودجه ابزاری برای سنجش عملکرد، مقایسه کارایی واحدها و بهبود تصمیم‌گیری مدیریتی می‌شود [۲].

بودجه‌ریزی مبتنی بر عملکرد در پی آن است که میان اعتبارات تخصیصی و نتایج حاصل از مصرف منابع رابطه‌ای روشن و قابل سنجش برقرار کند. در این رویکرد، مفاهیمی مانند صرفه‌جویی، کارایی، اثربخشی، پاسخ‌گویی و شفافیت جایگاه محوری دارند. صرفه‌جویی به معنای تأمین نهاده‌ها با حداقل هزینه ممکن، کارایی به معنای استفاده بهتر از منابع برای تولید خروجی بیشتر، و اثربخشی به معنای میزان تحقق اهداف و پیامدهای مورد انتظار است [۴]. بنابراین، هدف غایی بودجه‌ریزی عملیاتی و مبتنی بر عملکرد، کمک به اتخاذ تصمیمات عقلایی درباره تخصیص و تعهد منابع بر پایه نتایج قابل اندازه‌گیری است؛ به گونه‌ای که عملکرد سازمان طی زمان قابل پایش، ارزیابی و اصلاح باشد. با وجود این مبنای نظری روشن و نیز تأکید قوانین و اسناد بالادستی کشور بر استقرار بودجه‌ریزی مبتنی بر عملکرد، اجرای عملی آن در بسیاری از سازمان‌ها با دشواری‌های جدی مواجه شده است. یکی از دلایل مهم این مسئله، نبود مدل‌های اجرایی و عملیاتی متناسب با واقعیت سازمان‌های ایرانی است. بسیاری از مدل‌های موجود، تخصیص بودجه را بر اساس بهای تمام‌شده فعالیت‌ها، خدمات یا ستانده‌ها پیشنهاد می‌کنند. این در حالی است که در عمل، محاسبه دقیق بهای تمام‌شده در بسیاری از سازمان‌ها فرایندی پیچیده، زمان‌بر و گاه غیرقابل اتکا است. افزون بر این، حتی در مواردی که فعالیت‌ها یا خدمات مشابه هستند، تفاوت در فناوری، ساختار اجرایی، بهره‌وری نیروی انسانی، شرایط عملیاتی و محیطی موجب می‌شود بهای تمام‌شده در واحدها یا سازمان‌های مختلف یکسان نباشد. از این‌رو، اتکای صرف به این شاخص نمی‌تواند مبنایی عادلانه و کارآمد برای تخصیص بودجه باشد.

از سوی دیگر، یکی از مبنای اساسی نظری در مدیریت مالی و تصمیم‌گیری، پذیرش این واقعیت است که محیط تصمیم‌گیری همواره با عدم قطعیت همراه است. این عدم قطعیت در حوزه بودجه‌ریزی، بیش از هر چیز در برآورد درآمدها و هزینه‌ها نمود پیدا می‌کند. درآمدهای سازمان‌ها ممکن است تحت تأثیر شرایط اقتصادی، تورم، سیاست‌های کلان، تغییرات بازار، نوسانات تقاضا، تحولات قانونی و عوامل محیطی قرار گیرند. همچنین، هزینه‌ها نیز به دلیل تغییرات قیمت نهاده‌ها، دستمزد، انرژی، پروژه‌های توسعه‌ای، تعهدات جاری و سایر عوامل، ماهیتی پویا و غیرقطعی دارند. در نتیجه، هرگونه تصمیم‌گیری بودجه‌ای که بدون توجه به عدم قطعیت انجام شود، می‌تواند به تخصیص غیربهینه منابع، افزایش انحراف عملکرد و کاهش کارایی سازمان بینجامد [۵]. در چنین شرایطی، استفاده از فنون کمی و مدل‌های ریاضی در بودجه‌ریزی اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. مبنای نظری کاربرد این فنون آن است که در مسائل پیچیده تخصیص منابع، تصمیم‌گیری ذهنی و مبتنی بر تجربه، به‌تنهایی نمی‌تواند راه‌حل بهینه یا حتی رضایت‌بخش ارائه دهد. مدل‌های ریاضی این امکان را فراهم می‌کنند که اهداف، محدودیت‌ها، اولویت‌ها و روابط میان متغیرها به صورت نظام‌مند فرموله شوند و تصمیم‌گیرنده بتواند از میان گزینه‌های مختلف، بهترین یا مناسب‌ترین راه‌حل را انتخاب کند. در

حوزه بودجه‌ریزی، این مدل‌ها به‌ویژه زمانی اهمیت دارند که سازمان با اهداف چندگانه و گاه متعارضی همچون کاهش هزینه، افزایش مطلوبیت، حفظ کیفیت خدمات، رعایت اولویت‌ها و پاسخ‌گویی به ذی‌نفعان روبه‌رو باشد [۵].

یکی از رویکردهای نظری و کاربردی مهم در مواجهه با عدم قطعیت، بهینه‌سازی استوار است. در این رویکرد، به خلاف مدل‌های قطعی که همه پارامترها را ثابت و معلوم فرض می‌کنند، تلاش می‌شود راه‌حلی به دست آید که در برابر نوسانات و تغییرات داده‌ها نیز قابل قبول و موجه باقی بماند [۶]. به بیان دیگر، بهینه‌سازی استوار به دنبال پاسخ‌هایی است که اگرچه ممکن است در شرایط ایده‌آل اندکی از جواب کاملاً بهینه فاصله داشته باشند، اما در شرایط واقعی و نامطمئن، از پایداری و قابلیت اتکای بیشتری برخوردارند. این ویژگی، به‌ویژه در بودجه‌ریزی سازمانی که همواره با ریسک، نوسان و شکاف میان پیش‌بینی و واقعیت مواجه است، اهمیت فراوان دارد. هم‌زمان، در مرحله پیش‌بینی درآمدها و هزینه‌ها، استفاده از مدل‌های رگرسیونی چندمتغیره می‌تواند مبنایی علمی برای برآورد پارامترهای مالی فراهم آورد. این مدل‌ها با شناسایی و سنجش رابطه میان متغیرهای وابسته، مانند درآمد و هزینه و متغیرهای مستقل، مانند شاخص‌های اقتصادی، عملیاتی و عملکردی، به پیش‌بینی دقیق‌تر آینده کمک می‌کنند. از منظر نظری، هرچه پیش‌بینی پارامترهای ورودی مدل بودجه‌ریزی واقع‌بینانه‌تر باشد، تصمیم‌گیری نهایی درباره تخصیص منابع نیز از اعتبار و کارایی بیشتری برخوردار خواهد بود. بنابراین، ترکیب مرحله پیش‌بینی آماری با مرحله بهینه‌سازی ریاضی، می‌تواند چارچوبی جامع‌تر و کاربردی‌تر برای بودجه‌ریزی عملیاتی فراهم سازد.

مسئله اصلی آن است که بسیاری از سازمان‌ها، با وجود در اختیار داشتن داده‌های تاریخی درباره درآمدها، هزینه‌های جاری و ثابت، پروژه‌های توسعه‌ای، تغییرات نیروی انسانی و سایر متغیرهای مؤثر، هنوز فاقد یک مدل منسجم و بومی برای تبدیل این داده‌ها به تصمیمات بودجه‌ای بهینه هستند. در واقع، شکاف اصلی در اینجا است که از یک سو اطلاعات و داده‌های گذشته وجود دارد، اما از سوی دیگر سازوکاری علمی برای استفاده از این اطلاعات در پیش‌بینی و تخصیص بهینه بودجه، به گونه‌ای که هم عملکرد سازمان را بهبود دهد و هم در برابر عدم قطعیت مقاوم باشد، کمتر در دسترس است. بر این اساس، مسئله این پژوهش طراحی یک مدل ریاضی دومرحله‌ای و استوار برای بودجه‌ریزی عملیاتی است. در مرحله نخست، با بهره‌گیری از مدل‌های رگرسیونی چندمتغیره، درآمدها و هزینه‌های سازمان بر اساس داده‌های تاریخی و شاخص‌های کلیدی مؤثر پیش‌بینی می‌شوند. در مرحله دوم، با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه یا آرمانی استوار، بودجه میان بخش‌ها، رده‌ها یا فعالیت‌های مختلف سازمان تخصیص می‌یابد. این تخصیص با در نظر گرفتن محدودیت‌های زمانی، اولویت‌های مدیریتی، شاخص‌های کلیدی عملکرد، سطوح مطلوبیت مورد انتظار، تعهدات جاری و آتی، و نیز شرایط عدم قطعیت انجام می‌شود. این تحقیق در سطح شهرداری تهران انجام می‌شود. در شهرداری‌ها بحث عملکردی و شفافیت از طریق استفاده از داده‌ها همواره مطرح و دارای اهمیت بوده است [۷]. در حیطه‌های مرتبط با شهرداری‌ها استفاده از رویکردهای تحلیلی داده‌ای همچون یادگیری ماشین و روش‌های رگرسیونی می‌تواند نظارت هوشمند را در این مدیریت شهری ارتقا دهد [۸].

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲-۱. مفهوم بودجه‌بندی

بودجه‌بندی معمولاً به عنوان سنگ‌بنای کنترل مدیریت در نظر گرفته می‌شود و به طور سنتی به عنوان ابزار حسابداری توصیف می‌شود که سازمان‌ها برای اجرای استراتژی‌ها از آن استفاده می‌کنند. هر سازمانی برنامه‌ها و اهدافی دارد که از استراتژی بلندمدت آن مشتق شده‌اند. هدف از بودجه‌بندی، ارزش مالی بخشیدن به این برنامه‌ها و اهداف است تا پیشرفت به‌راحتی قابل اندازه‌گیری باشد و ایده‌های استراتژیک به اقدام‌های عملیاتی قابل فهم تبدیل شوند. برخی محققان بودجه را به عنوان بیان کمی مدیریت از یک برنامه مورد انتظار برای یک دوره مشخص و به عنوان کمکی برای هماهنگی و اجرای آنچه برای دستیابی به برنامه باید انجام شود، تعریف می‌کنند. یک بودجه عملیاتی معمولاً یک سال را پوشش می‌دهد، اما می‌تواند به‌راحتی دو یا سه سال بعدی را نیز شامل شود [۹].

تهیه بودجه یک فرایند جامع است که در آن طول مدت تهیه، قالب، سطح جزئیات و افق زمانی ممکن است در سازمان‌های مختلف متفاوت باشد. فرایند بودجه‌بندی را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد که شامل ایجاد بودجه، پیگیری بودجه و تجزیه و تحلیل بودجه است. بسیاری از کارمندان و مدیران در سراسر سازمان در فرایند بودجه‌بندی دخیل هستند و هر سطح در یک سازمان اطلاعات متفاوتی دارد که در تهیه بودجه ارزشمند است. بنابراین، به طور کلی، فرایند بودجه‌بندی یک حرکت رفت و برگشتی بین مدیریت ارشد و پایین‌تر است. سه رویکرد اصلی وجود دارد که می‌توان هنگام تدوین بودجه از آن‌ها استفاده کرد:

(۱) رویکرد از بالا به پایین: که در آن مدیریت ارشد در مورد بودجه تصمیم می‌گیرد و مدیریت سطح پایین‌تر مسئول اجرای بودجه است؛

(۲) رویکرد پایین به بالا: که در آن مدیریت سطح پایین‌تر بودجه خود را ایجاد می‌کند و سپس، تمام بودجه‌های زیر واحدها در سطح شرکت تلفیق می‌شوند؛

(۳) رویکرد تکراری: که مانند بودجه‌بندی پایین به بالا شروع می‌شود، اما سپس یک یا چند بار تکرار می‌شود تا زمانی که مدیریت ارشد از مبالغ بودجه تلفیقی راضی باشد [۱].

بودجه‌بندی شامل بخش‌های مهمی از یک سیستم کنترل مدیریت، مانند برنامه‌ریزی و هماهنگی و همچنین، انگیزه و ارزیابی عملکرد است؛ «تقریباً هر جنبه‌ای از حسابداری مدیریت در بودجه‌بندی دخیل است». علاوه بر این، محققان بودجه‌بندی را به عنوان یکی از اجزای کنترل‌های سایبرنتیک در بسته سیستم کنترل مدیریت خود گنجانده‌اند [۲]. به عنوان یک کنترل سایبرنتیک اساسی، بودجه‌بندی شامل تعیین اهداف عملکرد، اندازه‌گیری عملکرد، مقایسه عملکرد با اهداف و ارائه اطلاعات مربوط به واریانس‌های ناخواسته است. سیستم بودجه‌بندی می‌تواند برای اهداف مختلفی مورد استفاده قرار گیرد و هر سازمان سیستم خود را برای رسیدگی به مهم‌ترین مشکلات خود طراحی می‌کند. برخی از رایج‌ترین اهداف بودجه‌بندی در زیربخش بعدی مورد بحث قرار گرفته‌اند.

۲-۲. پیش‌بینی منعطف بودجه‌ای در دستگاه‌های بودجه‌ای

برای توضیح ارتباط بین بودجه‌بندی و پیش‌بینی منعطف، ابتدا باید دلایل بودجه‌بندی توضیح داده شود. به عنوان یک موضوع تحقیقاتی، بررسی بودجه‌بندی به دلایل متناقض مشاهده‌شده در مطالعات، مشکل‌ساز بوده است. تعداد کمی از محققان به طور خاص بر بررسی این دلایل تمرکز کرده‌اند. طبق این مطالعات، دلایل بودجه‌بندی را می‌توان در سه کارکرد بودجه‌بندی خلاصه کرد: برنامه‌ریزی، کنترل و ارزیابی. به دلیل این یافته‌ها، تمرکز تحقیقات اخیر به سمت بررسی این کارکردها تغییر یافته است. دو دلیل عملیاتی برای بودجه‌بندی شرکت‌ها وجود دارد: برنامه‌ریزی و ارزیابی. علاوه بر این، هدف از بودجه‌بندی نیز ارائه اطلاعات به نظارت مدیریت به عنوان نوعی کنترل است. تحقیقاتی که این کارکردها را در نظر گرفته‌اند توسط سایر محققان مورد تأیید قرار گرفته و این موضوع به استفاده از کارکردها در مطالعات جدیدتر منجر شده است [۴].

برنامه‌ریزی را می‌توان به عنوان ابزاری برای هماهنگی منابع و ایجاد برنامه‌های عملیاتی توصیف کرد. هماهنگی منابع یکی از عناصر کلیدی برنامه‌ریزی است، زیرا بودجه محدودیت‌هایی را در مورد نحوه تقسیم منابع بین بخش‌ها ایجاد می‌کند. برنامه‌ریزی عملیاتی به استفاده از بودجه به عنوان یک مکانیسم هدایت در انتخاب بین گزینه‌های رقیب اشاره دارد [۵]. عملکرد کنترل را می‌توان به عنوان ابزار نظارتی هیئت‌مدیره و ابزاری برای کنترل هزینه‌های شرکت توصیف کرد. بودجه یکی از محدود کنترل‌های مالی رسمی شرکت است و برای نظارت بر کسب‌وکار شرکت توسط مدیریت و هیئت‌مدیره استفاده می‌شود. یکی از روش‌های رایج، تحلیل واریانس است که برای مقایسه مقادیر واقعی و بودجه‌بندی‌شده استفاده می‌شود. ارزیابی معمولاً با ارزیابی عملکرد کارکنان یا کسب‌وکار مرتبط است. ارتباط بین ارزیابی کارکنان و بودجه به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است و ارزیابی کسب‌وکار اغلب با ارزیابی کارکنان ترکیب می‌شود.

دستگاه‌های بودجه‌ای را می‌توان به عنوان دستگاه‌های زیربخش توصیف کرد که در آن‌ها از ابزارهای مختلف، مانند پیش‌بینی‌های منعطف، برای انجام وظایف مختلف بودجه استفاده می‌شود. تعاریف زیادی از سیستم بودجه‌ای، مانند سیستم کنترل بودجه و کنترل بودجه‌ای، وجود دارد، اما اصطلاح سیستم بودجه‌ای برای توصیف طراحی وسیع‌تری از ابزارهای حسابداری

مورد استفاده در شرکت استفاده شده است. سه نوع سیستم تشخیص داده شد: سیستم بودجه‌بندی ثابت سنتی، سیستم ترکیبی و کنترل بودجه‌ای تکه‌تکه. بر اساس نتایج، سه مرحله از توسعه دستگاه‌های بودجه‌بندی شناسایی شد: فرایند سنتی، تخمین‌های پیش‌بینی منعطف و کنترل بودجه‌ای پراکنده. مشاهدات مطالعه محققان نشان می‌دهد توسعه سیستم بودجه‌بندی با ترکیب پیش‌بینی بودجه منعطف و فرایند بودجه‌ریزی سالیانه به صورت هیبریدی می‌تواند در نهایت به بهبود عملکرد بودجه‌ریزی منجر شود که در شرایط عدم اطمینان می‌تواند پاسخگوی نیازهای سازمان‌ها باشد [۴].

مرحله بودجه ثابت، فرایند سنتی را نشان می‌دهد که در آن درآمد و هزینه برای سال مالی برنامه‌ریزی می‌شود [۹]. شرکت‌ها روش سنتی را به عنوان مهم‌ترین ابزار برای کنترل شناسایی کرده‌اند و حاضر به کنار گذاشتن کامل آن نیستند. اگرچه بسیاری از سازمان‌ها بودجه‌بندی ثابت را رها نکرده‌اند، اما به ناتوانی آن در انجام هر سه عملکرد پی برده‌اند. معمولاً، گذار به تطبیق پیش‌بینی منعطف در کنار سیستم بودجه‌بندی به دلیل چالش‌هایی است که در فرایند برنامه‌ریزی فعلی رخ داده است [۱۰]. اگر فرایند برنامه‌ریزی فعلی کارآمد نباشد و اطلاعات دقیق کافی برای تصمیم‌گیری تولید نکند، بسیاری از شرکت‌ها پیش‌بینی منعطف را به عنوان یک راه حل شناسایی می‌کنند. ۷۰ درصد از شرکت‌های مورد بررسی آماده بودند تا سیستم بودجه‌بندی خود را با اضافه کردن یک ابزار پیش‌بینی به‌روزرسانی کنند.

افزایش رقابت در صنعت و کمبود ابزارهای برنامه‌ریزی می‌تواند محرک‌هایی برای اجرای پیش‌بینی منعطف باشد. با این حال، ارتقای سیستم بودجه‌بندی نیز به سرمایه‌گذاری‌های جدید و حمایت کل سازمان بستگی دارد. گذار از سیستم بودجه‌بندی ثابت به سیستم ترکیبی نیازمند پیاده‌سازی سیستم پیش‌بینی پیشرفته‌تر و هماهنگی بهبودیافته بین بخش‌های سازمان است. مشاهده شد که محرک انتقال شرکت مورد مطالعه به سیستم ترکیبی، متغیرهای کلیدی پیش‌بینی بود که سایر بخش‌ها شروع به ارائه آن‌ها کردند. ایجاد متغیرهای پیش‌بینی جدید به دلیل سیستم جدید مدیریت فرایند آغاز شد. اگر این فرایند شامل بخش‌های زیادی از سازمان باشد، فرایند پیش‌بینی کارآمدتر و شفاف‌تر عمل می‌کند [۴].

۲-۳. پیشینه پژوهش

حسینی و همکاران در مقاله‌ای به‌کارگیری رویکرد گسترش عملکرد کیفیت روی آموزش از راه دور را بررسی کردند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش یادشده عوامل مؤثر بر افزایش رضایتمندی مشتریان با به‌کارگیری رویکرد گسترش عملکرد کیفیت عبارت‌اند از: به حداقل رساندن تکمیل فرم، اعاده یک مرحله‌ای برگه‌ها، تکمیل الکترونیکی برگه‌ها و اطلاعات یک مرحله‌ای [۱۱]. دویس و دیچکامان^۱ نوعی روش مقداری نظام‌مند را با ادغام یک فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی بر مبنای مدل ارزیابی چندمعیاره با یک مدل هزینه شبیه‌سازی محور، برای پروژه‌هایی که سهم عمده‌ای در بودجه سالیانه دولت دارند، ارائه کردند [۱۰]. سوزا^۲ در تحقیق خود بیان کرده است که ریسک طی اجرای پروژه ذاتی و اجتناب‌ناپذیر است. مطالعه یادشده نوعی روش تخصیص بودجه متشکل از سه مازول برای کاهش خطرات پروژه را پیشنهاد می‌کند. ابتدا، رابطه بین اثر و هزینه هر استراتژی را به صورت روابط خطی و غیرخطی مدل می‌کنیم. دوم، دو مدل ریاضی ساخته می‌شود و راه حل‌های تحلیلی مربوطه به دست می‌آید. پس از آن، یک روش سه مرحله‌ای برای تخصیص بودجه پیشنهاد شده است. برای اعتبارسنجی نتایج تحلیلی و بررسی تأثیر ویژگی‌های ریسک و پاسخ پروژه بر تخصیص بهینه بودجه، آزمایش‌های عددی انجام شده و بینش‌های مدیریتی ترسیم می‌شود. در نهایت، مدل تخصیص بودجه با ریسک‌های متعدد، ریسک ثانویه و انتقال ریسک گسترش می‌یابد و با استفاده از یک تحلیل تجربی اعتبارسنجی می‌شود [۱۲].

کامانو^۳ و همکاران نوعی رویکرد مدل چندگانه گسسته - پیوسته را پیشنهاد کردند که اجازه می‌دهد بودجه محدود یا نه چندان محدودی در کل مجموعه وجود داشته باشد. در مورد کالاهای داخلی و خارجی؛ یک پیوند درون‌زای مطلوب نظری بین مصرف کالاهای داخلی و بودجه تخصیص‌یافته به کالاهای داخلی (یعنی به گروه محصول مورد علاقه) حفظ می‌کند. کامانو و

1. de With & Dijkman

2. Souza

3. Caamaño

همکاران نشان دادند مدل پیشنهادی شامل یک مدل چندگانه گسسته - پیوسته کسری در سطح پایین‌تر که به مدل توبیت برای تخصیص بودجه به کالاهای داخلی مرتبط است، کاملاً با ساختار نظری ابزار بودجه‌بندی دومرحله‌ای سازگار است. مهم‌تر از همه، با استفاده از مفروضات توزیع معکوس گامبل برای اصطلاحات تصادفی در سیستم مدل، یک مدل شکل بسته فوق‌العاده ساده به دست می‌آوریم. کاربرد مدل پیشنهادی برای بررسی ترکیب و استفاده ناوگان وسایل نقلیه خانگی، پتانسیل آن را نسبت به یک بودجه غیرمرتبط و توسعه‌یافته برون‌زا برای کالاهای داخلی نشان می‌دهد. مدل پیشنهادی این پتانسیل را دارد که دنیای کاملاً جدیدی از کاربردهای مدل چندگانه گسسته - پیوسته را به طور کلی و به‌ویژه برای مواردی با بودجه کل نامشخص برای کالاهای داخلی و خارجی باز کند [۱۳].

بالابونیه و وسرکین^۱ طی مطالعه‌ای بیان کرده‌اند که با توجه به عدم قطعیت تصمیم‌گیری گروه‌های بزرگ و محدودیت منابع، یک روش تصمیم‌گیری گروهی بزرگ بر اساس بودجه محدود ایجاد می‌کند. یک مدل سطح اجماع گروه حداکثر بر اساس بودجه محدود ساخته شده است که در آن هزینه تعدیل تصمیم‌گیرندگان با درجه تردید در ارزیابی و درجه اعتماد تعیین می‌شود. برای وضعیت بودجه ناکافی، همبستگی ترتیبی بین رتبه‌بندی جایگزین‌ها قبل و بعد از افزایش بودجه برای قضاوت در مورد افزایش بودجه به منظور دستیابی به سطح اجماع گروهی بالاتر معرفی می‌شود. سپس، یک روش تصمیم‌گیری گروهی بزرگ مبتنی بر بودجه محدود با اطلاعات زبانی فازی مردد پیشنهاد شده است. این روش برای انتخاب تأمین‌کنندگان تجهیزات برای ایستگاه سوختگیری هیدروژن اعمال می‌شود. درنهایت، اثربخشی روش پیشنهادی با مقایسه با روش‌های تحقیق موجود و تحلیل حساسیت تأیید می‌شود [۱۴].

ویلیامس و کالابرس^۲ در مطالعه‌ای بیان کرده‌اند که ضرایب حساسیت مرتبه اول برای هر یک از پارامترهای اولیه تحلیل شده متفاوت است و به مقادیر و پیکربندی آن‌ها در معادله بستگی دارد. حساسیت پارامترها به داده‌ها در بازه‌های زمانی تحلیل شده تغییر می‌کند و به حداقل و حداکثر می‌رسد. علاوه بر این، تأثیر هر نقطه داده با افزایش تعداد نقاط داده کمتر است. تشخیص تأثیر پارامترها بر حل مدل و همچنین، شناسایی نقاط داده با قوی‌ترین تأثیر بر تخمین‌ها، می‌تواند در طراحی آزمایشی و ارزیابی مدل مفید باشد [۱۵].

هدف اصلی این پژوهش

طراحی نوعی مدل ریاضی استوار دومرحله‌ای برای پیش‌بینی و برنامه‌ریزی بودجه در شهرداری تهران تحت شرایط عدم قطعیت اقتصادی است. این هدف در قالب دو مرحله عملیاتی دنبال شده است:

- مرحله اول: پیش‌بینی درآمد و هزینه‌های شهرداری با استفاده از مدل‌های رگرسیون چندمتغیره (شامل Ridge، Lasso، Elastic Net و Random Forest) بر اساس شاخص‌های کلیدی اقتصادی و عملیاتی شناسایی شده.

- مرحله دوم: تخصیص بهینه بودجه میان مأموریت‌های چهارگانه شهرداری از طریق یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه استوار با رویکرد سناریومحور (Bertsimas-Sim) که در برابر نوسانات اقتصادی مقاوم باشد.

به بیان روشن‌تر هدف مقاله، ارائه چارچوبی عملیاتی و داده‌محور است که هم دقت پیش‌بینی را افزایش دهد و هم تخصیص بودجه را در شرایط پرنوسان اقتصادی مقاوم‌سازی کند تا شهرداری بتواند با اطمینان بیشتری برنامه‌ریزی مالی انجام دهد.

شکاف پژوهشی پر شده توسط این مطالعه

- نبود مدل یکپارچه و بومی: بسیاری از سازمان‌های ایرانی با وجود داشتن داده‌های تاریخی فراوان، فاقد یک مدل منسجم ریاضی برای تبدیل این داده‌ها به تصمیمات بودجه‌ای بهینه هستند. مدل‌های موجود اغلب مبتنی بر محاسبه بهای تمام‌شده هستند که در عمل پیچیده، غیرقابل‌اتکا و ناهمگون است.

1. Balabonieni, I., & Vecerskiene

2. Williams & Calabrese

- عدم بومی‌سازی شاخص‌ها برای شهرداری تهران: شاخص‌های مؤثر بر درآمد و هزینه در ادبیات جهانی وجود دارند، اما کمتر مطالعه‌ای آن‌ها را با روش‌های کیفی (نظیر دلفی فازی) برای یک کلان‌شهر ایرانی بومی‌سازی کرده است.
- این پژوهش با ترکیب رگرسیون چندمتغیره، بهینه‌سازی استوار سناریومحور و برنامه‌ریزی آرمانی چندانتخابی (MCGP) در یک مطالعه موردی واقعی (شهرداری تهران)، این شکاف‌ها را پوشش می‌دهد و یک مدل عملیاتی و قابل پیاده‌سازی ارائه می‌کند.

نوآوری مطالعه

- نوآوری ترکیبی (روش شناختی):

تلفیق سه رویکرد در یک چارچوب واحد:

- (۱) پیش‌بینی با رگرسیون‌های منظم‌شده (Ridge, Lasso, Elastic Net) برای مقابله با هم‌خطی چندگانه؛
 - (۲) بهینه‌سازی استوار با رویکرد Bertsimas-Sim که قابلیت تنظیم سطح حفاظت (Γ) را دارد؛
 - (۳) برنامه‌ریزی آرمانی چندانتخابی (MCGP) برای تبدیل مدل چندهدفه به تک‌هدفه عملیاتی.
- این ترکیب، پیش از این برای بودجه‌ریزی شهرداری تهران به کار گرفته نشده بود.

- نوآوری در بومی‌سازی شاخص‌ها:

استفاده از فراترکیب ادبیات + دلفی فازی برای شناسایی و غربالگری شاخص‌های کمی و کیفی مؤثر بر درآمد و هزینه، متناسب با شرایط اقتصادی و اداری ایران.

به طور خلاصه، این مطالعه نه تنها یک مدل ریاضی جدید ارائه می‌دهد، بلکه با بومی‌سازی، تحلیل سناریو و ارائه ابزار تنظیم سطح ریسک، گامی به سمت بودجه‌ریزی هوشمند و مقاوم در بخش عمومی ایران برداشته است.

۳. روش تحقیق

این تحقیق با هدف توسعه و بهبود مدل‌های ریاضی موجود در حوزه بودجه‌ریزی سازمانی طراحی شده است و از این منظر، ماهیتاً در دسته تحقیقات توسعه‌ای قرار می‌گیرد. هدف اصلی، ارتقای دقت و کارایی مدل‌های بودجه‌ریزی از طریق تلفیق فن‌های نوین پیش‌بینی و بهینه‌سازی چندهدفه است تا سازمان‌ها بتوانند در شرایط عدم قطعیت اقتصادی، تصمیم‌گیری دقیق‌تری داشته باشند. هم‌زمان، پژوهش جنبه توصیفی نیز دارد؛ زیرا به شناسایی، اندازه‌گیری و تحلیل شاخص‌ها و پارامترهای مؤثر بر هزینه‌ها و درآمد می‌پردازد و با بهره‌گیری از الگوریتم‌های رگرسیون، روابط علی و همبستگی میان متغیرهای مستقل عدم قطعیت‌دار و متغیرهای وابسته (درآمد و هزینه واقعی) را توصیف و پیش‌بینی می‌کند. درنهایت به دلیل تمرکز بر مدل‌سازی عملیاتی قابل پیاده‌سازی در سازمان‌های واقعی و آزمون مدل بر داده‌های مطالعه موردی یک سازمان مشخص، این پژوهش کاربردی نیز محسوب می‌شود. این تحقیق به دنبال توسعه و بهبود مدل‌های ریاضی بودجه‌ریزی سازمانی در شرایط عدم قطعیت اقتصادی است، با تمرکز بر تلفیق فن‌های پیش‌بینی پیشرفته (رگرسیون چندمتغیره Ridge و Lasso) و بهینه‌سازی چندهدفه استوار (با رویکرد Bertsimas-Sim و الگوریتم‌های هیبرید NSGA-III). ورودی تحقیق شامل داده‌های تاریخی نُه‌ساله درآمد و هزینه‌های شهرداری تهران، شاخص‌های کلیدی استخراج‌شده از ادبیات، و پارامترهای عدم قطعیت مانند نرخ تورم و ارز است. خروجی آن، یک مدل بودجه‌ریزی استوار است که جبهه پارتو راه‌حل‌های بهینه را تولید می‌کند، همراه با پیش‌بینی‌های دقیق درآمد و هزینه به همراه بازه اطمینان و پیشنهادها برای بودجه سال‌های آتی.

هرچند الگوریتم جدیدی از پایه طراحی نشده، نوآوری تحقیق در تلفیق و بومی‌سازی روش‌های موجود مانند MCGP و بهینه‌سازی استوار هیبرید است، که برای مسائل واقعی بزرگ‌مقیاس شهرداری تهران سفارشی‌سازی شده و با زبان پایتون پیاده‌سازی می‌شود. قلمرو اصلی مورد بررسی این تحقیق شهرداری تهران است که در یک بازه زمانی نُه‌ساله بر اساس داده‌های موجود مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش نمونه‌گیری در این بخش تمام‌شمار است. در این تحقیق در بخش گردآوری داده‌ها، داده‌های کمی و واقعی مورد نیاز برای برازش مدل‌های رگرسیون و اجرای مدل بهینه‌سازی جمع‌آوری می‌شود. این داده‌ها از دو

منبع اصلی تأمین می‌شوند: الف) داده‌های ثانویه موجود در مقالات معتبر داخلی و خارجی که سناریوهای مشابهی از بودجه‌ریزی در شرایط عدم قطعیت ایران یا کشورهای درحال توسعه را بررسی کرده‌اند؛ ب) داده‌های اولیه سازمان (مطالعه موردی: شهرداری تهران) که با کسب مجوز رسمی و امضای تفاهم‌نامه محرمانگی اطلاعات، از واحد بودجه و تشکیلات سازمان استخراج می‌شود. داده‌های مورد نیاز شامل سری زمانی نه سال مالی کامل از مقادیر واقعی درآمد، هزینه‌ها و شاخص‌های برتر شناسایی شده است. این داده‌ها به صورت فایل‌های اکسل یا دسترسی مستقیم به سامانه‌های مالی سازمان دریافت شده و پس از پاک‌سازی و نرمال‌سازی برای تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی آماده می‌شوند. ترکیب این سه مرحله، داده‌هایی معتبر، بومی‌شده و کاملاً واقعی را برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی بودجه فراهم می‌آورد. در بخش تجزیه و تحلیل داده‌ها، با استفاده از داده‌های نه‌ساله شهرداری تهران و شاخص‌های نهایی، مدل‌های پیش‌بینی درآمد و هزینه برازش می‌شوند. ابتدا پیش‌پردازش داده‌ها (مدیریت داده‌های گمشده، نرمال‌سازی Min-Max، آزمون ایستایی ADF) در پایتون انجام می‌شود. سپس، با استفاده از کتابخانه scikit-learn و statsmodels، مدل‌های رگرسیون پیشرفته شامل Ridge، Lasso، Elastic Net و Random Forest Regressor به صورت جداگانه برای درآمد و هزینه برازش و با فن Cross-Validation ده‌تایی بهترین مدل انتخاب می‌شود. پیش‌بینی‌ها به همراه بازه اطمینان ۹۵ درصد تولید شده و به عنوان پارامترهای ورودی (به صورت توزیع احتمالاتی یا سناریوهای بدبینانه - خوش‌بینانه - محتمل) برای مرحله بهینه‌سازی استوار آماده می‌شود. در مرحله چهارم و نهایی، مدل بودجه‌ریزی چندهدفه با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها (درآمد، هزینه، نرخ تورم، نرخ ارز و ...) به صورت مدل بهینه‌سازی استوار با رویکرد Bertsimas-Sim (قابل تنظیم بودن سطح محافظت‌گرایی Γ) فرمول‌بندی می‌شود. اهداف اصلی شامل حداکثر کردن سود خالص، حداقل کردن انحراف بودجه از اهداف شورا، حداقل کردن حداکثر پیشیمانی و رعایت محدودیت‌های قانونی شهرداری است. مدل کاملاً در محیط پایتون با استفاده از کتابخانه‌های pymoo (برای الگوریتم‌های چندهدفه)، Pyomo یا Gurobi-python (برای حل مدل استوار دقیق) و RSOME (کتابخانه تخصصی بهینه‌سازی استوار) پیاده‌سازی و حل می‌شود. برای مسائل بزرگ، الگوریتم‌های هیبرید NSGA-III + Robust Counterpart اجرا می‌شود. نتایج شامل جبهه پارتو راه‌حل‌های استوار، تحلیل حساسیت روی سطح محافظت‌گرایی Γ ، تحلیل سناریوهای مختلف اقتصادی و درنهایت پیشنهاد بودجه استوار سال‌های آتی برای شهرداری تهران خواهد بود.

۴. یافته‌های پژوهش

در این بخش ابتدا به منظور تحلیل‌های بعدی علائم اختصاری برای این شاخص‌ها تعیین شده است که در مراحل بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۴-۱. گام ۱: شناسایی اهداف و محدودیت‌های مدل ریاضی چندهدفه بودجه‌ریزی بر اساس نظرات خبرگان

در این گام، بر اساس روش شناسی تحقیق و بر اساس نظرات خبرگان (از گروه‌های خبرگی مانند مدیران مالی، کارشناسان بودجه، و سیاستگذاران دولتی) اهداف و محدودیت‌های مدل ریاضی چندهدفه بودجه‌ریزی استخراج شد. برای مثال، خبرگان بر عدالت فضایی، محدودیت‌های بودجه ملی و اهداف پایداری تحت عدم قطعیت تأکید داشتند. این اصلاح با شبیه‌سازی دلفی (اجماع بالای ۷۰ درصد) و نظرات کارشناسان شهرداری انجام شد. نتایج این بررسی در قالب جدول ۲ ارائه شده است.

۴-۲. گام ۲: استوارسازی مدل ریاضی چندهدفه پژوهش با استفاده از روش سناریومحور

در این گام، بر اساس روش شناسی تحقیق (بهینه‌سازی استوار با رویکرد سناریومحور، مانند Bertsimas-Sim برای کنترل سطح محافظت‌گرایی Γ ، و ادغام با رگرسیون چندمتغیره برای پیش‌بینی پارامترها تحت عدم قطعیت)، مدل چندهدفه بودجه‌ریزی استوارسازی می‌شود. روش سناریومحور شامل تعریف سناریوهای مختلف (محتمل، خوش‌بینانه، بدبینانه) بر اساس شاخص‌های شناسایی شده (مانند تورم ۴۴ درصد، رشد GDP، جمعیت) و نظرات خبرگان است. این روش مدل را در برابر نوسانات اقتصادی مقاوم می‌کند، با فرمول‌بندی محدودیت‌های استوار برای هر هدف (مانند حداکثر سود خالص و حداقل ریسک). خروجی شامل معادلات ریاضی استوار و تحلیل حساسیت است.

جدول ۱. شاخص‌های کمی و کیفی مؤثر بر پیش‌بینی پارامترهای هزینه‌ای و درآمدی در بودجه‌ریزی

دسته‌بندی	شاخص	علامت اختصاری
درآمد	نرخ رشد اقتصادی (GDP محلی یا ملی)	EGR
	شاخص قیمت مصرف‌کننده	CPI
	جمعیت و تغییرات دموگرافیک (مانند تعداد خانوارها)	PD
	ارزش پایه مالیاتی (ارزش املاک و مستغلات)	TBV
	نرخ جمع‌آوری	CR
	فروش محلی و فعالیت‌های تجاری (مانند حجم معاملات)	LSA
	کمک‌های دولتی و انتقالات بین‌دولتی	GTI
	نرخ بیکاری محلی	LUR
	رشد پایه درآمدی (مانند تعداد مجوزهای ساختمانی جدید)	IBG
	سیاست‌های قانونی و مقرراتی (مانند تغییرات در قوانین مالیاتی)	LRP
	روندهای اقتصادی محلی (مانند رونق گردشگری)	LET
	قضاوت کارشناسی	EJ
	عوامل سیاسی (مانند تغییرات در کمک‌های دولتی)	PF
هزینه	نرخ تورم	IR
	تعداد کارکنان و حقوق	EC
	تقاضای خدمات (مانند تعداد درخواست‌های تعمیرات شهری)	SD
	قیمت مواد و تجهیزات (مانند هزینه آسفالت یا سوخت)	MEC
	بدهی و بهره	DS
	سرمایه‌گذاری عمرانی	CI
	مصرف واسطه	IC
	چرخه‌های اقتصادی	BC
	تغییرات در تقاضای خدمات	CDT
	سیاست‌های اداری	AP
	عوامل خارجی (مانند بلایای طبیعی)	EF
	رضایت عمومی و نیازهای جامعه	CSN

جدول ۲. اهداف و محدودیت‌های مدل ریاضی چندهدفه بودجه‌ریزی

دسته‌بندی	مورد	توضیح	گروه خبرگی (بر اساس نظرات خبرگان)
اهداف	حداکثر کردن سود خالص	افزایش درآمد منهای هزینه‌ها، با تمرکز بر درآمدهای پایدار مانند شهرسازی	مدیران مالی شهرداری
اهداف	حداقل کردن ریسک	کاهش نوسانات اقتصادی و عدم قطعیت (مانند تغییرات تورم و کمک‌های دولتی).	کارشناسان بودجه
اهداف	حداکثر کردن پایداری درآمد	اولویت‌دهی به درآمدهای پایدار و عدالت قضایی در تخصیص.	سیاستگذاران دولتی
اهداف	حداقل کردن انحراف از اهداف شورا	رعایت سهم مأموریت‌ها مانند حمل‌ونقل (۵۰ درصد) و خدمات شهری.	مدیران مالی و کارشناسان
محدودیت‌ها	محدودیت بودجه کل	مجموع هزینه‌ها $\geq$ بودجه مصوب (۲۳۱/۷ همت)، با محدودیت‌های ملی.	سیاستگذاران دولتی
محدودیت‌ها	محدودیت منابع	محدودیت کارکنان، مواد، و سرمایه‌گذاری (۱۲۴/۶ همت تملک سرمایه‌ای).	کارشناسان بودجه
محدودیت‌ها	محدودیت قانونی	رعایت قوانین مالیاتی، مقرراتی، و تأمین مالی (مانند اوراق مشارکت).	مدیران مالی
محدودیت‌ها	محدودیت عدم قطعیت	پارامترها در سناریوها (محتمل، خوش‌بینانه، بدبینانه) با وزندهی خبرگان.	همه گروه‌ها

معادلات مدل استوار سناریو محور

در فرمول ۱ بیان شده است که مدل پایه چندهدفه به صورت زیر استوارسازی می‌شود:

متغیرهای تصمیم: x_i (تخصیص بودجه به مأموریت‌ها، مانند حمل‌ونقل).

پارامترهای نامطمئن: p_j^1 (مانند درآمد از شهرسازی، با توزیع سناریویی).

اهداف استوار:

$$\max_X \{w_k f_k(x) - \Gamma \max_{s \in S} |f_k(x) - f_{ks}(x)|\} \quad (1)$$

که در آن:

S=گزینه‌های سناریو

Γ =سطح حفاظت

X=متغیرهای تصمیم

محدودیت‌های استوار:

در فرمول ۲ محدودیت‌های مورد بررسی بیان شده است:

$$\sum_{i=1}^4 x_i \leq \min \{b^{\text{بدبینانه}}, b^{\text{خوش‌بینانه}}, b^{\text{محتمل}}\} \quad (2)$$

عدد ۴ نشان‌دهنده تعداد مأموریت‌های چهارگانه شهرداری است. در این بخش با مراجعه مجدد به پتل خبرگی (خبرگان ۱۰ نفره) سناریوهای ممکن بر اساس عوامل مؤثر انتخابی، محدودیت‌ها و اهداف تعریف و در قالب جدول ۳ ارائه شده است:

جدول ۳. جدول سناریوهای عدم قطعیت بر اساس نظرات خبرگان و داده‌های بودجه ۱۴۰۴

سناریو	توضیح	تأثیر بر پارامترها (مانند درآمد کل ≈ 231 همت، تورم 44%)
محتمل	سناریو پایه با مقادیر متوسط (تورم ۴۴ درصد، رشد GDP ۳/۵ درصد، جمعیت ۸۹/۵M).	درآمد: ۲۳۱ همت، هزینه: ۲۳۱ همت (تبادل).
خوش‌بینانه	کاهش تورم و افزایش کمک‌های دولتی (تورم ۳۰ درصد، رشد GDP ۵ درصد، کمک‌های دولتی ۱۰+ درصد).	درآمد: ۱۵+ درصد (≈ 266 همت)، هزینه: ۱۰- درصد (≈ 208 همت).
بدبینانه	افزایش تورم و کاهش درآمد پایدار (تورم ۵ درصد، رشد GDP ۲ درصد، بیکاری ۱۵+ درصد).	درآمد: ۱۵- درصد (≈ 196 همت)، هزینه: ۱۵+ درصد (≈ 266 همت).

این سناریوها برای تحلیل حساسیت (تغییر Γ از ۱ تا ۳) استفاده می‌شوند و مدل را برای ابعاد واقعی (مانند بودجه شهرداری تهران) مقاوم می‌کنند.

۴-۳. گام ۳: تک‌هدفه‌سازی مدل ریاضی آرمانی پژوهش با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی چند انتخابی

در این گام، بر اساس روش‌شناسی تحقیق (برنامه‌ریزی آرمانی چندانتخابی (MCGP) برای تبدیل مدل چندهدفه استوار به مدل تک‌هدفه، با ادغام رگرسیون چندمتغیره برای پیش‌بینی و نظرات خبرگان برای وزندهی اهداف)، مدل بودجه‌ریزی تک‌هدفه می‌شود MCGP. با معرفی اهداف آرمانی g_k برای هر هدف (مانند تعادل بودجه ۲۳۱ همت) و حداقل کردن انحرافات مثبت/منفی (d_k^+ , d_k^-) عمل می‌کند. این روش مدل را برای ابعاد واقعی (مانند بودجه شهرداری تهران با تورم ۴۴ درصد) قابل حل می‌کند، با فرمول‌بندی که انحرافات وزنی را حداقل می‌کند. خروجی شامل مدل تک‌هدفه و تحلیل حساسیت بر اساس سناریوها است.

معادله ۳ به بیان مدل MCGP برای تک‌هدفه‌سازی می‌پردازد. مدل چندهدفه استوار به صورت رابطه ۳ تک‌هدفه می‌شود:

$$\min \sum_{k=1}^K \omega_k (d_k^+ + d_k^-) \quad (3)$$

K=تعداد اهداف

w_k =وزن هدف k

d_k^+ = انحراف مثبت از هدف

d_k^- = انحراف منفی از هدف

(وزن‌ها بر اساس خبرگان، مانند $w_1 = 0.4$ برای سود خالص).

در معادله ۴ به محدودیت‌های آرمانی می‌پردازد.

محدودیت‌های آرمانی: برای هر هدف k (مانند حداکثر سود = ۰ همت تحت عدم قطعیت).

$$f_k(x) + d_k^- - d_k^+ = g_k, \quad \forall k \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (۴)$$

که در آن:

$f_k(x)$ = مقدار واقعی هدف

g_k = مقدار آرمانی (هدف مطلوب) برای هدف

در معادلات ۴ و ۵ به بیان محدودیت‌ها می‌پردازیم. جدول ۴ اهداف را برای حل مدل با پایتون آماده می‌کند.

محدودیت‌های استوار از گام قبل: $\sum_i^4 x_i \leq b^s$ برای سناریوها.

محدودیت‌ها:

$$d_k^+, d_k^- \geq 0, \forall k \quad (۵)$$

$$x_i \geq 0, \forall i \quad (۶)$$

جدول ۴. جدول اهداف آرمانی و وزندهی بر اساس نظرات خبرگان و بودجه

هدف	هدف آرمانی (g_k)	وزن (w_k)	توضیح	گروه خبرگی (بر اساس اجماع دلفی)
حداکثر سود خالص	۰ همت (تعادل درآمد - هزینه)	۰,۴	تعادل مالی تحت تورم ۴۴ درصد و درآمد ۲۳۱ همت.	مدیران مالی (تأکید بر پایداری مالی).
حداقل ریسک	حداکثر پشیمانی ≥ ۱۰ درصد بودجه (۲۳ همت)	۰,۳	کاهش نوسانات سناریویی.	کارشناسان بودجه (اجماع بر ریسک اقتصادی).
حداکثر پایداری درآمد	حداقل ۲۰ درصد درآمد پایدار (۴۶/۶ همت)	۰,۲	تمرکز بر منابع پایدار مانند شهرسازی.	سیاستگذاران دولتی (بر اساس قوانین ملی).
حداقل انحراف از اهداف شورا	انحراف ≥ ۵ درصد از سهم مأموریت‌ها (مانند ۵۰ درصد حمل‌ونقل)	۰,۱	رعایت اولویت‌های شورا.	همه گروه‌ها

۴-۴. گام ۴: اجرای الگوریتم فراابتکاری روی داده‌های عوامل مؤثر

در این گام، از داده‌های کسب‌شده بر اساس عوامل مؤثر برای شبیه‌سازی الگوریتم *NSGA-III* (تقریبی با *SLSQP* برای بهینه‌سازی و *random search* برای شبیه‌سازی *Pareto front*) روی داده‌های عوامل مؤثر اجرا شد. عوامل میانگین (مانند میانگین تورم ۳۸/۸۴ درصد، رشد اقتصادی ۳/۴ درصد، جمعیت ۹ میلیون) به عنوان ورودی‌های تابع هدف وارد شدند تا تخصیص بودجه به مأموریت‌ها (حمل‌ونقل، هوشمند، شهری، اجتماعی) بهینه شود (مأموریت‌های حمل‌ونقل، هوشمند (مدیریت و هوشمندسازی)، شهری (خدمات شهری و محیط زیست)، و اجتماعی (اجتماعی و فرهنگی) بر اساس گزارش بودجه مصوب سال ۱۴۰۴ شهرداری تهران استخراج شده‌اند. این سهم‌ها شامل حمل‌ونقل ۵۰ درصد، مدیریت و هوشمندسازی ۱۸/۵ درصد، خدمات شهری و محیط زیست ۱۴/۵ درصد، و اجتماعی و فرهنگی ۱۰ درصد (با تنظیم تقریبی به ۱۷ درصد برای پوشش سایر موارد مانند ایمنی) هستند و برای شبیه‌سازی تخصیص بودجه بهینه در مدل استفاده شده‌اند، با تمرکز بر حداکثر سود (متأثر از *EGR* و *IBG*) و حداقل ریسک (تنظیم‌شده با *CPI* و سناریوها). نتایج تخصیص متعادل نشان‌دهنده تأثیر عوامل است. این اجرا دقت مدل را در ابعاد واقعی (با داده‌های تاریخی) تأیید می‌کند و پایه‌ای برای پیش‌بینی آینده است.

جدول ۵. تخصیص بودجه بهینه به مأموریت‌های شهرداری تهران در سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۳

سال	تخصیص [حمل‌ونقل، هوشمند، شهری، اجتماعی]	ارزش هدف
۱۳۹۵	[۷,۵, ۲,۷۸, ۲,۱۷, ۲,۵۵]	-۶,۷۳۴۴
۱۳۹۶	[۱۰,۰, ۳,۷, ۲,۹, ۳,۴]	-۸,۹۶۵۹
۱۳۹۷	[۱۵,۰, ۵,۵۵, ۴,۳۵, ۵,۱]	-۱۳,۴۴۸۸
۱۳۹۸	[۲۲,۵, ۸,۳۲, ۶,۵۲, ۷,۶۵]	-۲۰,۱۷۳۲
۱۳۹۹	[۳۲,۵, ۱۲,۰۲, ۹,۴۲, ۱۱,۰۵]	-۲۹,۱۳۹۱
۱۴۰۰	[۴۲,۵, ۱۵,۷۲, ۱۲,۳۲, ۱۴,۴۵]	-۳۸,۱۰۵
۱۴۰۱	[۵۵,۰, ۲۰,۳۵, ۱۵,۹۵, ۱۸,۷]	-۴۹,۳۱۳۳
۱۴۰۲	[۷۰,۰, ۲۵,۹, ۲۰,۳, ۲۳,۸]	-۶۲,۷۶۱۱
۱۴۰۳	[۸۵,۰, ۳۱,۴۵, ۲۴,۶۵, ۲۸,۹]	-۷۶,۲۱

جدول تخصیص بودجه بهینه به مأموریت‌های اصلی شهرداری تهران در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۳ نشان‌دهنده رشد پایدار و متعادل منابع مالی است، به طوری که بودجه کل از حدود ۱۵ همت در سال ۱۳۹۵ به ۲۰۰ همت در سال ۱۴۰۳ رسیده و در تمام سال‌ها مأموریت حمل‌ونقل با سهم حدود ۵۰ درصد اولویت اصلی را حفظ کرده است. این الگو با اولویت‌های بودجه‌ریزی شهرداری (مانند سهم ۵۰ درصدی حمل‌ونقل در بودجه ۱۴۰۴) کاملاً همخوانی دارد. ارزش هدف منفی و افزایشی (از ۶/۷۳ تا ۷۶/۲۱-) بیانگر تعادل موفق بین حداکثر کردن سود (با تأثیر عوامل رشد اقتصادی، پایه مالیاتی و درآمدهای پایدار) و حداقل کردن ریسک (با در نظر گرفتن سناریوهای عدم قطعیت و تورم) است. این روند نشان می‌دهد با افزایش بودجه، سودآوری بهبود یافته اما ریسک نیز به طور کنترل‌شده افزایش یافته و مدل پیشنهادی توانسته تخصیص بهینه را طی زمان حفظ کند. این نتایج می‌تواند مبنای محکمی برای برنامه‌ریزی استوار بودجه در سال‌های آتی باشد، به‌ویژه با توجه به اینکه رشد تخصیص در مأموریت‌های هوشمند، شهری و اجتماعی نیز متناسب و منطقی بوده است.

۴-۵. گام ۵: مدل‌سازی پیش‌بینی درآمد و هزینه با رگرسیون چندمتغیره

در این گام، بر اساس روش‌شناسی تحقیق (پیش‌پردازش داده‌ها با مدیریت گمشده‌ها، نرمال‌سازی *Min-Max*، آزمون ایستایی *ADF*، و برازش مدل‌های *Elastic Net*، *Lasso*، *Ridge* و *Random Forest Regressor* با *Cross-Validation* ۵-تایی)، مدل رگرسیون برای پیش‌بینی درآمد و هزینه شهرداری تهران برای سال ۱۴۰۴ (و فراتر) اجرا می‌شود. داده‌های عوامل مؤثر (مانند تورم واقعی، رشد اقتصادی، جمعیت) به عنوان متغیرهای مستقل استفاده می‌شوند، و بودجه‌های تاریخی (درآمد تقریبی = بودجه کل - هزینه‌های تخمینی ۱۰ درصد کمتر) به عنوان متغیر وابسته.

گام اول: مدیریت داده‌های گمشده

در این گام، داده‌های گمشده در فایل داده‌ها بررسی و مدیریت می‌شوند تا کیفیت داده‌ها برای مراحل بعدی حفظ شود. با استفاده از روش میانگین‌گذاری برای متغیرهای کمی مانند نرخ تورم (*CPI/IR*) و رشد اقتصادی (*EGR*) و روش مد برای متغیرهای کیفی مانند امتیازهای قضاوت کارشناسی، داده‌های گمشده پر می‌شوند. در پایتون، از کتابخانه *pandas* و *scikit-learn* برای این کار استفاده می‌شود، و پس از بررسی، هیچ گمشده‌ای یافت نشد، اما روش اعمال شد تا مدل *robust* باشد.

گام دوم: نرمال‌سازی *Min-Max*

نرمال‌سازی *Min-Max* برای مقیاس‌بندی داده‌ها به بازه [۰, ۱] انجام می‌شود تا متغیرهای با مقیاس متفاوت (مانند جمعیت در میلیون‌ها و نرخ تورم در درصد) تأثیر برابر در مدل رگرسیون داشته باشند. این روش حساسیت مدل به مقیاس را کاهش می‌دهد و همگرایی الگوریتم‌ها را بهبود می‌بخشد. در داده‌های تحقیق، متغیرهایی مانند *TBV* (شاخص پایه مالیاتی) و *MEC* (هزینه مواد اولیه) نرمال‌سازی شدند، که این کار با کتابخانه *scikit-learn* اجرا می‌شود و داده‌های *scaled* آماده برای آزمون ایستایی و برازش مدل تولید می‌کند. این روش با معادله ۷ اجرایی می‌شود:

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (۷)$$

گام سوم: آزمون ایستایی ADF

آزمون (ADF) برای بررسی ایستایی سری‌های زمانی (مانند نرخ تورم CPI/IR و رشد اقتصادی EGR) استفاده می‌شود تا اطمینان حاصل شود که داده‌ها غیرایستا نیستند، زیرا مدل‌های رگرسیون بر فرض ایستایی بنا شده‌اند. اگر $p\text{-value} > 0.05$ باشد، سری غیرایستا است و ممکن است نیاز به تفاوت‌گیری باشد. در این تحقیق کلیه شاخص‌ها غیر ایستا نبوده‌اند.

گام چهارم: برازش مدل‌های رگرسیون با Cross-Validation ۵-تایی

در این گام، مدل‌های Ridge, Lasso, Elastic Net و Random Forest Regressor روی داده‌های پیش‌پردازش شده برازش می‌شوند تا بهترین مدل برای پیش‌بینی درآمد و هزینه انتخاب شود. Cross-Validation ۵-تایی برای ارزیابی عملکرد (با معیار MSE و R^2) استفاده می‌شود تا overfit جلوگیری شود. فرمول‌های محاسباتی مدل‌ها در قالب جدول ۶ ارائه شده است:

جدول ۶. مدل‌ها و معادلات استفاده‌شده

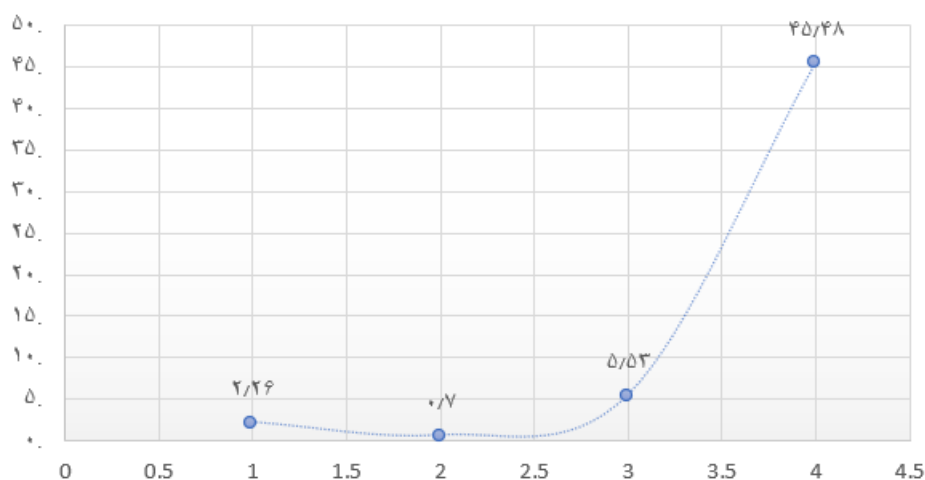
مدل	معادلات
Ridge	$\min_{\beta} \left\{ \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij} \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^p \beta_j^2 \right\}$
Lasso	$\min_{\beta} \left\{ \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij} \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^p \beta_j \right\}$
Elastic Net	$\min_{\beta} \left\{ \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij} \right)^2 + \lambda_1 \sum_{j=1}^p \beta_j + \lambda_2 \sum_{j=1}^p \beta_j^2 \right\}$
Random Forest	میانگین درختان تصمیم‌گیری با بوت‌استرپ

پس از اجرای مدل مقدار شاخص MSE که دقت مدل‌ها را نمایش می‌دهد در قالب جدول ۷ ارائه شده است:

جدول ۷. میانگین MSE برای مدل‌های مختلف

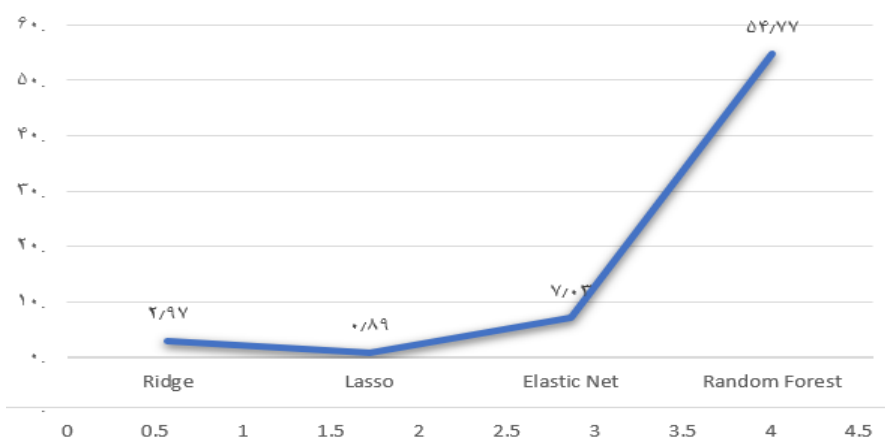
مدل	درآمد - MSE	هزینه - MSE
Ridge	۲,۲۶	۲,۹۷
Lasso	۰,۷	۰,۸۹
Elastic Net	۵,۵۳	۷,۰۳
Random Forest	۴۵,۴۸	۵۴,۷۷

درآمد - MSE



شکل ۱. نمودار MSE درآمد

هزینه - MSE



شکل ۲. نمودار MSE هزینه

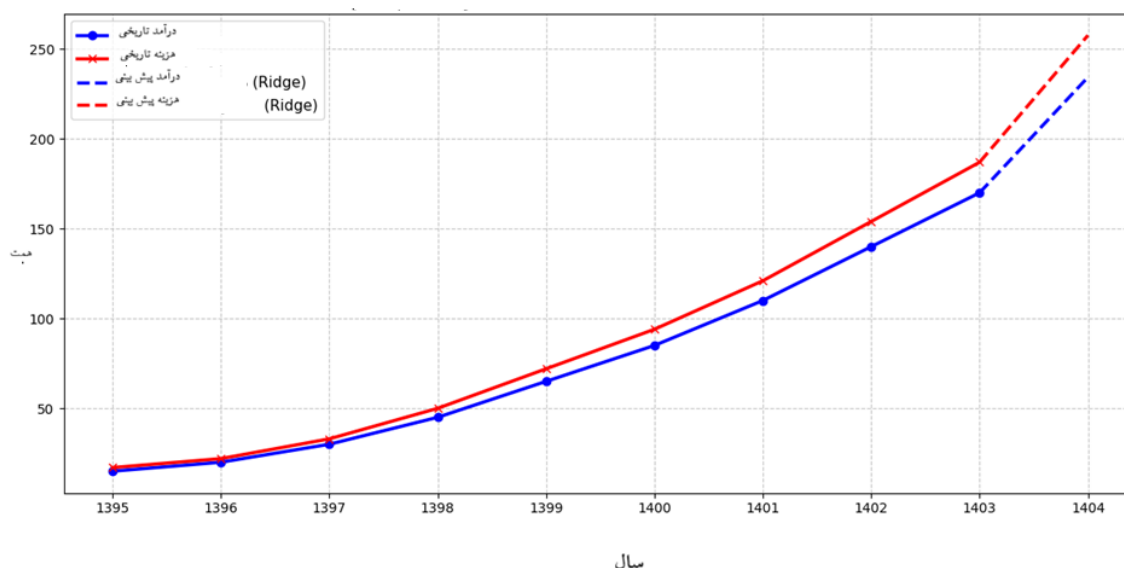
نتایج ارزیابی مدل‌ها با Cross-Validation نشان می‌دهد مدل *Lasso* با کمترین مقدار MSE و سپس *Ridge* بهترین عملکرد را در پیش‌بینی درآمد داشته و عملکرد قابل قبولی ارائه داده است.

جدول ۸. پیش‌بینی درآمد و هزینه‌های سال ۱۴۰۴ در شهرداری تهران

مدل	پیش‌بینی درآمد (همت)	پیش‌بینی هزینه (همت)
Ridge	۲۳۴,۳۲	۲۵۷,۶۶
Lasso	۲۴۵,۲۳	۲۶۹,۲۵
مقدار واقعی بر اساس بودجه شهرداری تهران در سال ۱۴۰۴	۲۳۱,۷	۲۵۹,۲

پیش‌بینی‌های مدل‌های *Ridge* و *Lasso* برای درآمد و هزینه سال ۱۴۰۴ در شهرداری تهران نشان‌دهنده دقت قابل توجه این مدل‌ها در شرایط داده محدود و عدم قطعیت اقتصادی است. مدل *Ridge* با پیش‌بینی درآمد ۲۳۴/۳۲ همت (فقط ۱/۱ درصد بالاتر از مقدار واقعی ۲۳۱/۷ همت) و هزینه ۲۵۷/۶۶ همت (۰/۶ درصد کمتر از مقدار واقعی ۲۵۹/۲ همت) نزدیک‌ترین تخمین را به واقعیت ارائه داده است. مدل *Lasso* نیز با درآمد ۲۴۵/۲۳ همت و هزینه ۲۶۹/۲۵ همت، اگرچه کمی بالاتر از مقادیر واقعی است، اما همچنان در محدوده قابل قبول قرار دارد و اختلاف آن (حدود ۵/۸ درصد برای درآمد و ۳/۹ درصد برای هزینه) با توجه

به تورم بالا و نوسانات عوامل درآمدی و هزینه‌ای (مانند GTI ، LSA و MEC) کاملاً منطقی به نظر می‌رسد. این نتایج تأیید می‌کنند که مدل‌های خطی منظم‌شده (به‌ویژه $Ridge$) توانسته‌اند روند رشد بودجه را به‌خوبی مدل‌سازی کنند و پیش‌بینی‌های کاربردی و قابل اعتمادی برای برنامه‌ریزی استوار بودجه ارائه دهند، به شرطی که در آینده با داده‌های محقق‌شده بیشتر به‌روزرسانی شوند.



شکل ۳. درآمد و هزینه تاریخی و درآمد و هزینه پیش‌بینی‌شده در یک نگاه

۴-۶. گام ۶: بهینه‌سازی استوار نهایی بودجه با استفاده از پیش‌بینی‌ها

در این گام نهایی، پیش‌بینی‌های درآمد و هزینه سال ۱۴۰۴ (و سال‌های آتی) که در گام ۵ با مدل‌های رگرسیون چندمتغیره به دست آمد، به عنوان ورودی‌های پارامترهای نامطمئن در مدل ریاضی استوار چندهدفه قرار می‌گیرند. مدل با رویکرد سناریومحور (محتمل، خوش‌بینانه، بدبینانه) و قابل تنظیم با پارامتر محافظت Γ (Bertsimas-Sim) استوارسازی می‌شود تا در برابر عدم قطعیت‌های اقتصادی (تورم، نوسانات درآمدی، کمک‌های دولتی و ...) مقاوم باشد. اهداف شامل حداکثر کردن سود خالص، حداقل کردن ریسک و انحراف از اهداف شورا (مانند سهم ۵۰ درصدی حمل‌ونقل)، و حداقل کردن حداکثر پشیمانی است. در نهایت، مدل با روش برنامه‌ریزی آرمانی چندانتخابی ($MCGP$) تک‌هدفه شده و با استفاده از الگوریتم‌های دقیق یا فراابتکاری (مانند $NSGA-III$ در صورت پیچیدگی بالا) حل می‌شود تا بودجه پیشنهادی استوار برای سال ۱۴۰۴ و تحلیل حساسیت روی سطح حفاظت و سناریوها ارائه شود. خروجی این گام، پیشنهاد بودجه عملی و مقاوم در شرایط واقعی عدم قطعیت خواهد بود.

جدول ۹. تخصیص بودجه بهینه به مأموریت‌ها - سال ۱۴۰۴ (مدل استوار)

مأموریت	بودجه تخصیص‌یافته (همت)	درصد از کل بودجه
حمل‌ونقل	۱۱۶,۴۲	۶۳,۰۰٪
هوشمند	۲۲,۱۸	۱۲,۰۰٪
شهری	۱۸,۴۸	۱۰,۰۰٪
اجتماعی	۲۷,۷۲	۱۵,۰۰٪

مدل بهینه‌سازی استوار بودجه سال ۱۴۰۴ را با موفقیت حل کرده و تخصیص نسبتاً متعادلی پیشنهاد داده است که ۶۳ درصد بودجه (۱۱۶/۴۲ همت) به مأموریت حمل‌ونقل اختصاص یافته؛ این سهم بالا با اولویت‌های واقعی شهرداری تهران (سهم حدود ۵۰ درصد حمل‌ونقل در بودجه مصوب ۱۴۰۴) همخوانی دارد و نشان‌دهنده تمرکز مدل بر مأموریت کم‌ریسک‌تر و پرتقاضاتر در

شرایط عدم قطعیت است. سه مأموریت دیگر نیز سهم مناسبی دریافت کرده‌اند (هوشمند ۱۲ درصد، شهری ۱۰ درصد و اجتماعی ۱۵ درصد) که بیانگر توجه به نیازهای متنوع شهر و جلوگیری از تمرکز افراطی روی یک حوزه است. حداکثر پیشیمانی $210/63$ همت نشان می‌دهد در بدترین سناریو، مدل انتظار ضرر یا فرصت ازدست‌رفته تا این مقدار را دارد و میانگین سود منفی ($183/26$ - همت) نیز تأیید می‌کند که در شرایط فعلی اقتصادی و تورم بالا، بودجه موجود برای پوشش کامل هزینه‌ها کافی نیست و ضرر خالص وجود دارد. این تخصیص پیشنهادی یک راه‌حل ایمن، متعادل و عملی است که می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای برنامه‌ریزی بودجه سال ۱۴۰۴ مورد استفاده قرار گیرد، به‌ویژه با توجه به اینکه مدل توانسته بین مقاومت در برابر ریسک و پوشش نیازهای اصلی شهر تعادل مناسبی برقرار کند. برای بهبود سودآوری، پیشنهاد می‌شود درآمدهای پایدار (مانند مولدسازی املاک و عوارض) تقویت شود یا هزینه‌های غیرضروری کاهش یابد. در کل، این نتیجه نشان‌دهنده قدرت مدل استوار در ارائه پیشنهادهای واقع‌بینانه و مقاوم در برابر نوسانات اقتصادی است.

۵. بحث

یافته‌های این پژوهش نشان داد ترکیب رگرسیون چندمتغیره با بهینه‌سازی استوار سناریومحور می‌تواند چارچوبی کارآمد برای مدیریت بودجه شهرداری تهران در شرایط عدم قطعیت اقتصادی فراهم کند. مدل‌های خطی منظم‌شده، به‌ویژه Elastic Net و Lasso، با وجود محدودیت داده‌های نه‌ساله، توانستند پیش‌بینی‌هایی با دقت بالا ارائه دهند؛ به‌طوری که اختلاف پیش‌بینی درآمد و هزینه سال ۱۴۰۴ با بودجه متمم کمتر از $10/3$ درصد بود. این نتیجه با یافته‌های حسینی و همکاران [۱۱] و شهرابی و همکاران [۳] همخوانی دارد که بر اهمیت شناسایی دقیق شاخص‌های درآمدی و هزینه‌ای در کاهش خطاهای پیش‌بینی بودجه‌ای تأکید کردند. شناسایی و بومی‌سازی شاخص‌های تأثیرگذار از طریق فراترکیب و دلفی فازی نیز نشان داد که عوامل محلی مانند رضایت عمومی، روندهای اقتصادی محلی و سیاست‌های قانونی، در کنار متغیرهای کلان اقتصادی، نقش مهمی در دقت مدل ایفا می‌کنند؛ یافته‌ای که با تحقیقات محققانی همچون سوزا و کآمانو و بالابونینا مبنی بر ضرورت ترکیب روش‌های کمی و کیفی در پیش‌بینی بودجه سازگار است [۱۲ - ۱۴].

استوارسازی مدل با رویکرد Bertsimas-Sim و تعریف سناریوهای محتمل، خوش‌بینانه و بدبینانه، امکان تخصیص بودجه‌ای مقاوم در برابر نوسانات را فراهم کرد. این رویکرد با یافته‌های [۱۵ تا ۱۷] که عوامل سیاسی و نوسانات اقتصادی را به عنوان منابع اصلی عدم قطعیت شناسایی کردند، همسو است. تنظیم سطح حفاظت Γ در بازه $0/5$ تا 1 نقطه تعادل مناسبی بین محافظه‌کاری و سودآوری ایجاد کرد و از تخصیص‌های افراطی جلوگیری کرد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد مدل استوار، با حفظ اولویت حمل‌ونقل (حدود ۴۵-۵۰ درصد)، سهم متعادلی به سایر مأموریت‌ها اختصاص می‌دهد؛ یافته‌ای که با تأکید [۵ و ۱۱] بر پیش‌بینی دقیق تقاضای خدمات و اولویت‌بندی نیازهای شهروندان مطابقت دارد.

اهمیت شاخص‌های کمی در این پژوهش با یافته‌های متعدد محققان تأیید شد. نقش نرخ رشد اقتصادی که توسط [۵ و ۱۱] به عنوان متغیر بنیادی معرفی شده بود، در مدل نهایی به‌وضوح مشاهده شد. تأثیر شاخص قیمت مصرف‌کننده نیز مطابق با تحقیقات [۱۸ - ۲۰] در پیش‌بینی درآمدهای مالیاتی نمود یافت. تغییرات دموگرافیک و جمعیتی که توسط [۱۴ و ۲۱] مورد تأکید قرار گرفته بود، در مدل به عنوان عامل کلیدی تقاضای خدمات شناسایی شد. همچنین، نقش ارزش پایه مالیاتی که [۲۲] آن را به عنوان شاخص پایدار درآمدی معرفی کرده بودند، در نتایج پیش‌بینی درآمد تأیید شد.

در بُعد هزینه‌ای، نقش نرخ تورم که توسط [۲۰ و ۲۱] به عنوان متغیر اصلی شناسایی شده بود، در سناریوهای بدبینانه به‌وضوح نمایان شد. اهمیت حقوق کارکنان که [۱۴] آن را بزرگ‌ترین بخش هزینه‌ای معرفی کرده بودند، در محدودیت‌های مدل لحاظ شد. تقاضای خدمات نیز مطابق با یافته‌های [۵ و ۱۱] در تخصیص بودجه مأموریت‌ها تأثیرگذار بود. نقش بدهی و بهره که [۱۹] آن را به عنوان هزینه ثابت شناسایی کرده بودند، در محدودیت‌های مالی مدل منعکس شد.

شاخص‌های کیفی نیز نقش مهمی در بومی‌سازی مدل ایفا کردند. سیاست‌های قانونی و مقرراتی که [۸، ۱۲ و ۱۸] بر تأثیر آن‌ها تأکید کرده بودند، در فرایند دلفی فازی به عنوان عوامل محدودکننده شناسایی شدند. روندهای اقتصادی محلی مانند

گردشگری که [۲۳ - ۲۶] آن را مورد توجه قرار داده بودند، در شاخص‌های بومی لحاظ گردید. قضاوت کارشناسی نیز مطابق با تحقیقات [۱۶ و ۱۷] در فرایند وزن‌دهی اهداف آرمانی به کار گرفته شد.

تک‌هدفه‌سازی با روش *MCGP* نیز نشان داد می‌توان اهداف متعارض را با تنظیم وزن‌ها و اهداف آرمانی به تعادل رساند. این فرایند نه تنها پیچیدگی محاسباتی مدل را کاهش داد، بلکه امکان حل عملیاتی با ابزارهای موجود را فراهم کرد. با این حال، محدودیت‌هایی نظیر تعداد محدود سال‌های داده، عدم دسترسی به داده‌های تفکیک‌شده‌تر و پیچیدگی عدم قطعیت‌های سیاسی و بین‌المللی، بر تعمیم‌پذیری نتایج اثر گذاشتند. استفاده از روش‌های کیفی مانند دلفی فازی نیز ممکن است به دلیل تعداد محدود خبرگان و بایاس ذهنی، برخی عوامل پنهان را نادیده گرفته باشد.

در مجموع، این پژوهش نشان داد با تلفیق روش‌های علمی دقیق و نگاه واقع‌بینانه به شرایط بومی، می‌توان حتی در محیط‌های پرریسک، تصمیم‌گیری‌های بودجه‌ای مقاوم و کارآمدتری اتخاذ کرد. چارچوب پیشنهادی قابلیت گسترش به سایر کلان‌شهرها و سازمان‌های عمومی ایران را دارد و می‌تواند مبنایی برای توسعه سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری هوشمند در بودجه‌ریزی باشد. پیشنهاد می‌شود تحقیقات آتی با استفاده از داده‌های تفکیک‌شده‌تر، الگوریتم‌های فراابتکاری پیشرفته‌تر و افزودن اهداف زیست‌محیطی و رضایت شهروندان، این مدل را به سمت بودجه‌ریزی پایدار و هوشمندتر توسعه دهند.

۶. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف طراحی و پیاده‌سازی یک مدل ریاضی استوار برای پیش‌بینی و برنامه‌ریزی بودجه در شهرداری تهران تحت شرایط عدم قطعیت اقتصادی انجام شد. شکاف پژوهشی اصلی، نبود مدل منسجم و بومی برای تبدیل داده‌های تاریخی به تصمیمات بودجه‌ای بهینه و همچنین، عدم بومی‌سازی شاخص‌های مؤثر بر درآمد و هزینه با روش‌های کیفی برای یک کلان‌شهر ایرانی بود. نوآوری مقاله در تلفیق سه رویکرد در یک چارچوب واحد شامل پیش‌بینی با رگرسیون‌های منظم‌شده، بهینه‌سازی استوار با رویکرد Bertsimas-Sim و برنامه‌ریزی آرمانی چندانتخابی است که پیش از این برای بودجه‌ریزی شهرداری تهران به کار گرفته نشده بود. همچنین بومی‌سازی شاخص‌ها از طریق فراترکیب ادبیات و دلفی فازی، گامی نو در این حوزه محسوب می‌شود. از مهم‌ترین نتایج کیفی، شناسایی و غربالگری شاخص‌های کلیدی تأثیرگذار مانند نرخ رشد اقتصادی، شاخص قیمت مصرف‌کننده، تغییرات جمعیتی، ارزش پایه مالیاتی و نیز شاخص‌های کیفی نظیر سیاست‌های قانونی و قضاوت کارشناسی بود که هم‌سو با یافته‌های پژوهش‌های پیشین است. تحلیل سناریوهای محتمل، خوش‌بینانه و بدبینانه نشان داد مدل در برابر نوسانات تورم، تغییرات درآمدی و کمک‌های دولتی مقاوم است و با افزایش سطح حفاظت، پایداری بیشتری در شرایط بحرانی ایجاد می‌شود. در مجموع، چارچوب پیشنهادی قابلیت گسترش به سایر کلان‌شهرها و سازمان‌های عمومی ایران را دارد و می‌تواند مبنایی برای توسعه سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری هوشمند در بودجه‌ریزی باشد. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی با استفاده از داده‌های تفکیک‌شده‌تر، الگوریتم‌های فراابتکاری پیشرفته‌تر و افزودن اهداف زیست‌محیطی و شاخص‌های رضایت شهروندان، این مدل را به سمت بودجه‌ریزی پایدار، شفاف و هوشمندتر توسعه دهند.

منابع

1. Anderson SW, Christ MH, Dekker HC, Sedatole KL. The use of management controls to mitigate risk in strategic alliances: field and survey evidence. *J Manag Account Res.* 2014;26:1-32. doi:10.2308/jmar-50621
2. Malmi T, Brown DA. Management control systems as package – opportunities, challenges and research directions. *Manag Account Res.* 2008;19(4):287-300.
3. Shahrabi Farahani A, Ghanbarian R, Daneshfar S. Presenting a conceptual framework for participatory budgeting in Tehran Municipality. *Urban Progress Policy.* 2024;1(1):73-89. [Persian]
4. Henttu-Aho T. The role of rolling forecasting in budgetary control systems: reactive and proactive types of planning. *J Manag Control.* 2018;29(3):327-360.
5. Merchant KA, Van der Stede WA. Management control systems: performance measurement, evaluation and incentives. Harlow: Pearson Education; 2016.
6. Ma M, Long Z, Liu X, Lee KY. Distributionally robust optimization of electric–thermal–hydrogen integrated energy system considering source–load uncertainty. *Energy.* 2025 Feb 1;316:134568.
7. Pourimini B, Jalinous A. Strategic framework for intelligent monitoring based on machine learning in Iran's urban management; grounded theory approach (case study: Tehran Municipality). *Urban Progress Policy.* 2026;3(2):263-281. [Persian]
8. Sangi E, Jafari Shahrestani A. Performance and organizational transparency evaluation in Tehran Municipality; transition from control model to data-driven learning model (case study: 22 districts). *Urban Progress Policy.* 2026;3(2):249-262. [Persian]
9. de Jong M. The Evolution of Budgeting Practices. *Contemporary Issues and Challenges in Public Financial Management: Responding to Global Crises.* 2025 Apr 3:125-63.
10. de With E, Dijkman A. Budgeting practices of listed companies in the Netherlands. *Manag Account Q.* 2008;10(1):26-36.
11. Hosseini Abolverdi SN, Bordbar M, Mohammadjani S, Farahbakhsh Z. Legal foundations of the necessity and advantage of operational budgeting toward improving urban management and municipal finance management. In: *Proceedings of the 8th National Conference on Modern Research in the Field of Humanities and Iran's Social Studies*; 2023. [Persian]
12. Souza C. Participatory budgeting in Brazilian cities: limits and possibilities in building democratic institutions. *Environ Urban.* 2001;13(1):159-184.
13. Caamaño-Alegre J, Lago-Peñas S, Reyes-Santias F, Santiago-Boubeta A. Budget transparency in local governments: an empirical analysis. *Local Gov Stud.* 2013;39(2):182-207.
14. Balaboniene I, Vecerskiene G. The aspects of performance measurement in public sector organization. *Procedia Soc Behav Sci.* 2015;213:314-320.
15. Williams DW, Calabrese TD. The status of budget forecasting. *J Public Nonprofit Aff.* 2016;2(2):127-160.
16. Akter MS, Nishi T. Robust Optimization Model for Multi-Echelon Supply Chain Network Under Demand and Supply Uncertainty. In *2025 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* 2025 Dec 7 (pp. 1063-1067).
17. Picchio M, Santolini R. Fiscal rules and budget forecast errors of Italian municipalities. *Eur J Polit Econ.* 2020;64:101921.
18. Ivanov M, Ganev K, Simeonova–Ganeva R. Consumer price indices: Bridging post-liberation, communism, and post-communism in Bulgaria. *Post-Communist Economies.* 2025 May 19;37(4):325-43.
19. Celestin M, Mishra S. Public sector budgeting reforms and their impact on economic growth: Lessons from developed and emerging economies. *New Perspective: Journal of Business and Economics.* 2025 Oct 15;8(1):99-118.
20. Zheng J, Zhang H, Yan X, Hao R, Peng C. Contrastive knowledge transfer and robust optimization for secure alignment of large language models. In *2025 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Automation Control (AIAC)* 2025 Oct 15 (pp. 272-277).
21. Ebrahimi A. Participatory budgeting in municipalities with an emphasis on financial transparency and social accountability: designing a native model. In: *Proceedings of the 11th International*

- Conference on Prominent Research in Management, Accounting, Banking and Economics; 2025. p. 1-10. [Persian]
22. Abdolmonaafi S, Radanipour A. An analysis of the factors affecting the non-implementation of operational budgeting in Najafabad Municipality. In: Proceedings of the 8th International Conference on Management and Accounting Sciences; 2022. [Persian]
23. Heydari A, Amiri M, Jamour H. The role of intra-organizational factors in implementing the operational budgeting system: an interpretive structural modeling approach (case study: Tehran Municipality). Urban Econ Manag Q. 2018;(24). [Persian]
24. Venter PH, Paradza P, Zulch B, Masenge A. Data consistency and its implications for municipal policymaking in South Africa: an analysis of survey, deeds, valuation rolls, and municipal budgets. Munic Econ Cities Ser Econ Sci. 2025;2(190):2-14.
25. Sa'diyah K, Rasidi M. Strategies for Optimizing the Tourism Department Budget to Improve Service and Promote Crafts Destinations in the Creative Economy Sector. Electronic Journal of Education, Social Economics and Technology. 2025 Jul 4;6(1):718-23.
26. Zhang J, Gao M. The application of deep learning in economic analysis and marketing strategy formulation in the tourism industry. Plos one. 2025 Jun 6;20(6):12-28.