



سیاستگذاری پیشرفت شهری

پاییز ۱۴۰۵، دوره سوم، شماره ۰۳، شماره پیاپی: ۰۸

- ارائه الگوی چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری رویکرد داده‌بنیاد
◦ پیمان اکبری، رضا رستمی
- بررسی تطابق پیامدهای انتقال پاینخت به مکران با رویکردهای هیدروپلیتیک و ساختارهای هیدروهمون
◦ رامین طاوسی راد، محمد انصاری فوجقار، آرش ملکیت
- ارزش‌گذاری املاک و اخذ عوارض شهری، رویکرد حکمرانی مشارکتی (مورد مطالعه: شهر اصفهان)
◦ رضا نصر اصفهانی، مصطفی نیانی‌نژاد، الهام عافریان
- تشخیص و جداسازی هوشمند پسماندهای شهری قابل بازیافت با استفاده از مدل بینایی ماشین مبتنی بر یادگیری عمیق
◦ علی جلوخانی
- پیش‌بینی تقاضای برق خانگی تحت سناریوهای تغییرات اقلیمی: یک مدل مبتنی بر پایتون با بهره‌گیری از روز درجه‌های سرمایش و گرمایش
◦ مونا میررضوی، بوتی توراللهی، صبا عموزاده، مهنا بابا حسین‌پور، حسین یوسفی
- کاربرد هوش مصنوعی در تدوین استراتژی بومی‌سازی با تغییر اقلیم قنات: ارزیابی عملکرد XGBoost در تخمین دبی قنات قابین
◦ محمد فولادی نصر آباد، محمدرضا فرزانه، سپیده زراعتی نیشابور
- واکاوی پارادایم‌های خط‌مشی‌گذاری شهری تهران در پرتو سیاست ملی شهری
◦ غلامحسین محمدی، رحمت‌اله قلی‌پور سوته
- پیش‌بینی نظام بودجه‌ریزی در شهرداری تهران بر اساس طراحی مدل ریاضی استوار در شرایط عدم قطعیت با رویکرد رگرسیون چندگانه
◦ اعظم غلامی زارع‌زاده، سوان سهرابی، مریم خادمی، احسان ساده
- طراحی منظر بیوفیلیک به مثابه راهبردی برای مواجهه با بحران آب در فضاهای شهری (نمونه موردی: منظر پلکانی پارک چمران کرج)
◦ ستایش زندی بابانی، محمد مهدی پور حسن مهرزنجانی
- طراحی الگوی بومی اکوسیستم کار آفرینی توانمندساز زنان سرپرست خانوار در کلان‌شهر تهران
◦ محمدجواد لشکری، مهران مقصودی، شادی شاهوردیانی



فصلنامه سیاستگذاری

پیشرفت شهری

پاییز ۱۴۰۵، دوره سوم، شماره ۳، شماره پیاپی ۸



موسسه آموزش عالی
علمی کاربردی شهرداری تهران

صاحب امتیاز:

مؤسسه آموزش عالی علمی کاربردی شهرداری تهران

مدیر مسئول

دکتر محمدحسین بوجانی

مدرس دانشگاه، دکتری برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه شهید بهشتی

سر دبیر

دکتر حسین یوسفی

استاد دانشکده انرژی و منابع پایدار، دانشگاه تهران

جانشین مدیر مسئول و سر دبیر

مسعود ندافان

مدیر نشریه

زهرا گلستا رسانی

مدیر اجرایی

دکتر حسینعلی مهرنیا

کارشناس نشریه

مرضیه رازقی

گرافیکست

ویدا محمدزاده اذانی

ویراستار علمی - ادبی

فاطمه رشوند

ویراستار انگلیسی

دکتر فرهاد محبتی

صفحه‌آرا

زهرا استواری دیلمانی

ترتیب انتشار: فصلنامه

شاپای چاپی: ۳۰۹۲-۶۵۳۸

شاپای الکترونیکی: ۳۰۹۲-۶۵۶۴

سیاست انتشار: دسترسی آزاد

فرآیند داوری: دوسوگور

شناسه مجوز: وزارت فرهنگ و ارشاد: ۹۷۴۲۶

تاریخ مجوز: ۲۵ فروردین ۱۴۰۴

در تاریخ ۱۴۰۴.۱۰.۱۶ فصلنامه سیاستگذاری پیشرفت شهری گواهی تاییدیه ورود به فرآیند ارزیابی و رتبه‌بندی نشریات علمی را از دفتر سیاستگذاری و برنامه‌ریزی امور پژوهشی نشریات علمی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری اخذ کرده است

نشانی: تهران، خیابان کریم‌خان زند، جنب پارک بهجت آباد، پلاک ۱۹۵، روبروی سازمان نوسازی شهرداری، مؤسسه آموزش عالی علمی کاربردی شهرداری تهران

کد پستی: ۱۵۹۴۶۴۵۱۱۹

تلفن: ۰۲۱-۸۸۹۳۴۸۷۳، ۰۲۱-۸۸۹۳۴۸۷۴، ۰۲۱-۸۸۸۹۸۹۴۴

پست الکترونیکی: amozesh.moasese@gmail.com

وبسایت نشریه: <https://judpm.ir>

اعضای هیئت تحریریه بین‌المللی

پروفسور بهنام محمدی ایواتلو

استاد دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه ال یو تی فنلاند

پروفسور کوروش بهزادیان

استاد زیرساخت‌های هوشمند، دانشگاه وست لندن، انگلستان

دکتر سعید محمدزاده بینا

استاد دانشکده تحصیلات تکمیلی علوم منابع بین‌المللی، گروه مهندسی منابع زمین و علوم محیطی،

دانشگاه آکیتا، ژاپن

اعضای هیئت تحریریه

دکتر یونس نوراللهی

استاد گروه سیستم‌های انرژی، دانشگاه تهران

دکتر بیژن عباسی

استاد دانشکده حقوق و علوم سیاسی، دانشگاه تهران

دکتر محمدعلی اکبری

استاد گروه آموزش زبان انگلیسی، دانشگاه ایلام

دکتر سید ابوالفضل ذاکریان

استاد گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشگاه علوم پزشکی تهران

دکتر یوسف حجت

استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

دکتر کیانوش ذاکر حقیقی

استاد گروه شهرسازی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

دکتر لطف‌الله فروزنده

استاد گروه مدیریت، دانشگاه تربیت مدرس تهران

دکتر ارسطو یاری حصار

استاد گروه جغرافیا، دانشگاه محقق اردبیلی

دکتر سهیلا پروین

استاد دانشکده اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبائی

دکتر معین معینی اقطاعی

دانشیار دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر رضا نصر اصفهانی

دانشیار اقتصاد شهری گروه کارآفرینی و اقتصاد، دانشگاه هنر اصفهان

دکتر سید داود آقائی

استاد دانشکده حقوق و علوم سیاسی، دانشگاه تهران

دکتر سحر ندایی طوسی

دانشیار گروه برنامه‌ریزی و طراحی شهری و منطقه‌ای دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه

شهیدبهشتی

سیاستگذاری پیشرفت شهری

دوره سوم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۵

فهرست مقالات

- ارائه الگوی چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری رویکرد داده‌بنیاد ۳۵۹
پیمان اکبری، رضا رستمی
- بررسی تطابق پیامدهای انتقال پایتخت به مکران با رویکردهای هیدروپلیتیک و ساختارهای هیدروهمزومون ۳۸۱
رامتین طاوسی راد، محمد انصاری قوجقار، آرش ملکیان
- ارزش‌گذاری املاک و اخذ عوارض شهری، رویکرد حکمرانی مشارکتی (مورد مطالعه: شهر اصفهان) ۳۹۳
رضا نصر اصفهانی، مصطفی نباتی‌نژاد، الهام عاقریان
- تشخیص و جداسازی هوشمند پسماندهای شهری قابل بازیافت با استفاده از مدل بینایی ماشین مبتنی بر یادگیری عمیق ۴۱۱
علی جلوخانی
- پیش‌بینی تقاضای برق خانگی تحت سناریوهای تغییرات اقلیمی: یک مدل مبتنی بر پایتون با بهره‌گیری از روز درجه‌های سرمایش و گرمایش ۴۳۳
مونا میررضوی، یونس نوراللهی، صبا عموزاده، مهنا بابا حسین‌پور، حسین یوسفی
- کاربرد هوش مصنوعی در تدوین استراتژی بومی سازگاری با تغییر اقلیم قنات: ارزیابی عملکرد XGBoost در تخمین دبی قنات قاین ۴۵۵
محمد فولادی نصرآباد، محمدرضا فرزانه، سپیده زراعتی نیشابور
- واکاوی پارادایم‌های خط‌مشی‌گذاری شهری تهران در پرتو سیاست ملی شهری ۴۷۱
غلامحسین محمدی، رحمت‌اله قلی‌پور سوته
- پیش‌بینی نظام بودجه‌ریزی در شهرداری تهران بر اساس طراحی مدل ریاضی استوار در شرایط عدم قطعیت با رویکرد رگرسیون چندگانه ۴۹۵
اعظم غلامی زارع‌زاده، سوان سهرایی، مریم خادمی، احسان ساده
- طراحی منظر بیوفیلیک به مثابه راهبردی برای مواجهه با بحران آب در فضاهای شهری (نمونه موردی: منظر پلکانی پارک چمران کرج) ۵۱۷
ستایش زندی بابائی، محمدمهدی پورحسن مهرزنجانی
- طراحی الگوی بومی اکوسیستم کارآفرینی توانمندساز زنان سرپرست خانوار در کلان‌شهر تهران ۵۴۱
محمدجواد لشکری، مهران مقصودی، شادی شاهوردیانی

باسمه تعالی

... سخن مدیر مسئول ...

هیئت وزیران در جلسه ۱۴۰۴/۱۲/۲۵ به پیشنهاد مشترک سازمان برنامه و بودجه و وزارت راه و شهرسازی و به منظور «مدیریت ارزیابی و جبران خسارت‌های وارد شده» به بخش‌های مختلف ناشی از جنگ آمریکایی - صهیونیستی و به استناد اصل ۱۳۸ قانون اساسی جمهوری اسلامی ایران؛ «مسئولیت ارزیابی خسارت‌های وارد شده» به واحدهای مسکونی، تجاری و اداری خصوصی در کلان‌شهرهای کشور را به عهده شهرداری‌ها نهاده است. همچنین، بر اساس این مصوبه «اسکان اضطراری و موقت» در هریک از کلان‌شهرهای کشور به عهده شهرداری همان شهر است. به علاوه آنکه مسئولیت «تعمیرات جزئی ساختمان‌های حادثه‌دیده در کلان‌شهرهای کشور به عهده شهرداری‌ها است.»

مشارکت شهرداری‌ها در شرایط بحرانی و جنگی ضرورت دارد و بخش عمده‌ای از فعالیت‌های حل چالش‌های شهرها در زمان بحران و جنگ به عهده مدیریت محلی است. اینکه فضای شهر در زمان بحران و جنگ بتواند با فوریت محیط‌های تخریب‌شده و نارسایی‌های ناشی از جنگ را به نحوی مدیریت کند که زیست اجتماعی مردم و فضای کالبدی شهر حالتی جنگ‌زده و آشفته نداشته باشد، نوعی راهبرد و سیاستی کارا و درست است. بر اساس مشاهدات و گزارش‌های کارشناسی انتشار یافته، محیط شهرهای ایران به واسطه حضور پویا، مستمر و به‌موقع شهرداری‌ها و سایر دستگاه‌های خدمات‌رسان شهری در زمان جنگ اخیر، مناسب بود. این اقدامات شهرداری‌ها در سایه کاهش دسترسی به منابع صورت گرفته است و عملاً به واسطه جنگ شهرداری‌ها با تنش تأمین منابع مواجه می‌شوند. به بیان روشن‌تر، شهرداری‌ها هم مسئولیت تأمین بخشی از خسارت‌های جنگ را عهده‌دار شده‌اند و هم به واسطه جنگ؛ شرایط تأمین منابع برایشان سخت شده است. سیاستگذاری مدیریت شهری با توجه به مقتضیات کنونی مستلزم بازاندیشی و بازنگری ساختاری است. از سوی دیگر، با توجه به تغییرات نظام منابع و مصارف در بودجه شهرداری‌ها، قاعده‌تاً اصلاحیه لایحه بودجه در اکثر شهرداری‌ها ضرورت دارد.

مطابق بند ۹ تصویب‌نامه هیئت وزیران در تاریخ ۱۴۰۴/۱۲/۲۵ باید سازوکارهای جبران خسارت موارد ارزیابی‌شده در این مصوبه به پیشنهاد مشترک سازمان برنامه و بودجه کشور و وزارت کشور به تصویب هیئت وزیران رسانده شود. با وجود گذشت بیش از ۷ ماه، تا کنون این سازوکارها برای جبران خسارت و کمک به شهرداری‌ها تصویب، ابلاغ و اجرایی نشده است، لذا یکی از اقدامات مهم دولت در شرایط کنونی چاره‌جویی برای این موضوع است. از سوی دیگر، شهرداری‌ها لازم است اصلاحاتی در اولویت‌بندی نظام مصارف خود انجام دهند. هر چند وزارت کشور تلاش کرده است از طریق تبدیل آرای قطعی کمیسیون‌های ماده ۱۰۰ به جریمه نقدی، در کوتاه‌مدت سازوکاری به منظور جبران خسارت و تأمین منابع برای شهرداری‌ها چاره‌جویی کند؛ اما به واسطه تضعیف حقوق عامه و بی‌اعتبارسازی طرح‌های توسعه شهری و سایر نارسایی‌ها؛ این ایده نتوانسته است کارایی و اثربخشی مناسب داشته باشد. تبدیل آرای قطعی قلع و تخریب ناشی از کمیسیون‌های ماده ۱۰۰ به جریمه با واکنش‌های نهادهای مختلف قضایی و اجرایی مواجه بوده است. دیوان عدالت اداری به شکایت شهروندان دستور توقف موقت مصوبه یادشده را داده است. همچنین، مجلس شورای اسلامی برای حل آرای اجرانشده کمیسیون‌های ماده ۱۰۰ در همه شهرداری‌ها - که حدود ۲۵۰ هزار رأی اجرانشده است - درخواست ارسال طرح در چارچوب اصول ۱۰۱ و ۱۰۲ قانون اساسی از سوی شورای عالی استان‌ها را داشته است. همچنین، وزارت راه و شهرسازی به طور جدی مخالف این نوع سیاستگذاری است.

تعیین تکلیف آرای قطعی کمیسیون‌های ماده ۱۰۰، مستلزم قانون‌گذاری در مجلس شورای اسلامی است، اما سازوکار جبران هزینه‌های شهرداری‌ها هنگام جنگ از تکالیف دولت است و باید در این خصوص سیاستگذاری درستی صورت گیرد. این سیاستگذاری از دو طریق ممکن است: ابتدا آنکه شهرداری‌ها با ازسرگیری سیاست‌های انقباضی مصارف و حذف ردیف‌های فاقد اولویت، بخشی از مصارف خود را کاهش دهند. از سوی دیگر، دولت در قالب کمک‌های دوره‌ای نسبت به حمایت از شهرداری‌ها اقدام کند. شاید استفاده از ظرفیت‌های شهرسازی ناشی از کمیسیون ماده ۵ یکی از سازوکارهای جبران خسارت و کمک به شهرداری‌ها باشد، ولی نباید این مسیر کل راه‌حل را شامل شود.

تحریریه فصلنامه سیاستگذاری پیشرفت شهری از همه محققان، پژوهشگران و اساتید دانشگاهی درخواست می‌کند در راستای بهبود عملکرد شهرها هنگام جنگ با ارسال مقالات علمی، موردپژوهی و کاربردی خود مجموعه مدیریت شهری ایران را مورد حمایت قرار دهند.

محمد حسین بوچانی



Presenting a Model of Financial Challenges for Public Sector Participation in the Process of Urban Fabric Reconstruction using A Grounded Theory Approach

Peyman Akbari^{1*}  | Reza Rostami² 

1. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Public Management, Payame Noor University, Tehran, Iran. Email: Peymanakbari3537@pnu.ac.ir

2. Assistant Professor, Department of Business Management, Payame Noor University, Tehran, Iran. Email: rostamipnu@pnu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received 28 January 2026

Revised 27 February 2026

Accepted 17 May 2026

Published Online 23 September 2026

Keywords:

Financial challenges,
Participation,
Public sector,
Reconstruction,
Urban fabric,
A Grounded Theory Approach.

ABSTRACT

This research aimed to present a model of the financial challenges of public sector participation in the reconstruction of dilapidated structures, using a case study of Tehran's District 1 Municipality. This is an applied and qualitative study with a data-based approach, and the data were collected through interviews with 20 managers and key employees and analyzed with MAXQDA software. The results showed that the causal factors include the diversity of services and resource constraints. The underlying factors include unforeseen costs, lack of resource sustainability, and financial dependence. Intervening factors include inflation, government indifference, and the cost-effectiveness of laws. The central category is the financial challenges of public participation. The proposed strategies include designing a financing program, reviewing laws, providing government resources, and encouraging private investment. The consequences of these measures include improving municipal performance, increasing citizen satisfaction, employment growth, and housing production. Finally, to overcome obstacles such as budget constraints and income instability, it is essential to rely on structural strategies such as government budget allocation, fiscal policy stability, and administrative process facilitation to improve the quality of life in target contexts.

Cite this article: Akbari, P. & Rostami, R. (2026). Presenting a Model of Financial Challenges for Public Sector Participation in the Process of Urban Fabric Reconstruction using A Grounded Theory Approach. *Urban Development Policy Making*, 3 (3), 359-380. DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.573447.1087>



© Authors retain the copyright and full publishing rights.
DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.573447.1087>

Introduction

The deterioration of urban fabric in Iran is a problem that has affected about 10% of the urban fabric by reducing the quality of life and creating heavy costs. The halting of renovation projects for economic reasons has doubled the need for public-private partnerships. Although these partnerships face obstacles such as power imbalance and lack of information, a solution can be found under the policies of the resistance economy. However, the government's budget constraints have made the reconstruction process difficult. This study examines the financial challenges of public sector participation and presents a coherent model for solving the problems of renovation of dilapidated fabrics.

Materials and Methods

This study aimed to provide a model for the financial challenges of public participation in the reconstruction of urban textures. The research method is qualitative and based on the Corbin and Strauss data-based theory. The statistical population includes employees of the Municipality of

District 1 of Tehran in 1403, of whom 20 people were selected through purposeful snowball sampling. Data were collected through semi-structured interviews and theoretical saturation was achieved in the seventeenth interview. Analysis was performed with MAXQDA software in three coding stages. Validity and reliability were ensured based on the Lincoln and Guba framework, with expert approval and double coding. The findings were also presented to external experts and documented.

Results

Data analysis with 20 in-depth interviews and open coding led to the identification of 94 initial codes, and theoretical saturation was achieved in the 17th interview. Concepts were categorized into 6 main categories, including financial challenges and lack of resources. Factors such as resource constraints (causal), economic problems (contextual), and inflation and costly laws (interventional) were identified. Suggested strategies include sustainable financing and regulatory review, which have consequences such as improved municipal performance, increased satisfaction, and housing production. Finally, based on data-driven theory, these core categories formed the basis for the formation of the final research model.

Discussion and Conclusion

The aim of this study is to identify the financial challenges of public sector participation in the reconstruction of urban textures in District 1 of Tehran. The results show that the diversity of services, resource limitations, lack of sustainable revenues, and legal problems put a heavy burden on the municipality and hinder reconstruction projects. To address these challenges, solutions such as creating sustainable revenues, reforming the budget structure, attracting public and private resources, and forming financial funds have been proposed. Implementing these solutions can lead to improved municipal performance, increased citizen satisfaction, and improved quality of life. The researchers also recommend that future studies use quantitative methods and examine other communities.



ارائه الگوی چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری رویکرد داده‌بنیاد

پیمان اکبری^{۱*} | رضا رستمی^۲

۱. نویسنده مسئول، استادیار گروه مدیریت دولتی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. رایانامه: Peymanakbari3537@pnu.ac.ir

۲. استادیار گروه مدیریت کسب و کار، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. رایانامه: rostamipnu@pnu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

کلیدواژه:

چالش مالی،

مشارکت،

بخش عمومی،

بازسازی،

بافت شهری،

رویکرد داده‌بنیاد.

بازسازی بافت‌های فرسوده شهری نیازمند تخصیص منابع مالی کافی و مشارکت مؤثر نهادهای عمومی است؛ با این حال، شهرداری‌ها به دلیل ساختار مالی نامناسب و محدودیت‌های بودجه‌ای در مسیر تحقق این اهداف با موانع جدی مواجه‌اند. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارائه الگوی جامع چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری، با تمرکز بر مطالعه موردی شهرداری منطقه ۱ تهران طراحی و اجرا شده است. این مطالعه از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، کیفی با رویکرد داده‌بنیاد است. داده‌ها از طریق مصاحبه‌های عمیق با ۲۰ نفر از مدیران و کارکنان کلیدی شهرداری (انتخاب‌شده به روش گلوله‌برفی) گردآوری و با استفاده از نرم‌افزار MAXQDA تحلیل شدند. تحلیل داده‌ها نشان داد پدیده محوری «چالش‌های مالی مشارکت عمومی در بازسازی بافت‌های فرسوده» تحت تأثیر عوامل علی (تنوع خدمات شهرداری و محدودیت منابع حمایتی مالی) و عوامل زمینه‌ای (هزینه‌های پیش‌بینی‌نشده، فورس بودن خدمات شهرداری، منابع غیر مجاز درآمدزایی، عدم پایداری منابع مالی شهرداری، بودجه محدود، گستردگی وظایف، و وابستگی مالی شهرداری - نبود آینده‌نگری مالی) شکل می‌گیرد. در این میان، عوامل مداخله‌گر نظیر (تورم‌های پی‌درپی، خسارت‌های غیر قابل پیش‌بینی، بی‌توجهی دولت در تأمین مالی، نبود هماهنگی بین عوامل اجرایی، هزینه‌بر بودن رعایت ضوابط، و هزینه‌بر بودن خدمات مبتنی بر قوانین) این چالش‌ها افزوده‌اند. راهبردهای استخراج‌شده شامل (طراحی برنامه تأمین مالی، بازنگری در قوانین و مقررات، بازتولید عاطفی ساکنان، تعریف سازوکارهای نظارتی بر بازسازی تدبیر منابع درآمدی از محل بودجه عمومی دولت، تسهیل فرایندهای اداری وابسته به دستگاه‌های مختلف دولتی، ثبات سیاست‌های پولی و مالی دولت، و تشویق سرمایه‌گذاری بخش خصوصی) بود که به پیامدهایی نظیر بهبود شاخص‌های عملکردی، افزایش رضایتمندی شهروندان، افزایش نرخ اشتغال، افزایش تولید مسکن، بهبود سیما و منظر شهری، کاهش مصف انرژی و افزایش سرمایه‌گذاری منجر می‌شود. نتایج بیانگر آن است که غلبه بر چالش‌های مالی نیازمند اتکا به راهبردهای ساختاری نظیر تخصیص اعتبارات از بودجه عمومی دولت و ثبات سیاست‌های مالی است.

استناد: اکبری، پیمان و رستمی، رضا (۱۴۰۵). ارائه الگوی چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری رویکرد داده‌بنیاد. *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۳ (۳) ۳۵۹-۳۸۰.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.573447.1087>

© نویسندگان

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.573447.1087>



۱. مقدمه

فرسودگی بافت‌های شهری یکی از چالش‌های اساسی و چندوجهی در مدیریت شهری ایران است که به کاهش کیفیت زندگی ساکنان و بروز مشکلات زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی منجر می‌شود [۱]. برآوردها نشان می‌دهد به طور متوسط، حدود ۱۰ درصد از سطح شهرهای ایران شامل بافت‌های فرسوده می‌شود که این پدیده، زوال شهری و هزینه‌های هنگفتی را به شهرها تحمیل کرده است. در این میان، مدیریت شهری به عنوان متولی اصلی فرایند بهسازی، با چالش اجرایی مواجه شده است؛ بسیاری از طرح‌های نوسازی در دو دهه اخیر به سرانجام نرسیده یا با توقف‌های طولانی مواجه شده‌اند [۲]. از دیدگاه بین‌المللی نیز این وضعیت مشابه چالش‌های جهانی است که در آن نبود هدایت کافی بخش عمومی باعث انحراف پروژه‌ها از مسیر اصلی خود شده است [۳]. بررسی‌ها نشان می‌دهد مهم‌ترین عامل در توسعه این فرسودگی و ناکامی طرح‌ها، عامل اقتصادی و سرمایه‌گذاری ناکافی است. این امر، لزوم توجه به رویکردهای نوین تأمین مالی، از جمله مشارکت‌های عمومی، را برجسته می‌سازد [۴]. در این پژوهش، منظور از مشارکت‌های عمومی، فرایندهای همکاری مبتنی بر قرارداد میان شهرداری و بخش‌های غیردولتی (مانند پیمانکاران عمرانی) است که برای تأمین مالی و اجرای پروژه‌ها شکل می‌گیرد [۵]. با این حال، ادبیات بین‌المللی نشان می‌دهد اثربخشی این همکاری‌ها، به‌ویژه زمانی که بخش عمومی فاقد مهارت‌های پیشرفته مدیریتی و راهبری لازم است، با چالش‌های جدی روبه‌روست. این چالش‌ها می‌تواند ناشی از عدم تعادل قدرت، عدم کفایت ساختارهای حاکمیتی غیرمتمرکز، و کمبود اطلاعات برای تصمیم‌گیری‌های مدنی باشد [۶]. در بستر ایران، این چالش‌ها نمود عینی‌تری پیدا می‌کند؛ به طوری که در دهه‌های اخیر، نهادهای دولتی به‌تنهایی قادر به نوسازی این بافت‌ها نبوده‌اند و ضرورت بهره‌گیری از مدل‌های مشارکت عمومی بیش از پیش احساس می‌شود. مدیریت شهری در ایران نه تنها با محدودیت‌های بودجه‌ای و ریاضت مالی مواجه است که تأمین مالی پروژه‌های بازسازی را دشوار می‌سازد، بلکه توانایی بخش عمومی در جذب و حفظ منابع مالی بلندمدت برای این پروژه‌ها نیز با چالش‌هایی روبه‌روست [۷]. اغلب، بار مالی و ریسک‌های مرتبط با پروژه‌های بازسازی، علی‌رغم تلاش‌ها برای توزیع آن، در نهایت به بخش عمومی باز می‌گردد یا از ابتدا به عهده آن باقی می‌ماند، وضعیت مالی نگران‌کننده بسیاری از شهرداری‌ها نیز به کاهش درآمدهای لازم برای توسعه شهری و نگهداری زیرساخت‌ها منجر شده است [۸]. تضاد منافع میان ذی‌نفعان مختلف (شامل شهرداری، ساکنان و مجریان پروژه)، فرایند تصمیم‌گیری را با بن‌بست مواجه می‌کند. برای مثال، در حوزه جبران خسارت، تفاوت فاحش میان انتظارات ساکنان برای دریافت قیمت‌های بالای ملک و تمایل مجریان و سرمایه‌گذاران به کاهش هزینه‌های احداث، به بن‌بست در مذاکرات و عدم توافق مالی منجر می‌شود. همچنین، در موضوع تکمیل زیرساخت‌ها، تلاش شهرداری برای واگذاری هزینه‌ها به بخش غیردولتی و در مقابل، تلاش مجریان برای کاهش تعهدات خود، باعث تعلیق پروژه‌ها و نیمه‌کاره ماندن خدمات می‌شود. این اصطکاک‌ها و عدم اجماع‌ها، ریسک سرمایه‌گذاری را بالا می‌برد و باعث می‌شود سرمایه‌گذاران با رفتار محتاطانه مواجه شوند و از تزریق منابع مالی یا ورود به پروژه‌های نوسازی امتناع کنند؛ امری که تشدید کسری بودجه و چالش‌های مالی مدیریت شهری را در پی دارد [۹]. در راستای سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی با تأکید بر شفافیت، سالم‌سازی و ارتقای درآمدهای پایدار، می‌توان چارچوب راهگشایی برای مدیریت شهری تدوین کرد. با این حال، فرایند بازسازی بافت‌های شهری از طریق این مشارکت‌ها، بدون چالش‌های مالی مهمی امکان‌پذیر نیست [۱۰]. بخش عمومی با تأمین منابع مالی پایدار و بلندمدت، تخصیص بهینه آن‌ها و مدیریت همکاری با شرکای اجرایی برای جذب سرمایه و ارزیابی دقیق نیازها روبه‌روست. این امر شامل چالش‌هایی در ایجاد یک چارچوب مالی متنوع است که بتواند هدایت دولتی، عملیات بازار [۱۱] و مشارکت ساکنان را ترکیب کند. شکاف اصلی پژوهش در این حوزه، فقدان الگوی بومی و منسجم است که با رویکردی نظام‌مند (مانند نظریه داده‌بنیاد)، چالش‌های مالی بخش عمومی را در فرایند بازسازی بافت‌های شهری ایران شناسایی کند، چرا که مطالعات پیشین بیشتر بر عوامل مؤثر بر مشارکت مالکان و ساکنان یا چارچوب‌های کلی پایدار [۱۲] متمرکز بوده‌اند و کمتر به واکاوی عمیق لایه‌های مختلف چالش‌های مالی در مشارکت‌های عمومی - خصوصی بافت‌های فرسوده پرداخته‌اند. از این رو، این پژوهش بر آن است تا پاسخی برای این پرسش بیابد که: آیا می‌توان چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری را در قالب یک الگوی منسجم ارائه داد؟

۲. چارچوب نظری و پیشینه پژوهش

چارچوب نظری این پژوهش با تکیه بر مبانی اقتصاد شهری و مدیریت مالی، چالش‌های منابع بافت‌های فرسوده را در شش محور کلیدی تشریح می‌کند. نخست، بر پایه «نظریه شکست بازار»، بافت‌های فرسوده کالاهای عمومی با پیوستگی‌های مثبت خارجی هستند [۱۳]، که بخش خصوصی به دلیل کم‌سودی و زمان‌بر بودن، تمایلی به سرمایه‌گذاری در آن‌ها ندارد؛ بنابراین ورود بخش عمومی برای جبران این شکست و مدیریت محدودیت‌های بودجه‌ای ضرورت می‌یابد [۱۴]. دوم، «نظریه شکاف مالی» نشان می‌دهد ساختار بودجه‌ریزی دچار عدم توازن عمودی میان وظایف و منابع است و شکاف افقی نیز توان مالی ضعیف مناطق فرسوده را در مقایسه با مناطق مرفه آشکار می‌سازد. سوم، از منظر «اقتصاد سیاسی»، تضاد میان افق زمانی کوتاه‌مدت مدیران و فرایند طولانی‌مدت احیا، مانع تخصیص بهینه منابع شده و نگاه صرفاً هزینه‌زا به پروژه‌ها را تقویت می‌کند [۱۵]. چهارم، «نظریه ریسک» بیانگر ریسک بالای سرمایه‌گذاری در بازسازی است که به دلیل ریسک‌گریزی بخش عمومی و نبود ابزارهای مدیریت ریسک و تضمین‌های قانونی، جذب منابع را ناممکن ساخته است. پنجم، «مکانیزم اسکان ارزش زمین» بر لزوم بازگرداندن ارزش افزوده زمین به پروژه تأکید دارد، اما نبود قوانین کارآمد و عدم اجرای صحیح، این منبع بالقوه را به فراموشی سپرده و وابستگی به نفت را تشدید کرده است. در نهایت، «نظریه هزینه‌های معاملاتی» با تمرکز بر ساختار اداری پیچیده و بروکراتیک، هزینه‌های نرم و فساد سیستماتیک را عامل افزایش هزینه‌ها و تضعیف توجیه اقتصادی معرفی می‌کند [۱۶]. در ادامه مفهوم بافت فرسوده، ضرورت مشارکت عمومی و چالش‌های مالی در بازسازی شهری شرح داده خواهد شد:

بافت شهر از نظر فیزیکی به درهم‌تنیدگی فضاها و عناصر شهری تحت تأثیر ویژگی‌های طبیعی همچون توپوگرافی اشاره دارد که در فرایندی پویا و متأثر از عواملی همچون رشد بازرگانی، صنعتی و جابه‌جایی جمعیت شکل گرفته است [۱۷]. شهر به مثابه یک ارگانیزم زنده از تعامل بافت‌های اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی حیات می‌یابد، اما بخشی از این بافت‌ها که در فرایندی طولانی تاریخی شکل گرفته، در برابر توسعه شهری نوین مقاومت کرده و به «بافت فرسوده» تبدیل شده‌اند. این مناطق که اغلب با عنوان «مناطق شهری فرسوده» شناخته می‌شوند، با ویژگی‌هایی همچون تراکم جمعیت بالا، مسکن نایمن و فقر اجتماعی و فیزیکی توصیف می‌شوند [۱۸]. اگرچه این بافت‌ها در گذشته عملکردی منطقی داشته‌اند، اما اکنون دچار کهنگی ساختاری شده و قادر به پاسخ‌گویی به نیازهای کنونی ساکنان نیستند. این فرسودگی، که ریشه در رشد بی‌رویه و فقدان برنامه‌ریزی دارد، به تجزیه فضای عمومی و زوال بافت اجتماعی و همچنین، به دلیل سازه‌های نایمن، به تهدید ایمنی شهروندان منجر می‌شود؛ بنابراین بازسازی و احیای آن‌ها یک ضرورت اجتماعی و اقتصادی برای پایداری شهرهاست [۱۹]. در فرایند بازسازی، واژه «مشارکت» به معنای درگیری ذهنی و عاطفی اشخاص در موقعیت‌های گروهی برای دستیابی به اهداف مشترک است، که در پروژه‌های شهری اهمیتی حیاتی می‌یابد [۲۰]. مشارکت عمومی اگرچه برای هماهنگی خواسته‌های ذی‌نفعان و تطبیق پروژه با شرایط محلی ضروری است، اما ممکن است پیچیدگی پروژه‌ها را افزایش دهد و پیشرفت آن‌ها را کند کند و یا تأثیر چندانی در تعدیل عدم تعادل قدرت نداشته باشد [۲۱]. توانمندسازی ذی‌نفعان در شرایط تعارض و بدون حمایت‌های حقوقی دشوار است؛ از این‌رو، مشارکت جامعه به‌ویژه در شکل‌های غیررسمی می‌تواند به عنوان مکملی مؤثر برای سازوکارهای رسمی عمل کند [۲۲]. ساماندهی پهنه‌های فرسوده حوزه‌ای گسترده شامل مسکن، اشتغال و موضوعات زیست‌محیطی است و به دلیل وسعت پهنه‌ها، به استفاده از توانایی‌های مالی عظیم در سطح شهر نیاز دارد [۲۳]. محدودیت منابع دولت‌های محلی، مشارکت عمومی را به راهکاری مهم برای توسعه پایدار تبدیل کرده است [۲۴]. از جمله روش‌های تأمین مالی می‌توان به فروش تراکم، اعتبارات بانکی و اوراق مشارکت اشاره کرد. در این‌میان، هزینه‌های مقدماتی و زیربنایی باید از منابع دولتی و عمومی تأمین شود. با این حال، اجرای پروژه‌ها با چالش‌هایی نظیر هماهنگی ضعیف، قراردادهای غیرقابل انعطاف، بروکراسی طولانی و عدم تعهد دولت به توسعه زیرساخت‌ها مواجه است. بنابراین، تقویت ظرفیت نهادی، افزایش شفافیت و اتخاذ سیاست‌های حمایتی [۲۵] برای اطمینان از پایداری پروژه‌ها الزامی است. در ادامه پیشینه پژوهش در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. خلاصه‌ای از پژوهش‌های پرکاربرد در زمینه بافت فرسوده

محقق (سال)	عنوان پژوهش	یافته‌های کلیدی
Rasouli et al (2024) [۲۶]	کاربرد تئوری نمایندگی برای تخصیص ریسک مشارکت بخش عمومی خصوصی - دولت در بستر اقتصاد مقاومتی (مورد مطالعه: صنعت آب و فاضلاب استان گیلان)	پارامترهای تئوری نمایندگی (کنترل، اطلاعات و انگیزه) رابطه معناداری با تخصیص ریسک در مشارکت عمومی - خصوصی در صنعت آب و فاضلاب گیلان دارند.
Karimzadeh (2023) [۲۷]	بررسی نقش مشارکت مردمی در بازسازی بافت فرسوده شهری با تاکید بر نقش شهرداری خوی	بین فراوانی‌های مشاهده شده و مورد انتظار میزان مشارکت مردم در نوسازی بافت‌های فرسوده شهر خوی اختلاف معناداری وجود دارد، که نشان‌دهنده وضعیت مطلوب مشارکت نیست.
Akbari et al, (2021) [۲۸]	شناسایی موانع تحقق اهداف بازآفرینی در برنامه‌ریزی قوانین بافت فرسوده	تاکید قوانین بر تملک و آزادسازی، باعث غفلت از منافع عمومی و اجتماعی شده و به حاشیه راندن برخی ساکنان منجر شده است. این امر عدم تحقق اهداف بازآفرینی را در پی داشته است.
Abedi (2020) [۲۹]	ابزارهای تأمین مالی و عوامل مؤثر بر مشارکت مردم در بهسازی محیطی شهر سبز (فراتحلیلی بر مطالعات انجام‌شده در ایران)	انتخاب روش تأمین مالی مناسب به شرایط هر پروژه و ویژگی‌های منطقه بستگی دارد و نمی‌توان از یک الگوی واحد برای همه مناطق استفاده کرد.
Shahriari et al (2019) [۳۰]	بررسی میزان مشارکت مردم در بازسازی بافت فرسوده کلان‌شهرها مطالعه موردی: خیابان شاهداعی اله شیراز	مشارکت مردم در تسریع روند بهسازی بافت فرسوده مؤثر است و ساماندهی معابر باعث ارتقای کارکرد و نقش‌پذیری جدید محله می‌شود.
Abedi (2019) [۳۱]	تحلیلی بر جایگاه ابزارهای تأمین مالی بازآفرینی شهری در اسناد بالادستی و قوانین برنامه‌های توسعه ایران	اکثر روش‌های تأمین مالی بافت فرسوده پشتوانه قانونی دارند، اما عدم استفاده از آن‌ها به دلیل محدودیت قانونی نیست، بلکه به دلیل عدم تناسب روش‌ها با شرایط متفاوت بافت‌هاست.
Iranmanesh et al (2019) [۳۲]	رتبه‌بندی چالش‌های پیش روی سرمایه‌گذاران ساخت‌وساز در بافت‌های فرسوده شهر کرمان	عمده‌ترین چالش‌های پیش روی سرمایه‌گذاران در بافت فرسوده کرمان، چالش‌های اقتصادی و فنی - مهندسی است.
Zareian et al (2018) [۳۳]	عوامل اثرگذار در پیاده‌سازی الگوی مشارکت عمومی - خصوصی در توسعه شهری تهران	مهم‌ترین عوامل در پیاده‌سازی الگوی مشارکت عمومی - خصوصی در شهرداری تهران عبارت‌اند از: ثبات شرایط و امنیت سرمایه‌گذاری، شفافیت نظام واگذاری و مدیریت یکپارچه پروژه‌ها.
Heydar et al (2018) [۳۴]	بازیافت زمین در بافت‌های فرسوده با رویکرد تأمین نیاز مسکن شهری (مطالعه موردی: بافت فرسوده بخش مرکزی شهر زنجان)	بازیافت زمین در بافت فرسوده زنجان می‌تواند ۸۲ هکتار زمین و ۳۸۱۶ واحد مسکونی فراهم کند که بخشی از نیاز آینده شهر را برطرف کرده و از گسترش فیزیکی ناپایدار جلوگیری می‌کند.
Amini & Rahnama (2016) [۳۵]	بررسی نقش مشارکت ارگان‌ها و سازمان‌های دولتی و خصوصی در بازسازی بافت فرسوده شهری (نمونه موردی: محله سرشور مشهد)	شرکت عمومی - خصوصی در محدوده مورد مطالعه موفقیت‌آمیز بوده و نقش ارگان‌های خصوصی در بازسازی و مقاوم‌سازی بافت، بیشتر از ارگان‌های عمومی بوده است.
Bigdali Kazemi (2013) [۳۶]	آسیب‌شناسی الگوی مشارکت کنشگران بافت‌های فرسوده شهری در فرایند نوسازی و ارائه الگوی مطلوب جهت افزایش مشارکت	طرح‌های شهری بدون مشارکت فعال همه کنشگران موفق نیستند. مدیریت شهری باید با فراهم کردن پیش‌نیازها و مستندسازی تجارب، مشارکت شهروندان را برای موفقیت نوسازی افزایش دهد.
Habibi et al (2013) [۳۷]	شناسایی و اولویت‌بندی راهبردهای مناسب جهت ساماندهی بافت فرسوده بخش مرکزی شهر قزوین با رویکرد بازآفرینی شهری پایدار	کمبود فضاهای خدماتی - رفاهی مهم‌ترین ضعف و دسترسی آسان به مراکز اصلی، بالاترین قوت محدوده است. مهم‌ترین تهدید، نبود برنامه مدون برای عدالت‌محوری است.
Fu et al (2025) [۳۸]	الگوهای تکاملی و بهینه‌سازی مکانیسم مشارکت عمومی در برنامه‌ریزی بازسازی جامعه را در گوانگژو	این مطالعه سه تغییر پارادایم را شناسایی کرده است: انتقال شرکت‌کنندگان از «پاسخ‌دهندگان منفعل» به «سازندگان فعال»، پیشرفت مراحل مشارکت از «مداخله قطعه‌ای» به «توانمندسازی چرخه کامل»، و تکامل روش‌های مشارکت از «ارتباط یک‌طرفه» به «همکاری مشترک»
Shen et al (2025) [۳۹]	بازسازی جامعه را با رویکرد «هم‌آفرینی، هم‌ساخت، و هم‌حکمرانی» از طریق مشارکت مدنی بررسی کردند	نتایج نشان می‌دهد اقدامات مشارکتی مدنی تحت اصول پایداری، حس هویت و مسئولیت جامعه را در شهروندان تقویت می‌کند
Yang et al (2025) [۴۰]	بازسازی میراثی روستاهای سنتی	مشارکت عمومی یکی از ابعاد ظرفیت میراثی است که بر ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی بازسازی تأثیر می‌گذارد
Zhang & Zhou (2023) [۴۱]	نوسازی ساختاری بلوک‌ها در منطقه مسکونی شهرهای جیانگ نان	حالت «کاشت فضای خارجی» می‌تواند به طور فعال ساخت بلوک‌های کوچک‌مقیاس را تشویق کند و از نظر احترام به بافت و سهولت اجرا مزایایی دارد.
Ragab (2021) [۴۲]	روند تهیه برنامه بازسازی شهر بیروت	طرح بازسازی بیروت با ترکیب کارکردهای سنتی و جدید (اداری، تجاری، فرهنگی، تفریحی و مسکونی) به دنبال ایجاد سرزندگی در مرکز شهر است.

پیشینه تحقیق، با وجود پرداختن به ابعاد گوناگون بازآفرینی، عمدتاً با رویکردهای کمی بر مشارکت عمومی - خصوصی یا سطح کلی مشارکت مردمی متمرکز بوده و از تبیین عمیق چالش‌های مالی درونی بخش عمومی و ارائه یک الگوی یکپارچه غفلت ورزیده است. پژوهش حاضر با عنوان «الگوی چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری (مورد مطالعه: شهرداری منطقه ۱ تهران)» و با اتکا به رویکرد داده‌بنیاد، دقیقاً این شکاف را هدف قرار می‌دهد. نوآوری اصلی این کار در سه بُعد کلیدی خلاصه می‌شود: **نخست**، تغییر تمرکز از بخش خصوصی به چالش‌های ساختاری و مالی خود شهرداری به عنوان بازیگر اصلی؛ **دوم**، به‌کارگیری روش داده‌بنیاد برای کشف و مدل‌سازی روابط پنهان و پویایی‌های مالی به جای شناسایی صرف عوامل؛ و **سوم**، انتخاب مورد مطالعه استراتژیک و پرهزینه منطقه ۱ تهران که ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن در مطالعات پیشین نادیده گرفته شده است. این ترکیب از موضوع، روش و مورد مطالعه، پژوهش حاضر را به یک تلاش منحصربه‌فرد برای ارائه یک نظریه زمینه‌ای و کاربردی در حوزه تأمین مالی بازآفرینی شهری مبدل ساخته است.

۳. مواد و روش‌ها

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، کیفی است که با رویکرد تفسیری - استقرایی و استراتژی نظریه داده‌بنیاد [۴۳] انجام شده است. جامعه آماری پژوهش را کارکنان و مدیران شهرداری منطقه ۱ تهران در سال ۱۴۰۳ تشکیل دادند. ابزار گردآوری داده‌ها، مصاحبه نیمه‌ساختاریافته و عمیق بود که با ۲۰ نفر از افراد واجد شرایط (انتخاب‌شده به روش نمونه‌گیری گلوله‌برفی) اجرا شد و روند آن تا حصول اشباع نظری در مصاحبه هفدهم ادامه یافت (مشخصات نمونه در جدول ۲). در این پژوهش، مصاحبه عمیق به عنوان اصلی‌ترین ابزار گردآوری داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. مصاحبه‌ها به صورت حضوری و در محیطی آرام با رعایت اصول اخلاقی انجام شد و میانگین زمان هر مصاحبه بین ۴۵ تا ۶۰ دقیقه بود. پروتکل سؤالات مصاحبه «لطفاً تجربه و دیدگاه خود را در خصوص وضعیت فعلی مشارکت بخش عمومی در تأمین مالی پروژه‌های بازسازی بافت‌های فرسوده بیان کنید و مهم‌ترین چالش‌های مالی موجود را تشریح کنید؛ به نظر شما ریشه و عوامل اصلی ایجادکننده این چالش‌ها چیست؟ شهرداری در چه بستر محیطی، اقتصادی و قانونی فعالیت می‌کند و عواملی نظیر تورم، قوانین هزینه‌بر و حمایت‌های دولتی چه تأثیری بر فرایند تأمین مالی داشته‌اند؟ مدیران شهری برای مقابله با این چالش‌ها چه راهبردها و سازوکارهایی را در پیش گرفته‌اند و در نهایت، اجرای این راهبردها چه پیامدهایی برای بافت شهری، ساکنان و آینده منطقه به همراه داشته است؟» با محوریت پارادایم نظریه داده‌بنیاد طراحی شد تا تمام ابعاد پدیده مورد بررسی قرار گیرد. برای تحلیل داده‌ها، از روش کدگذاری سه‌مرحله‌ای به کمک نرم‌افزار MAXQDA استفاده شد. در مرحله کدگذاری باز، متن مصاحبه‌ها خط‌به‌خط بررسی و کلمات کلیدی شناسایی شدند. در مرحله کدگذاری محوری، کدهای مشابه ادغام و در قالب مقوله‌های فرعی و اصلی قرار گرفتند. برای درک بهتر این فرایند، در ادامه یک نمونه از ترکیب کدها و خلق مقوله‌ها بر اساس جدول‌ها تحلیل ارائه می‌شود: در جدول «شرایط علی» (جدول ۴)، پژوهشگر در مرحله کدگذاری باز، عبارت‌های متعددی را استخراج کرد. برای مثال، جملاتی همچون «نبود درآمدهای پایدار» «کد D» «اعتبارات پایین» «کد E» و «بودجه محدود» «کد F» از متن مصاحبه‌ها شناسایی شدند. این کدها دلیل تشابه معنایی در مرحله کدگذاری، در مقوله فرعی تحت عنوان «محدودیت منابع مالی حمایت» ادغام شدند. در پایان در مرحله کدگذاری انتخابی ارتباط بین مقوله‌ها (عوامل علی، زمینه‌ای، مداخله‌گر، راهبردها و پیامدها) شناسایی و نظریه نهایی تبیین شد.

۴. یافته‌های پژوهش

فرایند تحلیل داده‌ها با ۲۰ مصاحبه عمیق کلید خورد. متون مصاحبه‌ها پس از واگردانی، در مرحله کدگذاری باز تحلیل شدند و بر اساس منطق نظریه داده‌بنیاد، در مجموع ۹۴ کد اولیه شناسایی شد. از مصاحبه هفدهم به بعد، با رسیدن به اشباع نظری، ادامه گفت‌وگوها فقط برای تأیید و غنی‌سازی کدهای موجود در فضایی غیررسمی با شرکت‌کنندگان انجام گرفت. در نهایت، این مفاهیم استخراج‌شده بر اساس مدل پارادایمی در ۶ مقوله اصلی دسته‌بندی شدند. بر اساس داده‌های جدول ۳، پدیده محوری پژوهش تحت عنوان «چالش‌های مالی مشارکت عمومی در بازسازی بافت‌های فرسوده» شناسایی شد. تحلیل کدهای باز

استخراج شده نشان می‌دهد این پدیده یک مسئله تک بعدی نیست، بلکه ترکیبی از موانع ساختاری و اجرایی است. مفاهیمی همچون «چالش در خود فرایند بازسازی»، «چالش نبود منابع مالی کافی» و «عدم پایداری منابع مالی» نشان می‌دهند شهرداری نه تنها با کمبود منابع مواجه است، بلکه نوسانات شدید درآمدی نیز فرایند بازسازی را با توقف مواجه کرده است. شفافیت نبودن بودجه و عدم انطباق آن با هزینه‌های واقعی، مؤلفه‌هایی هستند که شدت این پدیده را بیشتر کرده‌اند.

جدول ۲. مشخصات مشارکت کنندگان در پژوهش

ردیف	شغل	تحصیلات	سن
۱	مدیریت	کارشناسی ارشد	۴۰
۲	کارمند سازمان	کارشناسی ارشد	۳۰
۳	کارمند سازمان	کارشناسی ارشد	۳۲
۴	کارمند سازمان	کارشناسی ارشد	۲۷
۵	کارمند سازمان	کارشناسی ارشد	۳۸
۶	مدیریت	دکتری	۳۸
۷	کارمند	کارشناسی ارشد	۲۷
۸	معاون	کارشناسی ارشد	۳۰
۹	مدیر	کارشناسی ارشد	۳۲
۱۰	مدیر	کارشناسی ارشد	۳۰
۱۱	مدیر	دکتری	۳۳
۱۲	کارمند سازمان	کارشناسی ارشد	۲۷
۱۳	کارمند سازمان	کارشناسی ارشد	۲۵
۱۴	کارمند سازمان	کارشناسی ارشد	۳۴
۱۵	کارمند سازمان	کارشناسی	۲۴
۱۶	کارمند سازمان	دانشجوی دکتری	۴۵
۱۷	کارمند سازمان	کارشناسی ارشد	۲۰
۱۸	کارمند سازمان	کارشناسی ارشد	۲۹
۱۹	کارمند سازمان	کارشناسی ارشد	۳۵
۲۰	کارمند سازمان	کارشناسی ارشد	۳۶

جدول ۳. کدگذاری ثانویه و محوری - خلق مقوله اصلی

کد باز استخراج شده از مصاحبه	کد	مقوله فرعی	مقوله اصلی
چالش در خود فرایند بازسازی	A	چالش‌های مالی بازسازی بافت‌های شهری	عوامل زمینه‌های مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری در منطقه ۱ تهران
چالش درآمد پایدار برای بازسازی	D		
چالش نبود منابع مالی کافی	L		
محدودیت در منابع درآمدی و مالی	B, C, Q		
عدم پایداری منابع مالی	C		
چالش عدم استمرار درآمدزایی برای بازسازی بافت‌های فرسوده و درآمد شهرداری	D, S		
وجود منابع مالی ناپایدار	E		
چالش شفافیت بودجه‌ای	P		
چالش تأمین بودجه مناسب	F		
عدم انطباق بودجه با هزینه‌های واقعی بازسازی	J		

جدول ۴ به عوامل ایجادکننده پدیده محوری می‌پردازد. یافته‌ها بیانگر آن است که عوامل علی در دو دسته اصلی جای می‌گیرند:

- محدودیت منابع مالی حمایتی: کدهایی مانند «نبود درآمدهای پایدار»، «اعتبارات پایین» و «وابستگی مالی شهرداری» نشان می‌دهند ساختار مالی شهرداری در ناتوانی از تأمین هزینه‌های بازسازی فرو رفته است.

- تنوع خدمات شهرداری: گستردگی وظایف و فعالیت‌های چندبعدی بازسازی (کدهای H, I, J) باعث پراکندگی منابع محدود و تضعیف توان مالی شهرداری در تمرکز بر بافت‌های فرسوده شده است.

جدول ۴. کدگذاری ثانویه و محوری - خلق مفاهیم و مقوله عوامل علی			
مقوله اصلی	مقوله فرعی	کد	کد باز استخراج‌شده از مصاحبه
عوامل علی ارائه الگوی چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری در منطقه ۱ تهران	محدودیت منابع مالی حمایتی	A	تأمین مالی
		B	عدم منابع درآمدی
		C	مشکل در تأمین هزینه بازسازی
		D	نبود درآمدهای پایدار
		E	اعتبارات پایین
		F	بودجه محدود
		G	وظایف متعدد
		K	وابستگی مالی شهرداری
		L	خودمحور بودن برای تأمین هزینه بازسازی
		M	قیدوبندهای قانونی هزینه‌بر
		N	مجوزهای هزینه‌بر
		O	تأمین مالی سخت
		P	خودمحوری تأمین هزینه
		Q	نبود منابع حمایتی
		R	وابستگی به منابع مالی
		S	نبود برنامه مشخص مالی
		T	اختلال در برنامه‌ریزی مالی
	تنوع خدمات شهرداری	H	گستردگی وظایف بازسازی
		I	چندبعدی بودن بازسازی
		J	هزینه‌های چندبعدی

شرایط بستر و زمینه وقوع چالش‌ها در جدول ۵ ترسیم شده است. این جدول نشان می‌دهد شهرداری در محیطی عمل می‌کند که با «هزینه‌های پیش‌بینی‌نشده» (ناشی از مسائل سیاسی و اقتصادی) و «فارس بودن خدمات» مواجه است. نکته حائز اهمیت در این جدول، شناسایی «منابع غیرمجاز درآمدزایی» (مانند تراکم‌فروشی) به عنوان یک عامل زمینه‌ای است که نشان می‌دهد شهرداری برای جبران کسری بودجه به روش‌هایی روی آورده که از نظر پایداری مالی مخاطره‌آمیز هستند. همچنین، «نبود آینده‌نگری مالی» و «وابستگی مالی شهرداری» بستری را فراهم کرده که هیچ تضمینی برای تداوم پروژه‌های بازسازی وجود ندارد.

در ادامه عواملی که به عنوان مداخله‌گر عمل می‌کنند، در جدول ۶ ارائه شده‌اند. «تورم‌های پی‌درپی» و «هزینه‌بر بودن رعایت ضوابط» از جمله مهم‌ترین عوامل مداخله‌گر هستند که بار مالی شهرداری را تشدید می‌کنند. همچنین «بی‌توجهی دولت در تأمین مالی» و «نبود هماهنگی بین عوامل اجرایی» نشان می‌دهد چگونه عوامل بیرونی و ساختار اداری کشور، مانع از عملکرد مؤثر شهرداری شده و پیچیدگی فرایند تأمین مالی را افزایش داده‌اند.

در پاسخ به چالش‌های مطرح‌شده، شرکت‌کنندگان راهبردهایی را پیشنهاد داده‌اند که در جدول ۷ آمده است. راهبردها از رویکردهای تک‌بعدی فراتر می‌روند و شامل «طراحی برنامه تأمین مالی»، «بازنگری در قوانین و مقررات» و «تدبیر منابع درآمدی از محل بودجه عمومی دولت» می‌شوند. نکته کلیدی در این جدول، تأکید بر «تشویق سرمایه‌گذاری بخش خصوصی» و «بازتولید عاطفی ساکنان» است؛ به این معنا که شهرداری نمی‌تواند به‌تنهایی بازسازی را پیش ببرد و باید با جلب اعتماد مردم و سرمایه‌گذاران، منابع مالی جدیدی خلق کند.

جدول ۵. کدگذاری ثانویه و محوری - خلق مفاهیم و مقوله شرایط زمینه‌ای

مقوله اصلی	مقوله فرعی	کد	کد باز استخراج شده از مصاحبه
عوامل زمینه‌ای ارائه الگوی چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری در شهرداری منطقه ۱ تهران	هزینه‌های پیش‌بینی نشده	A	مشکلات سیاسی و اختلال برنامه‌ریزی هزینه‌ها
		B	مشکلات اقتصادی و اختلال در برنامه‌ریزی هزینه‌ها
		C	مشکلات طبیعی و مختل کردن برنامه‌ریزی مالی
		D	مشکلات اجتماعی و مختل کردن برنامه‌ریزی مالی
	فوری بودن خدمات شهرداری	L	فوری بودن
		M	عدم امکان به تعویق انداختن
		N	عدم حمایت‌های کافی از دولت
		O	وظایف اضطراری نیازمند هزینه
	منابع غیر مجاز درآمذایی	R	تراکم‌فروشی
		S	مشکلات درآمذایی
		T	عدم تأمین مالی کافی
	نبود آینده‌نگری مالی	T	نبود آینده‌نگری مالی
	عدم پایداری منابع مالی	A	عدم تأمین مالی در بازسازی بافت‌های فرسوده
	شهرداری	D, L, B	نبود درآمدهای پایدار و کافی برای بازسازی بافت‌های فرسوده
	بودجه محدود	H	توزیع نابرابری بودجه
		Q	عدم شفافیت بودجه
		I	عدم نظارت بر دریافت بودجه
		F	عدم بودجه‌بندی دقیق
	گسترده‌ی وظایف	M, N	فعالیت‌های چندبعدی بازسازی بافت‌های فرسوده
		T	تنوع فعالیت‌های بازسازی بافت‌های فرسوده
	وابستگی مالی شهرداری	D, S, E	عدم استمرار درآمذایی و منابع مالی ناپایدار بازسازی

جدول ۶. کدگذاری ثانویه و محوری - خلق مفاهیم و مقوله شرایط مداخله‌گر

مقوله اصلی	مقوله فرعی	کد	کد باز استخراج شده از مصاحبه
عوامل مداخله‌گر ارائه الگوی چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری در شهرداری منطقه ۱ تهران	هزینه‌بر بودن رعایت ضوابط	R	هزینه‌بر بودن بازسازی بافت‌های فرسوده
		S	هزینه‌بر بودن رضایت شهروندان از بازسازی
		T	هزینه‌بر بودن رعایت ضوابط بازسازی
	هزینه‌بر بودن خدمات مبتنی بر قوانین	A	هزینه‌بر بودن رعایت وضعیت زیست محیطی
		B	هزینه‌بر بودن رعایت اصول فنی
		C	هزینه‌بر بودن رعایت اصول انرژی
	تورم‌های پی‌درپی	D	تورم
		E	افزایش مستمر هزینه‌ها
		F	تورم‌های غیر قابل کنترل
		G	اختلال در پیش‌بینی هزینه‌ها
	خسارت‌های غیر قابل پیش‌بینی	H	خسارت‌های پیش‌بینی‌ناپذیر
		I	تنوع خدمات شهری
		J	بی‌توجهی دولت به نقش خود در مقابل شهرداری
	بی‌توجهی دولت در تأمین مالی	K	عدم اطلاع کافی از منابع مالی
		L	عدم برآورد دقیق مالی
		M	نبود امکان پیش‌بینی منابع مالی
		N	عدم پایداری منابع مالی
		O	عدم تداوم‌پذیری درآمدهای پایدار
		P	عدم حفظ درآمدهای پایدار
	نبود هماهنگی بین عوامل اجرایی بازسازی	Q	شوکه‌ها و بحران‌ها
		R	قدیمی بودن قوانین
		S	تداخل قوانین
		T	نبود هماهنگی بین دستگاه‌های مختلف

جدول ۷. کدگذاری ثانویه و محوری - خلق مفاهیم و مقوله‌ها راهدرا

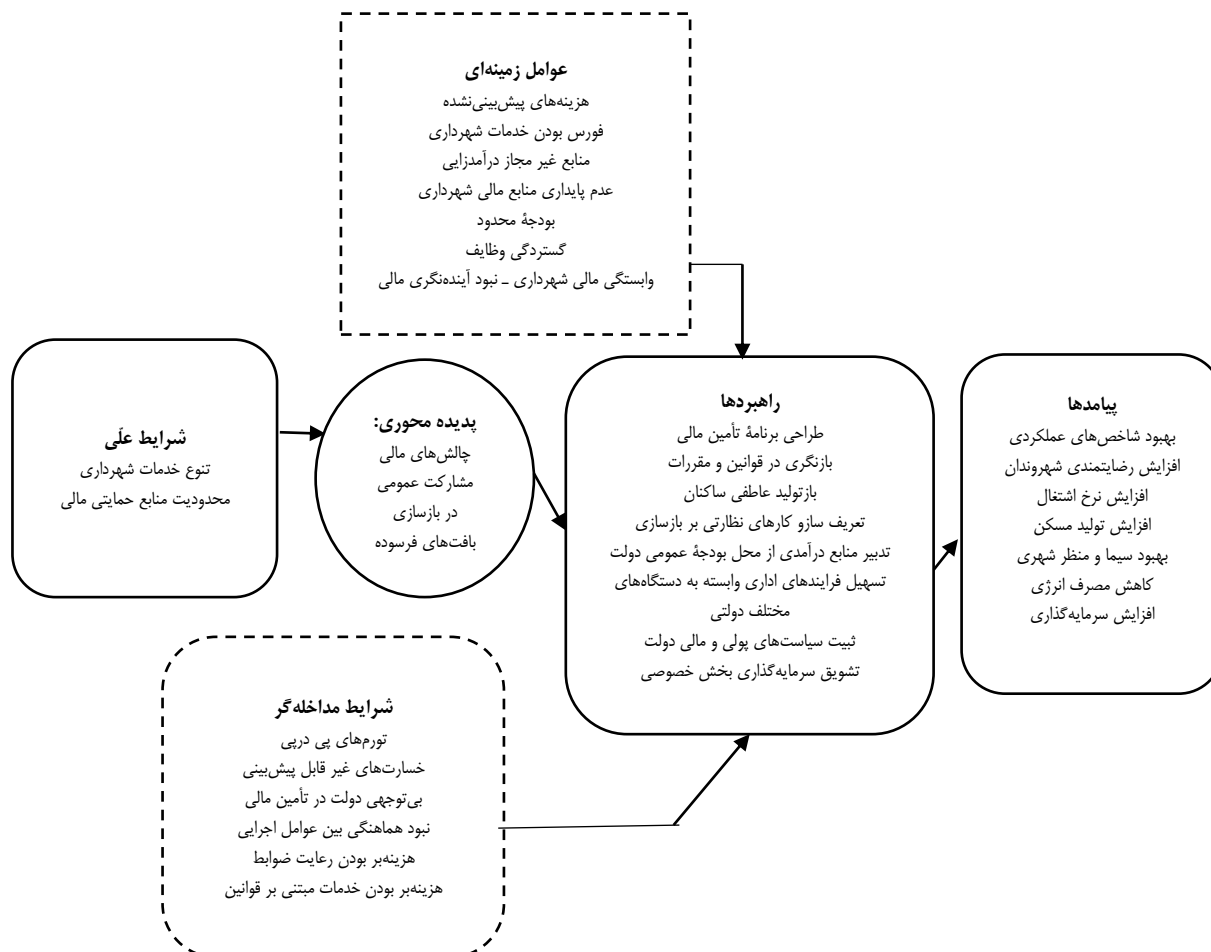
مقوله اصلی	مقوله فرعی	کد	کد باز استخراج شده از مصاحبه
عوامل راهبردی ارائه الگوی چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری در شهرداری منطقه ۱ تهران		A	مشکلات تأمین هزینه‌های بازسازی
		B	مشکلات اقتصادی و اختلال در برنامه‌ریزی هزینه
	طراحی برنامه تأمین مالی	C, D	مشکلات طبیعی و اجتماعی و اختلال در برنامه‌ریزی مالی
		E	عدم ضابطه
	بازنگری در قوانین و مقررات	F	عدم قوانین منطقی مالی بازسازی بافت‌های فرسوده
		K	قوانین متغیر
	بازتولید عاطفی ساکنان	P	بازتولید عاطفی
		Q	بازتولید ساکنان
	تعریف سازوکارهای نظارتی بر بازسازی	R	عدم نظارت
		S	عدم بازرسی دقیق
		T	بی‌توجهی به نحوه از دست رفتن منابع مالی
		A	تأمین مالی از بودجه
		B	عدم منابع درآمدی از بودجه دولتی
	تدبیر منابع درآمدی از محل بودجه عمومی دولت	C	مشکل در تأمین هزینه خدمات از طریق بودجه دولت
		D	نبود درآمدهای پایدار بر اساس بودجه
		E	اعتبارات پایین
		F	بودجه محدود
		G	بودجه تعریف نشده
	تسهیل فرایندهای اداری وابسته به دستگاه‌های مختلف دولتی	H	تسهیل فرایندهای اداری
		I	سهولت در فرایندهای اداری وابسته به دستگاه‌های مختلف دولتی
		J	تسهیل فرایندهای دولتی
	تثبیت سیاست‌های پولی و مالی دولت	K, L	تثبیت سیاست‌های مالی
	تشویق سرمایه‌گذاری بخش خصوصی	R	تشویق سرمایه‌گذاری بخش‌های مجزا
		S	تشویق سرمایه‌گذاری افراد
		T	تشویق سرمایه‌گذاری شرکت‌های خصوصی

جدول ۸ نتایج اجرای راهبردها را نشان می‌دهد. پیامدها فراتر از ابعاد مالی است و اثرات اجتماعی و کالبدی دارند. «بهبود شاخص‌های عملکردی» و «افزایش رضایتمندی شهروندان» پیامدهای مدیریت صحیح مالی هستند. همچنین، «افزایش نرخ اشتغال»، «افزایش تولید مسکن» و «کاهش مصرف انرژی» نشان می‌دهند حل چالش مالی مشارکت عمومی، نه تنها بافت شهری را نوسازی می‌کند، بلکه به پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی منطقه نیز کمک شایانی می‌کند.

جدول ۸. کدگذاری ثانویه و محوری - خلق مفاهیم و مقوله‌ها پیامدها

مقوله اصلی	مقوله فرعی	کد	کد باز استخراج شده از مصاحبه
پیامدهای ارائه الگوی چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری در شهرداری منطقه ۱ تهران	بهبود شاخص‌های عملکردی	A	بهبود شاخص‌های عملکرد شهرداری
		B	بهبود سطح عملکرد شهرداری
	افزایش رضایتمندی شهروندان	E	افزایش رضایتمندی شهروندان
		F	افزایش رضایتمندی افراد
		K	افزایش میزان رضایت شهروندی
	افزایش نرخ اشتغال	P	افزایش نرخ اشتغال
		Q	اشتغال آفرینی
	افزایش تولید مسکن	R	افزایش تولید مسکن
		S	توسعه فرایند ایجاد مسکن
	بهبود سیما و منظر شهری	R	بهبود سیما و منظر شهری
		S	بهبود ظاهر شهری
		T	بهبود بافت شهری
	کاهش مصرف انرژی	R	کاهش مصرف انرژی
		S	صرفه‌جویی در منابع انرژی
		T	پایین آوردن مصرف انرژی
	افزایش سرمایه‌گذاری	R	افزایش سرمایه‌گذاری
		S	توسعه روش‌های سرمایه‌گذاری
		T	بازدهی در سرمایه‌گذاری

در نهایت، با تلفیق جدول‌های ۳ تا ۸، مدل پارادایمی پژوهش در شکل ۱ ترسیم شد. این شکل (نمودار) نشان می‌دهد چگونه «عوامل علی» و «عوامل زمینه‌ای» باعث شکل‌گیری «پدیده محوری» (چالش‌های مالی) شده‌اند و «عوامل مداخله‌گر» (مانند تورم و قوانین) بر این روابط اثر گذاشته‌اند. در سمت راست نمودار، «راهبردها» به عنوان اقدامات اصلاحی معرفی شده‌اند که اگر اجرا شوند، به ظهور «پیامدها» (مانند رضایت شهروندان و اشتغال‌زایی) منجر خواهند شد. این مدل بصری، روابط علی و معلولی چالش‌های مالی شهرداری منطقه ۱ تهران را به صورت یک سیستم پویا و به هم پیوسته نمایش می‌دهد.



شکل ۱. مدل پارادایمی

۵. بحث و نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، ارائه الگوی چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری در شهرداری منطقه ۱ تهران بود. دستاوردهای این پژوهش را می‌توان در دو محور اصلی «دستاوردهای روش‌شناختی (ایجاد مدل بومی)» و «دستاوردهای یافته‌محور (کاربردی)» مورد واکاوی قرار داد:

۵-۱. دستاوردهای روش‌شناختی (ایجاد مدل بومی)

نخستین دستاورد این پژوهش، تولید یک «مدل پارادایمی بومی» است که به خلاف پژوهش‌های پیشین که غالباً به شناسایی عوامل به صورت افقی و فهرست‌وار می‌پرداختند، در اینجا با استفاده از رویکرد داده‌بنیاد، روابط عمیق علی و معلولی میان متغیرها را آشکار ساخت. برای مثال، این پژوهش اثبات کرد که «تراکم‌فروشی» در بافت فرسوده فقط یک روش درآمدی نیست، بلکه در این مدل به عنوان یک «شرایط زمینه‌ای مخرب» (منابع غیرمجاز درآمدزایی) عمل می‌کند که حلقه معیوب وابستگی مالی را تشدید می‌کند. همچنین، کشف مفهوم «بازتولید عاطفی ساکنان» به عنوان یک راهبرد کلیدی در مدیریت مالی پروژه‌ها،

دستاوردی نظری است که نشان می‌دهد راهکارهای مالی در بافت‌های فرسوده، الزاماً پولی نیستند و می‌توانند ریشه در جلب اعتماد و همکاری اجتماعی داشته باشند.

۵-۲. دستاوردهای یافته‌محور (کاربردی)

در این بخش نتایج مدل پارادایمی شرح داده شد.

عوامل علی چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری در شهرداری منطقه ۱ تهران، کدام‌اند؟

طبق کدهای به‌دست‌آمده از مدل پارادایمی، می‌توان گفت که تنوع خدمات شهرداری «گسترده‌گی وظایف بازسازی، چندبعدی بودن بازسازی و هزینه‌های چندبعدی» و محدودیت منابع حمایتی مالی «تأمین مالی، عدم منابع درآمدی، مشکل در تأمین هزینه بازسازی، نبود درآمدهای پایدار، اعتبارات پایین، بودجه محدود، وظایف متعدد، وابستگی مالی شهرداری، خودمحور بودن برای تأمین هزینه بازسازی، قیدوبندهای قانونی هزینه‌بر، مجوزهای هزینه‌بر، تأمین مالی سخت، خودمحوری تأمین هزینه، نبود منابع حمایتی، وابستگی به منابع مالی، نبود برنامه مشخص مالی، اختلال در برنامه‌ریزی مالی» از جمله شرایط علی است. در تبیین این یافته می‌توان گفت که در تبیین این یافته می‌توان گفت که **تنوع خدمات و گسترده‌گی وظایف بازسازی** بیانگر آن است که نهادهای عمومی نظیر شهرداری در مواجهه با بافت‌های فرسوده، تنها با یک چالش فیزیکی روبه‌رو نیستند؛ بلکه ماهیت بازسازی «چندبعدی» است و شامل ابعاد اجتماعی، فرهنگی و زیرساختی می‌شود که به ایجاد «هزینه‌های چندبعدی» و پیچیده می‌انجامد. این پیچیدگی نیازمند منابع وسیع‌تری است که معمولاً در دسترس نیست. از سوی دیگر، **محدودیت منابع حمایتی مالی** به عنوان ریشه اصلی معضل، نشان‌دهنده یک ساختار مالی شکننده است. وقتی شهرداری با «نبود درآمدهای پایدار» و «بودجه محدود» مواجه است، اما به دلیل وظایف محول‌شده و «خودمحوری در تأمین هزینه» مجبور به پوشش تمامی بار مالی است، دچار فشار مزمن می‌شود. عواملی نظیر «قیود و مجوزهای قانونی هزینه‌بر» نیز بر این فشار افزوده و فرایند تأمین مالی را دشوار می‌سازند. در واقع، نبود منابع حمایتی بیرونی و وابستگی شدید به منابع داخلی محدود، موجب «اختلال در برنامه‌ریزی مالی» می‌شود و توانایی بخش عمومی را در مشارکت مؤثر و استمرار پروژه‌های بازسازی به‌شدت تضعیف می‌کند. با توجه به شرایط علی شناسایی‌شده، پیشنهادهای کاربردی زیر ارائه می‌شود:

۱. **ایجاد درآمدهای پایدار اختصاصی:** با توجه به مشکل «نبود درآمدهای پایدار» و «اعتبارات پایین»، شهرداری باید ابزارهای مالی نوین مانند انتشار اوراق مشارکت اسلامی اختصاصی برای بافت‌های فرسوده، یا ایجاد صندوق‌های توسعه محله با مشارکت ساکنان را راه‌اندازی کند تا از نوسانات بودجه عمومی مستقل شود.

۲. **تمرکزگرایی و تفکیک وظایف بازسازی:** برای مقابله با «گسترده‌گی وظایف» و «هزینه‌های چندبعدی»، پیشنهاد می‌شود سازمانی مستقل یا دفتر ویژه‌ای با اختیارات تمرکز یافته برای مدیریت بازحیایی بافت‌های فرسوده تشکیل شود تا از پراکندگی وظایف و هزینه‌های ناشی از آن کاسته شود و پروژه‌ها با سرعت بیشتر پیش بروند.

۳. **اصلاح ساختار بودجه‌ریزی و برنامه‌ریزی مالی:** برای رفع «اختلال در برنامه‌ریزی مالی» و «نبود برنامه مشخص مالی»، لازم است نظام بودجه‌ریزی عملیاتی در این حوزه اجرا شود تا هزینه‌ها دقیقاً با خروجی‌های پروژه مرتبط شده و از اتلاف منابع در هزینه‌های جانبی جلوگیری شود.

۴. **چاره‌جویی قانونی برای حذف قیود هزینه‌بر:** با توجه به «قیود و مجوزهای قانونی هزینه‌بر»، شهرداری باید با نهادهای قانون‌گذاری و دولت مذاکره کرده و درخواست اصلاحیه قوانین کند. پیشنهاد می‌شود «پکیج تسهیلی ویژه بازسازی» تصویب شود که طی آن، بخشی از عوارض و مجوزها برای نوسازی در بافت‌های فرسوده معاف یا تسهیل شود.

۵. **جذب منابع حمایتی دولت و بخش خصوصی:** برای کاهش «خودمحوری در تأمین هزینه» و «وابستگی به منابع مالی داخلی»، شهرداری باید لایحه‌ای برای دریافت بودجه عمرانی مستقل از دولت تهیه کند و همچنین، با ارائه مشوق‌های سرمایه‌گذاری (مانند افزایش تراکم تشویقی)، بخش خصوصی را برای تحمل بخشی از هزینه‌های بازسازی جذب کند.

مقوله محوری چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری در شهرداری منطقه ۱ تهران، کدام‌اند؟

طبق کدهای به‌دست‌آمده از مدل پارادیمی، می‌توان گفت که چالش‌های مالی مشارکت عمومی در بازسازی بافت‌های فرسوده «چالش در خود فرایند بازسازی، چالش درآمد پایدار برای بازسازی، چالش نبود منابع مالی کافی، محدودیت در منابع درآمدی و مالی، عدم پایداری منابع مالی، چالش عدم استمرار درآمدزایی برای بازسازی بافت‌های فرسوده و درآمد شهرداری، وجود منابع مالی ناپایدار، چالش تأمین بودجه مناسب و عدم انطباق بودجه با هزینه‌های واقعی بازسازی» از جمله پدیده محوری است. در تبیین این پدیده می‌توان گفت که: **عدم پایداری منابع مالی** به معنای ناتوانی در ایجاد جریان‌های نقدی ثابت و قابل اطمینان برای پروژه‌های بلندمدت بازسازی است. هنگامی که شهرداری فاقد درآمدهای پایدار باشد، نمی‌تواند تعهدات مالی خود طی زمان پروژه را ایفا کند و این امر مستقیم به توقف یا کیفیت پایین بازسازی منجر می‌شود. این عامل تأثیر قابل توجهی بر شکست پروژه‌های مشارکتی دارد، زیرا عدم تضمین مالی، اعتماد شرکا و شهروندان را خدشه‌دار می‌کند. از طرفی، **عدم انطباق بودجه با هزینه‌ها** به معنای وجود شکاف عمیق بین برآوردهای اولیه هزینه و واقعیت‌های اجرایی پروژه است. در بازسازی بافت‌های فرسوده، هزینه‌ها اغلب غیرقابل پیش‌بینی و بالاست؛ وقتی بودجه تخصیصی با این هزینه‌های سنگین همخوانی ندارد، پروژه با کسری مواجه می‌شود و کیفیت نهایی کاهش می‌یابد. این عامل بر ارزیابی عملکرد مالی شهرداری تأثیر منفی می‌گذارد، زیرا نشان‌دهنده ضعف در برنامه‌ریزی دقیق و واقع‌بینانه است. از سوی دیگر، **چالش شفافیت بودجه** به معنای عدم شفافیت در نحوه هزینه‌کرد منابع و تخصیص بودجه است. زمانی که فرایندهای مالی شفاف نیستند، احتمال بروز فساد و عدم کارایی افزایش می‌یابد و این امر مانعی جدی برای جذب سرمایه‌گذار و مشارکت مؤثر بخش عمومی است. در نهایت، **چالش درآمدزایی** به عنوان یک عامل کلیدی اهمیت دارد. وقتی سازوکارهای درآمدزایی برای بازسازی ناکارآمد باشند، شهرداری با محدودیت منابع مواجه شده و مجبور می‌شود به منابع غیرپایدار یا استقراض متوسل شود. با توجه به حساسیت پروژه‌های بازسازی شهری، حل چالش‌های درآمدی و تأمین منابع پایدار مالی می‌تواند تضمین‌کننده موفقیت و استمرار پروژه‌های توسعه شهری باشد. با توجه به گفته‌های یادشده می‌توان پیشنهاد‌های کاربردی به شرح زیر ارائه کرد:

۱. **ایجاد و تثبیت منابع درآمدی پایدار:** با توجه به چالش «عدم پایداری منابع مالی»، شهرداری باید از اتکا به درآمدهای مقطعی فاصله بگیرد و به سمت استقرار سازوکارهای مالی پایدار حرکت کند. راهکارهایی نظیر انتشار اوراق مشارکت اختصاصی برای بافت‌های فرسوده، ایجاد صندوق‌های توسعه شهری با مشارکت بانک‌ها و اخذ عوارض ویژه بازسازی می‌تواند به تثبیت جریان نقدینگی مورد نیاز پروژه‌ها کمک کند.

۲. **واقع‌سازی و تطبیق بودجه با هزینه‌ها:** برای مقابله با مشکل «عدم انطباق بودجه با هزینه‌ها»، فرایند بودجه‌ریزی باید بر اساس برآوردهای دقیق مهندسی و شاخص‌های واقعی بازار انجام شود. باید در بودجه‌ریزی، ردیف‌های هزینه‌ای برای پیش‌بینی نوسانات اقتصادی و هزینه‌های پیش‌بینی‌نشده پیش‌بینی شود تا شکاف بین اعتبار تخصیص یافته و هزینه‌های عملیاتی کاهش یابد.

۳. **ارتقای شفافیت مالی و نظارت مردمی:** به منظور رفع «چالش شفافیت بودجه»، شهرداری باید سامانه‌ای برای شفاف‌سازی درآمدها و هزینه‌های پروژه‌های بازسازی ایجاد کند. امکان دسترسی شهروندان و ناظران به گزارش‌های مالی و حسابرسی‌شده پروژه‌ها، نه تنها اعتماد عمومی را جلب می‌کند، بلکه زمینه را برای مشارکت جدی‌تر بخش‌های خصوصی و مردمی فراهم می‌آورد.

۴. **تنوع‌بخشی به ابزارهای تأمین مالی:** با توجه به «چالش درآمدزایی» و محدودیت منابع شهرداری، باید سیاست‌های تشویقی برای جذب سرمایه‌گذاری بخش خصوصی تقویت شود. بازنگری در قوانین و تسهیل فرایندهای صدور پروانه و ارائه مشوق‌های مالی (مانند تخفیف در عوارض) به سرمایه‌گذارانی که در بافت‌های فرسوده فعالیت می‌کنند، می‌تواند بار مالی سنگین را از دوش بخش عمومی بردارد.

۵. ایجاد سازوکار هماهنگی با دولت: برای رفع «چالش در منابع مالی» و کمبود بودجه، شهرداری باید با دستگاه‌های اجرایی دولتی وارد مذاکره شود و برای دریافت اعتبارات تکلیفی و بودجه عمرانی مستقیم از طریق بودجه عمومی دولت برنامه‌ریزی کند تا وابستگی به منابع داخلی کاهش یابد.

شرایط زمینه‌ای چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری در شهرداری منطقه ۱ تهران، کدام‌اند؟

طبق کدهای به‌دست‌آمده از مدل پارادیمی، می‌توان گفت که هزینه‌های پیش‌بینی‌نشده «مشکلات سیاسی و اختلال برنامه‌ریزی هزینه‌ها، مشکلات اقتصادی و اختلال در برنامه‌ریزی هزینه‌ها، مشکلات طبیعی و مختل کردن برنامه‌ریزی مالی، مشکلات اجتماعی و مختل کردن برنامه‌ریزی مالی»؛ فورس بودن خدمات شهرداری «فورس مازور بودن، عدم امکان به تعویق انداختن، عدم حمایت‌های کافی از دولت، وظایف اضطراری نیازمند هزینه»؛ منابع غیر مجاز درآمدزایی «تراکم‌فروشی، مشکلات درآمدزایی، عدم تأمین مالی کافی»؛ عدم پایداری منابع مالی شهرداری «عدم تأمین مالی در بازسازی بافت‌های فرسوده، نبود درآمدهای پایدار و کافی برای بازسازی بافت‌های فرسوده»؛ بودجه محدود «توزیع نابرابری بودجه، عدم شفافیت بودجه، عدم نظارت بر دریافت بودجه، عدم بودجه‌بندی دقیق»؛ گستردگی وظایف «فعالیت‌های چندبعدی بازسازی بافت‌های فرسوده، تنوع فعالیت‌های بازسازی بافت‌های فرسوده»؛ وابستگی مالی شهرداری «عدم استمرار درآمدزایی و منابع مالی ناپایدار بازسازی»؛ نبود آینده‌نگری مالی، است بر اساس کدهای استخراج‌شده، شرایط زمینه‌ای محیطی که مشارکت بخش عمومی در آن اتفاق می‌افتد، پر از عدم قطعیت و فشار مالی است. این وضعیت را می‌توان یک «چرخه معیوب مدیریت بحران مالی» نامید. در تبیین این شرایط می‌توان گفت که محیط عمل شهرداری تحت تأثیر عوامل بیرونی و داخلی دچار نوسان است. از یک‌سو، «هزینه‌های پیش‌بینی‌نشده» ناشی از بحران‌های سیاسی، اقتصادی یا طبیعی، برنامه‌ریزی‌های دقیق را نقش بر آب می‌کند و از سوی دیگر، «فورس بودن خدمات» و وجود وظایف اضطراری، شهرداری را مجبور می‌کند تا منابع محدود خود را صرف امور حیاتی و کوتاه‌مدت کرده و نتواند به طور استراتژیک روی بازسازی بافت‌های فرسوده تمرکز کند. این فشارها در حالی است که شهرداری از نظر منابع درآمدی در وضعیت شکننده‌ای قرار دارد؛ به طوری که برای جبران «نبود درآمدهای پایدار» و «بودجه محدود»، متأسفانه به سمت «منابع غیرمجاز درآمدزایی» (مانند اتکای افراطی به تراکم‌فروشی) روی می‌آورد که خود روشی ناسالم و غیرپایدار است. در نهایت، «نبود آینده‌نگری مالی» و «عدم بودجه‌بندی دقیق» باعث می‌شود که سازمان نتواند بر چالش‌های پیش رو مسلط شود و فقط به مدیریت روزمره بپردازد؛ امری که با یافته‌های پژوهش سلطانی‌فرد و حیدریه (۱۴۰۰) مبنی بر آسیب‌پذیری ساختار مالی شهرداری‌ها در پروژه‌های بازسازی، همسو است. با توجه به شرایط زمینه‌ای یادشده، برای خروج از وضعیت بحرانی و تثبیت مالی پروژه‌های بازسازی، پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

۱. ایجاد صندوق ریسک و ذخیره احتیاطی: برای مقابله با «هزینه‌های پیش‌بینی‌نشده» و مشکلات طبیعی/اقتصادی، شهرداری باید یک صندوق ذخیره اختصاصی برای پروژه‌های بازسازی تشکیل دهد تا در بروز بحران‌های فورس مازور، منابع اختصاصی بازسازی خالی نشود و برنامه‌ریزی مالی دچار اختلال نشود.
۲. اصلاح ساختار درآمدی و کاهش اتکا به تراکم‌فروشی: با توجه به مشکل «منابع غیرمجاز درآمدزایی» و نبود درآمدهای پایدار، باید ابزارهای جایگزین و قانونی طراحی شود؛ مانند دریافت «عوارض ویژه نوسازی» از ساکنان و مالکان، یا استفاده از اسناد خزانه اسلامی و اوراق مشارکت به جای فروش تراکم که آثار مخرب شهری دارد.
۳. تفکیک بودجه جاری و عمرانی (حذف رقابت بودجه‌ای): برای حل مشکل «فورس بودن خدمات» و «توزیع نابرابر بودجه»، پیشنهاد می‌شود ردیف بودجه‌ای مستقلی برای بازسازی بافت‌های فرسوده در نظر گرفته شود که امکان جابه‌جایی آن به سایر امور جاری و اضطراری وجود نداشته باشد تا استمرار پروژه‌ها تضمین شود.
۴. تقویت نظام نظارت و شفافیت بودجه‌ای: برای رفع «عدم شفافیت بودجه» و «عدم نظارت بر دریافت بودجه»، پیاده‌سازی سامانه‌های هوشمند حسابداری و گزارش‌دهی مالی ضروری است تا انحرافات بودجه‌ای به‌سرعت شناسایی و اصلاح شوند.

۵. توسعه برنامه‌ریزی استراتژیک مالی: برای مقابله با «نبود آینده‌نگری مالی»، سازمان باید به جای بودجه‌ریزی سالانه، به سمت «برنامه‌ریزی مالی چندساله» حرکت کند تا بتواند منابع درآمدی آینده را پیش‌بینی کرده و برای هزینه‌های چندبعدی بازسازی، برنامه دقیق‌تری تدوین کند.

عوامل مداخله‌گر چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری در شهرداری منطقه ۱ تهران، کدام‌اند؟

طبق کدهای به‌دست‌آمده از مدل پارادیمی، می‌توان گفت که تورم‌های پی‌درپی «تورم، افزایش مستمر هزینه‌ها، تورم‌های غیر قابل کنترل، اختلال در پیش‌بینی هزینه‌ها»؛ خسارت‌های غیر قابل پیش‌بینی؛ بی‌توجهی دولت در تأمین مالی «تنوع خدمات شهری، بی‌توجهی دولت به نقش خود در مقابل شهرداری، عدم اطلاع کافی از منابع مالی، عدم برآورد دقیق مالی، نبود امکان پیش‌بینی منابع مالی، عدم پایداری منابع مالی، عدم تداوم‌پذیری درآمدهای پایدار، عدم حفظ درآمدهای پایدار»؛ نبود هماهنگی بین عوامل اجرایی «شوکه‌ها و بحران‌ها، قدیمی بودن قوانین، تداخل قوانین، نبود هماهنگی بین دستگاه‌های مختلف»؛ هزینه‌بر بودن رعایت ضوابط «هزینه‌بر بودن بازسازی بافت‌های فرسوده، هزینه‌بر بودن رضایت شهروندان از بازسازی، هزینه‌بر بودن رعایت ضوابط بازسازی»؛ هزینه‌بر بودن خدمات مبتنی بر قوانین «هزینه‌بر بودن رعایت وضعیت زیست‌محیطی، هزینه‌بر بودن رعایت اصول فنی، هزینه‌بر بودن رعایت اصول انرژی» است. در تبیین شرایط مداخله‌گر می‌توان گفت که این عوامل به عنوان محیط پیچیده و پرتلهایی عمل می‌کنند که بر فرایند اصلی بازسازی تأثیر می‌گذارند و جهت آن را تسهیل یا تضعیف می‌کنند. نخست، «تورم‌های پی‌درپی» و «خسارت‌های غیرقابل پیش‌بینی»، محیط اقتصادی را بی‌ثبات می‌کند و پیش‌بینی هزینه‌ها را ناممکن می‌سازند که مستقیم به افزایش ریسک سرمایه‌گذاری در بافت‌های فرسوده منجر می‌شود. دوم، «بی‌توجهی دولت در تأمین مالی» به معنای شکاف موجود میان وظایف گسترده شهرداری و منابعی است که دولت حاضر است تخصیص دهد؛ این عامل همراه با «عدم پایداری منابع مالی»، اعتماد به پروژه‌ها را خدشه‌دار می‌کند. سوم، «نبود هماهنگی بین عوامل اجرایی» ناشی از قوانین قدیمی و تداخل قوانین است که بروکراسی را تشدید می‌کند و سرعت عمل را می‌گیرد. در نهایت، «هزینه‌بر بودن رعایت ضوابط و قوانین» (هم در بخش شهروندان و هم در بخش الزامات فنی و زیست‌محیطی) نشان می‌دهد تلاش برای بازسازی استاندارد و پایدار، فشار مالی مضاعفی را به بخش عمومی وارد می‌کند. برای مدیریت عوامل مداخله‌گر و کاهش اثرات مخرب آن‌ها، پیشنهاد‌های زیر ارائه می‌شود:

۱. ایجاد مکانیزم تعدیل قراردادها: برای مقابله با «تورم‌های پی‌درپی» و «خسارت‌های غیرقابل پیش‌بینی»، باید در قراردادهای مشارکت و پیمانکاری، بندهای شناور و مکانیزم‌های تعدیل قیمت پیش‌بینی شود تا از ورشکستگی پیمانکاران و توقف پروژه‌ها در اثر نوسانات اقتصادی جلوگیری شود.
۲. تشکیل ستاد فرماندهی شهرسازی نو سازی: برای رفع «نبود هماهنگی بین عوامل اجرایی» و «تداخل قوانین»، پیشنهاد می‌شود یک ستاد مشترک میان شهرداری، وزارت راه و شهرسازی و سایر دستگاه‌های ذی‌ربط تشکیل شود تا با اختیارات ویژه، مجوزها را تسریع کرده و قوانین متعارض را حل و فصل کند.
۳. لابی‌گری و عقد تفاهم‌نامه‌های مالی ملی: برای کاهش «بی‌توجهی دولت در تأمین مالی»، شهرداری باید با ارائه مستندات دقیق از «تنوع خدمات شهری» و نیازهای بافت‌های فرسوده، دولت را متقاعد به تصویب بودجه‌های ردیف مستقل یا تضمین تسهیلات بانکی دولتی برای این پروژه‌ها کند.
۴. مشوق‌های ویژه برای استانداردها: با توجه به «هزینه‌بر بودن رعایت ضوابط» (فنی، زیست‌محیطی و انرژی)، باید به سازندگان و ساکنان مشوق‌هایی مانند تخفیف در عوارض یا کمک بلاعوض داده شود تا انگیزه اجرای پروژه‌های استاندارد و پایدار با وجود هزینه بالای آن‌ها، حفظ شود.

راهبردهای رفع چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری در شهرداری منطقه ۱ تهران، کدام‌اند.

طبق کدهای به‌دست‌آمده از مدل پارادیمی، می‌توان گفت که طراحی برنامه تأمین مالی «مشکلات تأمین هزینه‌های بازسازی، مشکلات اقتصادی و اختلال در برنامه‌ریزی هزینه، مشکلات طبیعی و اجتماعی و اختلال در برنامه‌ریزی مالی»؛ بازنگری در قوانین و مقررات «عدم ضابطه، عدم قوانین منطقی مالی بازسازی بافت‌های فرسوده، قوانین متغیر»؛ بازتولید عاطفی ساکنان «بازتولید عاطفی، بازتولید ساکنان»؛ تعریف سازوکارهای نظارتی بر بازسازی «عدم نظارت، عدم بازرسی دقیق، بی‌توجهی به نحوه از دست رفتن منابع مالی»؛ تدبیر منابع درآمدی از محل بودجه عمومی دولت «تأمین مالی از بودجه، عدم منابع درآمدی از بودجه دولتی، مشکل در تأمین هزینه خدمات از طریق بودجه دولت، نبود درآمدهای پایدار بر اساس بودجه، اعتبارات پایین، بودجه محدود و بودجه تعریف‌نشده»؛ تسهیل فرایندهای اداری وابسته به دستگاه‌های مختلف دولتی «تسهیل فرایندهای اداری، سهولت در فرایندهای اداری وابسته به دستگاه‌های مختلف دولتی، تسهیل فرایندهای دولتی»؛ تثبیت سیاست‌های پولی و مالی دولت «تثبیت سیاست‌های مالی»؛ تشویق سرمایه‌گذاری بخش خصوصی «تشویق سرمایه‌گذاری بخش‌های مجزا، تشویق سرمایه‌گذاری افراد و شرکت‌های خصوصی» است. در خصوص تبیین باید گفت که در خصوص تبیین باید گفت که راهبردهای شناسایی‌شده برای رفع چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در بازسازی بافت‌های شهری به طور سیستماتیک به مسائل کلیدی پرداخته و در راستای ایجاد یک چارچوب مؤثر طراحی شده‌اند. هر یک از این راهبردها به صورت مستقل و هم‌زمان با یکدیگر می‌توانند نقش مهمی در بهبود سیاست‌گذاری‌ها و فرایندهای اجرایی داشته باشند. به طور خاص، طراحی برنامه تأمین مالی به عنوان نخستین گام می‌تواند به مدیریت بهتر هزینه‌ها و منابع مالی کمک کند؛ در حالی که بازنگری در قوانین و مقررات لازم برای تضمین شفافیت و قانونمندی فرایندها است. همچنین، ارتباط نزدیک با ساکنان و در نظر گرفتن نیازهای عاطفی آن‌ها، نه تنها مشارکت اجتماعی را افزایش می‌دهد، بلکه به تقویت اعتماد عمومی نیز کمک خواهد کرد. اضافه بر این، تعریف سازوکارهای نظارتی مؤثر می‌تواند از ائتلاف منابع جلوگیری کند و پایداری مالی لازم را تضمین کند. در نهایت، تأکید بر تسهیل فرایندهای اداری و تشویق سرمایه‌گذاری بخش خصوصی به دلیل ارائه منابع مالی جدید و کاهش مقدمات اجرایی، اهمیت بسیاری دارد. به طور کلی، این راهبردها مجموعه‌ای جامع از اقداماتی را تشکیل می‌دهند که می‌تواند به تحقق موفقیت‌های بازسازی و توسعه پایدار در بافت‌های شهری کمک کند. با توجه به گفته‌های یادشده پیشنهادها کاربردی راهبردهای رفع چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری در شهرداری منطقه ۱ تهران به شرح زیر است:

۱. راه‌اندازی پلتفرم یکپارچه تأمین مالی و سرمایه‌گذاری: ایجاد سامانه آنلاین تعاملی برای شناسایی، معرفی و اولویت‌بندی پروژه‌های بازسازی، با هدف فراهم‌سازی بستر لازم برای جذب سرمایه‌گذاران بخش خصوصی و نهادهای عمومی و ارائه شفاف اطلاعات فنی و مالی پروژه‌ها، به طوری که سرمایه‌گذاران بتوانند تصمیمات بهتری در خصوص سرمایه‌گذاری‌های خود اتخاذ کنند.
۲. برگزاری دوره‌های توانمندسازی تخصصی: طراحی و اجرای کارگاه‌های آموزشی ویژه مدیران و کارکنان شهرداری و فعالان بخش خصوصی، به منظور ارتقای دانش فنی، مهارت‌های مدیریتی و آشنایی با روش‌های نوین تأمین مالی پروژه‌های شهری، و همچنین ایجاد فضایی برای تبادل تجربیات و بهترین شیوه‌ها در فرایندهای مدیریتی.
۳. کاربردی‌سازی مدل‌های نوین تأمین مالی: بهره‌گیری از سیستم‌های سرمایه‌گذاری جمعی برای جذب سرمایه‌های خرد و محلی، به عنوان یک مکمل برای تأمین مالی پروژه‌های بازسازی بافت‌های فرسوده، با هدف تقویت احساس مشارکت اجتماعی و افزایش مسئولیت‌پذیری در میان ساکنان و سرمایه‌گذاران.
۴. تدوین و اجرای بسته مشوق‌های سرمایه‌گذاری: ارائه مشوق‌های کارآمد نظیر معافیت‌های عوارضی و مالیاتی، و همچنین تسهیلات بانکی کم‌بهره، جهت کاهش ریسک و تشویق سرمایه‌گذاران برای مشارکت در پروژه‌های نوسازی، که می‌تواند به افزایش تمایل بخش خصوصی به سرمایه‌گذاری در پروژه‌های شهری منجر شود.

۵. ایجاد سازوکارهای نظارت و حسابرسی مردمی: تشکیل کمیته‌های نظارتی مستقل متشکل از نمایندگان دستگاه‌های دولتی، جامعه محلی و کارشناسان، برای پایش دقیق مصرف منابع مالی و تضمین شفافیت عملکرد، به طوری که مسئولیت‌پذیری عمومی و اعتماد به سیستم‌های مالی تقویت شود.
۶. استقرار نظام پایش و گزارش‌دهی شفاف: راه‌اندازی سامانه مدیریت اطلاعات برای ثبت، پردازش و انتشار لحظه‌ای داده‌های مرتبط با پیشرفت فیزیکی و وضعیت مالی پروژه‌ها، با هدف جلب اعتماد عمومی و افزایش پاسخ‌گویی، تا ساکنان و سرمایه‌گذاران در جریان روند اجرای پروژه‌ها قرار گیرند.
۷. تقویت دیپلماسی شهری و همکاری‌های بین‌بخشی: شکل‌دهی شبکه منسجم تعاملی میان دستگاه‌های اجرایی، بخش خصوصی و نهادهای عمومی برای هم‌افزایی در برنامه‌ریزی، رفع موانع اداری و تسریع در اتمام پروژه‌ها، که می‌تواند فرایند تصمیم‌گیری را تسهیل و کارایی پروژه‌ها را افزایش دهد.

پیامدهای چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری در شهرداری منطقه ۱ تهران، کدام‌اند؟

طبق کدهای به‌دست‌آمده از مدل پارادیمی، می‌توان گفت که پیامدهای این مطالعه بهبود شاخص‌های عملکردی «بهبود شاخص‌های عملکرد شهرداری، بهبود سطح عملکرد شهرداری»؛ افزایش رضایتمندی شهروندان «افزایش رضایتمندی شهروندان، افزایش رضایتمندی افراد، افزایش میزان رضایت شهروندی»؛ افزایش نرخ اشتغال «افزایش نرخ اشتغال، اشتغال‌آفرینی»؛ افزایش تولید مسکن «افزایش تولید مسکن، توسعه فرایند ایجاد مسکن»؛ بهبود سیما و منظر شهری «بهبود سیما و منظر شهری، بهبود ظاهر شهری، بهبود بافت شهری»؛ کاهش مصرف انرژی «کاهش مصرف انرژی، صرفه‌جویی در منابع انرژی، پایین آوردن مصرف انرژی»؛ افزایش سرمایه‌گذاری «افزایش سرمایه‌گذاری، توسعه روش‌های سرمایه‌گذاری، بازدهی در سرمایه‌گذاری» است. این نتایج با پژوهش‌های نوریامان (۲۰۱۵) همخوانی دارد. در خصوص تبیین باید گفت که چالش‌های مالی در مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری در شهرداری منطقه ۱ تهران پیامدهای شگرف و قابل توجهی را به همراه دارد. این چالش‌ها نه تنها می‌توانند به بهبود عملکرد شهرداری و افزایش رضایتمندی شهروندان منجر شوند، بلکه به ایجاد فرصت‌های شغلی و افزایش تولید مسکن نیز کمک می‌کنند. بهبود سیما و منظر شهری و کاهش مصرف انرژی به عنوان نتایجی از این فرایند، بهینه‌سازی شرایط زیست‌محیطی را نیز ممکن می‌سازد. در نهایت، افزایش سرمایه‌گذاری و توسعه روش‌های نوین تأمین مالی، به ایجاد محیطی پایدار و رونق اقتصادی در این منطقه منجر خواهد شد. از این‌رو، توجه به چالش‌های مالی و ارائه راهکارهای مناسب در این زمینه، می‌تواند به شکل‌گیری یک شهر باکیفیت‌تر و زندگی بهتر برای ساکنان کمک کند. با توجه به گفته‌های یادشده در خصوص پیامدهای چالش‌های مالی مشارکت بخش عمومی در فرایند بازسازی بافت‌های شهری در شهرداری منطقه ۱ تهران، پیشنهادهای کاربردی به شرح زیر است:

۱. بهبود شاخص‌های عملکردی: لازم است سامانه‌های مدیریت اطلاعات و ارزیابی عملکرد در شهرداری به‌روزرسانی شوند تا چرخه بهبود مستمر در خدمات شهری برقرار شود و به ارتقای کیفیت خدمات و مدیریت منابع مالی کمک شود.
۲. افزایش رضایتمندی شهروندان: برگزاری جلسات مشاوره و تعامل با جامعه محلی برای جمع‌آوری نظرات و پیشنهادها، به منظور پاسخ‌گویی بهتر به نیازها و افزایش مفهوم مشارکت اجتماعی.
۳. افزایش نرخ اشتغال: توسعه طرح‌های حمایتی برای ایجاد مشاغل جدید در پروژه‌های بازسازی، از جمله سرمایه‌گذاری در مشاغل محلی، که به ایجاد فرصت‌های شغلی و کاهش بیکاری منجر خواهد شد.
۴. افزایش تولید مسکن: اجرای پروژه‌های مسکونی جدید با تأکید بر نوسازی بافت‌های فرسوده و ارائه تسهیلات مالی برای خریداران، به منظور تأمین نیازهای مسکن شهروندان و بهبود کیفیت زندگی.
۵. بهبود سیما و منظر شهری: توجه به طراحی و بازسازی فضاهای عمومی و پارک‌ها، با هدف ارتقای زیبایی‌شناسی شهری و جذب گردشگران، که می‌تواند به افزایش رضایت ساکنان و بازدیدکنندگان کمک کند.

۶. کاهش مصرف انرژی: استفاده از فناوری‌های نوین در ساختمان‌ها و نوسازی آن‌ها با تمرکز بر بهینه‌سازی مصرف انرژی و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، همچنین ارتقای آگاهی‌های عمومی در مورد صرفه‌جویی در مصرف.

۷. افزایش سرمایه‌گذاری: ایجاد مشوق‌های مالی برای سرمایه‌گذاران خصوصی و فعالان اقتصادی به منظور تشویق آن‌ها به مشارکت در پروژه‌های بازسازی و توسعه زیرساخت‌ها، که می‌تواند به رونق اقتصادی منطقه نیز کمک کند.

در حوزه طراحی مدل پارادایمی، معمولاً محققان آتی با چالش‌ها و محدودیت‌هایی روبه‌رو هستند. در زیر، محدودیت‌ها ارائه می‌شود:

- عدم بررسی شیوه کمی و تمرکز فقط بر روش کیفی و مصاحبه
 - تنها محدود شدن بررسی این مطالعه در یک جامعه خاص، باعث کاهش قابلیت اعمال تعمیم‌پذیری نتایج می‌شود.
- در ادامه پیشنهادهایی برای محققان آتی آورده شده است:
۱. پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی از روش کمی مانند استفاده از پرسشنامه استفاده کنید.
 ۲. پیشنهاد می‌شود این پژوهش را در جوامع دیگری به غیر از جامعه مورد مطالعه، مانند سازمان‌های خدمات‌رسان دولتی، انجام دهید.

منابع

1. Ramezani N, Tamošaitienė J, Sarvari H, Golestanizadeh M. Determining Essential Indicators for Feasibility Assessment of Using Initiative Green Building Methods in Revitalization of Worn-Out Urban Fabrics. *Sustainability*. 2025;17(8):1–22.
2. doi: [10.3390/su17083389](https://doi.org/10.3390/su17083389).
3. Hedayatnezhad Kashi SM, Hashemkhani Zolfani S, Ghane M, et al. Development drivers for urban regeneration and livability in worn-out neighborhoods. *Int J Strateg Prop Manag*. 2025;29(2):81–92. doi: [10.3846/ijspm.2025.23585](https://doi.org/10.3846/ijspm.2025.23585).
4. Dehghan Pour Farashah MH, Niemczewska ZE, Guimarães PPC. Exploring the Effectiveness of Urban Regeneration: The Comparative Study of the Industrial Heritage Sites of Łódź (Poland) and Yazd (Iran). *Eur J Geogr*. 2025;16(2):314–34. doi: [10.48088/ejg.m.far.16.2.314.334](https://doi.org/10.48088/ejg.m.far.16.2.314.334)
5. Alim S, Polak J. Public–private partnerships for future urban infrastructure. *Proc Inst Civ Eng Manag Procure Law*. 2016;169(4):150–8. doi: [10.1680/jmapl.16.00001](https://doi.org/10.1680/jmapl.16.00001).
6. Mirzakhani A, Turró M, Behzadfar M. Sustainable regeneration strategies for the historical city centers of Iran using SWOT and QSPM models. *J Cult Herit Manag Sustain Dev*. 2023;13(4):794–813. doi: [10.1108/JCHMSD-02-2021-0022](https://doi.org/10.1108/JCHMSD-02-2021-0022).
7. Zarei-Rahro A, Taherpour-Kalantari H, Najaf-Beigi R. A Model for Public-Private Partnership in the Public Services Sector. *Manag Dev Process*. 2019;32(1):27–54. doi: [10.29252/jmdp.32.1.27](https://doi.org/10.29252/jmdp.32.1.27).
8. Das D, Shrivastav MK, Krishna SVSP PJS, et al. Public-private partnerships (PPP) in infrastructure financing: A comparative study of developed and developing economies. *Herit Sustain Dev*. 2025;7(1):443–52. doi: [10.37868/hsd.v7i1.1087](https://doi.org/10.37868/hsd.v7i1.1087).
9. Taheri M, Rezvani NS, Shormij RA. Smart City Development: Analyzing the Feasibility of Smart Water Supply Systems in Qazvin. *Int J Invent Eng Sci*. 2025;12(4):15–9. doi: [10.35940/ijies.D1069.12040425](https://doi.org/10.35940/ijies.D1069.12040425).
10. Park EJ, Kang E, Shin Y. Urban regeneration and community participation: a critical review of project-based research. *Open House Int*. 2025;50(5):834–56. doi: [10.1108/OHI-04-2024-0127](https://doi.org/10.1108/OHI-04-2024-0127).
11. Vale de Paula P, Cunha Marques R, Gonçalves JM. Public-Private Partnerships in Urban Regeneration Projects: The Brazilian Context and the Case of “Porto Maravilha” in Rio de Janeiro. *Land*. 2025;14(5):1055. doi: [10.3390/land14051055](https://doi.org/10.3390/land14051055).
12. Gupta N. Urban Development and Banking: Financing Growth, Inclusion, and Sustainability. *Int J Res Publ Semin*. 2024;15(4):188–213. doi: [10.36676/jrps.v15.i4.309](https://doi.org/10.36676/jrps.v15.i4.309).
13. Jandaghi Meibodi, F., Jafarzadeh Najar, M. and Kosari, A. A. (2020). Investigating Factors Affecting owners and Residents Participation in Financing Residential projects of Renovation and Improvement plan of Texture Around the Holy Shrine of Imam Reza. *Urban Economics*, 5(1), 99–112. doi: [10.22108/ue.2021.121523.1133](https://doi.org/10.22108/ue.2021.121523.1133)
14. Noring L. Public asset corporation_ A new vehicle for urban regeneration and infrastructure finance. *Cities*. 2019;11:125–35. doi: [10.1016/j.cities.2019.01.002](https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.01.002).
15. Orekan A, Richard M. A Systematic Review on Land Accessibility for Private Sector Driven Housing Delivery in Urban Areas of Developing Countries. *J Environ Manag Constr Res*. 2025;9(4):1–26. doi: [10.70382/bejemcr.v9i4.037](https://doi.org/10.70382/bejemcr.v9i4.037).
16. Codecasa G, Ponzini D. Public–Private Partnership: A Delusion for Urban Regeneration? Evidence from Italy. *Eur Plan Stud*. 2011;19:647–67. doi: [10.1080/09654313.2011.548471](https://doi.org/10.1080/09654313.2011.548471).
17. Heydari M, Fan Y, Li X, Lai KK. Risk Management in Public-Private Partnerships. 2020:97–9. doi: [10.4324/9781003112051](https://doi.org/10.4324/9781003112051).
18. Chen L, Chang C. Discovering the relationship between economic, socio-cultural factors and popularization of services. *J Harv Bus Rev*. 2021;40(12):2–25. doi: [10.4018/979-8-3693-4151-3.ch015](https://doi.org/10.4018/979-8-3693-4151-3.ch015).
19. Thandapani V, Arulmurugan M. An Economic Study on Income and Expenditure Activities on Nochikuppam Slum Areas, Chennai City. *YMER Digit*. 2021;20(12):545–50. doi: [10.37896/ymer20.12/41](https://doi.org/10.37896/ymer20.12/41).
20. Ng MK, Cook A, Chui WT. The Road Not Travelled: A Sustainable Urban Regeneration Strategy for Hong Kong. *Plan Pract Res*. 2001;16:171–83. doi: [10.1080/02697450120077370](https://doi.org/10.1080/02697450120077370).

21. Luo Z, Li J, Wu Z, Li S, Bi G. Investigating the Driving Factors of Public Participation in Public-Private Partnership (PPP) Projects—A Case Study of China. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(9):1–20. doi: 10.3390/ijerph19095192.
22. Haruță C, Radu BV. Citizen Participation in the Decision Making Process at Local and County Levels in the Romanian Public Institutions. *Transylvanian Rev Adm Sci*. 2010;(6):76–92.
23. Bergh SI, Jari M. Introduction to the Special Journal Issue: Spaces for Change? Decentralization, Participation and Local Governance in the Middle East/North Africa Region. 2010.
24. Jayasena NS, Chan DWM, Kumaraswamy M. A systematic literature review and analysis towards developing PPP models for delivering smart infrastructure. *Built Environ Proj Asset Manag*. 2021;11(1):121–37. doi: 10.1108/BEPAM-11-2019-0124.
25. Khan AT, Bhatnagar V, Siddiqui O. Assessing the Effectiveness and Challenges of Viability Gap Funding (VGF) in Public-Private Partnership (PPP) Infrastructure Projects. *J Inf Syst Eng Manag*. 2025;10(34s):741–50. doi: 10.52783/jisem.v10i34s.5868.
26. Guijie. Public-Private Partnerships for Sustainable Infrastructure Development. *J Lifestyle SDGs Rev*. 2025;5(5):e06622. doi: 10.47172/2965-730X.SDGsReview.v5.n05.pe06622.
27. Rasouli B, Kherdiar S, Bani Mahd B. Application of agency theory for risk allocation of public-private-government partnership in the context of resistance economy (Case study: Water and wastewater industry of Guilan province). *J Quant Stud Manag*. 2024;11(3):107–33. Available from: <https://sanad.iau.ir/fa/Article/935305>. (in Persian)
28. Karimzadeh M. The role of public participation in the reconstruction of dilapidated urban fabric with emphasis on the role of Khoy Municipality. *Mod Res Geogr Sci Archit Urban Plann*. 2023;5(44):229–39. Available from: <https://www.pantajournals.ir/buy.aspx?id=100417&id=100417&t=1>. (in Persian)
29. Akbari N, Andalib A, Toghyani S, Mohamadi M. Identifying barriers to achieving recreational goals in the planning of urban decay laws. *J Appl Res Geogr Sci*. 2021;21(61):24. doi:10.52547/jgs.21.61.447. (in Persian)
30. Abedi S. Financing tools and factors affecting people's participation in environmental rehabilitation of green city (Meta-analysis of studies in Iran). *Urban Econ Plann*. 2020;1(1):1–18. doi:10.22034/UE.2020.09.01. (in Persian)
31. Shahriari MR. Investigating the level of public participation in the reconstruction of dilapidated urban fabric. Case study: Shahdee-e-Allah Street, Shiraz. *Green Archit*. 2019;5(2):10–9. Available from: <http://www.greenarchitecture.ir/post.aspx?id=597>. (in Persian)
32. Abedi S. The Analysis of Status of Urban Renewal Financing Methods in Upstream Documentation and Development Plans Laws of Iran. *Rahyaft*. 2019;29(2):31–52. doi:10.22034/rahyaft.2019.13765. (in Persian)
33. Iranmanesh S, Shakibayi A, Nazari Robati F. Ranking Challenges Facing Construction Investors in Vanished Texture of Kerman. *IUESA*. 2019;7(27):46–55. Available from: <http://iueam.ir/article-1-1245-fa.html>. (in Persian)
34. Zareian K, Sarwar R, Arghan A. Factors affecting the implementation of the public-private partnership model in Tehran urban development. *New Perspect Hum Geogr*. 2018;10(4):232–50. Available from: <https://sanad.iau.ir/fa/Article/859931>. (in Persian)
35. Heydari MT, Meshkini A, Ahadnejad Roushati M. Land recycling in dilapidated areas with the approach of meeting urban housing needs (Case study: dilapidated area of the central part of Zanjan city). *Geogr Space*. 2018;61:1–24. Available from: <http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-3262-en.html>. (in Persian)
36. Amini M, Rahnama MR. Investigating the role of participation of government and private organizations and institutions in the reconstruction of dilapidated urban fabric (case study: Sarshour neighborhood of Mashhad). In: *Proceedings of the Third International Conference on Research in Science and Technology*; 2016. Available from: <https://civilica.com/doc/1746128/>. (in Persian)
37. Bigdali Kazemi F. Pathology of the participation pattern of actors of dilapidated urban textures in the renovation process and presenting a desirable model to increase participation. In: *Proceedings of the National Conference on Sustainable Architecture and Urban Development*; 2013. Available from: <https://civilica.com/doc/214274>. (in Persian)

38. Habibi M, Marsousi N, Ali Akbari E. Identifying and prioritizing appropriate strategies for organizing the dilapidated fabric of the central part of Qazvin city with a sustainable urban regeneration approach using AHP-SWOT techniques. *Q J Hum Environ*. 2013;66:59–75. Available from: <https://sanad.iau.ir/Journal/he/Article/848124>. (in Persian)
39. Fu D, Chen T, Lang W. Evolutionary Patterns and Mechanism Optimization of Public Participation in Community Regeneration Planning: A Case Study of Guangzhou. *Land*. 2025;14(7):1–25. doi: [10.3390/land14071394](https://doi.org/10.3390/land14071394).
40. Shen Y, Tan R, Zhang S. Co-Creation, Co-Construction, and Co-Governance in Community Renewal: A Case Study of Civic Participation and Sustainable Mechanisms. *Land*. 2025;14(8):1–29. doi: [10.3390/land14081577](https://doi.org/10.3390/land14081577)
41. Yang Y, Azmi NF, Hakimi HA, Pan L. Unpacking the Dynamics of Heritage-Led Regeneration: A Structural Equation Modeling Approach for Traditional Villages of Hebei, China. *Land*. 2025;14(9):1–25. doi: [10.3390/land14091925](https://doi.org/10.3390/land14091925).
42. Zhang F, Zhou X. Structural renovation of blocks in build-up area of Jiangnan cities, taking Suzhou new district as an example. *iScience*. 2023;26(12):108553. doi: [10.1016/j.isci.2023.108553](https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.108553).
43. Ragab TS. The crisis of cultural identity in rehabilitating historic Beirut downtown. *Cities*. 2021;28(1):107–14. doi: [10.1016/j.cities.2010.04.001](https://doi.org/10.1016/j.cities.2010.04.001).
44. Corbin J, Strauss A. *Basics of Qualitative Research*. 3rd ed. Thousand Oaks: Sage; 2014.



Examining the Consequences of Moving the Capital to Makran with Hydropolitical Approaches and Hydro-Hegemonic Structures

Ramtin Tavoosi Rad¹ | Mohammad Ansari Ghojghar^{2*} | Arash Malekian³

1. Master Candidate, Department of Reclamation of Arid and Mountainous regions Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: ramtintavosirad@ut.ac.ir

2. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Reclamation of Arid and Mountainous regions Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: ansari.ghojghar@ut.ac.ir

3. Professor, Department of Reclamation of Arid and Mountainous regions Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: malekian@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 27 February 2026
Revised 09 April 2026
Accepted 26 May 2026
Published Online 23 September 2026

Keywords:
Capital Relocation,
Hydropolitics,
Makran Region,
Water Resource Sustainability,
Crisis Management.

ABSTRACT

This study examines the strategic implications and challenges of the proposed relocation of Iran's capital from Tehran to the Makran region, with a particular focus on hydropolitical dimensions and water resource sustainability. Drawing on a comprehensive review of the literature and an analysis of responses collected through a researcher-designed questionnaire administered to experts in water resources management and hydropolitics, the study evaluates the multifaceted consequences of this proposed transition. The questionnaire consisted of three quantitative sections containing ten closed-ended items measured on a five-point Likert scale and was designed to provide an in-depth assessment across three key dimensions: water security, geopolitical implications, and national sustainability. The findings indicate that the current water resource management model in Tehran suffers from significant hydropolitical instability. The relocation of the capital could potentially contribute to a redistribution of power and a shift in the hydropolitical balance toward southeastern Iran. However, expert opinions reveal a critical gap between strategic necessity and infrastructural preparedness. In particular, the inadequacy of existing infrastructure in the Makran region was identified as the primary challenge, receiving agreement from 90% of respondents, while the risk of local conflicts over water resources was recognized as another major concern, supported by 40% of respondents. The study further emphasizes that, given the multidimensional nature of this decision and the strong consensus among respondents—90% of whom expressed support for the proposal—the successful implementation of the capital relocation plan requires a transition from a centralized management framework toward an integrated and coordinated governance model involving multiple sectors. Without substantial investment in water infrastructure and effective management of geopolitical risks, the project may exacerbate environmental and social challenges within the region.

Cite this article: Tavoosi Rad, R.; Ansari Ghojghar, M. & Malekian, A. (2026). Examining the Consequences of Moving the Capital to Makran with Hydropolitical Approaches and Hydro-Hegemonic Structures. *Urban Development Policy Making*, 3 (3), 381-392. DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.581957.1105>



© Authors retain the copyright and full publishing rights.
DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.581957.1105>

Introduction

In recent years, Iran has faced unprecedented water management crises and climatic instabilities. The excessive concentration of economic, political, and infrastructural resources in the current capital (Tehran) has not only placed immense pressure on local ecosystems but has also created significant strategic risks in the face of unforeseen contingencies. The proposal to relocate the capital to the Makran region transcends mere geographical shifting; it represents a geopolitical maneuver aimed at

redefining Iran's role in the Indian Ocean and implementing a new resource management paradigm. However, the core dilemma remains can the hydropolitical infrastructure in the Makran region guarantee the sustainability of a new center of power?

Methodology

This research employs a mixed-methods approach. In the qualitative phase, strategic document analysis was utilized to examine the geopolitical dimensions of the relocation. In the quantitative phase, a review of Library documents and expert surveys—comprising specialists in water resources, politics, and urban planning—were implemented to evaluate hydropolitical sustainability indices and infrastructural readiness in the target region.

Discussion and results

The findings suggest that relocating the capital could trigger a power paradigm shift from the center to the south, redistributing the hydropolitical equilibrium toward the Gulf of Oman and the Indian Ocean. This shift could enhance regional stability through the development of water transfer projects and optimized groundwater management in the south. Nevertheless, statistical analysis reveals a profound gap in this topic. The infrastructural readiness score in the Makran region remains significantly below the threshold required to support a national capital. Furthermore, potential tensions over freshwater resources and the high energy costs associated with large-scale water transfer were identified as critical risks within the sustainability model.

Conclusion

The study concludes that the relocation project faces a high risk of failure without a comprehensive hydropolitical strategy. It is recommended that, prior to any structural implementation, water and sanitation infrastructures in the Makran region be developed with national priority. Additionally, the governance model must transition from a centralized approach toward a "networked and cross-sectoral governance" model to ensure the management of both local and international water-related tensions.



بررسی تطابق پیامدهای انتقال پایتخت به مکران با رویکردهای هیدروپلیتیک و ساختارهای هیدروهمز مون

رامتین طاوسی راد^۱ | محمد انصاری قوجقار^{۲*} | آرش ملکیان^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: ramtintavosirad@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: ansari.ghojghar@ut.ac.ir

۳. استاد، گروه مهندسی احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: malekian@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

کلیدواژه:

هیدروپلیتیک،

منطقه مکران،

پایداری منابع آب،

مدیریت بحران،

ژئوپلیتیک ایران.

پژوهش حاضر پیامدها و چالش‌های استراتژیک طرح انتقال پایتخت ایران از تهران به منطقه مکران را با تمرکز بر ابعاد هیدروپلیتیک و پایداری منابع آب بررسی می‌کند. این مطالعه با استفاده از مطالعات منابع کتابخانه‌ای و تحلیل نظرات حاصل از پرسشنامه محقق ساخته کارشناسان فعال در زمینه منابع آب و مباحث هیدروپلیتیک، ابعاد مختلف این انتقال را مورد ارزیابی قرار داده است. پرسشنامه محقق ساخته در ۳ بخش کمی در ۱۰ گویه بسته با مقیاس لیکرت ۵ درجه‌ای به منظور توصیف عمیق در سه بعد امنیت آبی، پیامدهای ژئوپلیتیک و پایداری ملی طراحی شد. نتایج نشان می‌دهد مدل فعلی مدیریت منابع آب در تهران از نظر هیدروپلیتیک دچار ناپایداری شدید است و انتقال پایتخت می‌تواند به بازتوزیع قدرت و تعادل هیدروپلیتیک به سمت جنوب شرق ایران منجر شود. با این حال، نتایج حاصل از نظرات کارشناسان، شکافی حیاتی میان ضرورت‌های استراتژیک و آمادگی زیرساختی را آشکار می‌سازد. به طوری که عدم کفایت زیرساخت‌های موجود در منطقه مکران با ۹۰ درصد توافق آرا میان پاسخ‌دهندگان و ریسک‌های مربوط به تنش‌های محلی بر سر منابع آب با ۴۰ درصد آرا به عنوان تهدیدهای اصلی در برابر این طرح شناسایی شده‌اند. نتایج پژوهش تأکید می‌کند که با توجه به ماهیت چندبعدی این تصمیم و همچنین، موافقت ۹۰ درصدی و قاطع پاسخ‌دهندگان حاضر در این مقاله، موفقیت این طرح، مستلزم گذار از مدیریت متمرکز به سمت الگوی حکمرانی یکپارچه و هماهنگ میان‌بخش است و بدون تقویت زیرساخت‌های آبی و مدیریت ریسک‌های ژئوپلیتیک، می‌تواند به تشدید بحران‌های زیست‌محیطی و اجتماعی در منطقه منجر شود.

استناد: طاوسی راد، رامتین؛ انصاری قوجقار، محمد و ملکیان، آرش (۱۴۰۵). بررسی تطابق پیامدهای انتقال پایتخت به مکران با رویکردهای هیدروپلیتیک و ساختارهای هیدروهمز مون. *سیاست‌گذاری پیشرفت شهری*، ۳ (۳) ۳۸۱-۳۹۲.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.581957.1105>

© نویسندگان

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.581957.1105>



مقدمه

رشد جمعیت، گسترش شهرها و متنوع شدن فعالیت‌های اقتصادی، دگرگونی وضعیت منابع طبیعی و تخریب محیط زیست، باعث بروز تغییرات در جوامع بشری شده است. رشد جمعیت در این میان مورد ویژه است که بر سایر موارد هم تأثیرگذار بوده و مسائل دیگر را تحت تأثیر قرار داده است. برجسته‌ترین پیامد رشد جمعیت تقاضا برای منابع بیشتر به‌ویژه آب است. تحمیل شرایط پیش‌گفته بر منابع محدود آب بیانگر کاسته شدن از ظرفیت تحمل طبیعت است که هشدارهایی را در خصوص امنیت منابع آب و تنش بر سر آن‌ها به همراه داشته است. سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد نیز مفهوم امنیت آبی را به امنیت غذایی مرتبط کرده و در تعریفی امنیت آبی را توانایی تأمین آب کافی و مطمئن برای جمعیت ساکن در مناطق خشک جهان به منظور رفع نیازهای تولید کشاورزی معرفی می‌کند. بر این اساس، اطمینان واحدهای سیاسی از دسترسی پایدار به منابع آب کافی برای مدیریت بهتر فضای سرزمینی خود موجب طرح مفهومی امنیت آب شده است. امنیت آب به عنوان عملکردی از وابستگی متقابل حوضه‌های مختلف امنیتی است که در داخل شبکه‌ای از نیروهای اجتماعی - اقتصادی و سیاسی در مقیاس مختلف فضایی پخش شده است [۱].

مدیریت منابع و خدمات آب یک وظیفه پیچیده است که باید تعدادی از اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مختلف و اغلب متناقض را برآورده کند. ماهیت خود آب و کاربردهای بی‌شمار آن، نیاز به میانجی‌گری و تنظیم نوعی سیستم ارگانیک که با پیوندهای فیزیکی و وابستگی‌های متقابل مشخص می‌شود که به وابستگی‌های اقتصادی تبدیل می‌شوند را ایجاد می‌کند. این وابستگی‌های متقابل به معضلات سیاستی ناشی از بهره‌برداری از محیط آبی منجر می‌شوند [۲].

ایران با یکی از بحران‌های شدید آبی در تاریخ معاصر خود روبه‌رو است. متوسط بارندگی سالانه به کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر کاهش یافته است. حجم آب‌های سطحی به‌شدت کاهش یافته است. دریاچه ارومیه که زمانی بزرگ‌ترین دریاچه آب شور در خاورمیانه بود از دهه ۱۹۹۰ تا کنون بیش از ۹۰ درصد از سطح خود را از دست داده است. اتکای بیش از حد به آب‌های زیرزمینی باعث کاهش جدی آن شده، به طوری که بیش از ۷۰ کیلومتر مکعب از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۵ از دست رفته و برداشت ناپایدار در ۷۷ درصد از مساحت ایران گزارش شده است. این کاهش به خشک شدن چاه‌ها، آب شور و فرونشست گسترده زمین منجر شده است. بخش‌هایی از استان‌های تهران، اصفهان و کرمان بالاترین نرخ فرونشست در خاورمیانه را نشان می‌دهند که سالانه از ۲۵ سانتی‌متر فراتر می‌رود [۳]. تنش‌های آبی در برخی موارد به شکل بحران یا حتی به جنگ آب منجر شده‌اند. این در حالی است که برنامه‌ها و زیرساخت‌های موجود توان رویارویی با تنش آبی فراگیر کنونی و آینده را ندارند. در این میان، دانش جغرافیای سیاسی یا ژئوپلیتیک که بر سه عامل مناسبات قدرت، قلمرو و قلمرومندی استوار است، مسئله آب را در قالب دانش واژه هیدروپلیتیک تحلیل و بررسی کرده است [۴].

پایتخت به عنوان مرکز سیاسی، اداری، اقتصادی، فرهنگی و اجتماعی حکومت‌ها نقش به‌سزایی در جغرافیای سیاسی و اداری کشورها داشته است و انتخاب مکان آن باید بر اساس الگویی تعریف‌شده انجام شود. پایتخت می‌تواند نماد اقتدار حکومت‌ها باشد و از این رو در معرض ساخت‌وساز، توسعه کالبدی، نظارت دقیق حکومتی، کنترل اقتصادی و امنیتی، رشد جمعیت، توسعه نهادهای علمی، فرهنگی قرار می‌گیرد. در واقع، پایتخت مهم‌ترین عنصر ساختار سیاسی فضا با کارکرد و هویت سیاسی - اداری و نیز کارکردهای اقتصادی، تجاری و فرهنگی است. این واحد فضایی - سیاسی صرف نظر از فلسفه وجودی، ماهیت و کارکردهای سیاسی، اداری، اقتصادی، تجاری، فرهنگی، با توجه به اینکه کانون اقتدار و حاکمیت سیاسی حکومت و نیز تکیه‌گاه اصلی دولت مرکزی به حساب می‌آید و نسبت به سایر عناصر سازمان سیاسی فضا از موقعیت ترجیح برخوردار است، مورد توجه خاص جغرافیای سیاسی است. هنگام مطالعه و تصمیم‌گیری یا برنامه‌ریزی برای تغییر یا انتقال پایتخت باید عوامل کلیدی اثرگذار بر کارکرد پایتخت شناسایی و بررسی شوند. چندی از این عوامل عبارت‌اند از: عوامل سیاسی (تمرکز بر قدرت‌های تصمیم‌گیر)، اداری (تمرکز بر وظایف قضایی، قانون‌گذاری و اجرایی)، فرهنگی (تمرکز بر فعالیت‌ها، نمادین و حمایت فرهنگی از آن فعالیت‌ها)، اطلاعاتی (تمرکز بر منبع اصلی تصمیم‌گیری) و نمادین (تمرکز بر ارزش‌ها و هنجارها) [۵].

کمبود آب و خطر خشکسالی در کلان‌شهر تهران بحرانی جدی است در حالی که مدیریت شهری شیوه‌های انطباقی را اتخاذ نکرده است. خطر خشکسالی و تنش آبی برای کلان‌شهر تهران می‌تواند ضمن افزایش آسیب‌پذیری جامعه و شهر، اثرات منفی بر حوضه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی، سیاسی بگذارد. نگاه بخشی مدیریت نسبت به سیستم یکپارچه انسانی - محیطی شهر، هدررفت منابع آب، تغییر کاربری اراضی نامتناسب با ظرفیت‌های آبی و همچنین، مداخلات انسانی و توسعه زیرساخت‌های خاکستری، مهم‌ترین عوامل کاهش تاب‌آوری تهران هستند [۶].

منطقه مکران در سواحل جنوب شرقی استان سیستان و بلوچستان ایران قرار دارد. این منطقه اخیراً به عنوان گزینه‌ای استراتژیک به منظور انتقال پایتخت از تهران مطرح شد. به دلیل اینکه این منطقه به دریای عمان دسترسی مستقیم دارد و همچنین، امکان گذار به توسعه ساحلی را فراهم می‌سازد، مورد توجه قرار گرفته است [۷]. با این حال، این انتقال از منظر هیدروپلیتیک چالش‌برانگیز است، زیرا مکران در منطقه خشک جنوبی واقع شده و در سالیان اخیر با مشکلات مربوط به منابع آب درگیر بوده است. این انتقال ممکن است باعث دگرگونی تعادل هیدروپلیتیک داخلی و منطقه‌ای شود.

برای درک پیامدهای این تصمیم، باید به تجربیات کشورهای دیگر نگریست که در آن‌ها جابه‌جایی یا توسعه مراکز جدید با چالش‌های مدیریت آب مواجه شده است. تجربه اندونزی (انتقال از جاکارتا به نوسانتارا) یکی از این موارد است. اندونزی در حال انتقال پایتخت خود از جاکارتا (که با غرق‌شدگی و نشست زمین روبه‌روست) به نوسانتارا در جزیره بورنئو است. این انتقال نشان می‌دهد جابه‌جایی پایتخت می‌تواند فشار بر منابع آب در منطقه جدید را به شدت افزایش دهد و مدیریت آب را از یک مسئله شهری به یک مسئله امنیت ملی و اکولوژیک تبدیل کند. تجربه برزیل (انتقال از ریودوژانیرو به برازیلیا) که ابتدا برازیلیا با هدف توسعه داخلی ساخته شد، اما این جابه‌جایی باعث ایجاد چالش‌های بزرگ در تأمین آب برای یک شهر مدرن در دل مناطق نیمه‌خشک شد. این تجربه نشان داد بدون پیش‌بینی دقیق هیدروپلیتیک، پایتخت‌های جدید با بحران‌های تأمین آب مواجه می‌شوند که می‌تواند ثبات سیاسی را تهدید کند. همچنین، تجربیات مشابه مانند ترکیه و کانادا نیز باید مورد بررسی قرار گیرد. با بررسی مقالات مشابه، شکاف‌هایی در زمینه موضوع مورد مباحثه مورد توجه قرار گرفت که باید بررسی شوند. فقدان مدل‌های هیدروپلیتیک در جابه‌جایی پایتخت یکی از این موارد است. اکثر پژوهش‌ها بر جنبه‌های اقتصادی یا زیرساختی تمرکز دارند، اما تأثیر جابه‌جایی قدرت سیاسی بر کنترل و توزیع منابع آب در منطقه مقصد نادیده گرفته شده است. همچنین، تغییر ماهیت تقاضا از آب شیرین داخلی به آب ساحلی و در مورد انتقال از تهران به مکران که مورد بررسی مدل‌های فعلی قرار نگرفته‌اند. ریسک‌های امنیتی و تنش‌های منطقه‌ای از دیگر موارد است. شکاف بزرگی در بررسی این موضوع وجود دارد که چگونه تمرکز منابع آب در منطقه مکران برای تأمین نیاز پایتخت جدید، می‌تواند باعث ایجاد تنش‌های هیدروپلیتیک با جوامع محلی یا حتی کشورهای همسایه در صورت اشتراک منابع شود. در پژوهش‌های فرهادیان و همکاران [۸] به انتقال پایتخت از تهران پرداخته شد و نتایج آن نشان داد آمایش فضایی فضای جغرافیایی و شهری ویژگی تحلیل فضایی نظام مطلوب برنامه‌ریزی شهری چالش مهم برای طرح انتقالی پایتخت به شمار می‌روند.

این پژوهش بر آن است تا با استفاده از رویکرد هیدروپلیتیک، بررسی کند که آیا انتقال پایتخت از تهران به مکران، می‌تواند به ایجاد یک امنیت آبی جدید منجر شود و یا به بحران‌های سیاسی - آبی تبدیل خواهد شد. این مطالعه با ترکیب نظریات سیاست بین‌الملل و نظرات کارشناسان مربوطه چارچوبی ارائه می‌دهد که در آن با تمرکز بر واکاوی هیدروپلیتیک انتقال پایتخت به مکران به بررسی تأثیر این جابه‌جایی بر امنیت آبی، قدرت ژئوپلیتیک و پایداری ملی ایران و عملی بودن طرح حاضر در برهه زمانی کنونی می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

شهر تهران واقع در حوضه مرکزی فلات ایران با مساحت تقریبی ۷۳۰ کیلومتر مربع و جمعیتی بیش از ۹ میلیون نفر، مرکز سیاسی - اقتصادی و نماد تمرکزگرایی است. شهر تهران به دلیل قرارگیری در اقلیم نیمه‌خشک، وابستگی شدید به منابع آبی

محدود مانند سدهای کرج، لتیان و لار، همچنین برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و جمعیتی رو به افزایش، با بحران هیدروپلیتیک روبه‌روست که فرونشست زمین تا ۲۰ سانتی‌متر سالانه و تنش‌های اجتماعی فراوانی را پدید آورده است [۹]. افزایش روزافزون جمعیت این کلان‌شهر همراه با دشوارتر شدن وضعیت خشکسالی و کمبود بارش‌ها در کشور ایران و به‌خصوص اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، ضرورت تغییر رویکرد مدیریت منابع آب در این‌گونه مناطق را دوچندان می‌کند. اگرچه در پژوهش‌های [۵، ۱۰ و ۱۱] با بررسی‌های صورت‌گرفته بر وضعیت ژئوپلیتیک شهر تهران نشان دادند از این لحاظ و با مطالعه بر شاخص‌های ژئوپلیتیک، شهر تهران در وضعیت نیمه‌مطلوب و مطلوب قرار گرفته و به وضعیت نامناسب و بحرانی نرسیده است.

مکران در نوار ساحلی جنوب شرقی ایران در استان‌های هرمزگان و سیستان و بلوچستان واقع شده است. این شهر مساحتی حدود ۱۰۰ هزار کیلومتر مربع دارد. جمعیت فعلی مکران براساس آخرین آمارها بین ۱/۵ تا ۲ میلیون نفر تخمین زده شده است. این منطقه با اقلیم گرم و خشک بیابانی و دسترسی مستقیم به دریای عمان، به عنوان محور توسعه دریامحور شناخته می‌شود. این منطقه از شمال، به رشته‌کوه‌های مکران؛ از غرب، به شهرستان میناب و قشم؛ از جنوب، به دریای عمان و از شرق به پاکستان محدود می‌شود [۱۲]. این منطقه با بحران آب شدیدی درگیر است که یکی از عوامل مهم در عدم موفقیت طرح انتقال پایتخت به این منطقه شناخته می‌شود.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

نوع و رویکرد پژوهش

پژوهش حاضر بر بررسی دو منطقه تهران و مکران به عنوان مکان پایتخت فعلی و گزینه آینده برای انتقال پایتخت می‌پردازد. تهران به عنوان پایتخت حاضر، نماد بحران هیدروپلیتیک داخلی با برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و سطحی است. در حالی که مکران به عنوان گزینه احتمالی انتقال پایتخت، به دلیل موقعیت ارتباطی با دریای عمان و پتانسیل توسعه محور بسیاری را دارد، اما از طرفی با محدودیت‌های آبی شدیدی درگیر است. این پژوهش با رویکرد کاربردی - توصیفی و استفاده از منابع

کتابخانه‌ای و همچنین، نظرات کارشناسان و ذی‌نفعان حوزه آب و هیدروپلیتیک است. در این چارچوب، ابتدا با بهره‌گیری از مرور نظام‌مند پژوهش‌های گذشته مفاهیم کلیدی و ابعاد مؤثر شناسایی شد و سپس با استفاده از داده‌های میدانی، یافته‌های نظری اعتبارسنجی شد. به دلیل چندبعدی بودن طرح موجود به منظور انتقال پایتخت از تهران به مکران، بررسی پیامدهای این تصمیم بدون استفاده از مدل‌سازی‌های کمی پیچیده صورت گرفته و برپایه تحلیل محتوای منابع کتابخانه‌ای و نظرات کارشناسی بنا نهاده شده است. این رویکرد اجازه می‌دهد تا چالش‌های امنیتی آبی و ژئوپلیتیک در چارچوب واقعی تحلیل شود.

جامعه آماری و نمونه‌گیری

جامعه آماری شامل مدیران، کارشناسان و متخصصان حوزه آب و هیدروپلیتیک در دانشگاه‌ها و وزارتخانه‌های مرتبط است. این گروه‌ها به دلیل آشنایی با شرایط واقعی، چالش‌ها و سیاست‌های مرتبط با بازار آب و حکمرانی منابع به عنوان جامعه هدف انتخاب شدند. با استفاده از روش نمونه‌گیری هدفمند و با لحاظ معیارهایی مانند تجربه کاری مرتبط، آشنایی با فناوری‌های نوین و مشارکت در پروژه‌های مدیریتی آب، تعداد ۶۰۰ نفر به عنوان حجم نمونه تعیین شد. پرسشنامه‌ها برای کارشناسان، مدیران دولتی و ذی‌نفعان محلی توزیع شد و طی مدت دو ماه پاسخ‌های حاصل جمع‌آوری شدند. پرسشنامه‌ها به صورت ایمیل و حضوری برای کارشناسان، مدیران و متخصصان توزیع شد و طی مدت یک ماه پاسخ‌های حاصل جمع‌آوری شدند. نمونه‌گیری به روش هدفمند با تکنیک گلوله‌برفی انجام شد. به این منظور ۱۰ کارشناس اولیه شناسایی شده و سپس، از طریق معرفی آن‌ها ۳۰ تا ۵۰ به عنوان نمونه نهایی انتخاب شدند. این روش، مناسب پژوهش‌های کیفی با جامعه محدود و تخصصی است و اطمینان از تنوع جغرافیایی و کارشناسی را تضمین می‌کند.

ابزار جمع‌آوری داده

برای گردآوری داده‌ها از مطالعات کتابخانه‌ای و اسنادی شامل بررسی مقالات علمی، گزارش‌های رسمی وزارت نیرو، اسناد ملی مرتبط با سیاستگذاری و مطالعات بین‌المللی درباره بحران آب و ژئوپلیتیک استفاده شد. همچنین، پرسشنامه محقق‌ساخته در ۳ بخش کمی در ۱۰ گویه بسته با مقیاس لیکرت ۵ درجه‌ای به منظور توصیف عمیق در سه بعد امنیت آبی، پیامدهای ژئوپلیتیک و پایداری ملی طراحی شد. پاسخ‌ها بر اساس مقیاس ۵ درجه‌ای ثبت شد.

روش‌های تحلیل داده

در این روش، پاسخ‌ها پس از پاک‌سازی و کدگذاری اولیه، بر اساس میانگین و الگوی فراوانی گزینه‌های انتخابی مورد ارزیابی قرار گرفتند. سپس، با مقایسه پاسخ‌ها در بین گروه‌های مختلف کارشناسان، روند کلی پاسخ‌ها و تفاوت‌های دیدگاهی استخراج شد. در این پژوهش، تحلیل بر مبنای منطق تفسیر داده‌های میدانی انجام گرفت تا تصویر درستی از نظرات و باورهای کارشناسان نسبت به انتقال پایتخت و تأثیر آن بر معادلات هیدروپلیتیک ارائه شود و از مدل‌های آماری به منظور تحلیل نظرات کارشناسان استفاده به عمل نیامد. این رویکرد امکان بررسی مستقیم تأثیر عوامل مختلف از جمله زیرساخت‌ها، پذیرش اجتماعی، الزامات قانونی و آثار زیست‌محیطی را بر اساس داده‌های واقعی فراهم ساخت. نتایج حاصل به صورت توصیفی و تحلیلی تفسیر شد تا تصویر دقیقی از وضعیت موجود و ظرفیت‌ها ارائه شود. روش تحلیل در این پژوهش، رویکردی توصیفی و مقایسه‌ای دارد و هدف آن، شناخت روابط مفهومی و تجربی میان متغیرها بوده است.

یافته‌های پژوهش

نتایج حاصل از تحلیل پرسشنامه

به منظور سنجش نگرش، آمادگی و میزان آشنایی کارشنان صاحب نظر در بحث هیدروپلیتیک، داده‌های به‌دست‌آمده از پرسشنامه‌ها تحلیل شد. پرسشنامه بین ۶۰۰ نفر از گروه‌های مختلف شامل افراد آکادمیک، اجرایی و پژوهشگران در سرتاسر ایران توزیع شد. نتایج به‌دست‌آمده از پاسخ پرسشنامه‌ها با توجه به موضوعات مشخص شده در آن‌ها به صورت توصیفی و

استنباطی مورد بررسی قرار گرفت تا پیامدهای هیدروپلیتیک انتقال پایتخت از تهران به مکران مشخص شود. جدول ۱ اطلاعات دموگرافیک پاسخ‌دهندگان را نشان می‌دهد.

جدول ۱. اطلاعات دموگرافیک پاسخ‌دهندگان

ویژگی	گروه‌ها	درصد پاسخ‌دهندگان
جنسیت	مرد	۶۰
	زن	۴۰
سن	کمتر از ۲۵ سال	۱
	۲۵ - ۳۵ سال	۲۶
	۳۶ - ۴۵ سال	۳۵
	۴۶ - ۵۵ سال	۱۹
	بیشتر از ۵۵ سال	۱۹
تحصیلات	کارشناسی ارشد	۳۶
	دکتری و بالاتر	۴۰
	کارشناسی	۱۵
	کاردانی	۴
	دیپلم	۵
شغل	آکادمیک	۲۵
		۴۵
	اجرایی	۳۰
	پژوهشی	

جدول ۲. نگرش کارشناسان نسبت به پیامدهای هیدروپلیتیک انتقال پایتخت

ردیف	ابعاد	گویه	امتیاز
۱	نگرش و آگاهی نسبت به وضعیت امنیت آبی	مدل فعلی تهران یک الگوی هیدروپلیتیک متمرکز و ناپایدار است	۹
۲		انتقال پایتخت باعث انتقال تعادل هیدروپلیتیک به سمت جنوب شرق	۶
۳		بدون مدیریت یکپارچه آب، طرح انتقال پایتخت شکست خواهد خورد	۹
۴	تحلیل چالش‌ها، ریسک‌ها و زیرساخت‌ها	زیرساخت‌های فعلی در منطقه مکران برای این طرح کافی نیست	۹
۵		انتقال پایتخت باعث تشدید تنش‌های محلی بر سر منابع آب می‌شود	۶
۶		موقعیت مرزی مکران، ریسک امنیتی را افزایش می‌دهد	۶
۷	پایداری ملی	انتقال، اقتصاد دریامحور را فعال می‌کند	۷
۸		انتقال بدون مشارکت افراد محلی شکست می‌خورد	۸
۹		مدل ترکیبی پایتخت اداری در مکران و اقتصادی در تهران بهترین است	۶

جدول ۳. ماتریس تحلیل نتایج حاصل از پرسشنامه

حوزه تحلیل	شاخص اصلی	سطح اجماع	امتیاز نهایی	وضعیت استراتژیک
حکمرانی آب	ضرورت مدیریت یکپارچه	بسیار بالا	۹	حیاتی
ژئوپلیتیک	بازتوزیع قدرت به جنوب شرق	متوسط	۶	فرصت
زیرساخت	کفایت منابع و امکانات مکران	بسیار پایین	۹	تهدید
پایداری مرکز	ناپایداری مدل فعلی تهران	بسیار بالا	۲	ضرورت تغییر

تحلیل یافته‌های حوزه امنیت آبی و ریسک‌های هیدروپلیتیک

در این بخش، دیدگاه کارشناسان در خصوص چالش‌های حیاتی مدیریت منابع آب در فرایند انتقال پایتخت به مکران طبق جدول‌های ۱ و ۲ مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از پرسشنامه (با مشارکت ۶۰۰ پاسخ‌دهنده) نشان‌دهنده یک تضاد استراتژیک میان فرصت‌های دسترسی به منابع و محدودیت‌های ظرفیت پایداری است.

یافته‌ها نشان می‌دهد حدود ۶۵ درصد از شرکت‌کنندگان بر ضرورت افزایش ظرفیت‌های نمک‌زدایی و مدیریت ریسک‌های هیدروپلیتیک در منطقه تأکید دارند. این سطح از موافقت نشان می‌دهد کارشناسان، انتقال به مکران را بدون زیرساخت‌های پیشرفته تصفیه آب، یک ریسک امنیتی قلمداد می‌کنند. در واقع، از دیدگاه هیدروپلیتیک، امنیت پایتخت جدید مستقیم به توانایی مدیریت نوسانات و کیفیت منابع آب در منطقه وابسته است. از برجسته‌ترین یافته‌های این پژوهش، تأیید فرضیه کاهش فشار بر حوضه‌های مرکزی است، به طوری که تقریباً ۹۰ درصد کارشناسان موافق بودند که انتقال پایتخت باعث کاهش فشار بر حوضه‌های آبخیز مرکزی می‌شود. این یافته، از اصلی‌ترین توجهات محیط زیستی و امنیتی برای بازآرایی مرکز ثقل کشور از تهران به مکران است.

با وجود کاهش فشار بر حوضه‌های مرکزی، یک چالش بسیار جدی در لایه ظرفیت‌پذیری پدیدار شده است. حدود ۹۰ درصد از پاسخ‌دهندگان مخالف این دیدگاه هستند که کم‌آبی مکران تهدیدی برای افزایش جمعیت پایتخت نباشد. این تضاد آماری نشان می‌دهد اگرچه انتقال پایتخت از تهران باعث نجات حوضه‌های مرکزی می‌شود، اما خود منطقه مکران با بحران کم‌آبی روبه‌رو خواهد شد که می‌تواند ظرفیت پذیرش جمعیت پایتخت جدید را به شدت محدود یا تهدید کند.

در راستای شناسایی خطاهای مدیریتی گذشته، ۶۰ درصد کارشناسان معتقدند که تکرار سیاست‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای به عنوان الگویی برای مکران، رویکردی ناکارآمد خواهد بود. این یافته نشان‌دهنده یک ضرورت برای تغییر ساختار در مدیریت آب است. در حوضه مکران نباید به دنبال تأمین آب از حوضه‌های داخلی بود، بلکه باید بر مدیریت منابع محلی و تکنولوژی‌های نوین مانند نمک‌زدایی تمرکز کرد. در مقابل نگرانی‌ها، یک چشم‌انداز مثبت نیز در نتایج مشاهده می‌شود. ۷۰ درصد کارشناسان معتقدند که دسترسی ساحلی مکران می‌تواند امنیت آبی بلندمدت را نسبت به تهران تقویت کند؛ به این معناست که اگرچه چالش‌های زیرساختی وجود دارد، اما پتانسیل استفاده از منابع آب دریا و مدیریت اقیانوسی یک مزیت استراتژیک برای پایتخت جدید فراهم می‌کند که در تهران وجود ندارد. تحلیل پایداری الگوهای موجود و بازآرایی قدرت هیدرولوژیک یکی از یافته‌های کلیدی این پژوهش است. ۸۰ درصد کارشناسان، مدل فعلی در تهران را یک الگوی هیدروپلیتیک متمرکز و ناپایدار قلمداد می‌کنند. این توافق جمعی نشان می‌دهد بحران آب در تهران دیگر تنها یک مشکل محیط زیستی نیست، بلکه یک بحران ساختاری است که پایداری مرکز سیاسی کشور را تهدید می‌کند. در مقابل، ۶۰ درصد شرکت‌کنندگان معتقدند که انتقال پایتخت، تعادل هیدروپلیتیک را به سمت جنوب شرق کشور سوق می‌دهد و باعث بازتوزیع استراتژیک قدرت و منابع می‌شود. در بررسی ابعاد اجتماعی - سیاسی منابع آب، یافته‌ها نشان می‌دهد ۶۰ درصد کارشناسان با فرضیه تشدید تنش‌های محلی بر سر آب مخالف هستند. این امر نشان می‌دهد انتقال پایتخت به معنای ایجاد درگیری میان ساکنان بومی و پایتخت جدید نیست، بلکه چالش اصلی در لایه فنی و مدیریتی است. ۹۰ درصد پاسخ‌دهندگان بر عدم کفایت زیرساخت‌های فعلی مکران تأکید دارند که یکی از چالش‌های مهم طرح حاضر است. در نهایت، تحلیل داده‌ها به یک نقطه اشتراک قطعی منجر می‌شود. ۹۰ درصد کارشناسان معتقدند که بدون یک مدیریت یکپارچه و جامع منابع آب، طرح انتقال پایتخت با شکست مواجه خواهد شد. این دیدگاه به این معناست که موفقیت یا شکست این پروژه بزرگ به توانایی ایجاد یک ساختار حکمرانی جدید بر منابع آب وابسته است.

چالش‌های سیاست خارجی و امنیت منطقه‌ای

یافته‌ها نشان می‌دهد کارشناسان نسبت به پیامدهای سیاسی انتقال به مناطق جنوبی بسیار حساس هستند. با وجود اینکه اکثریت نظرات در برخی حوزه‌ها پراکنده است، اما مشخص است که انتقال بدون آمادگی قبلی ریسک‌های سیاست خارجی را افزایش می‌دهد. این امر تنش‌های ژئوپلیتیک ناشی از تغییر مرکز ثقل قدرت را تأیید می‌کند. از برجسته‌ترین یافته‌های این پژوهش، وجود یک تضاد استراتژیک میان فعال‌سازی اقتصاد و پایداری مالی است. از یک‌سو، اکثریت قاطع کارشناسان معتقدند که انتقال

پایتخت می‌تواند باعث فعال‌سازی اقتصاد در منطقه باحو شود، اما از سوی دیگر، اکثریت کارشناسان هشدار داده‌اند که این انتقال، هزینه‌های زیرساختی و پایداری مالی را به‌شدت تهدید می‌کند. این یافته شکاف پژوهشی مطرح‌شده در مقدمه را تأیید می‌کند. انتقال پایتخت می‌تواند نوعی شوک اقتصادی ایجاد کند که اگر مدیریت هیدروپلیتیک و زیرساختی به‌درستی انجام نشود، سود اقتصادی آن زیر بار هزینه‌های سنگین زیرساختی از بین خواهد رفت.

در حوزه پایداری ملی، نتایج بیانگر حمایت گسترده از رویکرد تمرکززدایی است. کارشناسان معتقدند که جابه‌جایی مرکز قدرت می‌تواند به افزایش انسجام ملی کمک کند. با این حال، نگرانی جدی در مورد بی‌ثباتی در منطقه بلوچستان وجود دارد. این نشان می‌دهد پایداری ملی در مکران، مشروط به مدیریت دقیق چالش‌های امنیتی و اجتماعی منطقه است. با ترکیب نتایج حاصل از نظرات کارشناسان و تحلیل‌های نظری، می‌توان نتیجه گرفت که انتقال پایتخت از تهران به مکران از منظر توسعه اقتصادی و تمرکززدایی دارای پتانسیل بسیار بالایی است، اما از منظر پایداری مالی و امنیت هیدروپلیتیک با ریسک‌های بسیار جدی روبه‌روست.

نتایج حاصل از این پژوهش، تصویری پیچیده از گذار هیدروپلیتیک ایران ارائه می‌دهد که با مقالات علمی موجود در حوزه مدیریت منابع آب و ژئوپلیتیک، قابل مقایسه و تحلیل است. طبق جدول ۳، یافته‌های این تحقیق که نشان‌دهنده موافقت ۸۰ درصدی کارشناسان با ناپایداری مدل هیدروپلیتیک متمرکز در تهران است با نظریات مطرح در حوزه تاب‌آوری شهری همسو است. در مقالات علمی، تمرکز بیش از حد جمعیت و منابع در یک مرکز جغرافیایی باعث ایجاد آسیب‌پذیری سیستمیک می‌شود. این یافته با مطالعه Waters و Adger [۱۳] در مورد مدیریت بحران در کلان‌شهرها همخوانی دارد که تأکید می‌کنند تمرکززدایی از مراکز بحران‌زده، اولین گام در جهت تقویت امنیت ملی است. یافته مهم این پژوهش مبنی بر اینکه ۹۰ درصد کارشناسان، مدل فعلی تهران را یک الگوی هیدروپلیتیک متمرکز و ناپایدار می‌دانند. در واقع، یافته‌های این پژوهش تأیید می‌کند که وضعیت تهران تنها یک بحران کم‌آبی نیست، بلکه یک بحران ساختاری در مدیریت قدرت و منابع است که با نظریات مدیریت ریسک شهری در سطح جهانی همخوانی دارد. در حالی که برخی مطالعات بر مزایای جابه‌جایی پایتخت به مناطق ساحلی تأکید دارند، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد ۹۰ درصد پاسخ‌دهندگان نگران عدم کفایت زیرساخت‌ها و تهدید کم‌آبی مکران برای جمعیت جدید هستند.

مخالفت ۶۰ درصدی شرکت‌کنندگان با تکرار الگوی انتقال آب بین‌حوضه‌ای برای مکران، یافته‌های پژوهش حاضر این نظریه را در سطح ملی تأیید می‌کند. مکران نباید با الگوهای سنتی انتقال آب از حوضه‌های دیگر مدیریت شود، بلکه باید به سمت مدیریت منابع محلی حرکت کند. در نهایت، توافق ۹۰ درصدی کارشناسان بر شکست طرح مورد مطالعه بدون مدیریت یکپارچه آب، مستقیم در راستای اصول بنیادین مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM) که توسط [۱۴] در گزارش‌های جهانی خود بر آن تأکید شده، قرار دارد. گزارش‌های یونسکو بیان می‌کنند که در پروژه‌های عظیم تغییر مرکز ثقل ملی، شکست در حکمرانی آب به شکست پروژه توسعه‌ای منجر می‌شود. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد در مورد طرح مکران، مدیریت یکپارچه شرط اصلی موفقیت طرح مورد مطالعه است.

از چالش‌برانگیزترین یافته‌های این پژوهش، تضاد میان کاهش فشار بر حوضه‌های مرکزی و تهدید کم‌آبی در مکران است. این نتیجه با مفهوم انتقال ریسک هیدرولوژیک در مقالات مربوطه مطابقت دارد. در حالی که بسیاری از مطالعات بر مزایای انتقال پایتخت به مناطق ساحلی برای دسترسی به منابع غیرسنتی تأکید دارند، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد این انتقال لزوماً به معنای رفع بحران نیست، بلکه می‌تواند به جابه‌جایی بحران منجر شود. این موضوع با نظریه تنش‌های آب‌محور که توسط پژوهشگران حوزه امنیت محیط زیست مطرح شده هم‌راستا است. جابه‌جایی جمعیت به مناطق کم‌آب، بدون زیرساخت‌های نمک‌زدایی، تنها به تغییر شکل بحران از نوع کم‌آبی ناشی از خشکسالی به کم‌آبی ناشی از عدم کفایت زیرساخت منجر می‌شود. مخالفت ۶۰ درصدی شرکت‌کنندگان با تکرار الگوی انتقال آب بین‌حوضه‌ای در مکران، یکی از یافته‌های بسیار مهم پژوهش حاضر است. این دیدگاه با رویکرد مدیریت یکپارچه منابع آب که توسط سازمان‌های بین‌المللی ترویج می‌شود، همخوانی دارد. مقالات معتبر در حوزه مدیریت آب در مناطق خشک تأکید می‌کنند که در قرن بیست و یکم، دیگر راهکار انتقال آب از

حوضه‌های دوردست به دلیل هزینه‌های انرژی و تلفات زیست‌محیطی، راهکار غیرپایدار است. یافته‌های این پژوهش تأیید می‌کند که مکران نیازمند یک مدیریت تکنولوژیک‌محور است. تأیید ۶۰ درصدی نقش مکران در تقویت تعادل هیدروپلیتیک به سمت جنوب شرق با نظریه توسعه استراتژیک ساحلی در ژئوپلیتیک مدرن مطابقت دارد. این نتیجه نشان می‌دهد انتقال پایتخت می‌تواند از طریق ایجاد یک قطب جدید اقتصادی - سیاسی، اثرات متوازن‌کننده بر توزیع قدرت در ایران داشته باشد، اما این امر تنها در صورتی امکان‌پذیر است امنیت آبی آن از طریق دسترسی به دریا تضمین شود.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با بررسی ابعاد چندگانه انتقال پایتخت از تهران به مکران از منظر سیاست خارجی، پایداری ملی، پیامدهای ژئوپلیتیک و امنیت آبی به نتایج کلیدی و استراتژیکی دست یافت. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد انتقال پایتخت، بیشتر از یک جابه‌جایی اداری، نوعی شروع بنیادین در ساختار ژئوپلیتیک و هیدروپلیتیک ایران است. از منظر سیاست خارجی و ژئوپلیتیک انتقال به مکران پتانسیل بالایی برای تقویت قدرت ژئوپلیتیک ایران در حوزه دریایی دارد، اما هم‌زمان نیازمند مدیریت هوشمندانه پیامدهای سیاسی و امنیتی در مرزهای جنوبی است تا از بروز تنش‌های ناخواسته جلوگیری شود. در حالی که تمرکززدایی و انتقال به مکران می‌تواند به فعال‌سازی اقتصاد منطقه‌ای و افزایش انسجام ملی بینجامد، اما این فرایند با ریسک‌های جدی در زمینه بی‌ثباتی‌های احتمالی و هزینه‌های عظیم زیرساختی روبه‌رو است. این پژوهش نشان داد انتقال پایتخت می‌تواند فشار بر حوضه‌های آبریز مرکزی را کاهش دهد، اما هم‌زمان با چالش جدی ظرفیت‌پذیری مکران و عدم کفایت زیرساخت‌های فعلی روبه‌رو خواهد بود. به منظور به موفقیت رسیدن طرح مورد مطالعه، باید عبور از الگوهای سنتی مانند انتقال آب بین حوضه‌ای و گذار به سمت مدیریت تکنولوژیک مانند نمک‌زدایی پیشرفته و حکمرانی یکپارچه آب مورد توجه قرار گیرد. بر اساس نتایج این تحقیق، پیشنهاد می‌شود که دولت و سیاست‌گذاران، طرح انتقال پایتخت را نه به عنوان یک پروژه عمرانی، بلکه به عنوان یک پروژه گذار امنیتی - توسعه‌ای تعریف کنند. موفقیت این طرح مشروط به تحقق سه رکن مدیریت یکپارچه منابع آب با تمرکز بر تکنولوژی‌های نوین، ایجاد زیرساخت‌های اقتصادی و اجتماعی برای تضمین پایداری ملی در منطقه و تدوین یک راهکار همه‌جانبه در سیاست خارجی برای مدیریت جایگاه جدید ایران در حوزه دریای مکران است. بدون توجه هم‌زمان به این سه رکن، ریسک‌های هیدروپلیتیک و اقتصادی ممکن است بر فرصت‌های توسعه‌ای و ژئوپلیتیک این طرح غلبه کند.

منابع

1. Asgari S. Hydropolitics of Iran's Water Resources: Consequences of the Water Scarcity Challenge. *Political Organizing of Space*. 2024;6(4):87-106.
2. Cashman A. A watery form of sustainability. *Water and Environment Journal*. 2006;20(1):2-6.
3. Hadei M, Hopke P. K. Civilizational drought: A missing category in the Understanding of iran's water crisis. *Environmental Science & Technology*. 2025;59(27):13529-13531.
4. Mokhtari Hashi H, Kaviani Rad M. Explaining the Hydropolitics Concept. *Journal of Water and Sustainable Development*. 2020; 6(2):15-26. [In Perisan]
5. Motaghi Dastanaei A, Lotfi H, Sadeghi M. Political Geography Dimensions of the Placing and Transferring of Capitals in Iran. *Regional planning*. 2014;16:137-148. [In Perisan]
6. Saboonchi P, Khorsandnikoo M, Masnavi M. R, Motedayen H. strategies to mitigate drought and water stress in tehran through nature-based solutions (nbs), a decision-making based on fuzzy cognitive maps (fcms). *Manzar magazine*. 2023;17(70):26-33. [In Perisan]
7. Al Ahmad L, Mozaffari Z. Model of economic development of Mokran coast with consideration of social and Security considerations. *Defense Economics and Sustainable Development*. 2020;5(16): 81-113. [In Perisan]
8. Farhadian P, Shams M. Feasibility study of changing the capital; spatial analysis approach. *Quarterly of Environmental Planning*. 2020;57. [In Perisan]
9. Zafari H, Rouhani S.M. Investigating the consequences of the groundwater crisis (case study of Tehran). *Crisis Management*. 2015. [In Perisan]
10. Ansari Z, Ghorbani Sepehr A, Khodadad M. Geopolitical Regions of Tehran Based on the Development Index (Case Study: North-Center Geopolitical Area), *Journal of Geographical Science*. 2019;16(30):1-19. [In Perisan]
11. Mottaghi A, Ghorbani Sepehr A, Saloukadz, J. Key Drivers Affecting the Future of Power Relations in Tehran Metropolis with a Scenario-Writing Approach. *spatial planning*. 2024;14(3):59-86. [In Perisan]
12. Sargolzaei J, Pooya M, Tajeri M. Socio-economic development of the Mackoran coast with emphasis on security and defense challenges. *Geography and Regional Planning*. 2026;15(58):418-434. doi: 10.22034/jgeoq.2025.506654.4238 [In Perisan]
13. Waters J, Adger W. N. Spatial, network and temporal dimensions of the determinants of adaptive capacity in poor urban areas. *Global Environmental Change*. 2017;46:42-49.
14. UNESCO. United Nations World Water Development Report: Partnerships and Integrated Water Resources Management (IWRM). UNESCO Publishing. 2023.



Property Valuation and Urban Revenue Collection within a Participatory Governance Framework: The Case of Isfahan

Reza Nasr Esfahani^{1*}  | Mostafa Nabati Nejad²  | Elham Agharian³ 

1. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Economics & Entrepreneurship, Art University of Isfahan, Iran. Email: r.nasr@au.ac.ir

2. Ph.D. in Entrepreneurship, Management and Economics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: nabatine@gmail.com

3. M.A. in Educational Sciences and Psychology, University of Isfahan, Isfahan, Iran. Email: agheryan@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 27 February 2026
Revised 14 April 2026
Accepted 26 May 2026
Published Online 23 September 2026

Keywords:
Participatory Governance,
Property Valuation,
Building Charges,
Area-Based Pricing,
Isfahan.

ABSTRACT

This study was conducted to improve the property valuation system of Isfahan City for the assessment of municipal charges by incorporating the participation of real estate consultants. The research adopted a descriptive-analytical approach and involved 914 participants, including municipal property valuation experts and members of the Isfahan Real Estate Consultants Association, who were selected through random sampling. Data were collected using structured questionnaires based on a detailed geographical zoning framework, with a precise distinction between main and secondary streets. The findings revealed that the average discrepancy between expert-assessed property values and market prices amounted to 60 million Iranian Rials in the residential sector and 130 million Iranian Rials in the commercial sector. In the residential sector, 22% of regional valuation codes exhibited low discrepancies (less than 10%), 31% showed moderate discrepancies (10–30%), and 47% required re-evaluation. The corresponding figures for the commercial sector were 9%, 19%, and 72%, respectively. A hybrid valuation model was developed based on minimizing estimation errors and empirically testing alternative weighting schemes. The optimal model assigned a weight of 70% to expert valuations and 30% to market-based valuations. The results demonstrated that this combination significantly reduced the gap between expert-assessed values and actual market prices. The findings confirm the effectiveness of the proposed hybrid model in urban property valuation systems. It is recommended that the Municipality of Isfahan employ this model for the periodic updating of benchmark property values. The application of the proposed approach can contribute to enhancing the efficiency of building charge assessment mechanisms and increasing transparency in urban governance and municipal management.

Cite this article: Nasr Esfahani, R.; Nabati Nejad, M. & Agharian, E. (2026). Property Valuation and Urban Revenue Collection within a Participatory Governance Framework: The Case of Isfahan. *Urban Development Policy Making*, 3 (3), 393-409. DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.580224.1099>



© Authors retain the copyright and full publishing rights.
DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.580224.1099>

Introduction

Rapid urbanization, increasing land values, and the growing complexity of real estate markets have created significant challenges for municipalities in designing fair and efficient property-based revenue systems. Property taxation and urban charges are among the most stable sources of municipal finance; however, their effectiveness depends heavily on the accuracy, transparency, and timeliness of property valuation systems. In many developing countries, including Iran, a substantial gap exists between administratively assessed values and actual market prices. This discrepancy leads to inefficiencies such as tax inequity, reduced municipal revenues, and declining public trust.

In response, contemporary urban governance has shifted toward participatory models that integrate

stakeholders particularly market actors into decision-making processes. Real estate agents, as key intermediaries with up to date market knowledge, represent a valuable yet underutilized source of information. This study aims to improve the property valuation system in Isfahan by incorporating a participatory, behaviorally informed approach that combines expert assessments with market-based insights.

Materials and Methods

This research adopts a descriptive–analytical methodology. The statistical population includes municipal property experts and licensed real estate agents in Isfahan. A total of 914 participants were selected through random sampling from a pool of invited professionals. Data were collected using structured questionnaires designed based on detailed geographic zoning, distinguishing between main and secondary streets across 15 municipal districts.

Participants were asked to report estimated price ranges for residential and commercial properties based on local market conditions. The collected data were cleaned and analyzed using statistical methods. A total of 2,254 spatial codes were evaluated, generating over 11,500 price observations for each property type. Price discrepancies between expert assessments and market-based estimates were calculated and classified into three categories: low ($\leq 10\%$), moderate (10–30%), and high ($> 30\%$). Additionally, a hybrid valuation model was developed, assigning weights of 70% to expert-based values and 30% to market-based values, to test its effectiveness in reducing valuation gaps.

Results

The findings reveal a significant discrepancy between official municipal valuations and market prices. On average, the difference amounts to approximately 60 million IRR for residential properties and 130 million IRR for commercial properties.

In the residential sector, 22% of zoning codes showed low discrepancy, 31% moderate discrepancy, and 47% required reassessment. In the commercial sector, only 9% exhibited low discrepancy, 19% moderate discrepancy, and a substantial 72% required reevaluation. These results indicate a more pronounced valuation gap in commercial properties, likely due to higher market volatility and speculative dynamics.

The spatial distribution of discrepancies also highlights uneven patterns across different urban areas, confirming that real estate markets operate as localized systems influenced by accessibility, demand, and neighborhood characteristics.

The proposed hybrid model significantly reduced valuation errors by integrating institutional knowledge with real-time market data. The model acts as an information-adjustment mechanism, mitigating both the lag in administrative updates and the volatility of market fluctuations.

Discussion and Conclusion

The observed valuation gap reflects both market failure (due to information asymmetry) and government failure (due to institutional inefficiencies in updating valuation data). Reliance solely on traditional expert-based methods results in outdated and unresponsive pricing, while purely market-driven approaches may introduce excessive volatility and speculative bias.

The hybrid valuation model provides a balanced solution by combining the stability of institutional assessments with the responsiveness of market data. From an economic perspective, this approach aligns with Bayesian information integration, where multiple data sources are weighted to improve estimation accuracy. The empirical results suggest that the current valuation system in Isfahan is relatively inefficient and requires structural reform.

Policy implications of this study emphasize the need for transitioning toward data-driven valuation systems, incorporating automated valuation models (AVMs), geographic information systems (GIS), and continuous data updates. Furthermore, institutionalizing stakeholder participation—particularly through collaboration with real estate professionals—can enhance transparency, legitimacy, and efficiency in municipal finance systems.

Ultimately, this research demonstrates that property valuation is not merely a technical exercise but a multidimensional issue involving urban governance, information economics, and market behavior. Implementing participatory and hybrid valuation frameworks can significantly improve the fairness and effectiveness of urban charge systems, contributing to sustainable urban financial management and increased public trust.



ارزش‌گذاری املاک و اخذ عوارض شهری، رویکرد حکمرانی مشارکتی (مورد مطالعه: شهر اصفهان)

رضا نصر اصفهانی^{۱*} | مصطفی نباتی‌نژاد^۲ | الهام عاقربان^۳

۱. نویسنده مسئول، دانشیار گروه اقتصاد و کارآفرینی، دانشگاه هنر اصفهان، ایران. رایانامه: r.nasr@au.ac.ir
۲. دانش‌آموخته دکتری کارآفرینی، مدیریت و اقتصاد، دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران. رایانامه: nabatine@gmail.com
۳. کارشناسی ارشد، علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: agheryan@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

این مطالعه با هدف بهبود نظام ارزش‌گذاری املاک شهر اصفهان جهت اخذ عوارض شهری با بهره‌گیری از مشارکت مشاوران املاک در شهر اصفهان انجام شد. پژوهش حاضر به روش توصیفی - تحلیلی و با مشارکت ۹۱۴ نفر از کارشناسان املاک شهرداری و مشاوران عضو اتحادیه املاک اصفهان که به شیوه نمونه‌گیری تصادفی انتخاب شده بودند، اجرا شد. داده‌ها از طریق پرسشنامه‌های ساختاریافته مبتنی بر پهنه‌بندی جغرافیایی با تفکیک دقیق گذرهای اصلی و فرعی جمع‌آوری شد. یافته‌های تحقیق نشان داد میانگین اختلاف قیمت ارزش‌گذاری املاک کارشناسی و قیمت‌گذاری بازار در بخش مسکونی ۶۰ میلیون ریال و در بخش تجاری ۱۳۰ میلیون ریال است. در بخش مسکونی، ۲۲ درصد از کدهای منطقه ای دارای اختلاف کم (کمتر از ۱۰ درصد)، ۳۱ درصد اختلاف متوسط (۱۰ تا ۳۰ درصد) و ۴۷ درصد نیاز به بررسی مجدد داشتند. این ارقام برای بخش تجاری به ترتیب ۹ درصد، ۱۹ درصد و ۷۲ درصد بود. مدل ترکیبی پیشنهادی پژوهش بر اساس حداقل‌سازی خطای برآورد و آزمون تجربی ضرایب مختلف طراحی شد که در آن ۷۰ درصد به قیمت کارشناسی و ۳۰ درصد به قیمت بازار اختصاص یافت. نتایج نشان داد این ترکیب توانسته است اختلاف میان ارزش‌های کارشناسی و بازار را به طور معناداری کاهش دهد. نتایج این مطالعه مؤید کارایی مدل ترکیبی در نظام ارزش‌گذاری املاک شهری است. پیشنهاد می‌شود شهرداری اصفهان از این مدل برای به‌روزرسانی دوره‌ای قیمت‌های پایه استفاده کند. کاربست نتایج این پژوهش می‌تواند در جهت کارآمدی بیشتر نظام تعیین عوارض ساختمانی و افزایش شفافیت در مدیریت شهری محسوب می‌شود.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

کلیدواژه:

حکمرانی مشارکت‌مبنا،
ارزش‌گذاری املاک،
عوارض ساختمانی،
قیمت‌گذاری منطقه‌ای،
اصفهان.

استناد: نصر اصفهانی، رضا؛ نباتی‌نژاد، مصطفی و عاقربان، الهام (۱۴۰۵). ارزش‌گذاری املاک و اخذ عوارض شهری، رویکرد حکمرانی مشارکتی (مورد مطالعه: شهر اصفهان). *سیاست‌گذاری پیشرفت شهری*، ۳ (۳) ۳۹۳-۴۰۹.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.580224.1099>

© نویسندگان

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.580224.1099>



۱. مقدمه

رشد فزاینده شهرنشینی، افزایش ارزش زمین و پیچیدگی بازارهای املاک، بسیاری از دولت‌ها و شهرداری‌ها را با چالش‌هایی جدی در زمینه تعیین ارزش پایه برای اخذ مالیات و عوارض املاک مواجه ساخته است [۱]. از مهم‌ترین این چالش‌ها، نحوه دقیق و عادلانه ارزش‌گذاری دارایی‌های غیرمنقول به منظور تعیین مبنای مالیات است. مالیات بر املاک، به عنوان یکی از منابع پایدار و نسبتاً قابل پیش‌بینی درآمد شهری، وابستگی مستقیم به وجود یک نظام ارزش‌گذاری شفاف، به‌روز و مبتنی بر واقعیت‌های بازار دارد [۲].

ارزش‌گذاری رسمی دارایی یک عامل مهم در اقتصاد هر کشور است. ارزش‌گذاری املاک، نه تنها پایه محاسبه مالیات‌های محلی و عوارض خدمات شهری است، بلکه به مثابه ابزاری مؤثر برای برنامه‌ریزی کاربری زمین، هدایت سرمایه‌گذاری، تحقق عدالت مالیاتی و ارتقای پاسخگویی نهادهای عمومی نیز عمل می‌کند [۳]. در نبود یک نظام کارآمد و عادلانه برای برآورد ارزش املاک، پیامدهایی همچون فرار مالیاتی، تبعیض در بار مالیاتی، نارضایتی عمومی و کاهش درآمدهای شهری قابل پیش‌بینی خواهد بود. در چند دهه اخیر، رویکردهای برنامه‌ریزی شهری به سمت درگیر کردن ذی‌نفعان و جوامع محلی در طراحی و اجرای راهکارهای توسعه شهری حرکت کرده است، به طوری که این موضوع به یکی از محورهای اصلی تحقیقات در این حوزه تبدیل شده است. مطالعات نشان می‌دهد فرایندهای برنامه‌ریزی با مشارکت فعال شهروندان می‌تواند به افزایش اثربخشی تصمیم‌گیری‌های شهری منجر شود. این امر سبب شده تا پژوهشگران به بررسی سازوکارهای مختلف برای تقریب دیدگاه‌های متنوع در فرایندهای برنامه‌ریزی بپردازند [۴ و ۵].

گنجاندن نظرات ذی‌نفعان و فعالان موضوع در برنامه‌ریزی شهری نه تنها موجب افزایش مشروعیت تصمیمات، بلکه به عنوان یک ابزار کلیدی در سیاستگذاری‌های شهری شناخته می‌شود. چنین مشارکتی به‌ویژه در مواجهه با مسائل پیچیده اجتماعی، مالی و اقتصادی، امکان در نظر گرفتن دیدگاه‌های متنوع را فراهم می‌سازد [۶]. مطالعات نشان می‌دهد تعامل بین نهادهای مدیریت شهری (شامل برنامه‌ریزان، متخصصان و توسعه‌دهندگان) و سایر ذی‌نفعان می‌تواند به دستیابی به راه‌حل‌های توافقی بینجامد و به تقویت هویت جمعی و انسجام اجتماعی در بافت‌های شهری کمک کند [۷].

در سطح جهانی، کشورها رویکردهای متنوعی را در طراحی و اجرای نظام ارزش‌گذاری دارایی‌های غیرمنقول برگزیده‌اند. برخی بر روش‌های سنتی مبتنی بر ارزیابی دستی تأکید دارند، در حالی که برخی دیگر با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS)، مدل‌های خودکار ارزش‌گذاری (AVM) و داده‌های بزرگ (Big Data)، فرایند ارزش‌گذاری را شفاف، سریع و مبتنی بر شواهد کرده‌اند [۸].

در ایران، اگرچه چارچوب قانونی برای اخذ عوارض نوسازی و مالیات بر املاک وجود دارد، اما ضعف نظام اطلاعاتی، فاصله معنادار میان ارزش واقعی و ارزش منطقه‌ای و عدم به‌روزرسانی، موجب ناکارآمدی جدی در این حوزه شده است. یکی از منابع اصلی درآمد شهرداری‌ها، به عنوان نهادهای اجرایی مسئول در امور شهری، دریافت عوارض از شهروندان است که از جمله این عوارض، عوارض مرتبط با ساخت‌وساز است. در این فرایند، تعیین «ارزش پایه» املاک یکی از پیش‌نیازهای اصلی محاسبه عوارض به صورت صحیح و عادلانه است برای تعیین این ارزش، به طور معمول قسمت‌های منطقه‌بندی را در ضریب مصوب شورا ضرب کرده تا مبنای محاسبه عوارض ساختمانی به دست آید (قیمت تراکم). به این دلیل که قیمت‌های منطقه‌ای مصوب و غیر قابل تغییر از طرف شهرداری است. کارشناسان املاک مناطق شهرداری همه‌ساله براساس برداشت خود از قیمت‌های بازار لیست از ضرایب را تهیه و جهت تصویب به شورای اسلامی شهر پیشنهاد می‌دهند (دفترچه تراکم). در بررسی‌های انجام‌شده دیدگاه‌های کارشناسان شهرداری به واقعیت‌های بازار تفاوت دارد. لذا، چالش‌هایی در فرایند محاسبه عوارض ساخت‌وساز ایجاد شده است. مقاله حاضر تلاش می‌کند با مرور مفاهیم پایه، معرفی روش‌های متداول ارزش‌گذاری و تحلیل تطبیقی تجارب کشورها، چارچوبی پیشنهادی برای بهبود نظام ارزش‌گذاری املاک در شهرداری ارائه کند.

۱. روش AVM (Automated Valuation Model) در ارزش‌گذاری املاک، یک رویکرد مبتنی بر داده و مدل‌های آماری/یادگیری ماشین است که برای برآورد سریع و نسبتاً دقیق ارزش ملک بدون نیاز به ارزیابی حضوری به کار می‌رود. این روش امروز در بسیاری از نظام‌های مالیات‌ستانی و مدیریت شهری به عنوان ابزار پایه در تعیین ارزش املاک استفاده می‌شود.

۲. چارچوب نظری و مفهومی

۲-۱. حکمرانی شهری

تحولات اخیر در عرصه سیاستگذاری و برنامه‌ریزی شهری نشان‌دهنده گذار از الگوی سنتی حکومت به سمت الگوی حکمرانی مشارکتی است که در آن کلیه ذی‌نفعان در فرایند تصمیم‌سازی نقش‌آفرینی می‌کنند، این تحول مفهومی که تحت عنوان «حکمرانی تعاملی» شناخته می‌شود، بر ضرورت ایجاد بسترهای مناسب برای تعامل سازنده بین بازیگران مختلف تأکید دارد. در این چارچوب، ایجاد فضای گفت‌وگو، تبادل دانش و همکاری مبتنی بر مسائل عینی میان تصمیم‌گیران رسمی و شهروندان به عنوان عنصر کلیدی حکمرانی نوین شهری مورد توجه قرار گرفته است [۹].

در حوزه مدیریت شهری، این تحولات منجر به ظهور مفهوم «حکمرانی شهری مشارکتی» شده که در آن سه ضلع اصلی دولت، بخش خصوصی و نهادهای مدنی در حل چالش‌های پیچیده شهری همکاری می‌کنند [۱۰]. این الگوی حکمرانی که در تقابل با رویکردهای متمرکز و سلسله‌مراتبی سنتی قرار دارد، به دنبال دستیابی به اهدافی همچون توسعه پایدار، ارتقای کیفیت زندگی شهری و تقویت انسجام اجتماعی است. با این وجود، شواهد نشان می‌دهد بسیاری از برنامه‌های مشارکتی هنوز نتوانسته‌اند تأثیر ملموسی بر روند برنامه‌ریزی و توسعه شهری داشته باشند [۱۱].

مفهوم حکمرانی شهری مشارکتی از دو دیدگاه نظری استفاده می‌کند. نخست رویکرد تکثرگرایانه که بر مشارکت گسترده گروه‌های اجتماعی تأکید دارد و دوم دیدگاه گفت‌وگومان‌محور که بر اهمیت فرایندهای مشورتی در تصمیم‌گیری‌های جمعی تأکید می‌کند این چارچوب نظری مستلزم توانمندسازی شهروندان و به‌ویژه گروه‌های محروم در فرایندهای تصمیم‌گیری شهری است [۱۲]. از منظر نظریه ذی‌نفعان نیز سازمان‌های شهری موظف‌اند منافع تمام گروه‌های ذی‌نفع را در تصمیمات خود مد نظر قرار دهند و سازوکارهای لازم برای شنیده شدن صدای تمام شهروندان را فراهم آورند [۱۳]. در این راستا، مشارکت شهروندان در مدیریت شهری نه تنها یک حق مدنی، بلکه در حکمرانی نوین شهری ضروری است. پژوهش‌ها نشان می‌دهند سطح مشارکت شهروندان تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله ویژگی‌های فرهنگی، ساختارهای حکمرانی و منافع شخصی قرار دارد. شاخص‌هایی همچون میزان رسمیت، تداوم و داوطلبانه بودن مشارکت، کیفیت تعاملات شهروندی را در فرایندهای تصمیم‌گیری شهری تعیین می‌کنند. اگرچه برخی مطالعات نشان می‌دهد شهروندان با سطح تحصیلات و درآمد بالاتر تمایل بیشتری به مشارکت مدنی دارد، اما باید توجه داشت که احساس عدم تأثیرگذاری می‌تواند به عنوان مانعی جدی در مشارکت تمامی اقشار جامعه عمل کند [۱۴].

۲-۲. ارزش‌گذاری املاک

ارزش‌گذاری املاک فرایندی است برای تعیین بهای یک دارایی غیرمنقول مانند زمین، ساختمان یا هر نوع ملک دیگر در یک مقطع زمانی مشخص. این فرایند، اساس بسیاری از تصمیم‌گیری‌های اقتصادی، حقوقی و مالی در حوزه برنامه‌ریزی شهری، سرمایه‌گذاری، اخذ مالیات، و ارزیابی دارایی‌های عمومی و خصوصی را تشکیل می‌دهد [۱۵].

تعریف ارزش: در ادبیات ارزش‌گذاری املاک، اصطلاح «ارزش» دارای معانی مختلفی است که باید با دقت از یکدیگر تفکیک شوند. چهار نوع اصلی از ارزش‌ها که در سیاستگذاری مالیاتی و شهری اهمیت دارند [۱۶]، عبارت‌اند از:

- **ارزش بازار:** قیمتی است که یک ملک احتمالاً در بازار آزاد و رقابتی، در صورت فروش میان یک خریدار و فروشنده آگاه و بدون اجبار، خواهد داشت. این تعریف مطابق با استانداردهای جهانی ارزیابی املاک (IVS) به عنوان پایه اصلی برای ارزش‌گذاری املاک پذیرفته شده است.
- **ارزش معاملاتی یا ارزش دفترچه‌ای:** ارزشی است که در معاملات رسمی یا اسناد دولتی برای یک ملک ثبت شده است. در برخی کشورها (مانند ایران)، این رقم معمولاً کمتر از ارزش واقعی بازار است و به محاسبه مالیات ناعادلانه منجر می‌شود.

- **ارزش اجاری:** مقدار درآمد سالانه یا ماهانه‌ای که انتظار می‌رود ملک در شرایط عادی بازار ایجاد کند. در برخی کشورها مانند بریتانیا، پایه محاسبه مالیات بر املاک^۱ بر اساس ارزش اجاری فرضی تنظیم شده است.
- **ارزش مالیاتی:** ارزشی است که توسط یک نهاد عمومی یا اداره مالیات برای محاسبه مالیات بر ملک تعیین می‌شود. این عدد ممکن است با ارزش بازار تفاوت داشته باشد و معمولاً تحت تأثیر سیاستگذاری‌های خاص نظیر معافیت‌ها، تعدیلات منطقه‌ای یا سقف‌های افزایش سالانه قرار دارد [۱۷].

۲-۳. روش‌های ارزش‌گذاری در نظام مالیه شهری

ارزش‌گذاری املاک، بنیان فنی و اقتصادی محاسبه مالیات بر دارایی‌های غیرمنقول است. کیفیت و دقت این فرایند به طور مستقیم بر عدالت مالیاتی، کارآمدی درآمدی و مشروعیت نظام مالیاتی تأثیر می‌گذارد. به‌ویژه در محیط‌های شهری، که تنوع مکانی و اقتصادی بالایی در املاک وجود دارد، روش‌های ارزش‌گذاری باید بتوانند تفاوت‌های فضایی، کاربری‌های مختلف و شرایط بازار را به‌درستی بازتاب دهد.

از منظر نظری، ارزش‌گذاری را می‌توان بخشی از نظام اطلاعاتی مالیاتی و نیز ابزاری برای تنظیم رفتار شهروندان و فعالان اقتصادی در بازار املاک دانست. به بیانی، اگر ارزش‌گذاری‌ها عادلانه و قابل پیش‌بینی باشد، می‌تواند انگیزه سرمایه‌گذاری صحیح، کاهش سوداگری و مشارکت داوطلبانه در پرداخت مالیات را تقویت کند. انتخاب روش مناسب برای ارزش‌گذاری املاک، به هدف ارزش‌گذاری، داده‌های موجود، ساختار بازار، و ظرفیت نهادی کشور بستگی دارد. در **نظام‌های شهری**، معمولاً از سه روش اصلی استفاده می‌شود که گاه به صورت ترکیبی یا با کمک فناوری‌های نوین نیز اجرا می‌شود [۱۸]. در ادامه، این روش‌ها معرفی می‌شود.

- **روش مقایسه‌ای:** این روش بر پایه مقایسه ملک مورد نظر با املاک مشابهی که اخیراً در همان منطقه فروخته شده بنا شده است. فرض اساسی این است که ارزش بازار یک ملک را می‌توان از قیمت معاملات اخیر املاک مشابه به دست آورد. این روش در بسیاری از ایالت‌های آمریکا، کانادا و استرالیا پایه اصلی ارزش‌گذاری مالیاتی محسوب می‌شود [۱۹].
- **روش درآمدی:** در این روش، ارزش ملک بر اساس درآمدی که می‌تواند در آینده تولید کند، محاسبه می‌شود. این روش عمدتاً در مورد املاک تجاری یا اجاره‌ای به کار می‌رود. فرمول پایه آن معمولاً به صورت تقسیم درآمد خالص سالانه بر نرخ بازده مورد انتظار است [۲۰].

- **روش هزینه‌ای:** در این روش، ارزش ملک از طریق برآورد هزینه بازسازی ملک (با لحاظ استهلاک) و اضافه کردن قیمت زمین محاسبه می‌شود. این روش بیشتر برای املاک خاص یا غیرقابل مقایسه کاربرد دارد، مانند ساختمان‌های عمومی، مدارس، بیمارستان‌ها یا تأسیسات صنعتی.

مدل‌های خودکار ارزش‌گذاری (از ترکیب روش‌ها به همراه فناوری‌هایی مانند سیستم اطلاعات مکانی) بر پایه الگوریتم‌های آماری و یادگیری ماشین، داده‌های گسترده‌ای از بازار املاک، ویژگی‌های ملک و موقعیت جغرافیایی را برای تخمین ارزش املاک به کار می‌گیرد. برای دستیابی به ارزش‌گذاری دقیق‌تر و منصفانه‌تر، تحلیل داده‌های بزرگ، پردازش تصاویر ماهواره‌ای و هوایی و هوش مصنوعی (AI) استفاده می‌شود. این فناوری‌ها به ارزیابان و نهادهای مالیاتی کمک می‌کند تا تفاوت‌های مکانی، تغییرات بازار و ویژگی‌های فیزیکی املاک را بهتر تحلیل کنند. در کشورهای نظیر هلند، سوئد، نیوزیلند و برخی ایالت‌های آمریکا نمونه‌های از این روش‌ها استفاده است.

۲-۴. تحلیل تطبیقی تجربیات جهانی در ارزش‌گذاری املاک برای اخذ مالیات

مطالعات بانک جهانی و IMF نشان می‌دهد اکثر کشورهای درحال توسعه با فقدان زیرساخت‌های داده‌ای، کمبود نهادهای تخصصی و ضعف در شفافیت مالکیت مواجه‌اند [۲۱]. برای مثال در نیجریه، به دلیل نبود سامانه جامع املاک، ارزش‌گذاری دقیق تقریباً ناممکن است. در مقابل، کشورهایی مانند هند و اندونزی با اجرای سیستم‌های دیجیتالی مبتنی بر GIS در چند سال اخیر،

توانسته‌اند بخشی از مشکلات را کاهش دهند [۲۲]. همچنین، برخی کشورها مانند فیلیپین از مدل‌های ترکیبی بین ارزیابی میدانی و الگوریتمی استفاده می‌کنند که در حال گسترش است. با دیجیتالی‌سازی، یکپارچگی داده‌ها و آموزش کارشناسان، فرصت تحول وجود دارد؛ اما تحقق این هدف، نیازمند عزم سیاسی، حمایت مالی و مشارکت بین‌بخشی است [۲۳]. کشورها بسته به ساختار نهادی، ظرفیت‌های اجرایی و اهداف مالیاتی خود، رویکردهای متفاوتی در ارزش‌گذاری املاک اتخاذ کرده‌اند. با این حال، سه اصل کلیدی در نظام‌های موفق ارزش‌گذاری مشاهده می‌شود: دقت، شفافیت و به‌روزرسانی مستمر. در ادامه، چند نمونه برجسته مرور می‌شود.

- **ایالات متحده آمریکا (ارزش‌گذاری مبتنی بر بازار همراه با سیستم ارزیابی انبوه):** در آمریکا، هر ایالت و ناحیه محلی سیستم مالیاتی و ارزش‌گذاری خاص خود را دارد، اما در بیشتر مناطق، مالیات بر املاک بر پایه ارزش بازار فعلی ملک تعیین می‌شود. دفاتر ارزیابی محلی از روش‌های مقایسه‌ای، درآمدی، یا مدل‌های خودکار ارزش‌گذاری (AVMs) برای محاسبه ارزش استفاده می‌کنند از ویژگی‌های این روش می‌توان به استفاده گسترده از سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS)، به‌روزرسانی ارزش‌ها هر سال یا هر چند سال یک‌بار، امکان اعتراض و بررسی مجدد توسط مالک اشاره کرد. مطالعات نشان می‌دهند این مدل توانسته درآمد پایدار و نسبتاً عادلانه‌ای برای دولت‌های محلی ایجاد کند [۲۰].
- **انگلستان (نظام ارزش‌گذاری مبتنی بر ارزش اجاری فرضی):** در انگلستان، مالیات‌های شهری (Council Tax) بر اساس ارزش اجاری فرضی ملک در سال پایه ۱۹۹۱ محاسبه می‌شوند. املاک به نوارهایی طبقه‌بندی شده‌اند و مالیات بر اساس این طبقه‌ها تعیین می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به سادگی و سهولت در اجرا و پیش‌بینی‌پذیری برای مالکان و از معایب آن می‌توان به عدم به‌روزرسانی ادواری اشاره کرد که باعث بی‌عدالتی شده و با ارزش‌ها با واقعیت کنونی بازار تفاوت زیادی دارند. این تجربه نشان می‌دهد عدم بازنگری مستمر در ارزش‌گذاری می‌تواند موجب فرسایش عدالت مالیاتی شود [۲۴].
- **کشورهای اسکاندیناوی (سوئد، دانمارک) (استفاده از مدل‌های خودکار و بازبینی منظم):** در سوئد، اداره مالیات ملی مسئول ارزش‌گذاری کلیه املاک کشور است. ارزش‌گذاری بر اساس مدل‌های ریاضی پیچیده (AVM) و اطلاعات گسترده ثبت‌شده در سیستم‌های ملی املاک انجام می‌شود. هر ملک به صورت جداگانه ارزش‌گذاری شده و بازنگری‌ها به صورت دوره‌ای (معمولاً هر ۳ سال) صورت می‌گیرد [۲]. از نکات برجسته این روش می‌توان به ارزش‌گذاری سراسری و دیجیتالی‌شده، استفاده از داده‌های دقیق مکانی، فیزیکی و اقتصادی، امکان اعتراض الکترونیکی توسط مالکان اشاره کرد. این مدل شفافیت و کارایی را افزایش داده و فاصله ارزش مالیاتی و بازار را کاهش داده‌اند.
- **کنیا (اصلاح نظام ارزش‌گذاری با هدف افزایش عدالت مالیاتی):** در کنیا، اصلاحات اخیر مالیاتی با هدف مدرن‌سازی روش‌های ارزش‌گذاری آغاز شده است. شهر نایروبی، با کمک UN-Habitat و صندوق‌های توسعه، پروژه‌ای برای ایجاد نظام ارزش‌گذاری مبتنی بر GIS و داده‌های بازاری اجرا کرده است [۲]. از نکات حائز اهمیت این روش می‌توان به ظرفیت‌سازی نهادهای محلی برای جمع‌آوری و تحلیل داده ضروری است و مشارکت شهروندان و اطلاع‌رسانی عمومی در پذیرش نظام مالیاتی حیاتی اشاره کرد.
- **هلند (ارزش‌گذاری انبوه سالانه با مشارکت شهرداری‌ها):** در هلند، ارزش‌گذاری املاک هر سال توسط شهرداری‌ها انجام می‌شود، ولی در چارچوبی ملی و تحت نظارت شورای ارزیابی. مدل‌های ارزش‌گذاری انبوه با الگوریتم‌های استاندارد و بررسی‌های میدانی تلفیق می‌شوند. این نظام به دلیل شفافیت بالا و عدالت توزیعی در سطح اروپا نمونه موفق محسوب می‌شود.
- **کانادا (ارزش‌گذاری ایالتی منظم با مشارکت دولت محلی):** در کانادا، ارزش‌گذاری املاک مسئولیت ایالتی است، ولی توسط نهادهای حرفه‌ای و با همکاری شهرداری‌ها انجام می‌شود. برای مثال در استان انتاریو، سازمان وظیفه ارزیابی دوره‌ای تمام املاک را به عهده دارد [۲۵]. این ارزش‌گذاری‌ها با استفاده از روش مقایسه‌ای و مدل‌های آماری

- به روزرسانی می‌شوند. از ویژگی‌های این روش می‌توان به ارزش‌گذاری بر اساس ارزش بازار در تاریخ مشخص (با تأخیر ۱ یا ۲ ساله)، امکان اعتراض از سوی مالک و شفافیت بالا در روش‌ها و دسترسی عمومی به اطلاعات اشاره کرد.
- **استرالیا (ارزش‌گذاری مبتنی بر ارزش زمین و به‌روزرسانی ادواری):** در استرالیا، برخی ایالت‌ها مانند نیو ساوت ولز مالیات املاک را بر اساس ارزش زمین خالص (بدون ساختمان) محاسبه می‌کنند. این ارزش‌ها توسط ارزش‌گذاران دولتی^۱ تهیه می‌شود و معمولاً هر دو سال بازبینی می‌شود. نکات قابل توجه در این مدل تمرکز بر ارزش زمین برای تشویق به استفاده مؤثر از آن و شفافیت بالا و فرایند اعتراض رسمی است.
 - **آلمان:** در آلمان، تا پیش از ۲۰۲۲ ارزش‌گذاری املاک بر مبنای داده‌های بسیار قدیمی (مربوط به ۱۹۶۴ و حتی ۱۹۳۵ در شرق - آلمان شرقی) انجام می‌شد، اما پس از حکم دادگاه قانون اساسی، سیستم جدیدی از ۲۰۲۲ به اجرا درآمد که مبتنی بر درآمد اجاری، مکان، مترژ و عمر ساختمان است. این مدل تلفیقی از درآمد و مقایسه، محاسبه الکترونیکی توسط دولت فدرال و نظام ارزش‌گذاری متحد با اجرای محلی است.
 - **فرانسه (ارزش‌گذاری مبتنی بر اجاره نظری):** در فرانسه، سیستم مالیات بر املاک از مدل قدیمی ارزش اجاره‌ای نظری استفاده می‌کند که هر سال با ضریب‌هایی تعدیل می‌شود. اصلاحات در حال اجراست تا این ارزش‌ها به واقعیت بازار نزدیک‌تر شود. این نظام پیچید و با شفافیت کمتر است و وابستگی زیاد به داده‌های تاریخی داشته و در برابر اصلاحات با مقاومت اجتماعی مواجه شده است.
 - **هند (تنوع بالا و تمرکز بر مدل اجاره‌ای):** در هند، ارزش‌گذاری املاک برای مالیات شهر، توسط شهرداری‌ها انجام می‌شود و روش‌ها بسته به شهر متفاوت‌اند. در شهرهایی مانند دهلی یا بمبئی، رویکردهای ارزش‌گذاری مبتنی بر واحد و دسته‌بندی‌های مکانی به کار می‌رود. چالش‌های این روش، تنوع زیاد در رویکردها بین ایالت‌ها و کمبود داده و ظرفیت نهادی پایین است.
 - **فیلیپین (وابستگی به دفاتر ثبت محلی با ظرفیت محدود):** در فیلیپین، دولت‌های محلی مسئول ارزش‌گذاری املاک هستند، ولی اغلب از اطلاعات منسوخ استفاده می‌شود. تأخیر در به‌روزرسانی‌ها باعث تفاوت زیاد بین ارزش ثبت شده و ارزش بازار شده است. اصلاحات جدید شامل دیجیتال‌سازی و توسعه مدل‌های ارزش‌گذاری انبوه است.
 - **کره جنوبی (مدل ارزش‌گذاری چندلایه با دخالت دولت مرکزی):** در کره جنوبی، ارزش‌گذاری املاک برای اهداف مالیاتی توسط دولت مرکزی به صورت سالانه و متمرکز انجام می‌شود. برای ساختمان‌ها، سه نوع ارزش‌گذاری جداگانه انجام می‌شود: ارزش بازار، ارزش رسمی، و ارزش اعلام‌شده توسط مالک مزایای این روش داده‌محور، تکنولوژی‌محوری و امکان نظارت دقیق و جلوگیری از فرار مالیاتی است.

جدول ۱. مقایسه کشورها در نظام ارزش‌گذاری املاک

کشور	روش غالب	بازنگری	فناوری	شفافیت	چالش اصلی
آمریکا	بازار + AVM	سالانه	بالا	بالا	اعتراضات و نابرابری بین ایالت‌ها
کانادا	مقایسه‌ای	هر ۴ سال	بالا	بالا	تفاوت بین استان‌ها
استرالیا	ارزش زمین	سالانه/دو سالانه	بالا	بالا	نوسانات بازار زمین
آلمان	تلفیقی	از ۲۰۲۲	متوسط	بالا	مقاومت در برابر تغییر
فرانسه	اجاره نظری	سالانه (با ضریب)	پایین	متوسط	فرسودگی سیستم
سوئد	AVM	هر ۳ سال	بسیار بالا	بسیار بالا	نیاز به داده دقیق
هند	اجاره‌ای یا واحدبندی	نامنظم	پایین	پایین	تنوع و کمبود ظرفیت
کره جنوبی	چندلایه + GIS	سالانه	بالا	بالا	پیچیدگی ساختار
فیلیپین	دستی + ناقص	کم	پایین	پایین	نبود داده و ظرفیت
هلند	AVM انبوه	سالانه	بالا	بالا	مدیریت انبوه اطلاعات

۲-۵. تاربخچه ارزش‌گذاری املاک برای مالیات در ایران

نظام مالیات بر املاک و مستغلات در ایران، پیشینه‌ای طولانی دارد که بیش از یکصد سال است. با این حال، ساختار مدرن این نظام با تصویب قوانین جدید مالیاتی شکل گرفت. تصویب قانون مالیات‌های مستقیم سال ۱۳۴۵ بنیان جدید برای این موضوع است [۲۶]. در این قانون، ارزش‌گذاری املاک بر مبنای ارزش معاملاتی تعیین می‌شد که توسط کمیسیون‌های محلی (ماده ۶۴ قانون) مشخص می‌شود. با این حال، به دلیل عدم بروزرسانی منظم، این ارزش‌ها عمده‌تاً پایین‌تر از قیمت بازار بوده‌اند که باعث فرار مالیاتی و کاهش درآمد دولت شده است. به همین دلیل در سال‌های اخیر، برنامه‌هایی همچون سامانه ملی املاک و اسکان کشور و طرح‌های مالیات بر خانه‌های خالی و لوکس در قوانین بودجه سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ تصویب شده‌اند که مبتنی بر بهبود نظام ارزش‌گذاری است [۲۷]. تا امروز، اصلی‌ترین مبنای مالیات بر نقل و انتقال املاک در ایران، ارزش معاملاتی مصوب کمیسیون ماده ۶۴ قانون مالیات‌های مستقیم است. این ارزش‌ها عمده‌تاً بسیار پایین‌تر از قیمت بازار است و هر چند سال یک‌بار به‌روزرسانی می‌شود. این امر باعث شده شکاف شدیدی بین ارزش واقعی و ارزش منطقه‌ای به وجود آید.

۳. محاسبه عوارض ساختمانی در شهرداری اصفهان

در راستای تأمین منابع مالی مورد نیاز برای توسعه و نوسازی شهری، متناسب با بند دوم قانون درآمد پایدار و هزینه شهرداری‌ها و دهیاری‌ها، کلیه اشخاص حقیقی و حقوقی که در محدوده و حریم شهر و محدوده روستا ساکن هستند و یا به نوعی از خدمات شهری و روستایی بهره می‌برند، مکلف‌اند عوارض و بهای خدمات شهرداری و دهیاری را پرداخت کنند. هدف اصلی این قانون، تأمین مالی پروژه‌های عمرانی نظیر احداث معابر، پارک‌ها، پارکینگ‌های عمومی و سایر زیرساخت‌های شهری بوده است. نرخ و شیوه محاسبه این عوارض توسط شورای اسلامی شهر مصوب و مالکان موظف به پرداخت آن در مهلت مقرر هستند. پرداخت عوارض ساختمانی به دو روش حضوری و غیرحضوری (از طریق درگاه الکترونیکی شهرداری) امکان‌پذیر است. مبنای محاسبه عوارض، مساحت ساختمان، نوع کاربری، ارزش معاملاتی ملک و منطقه شهری است:

$$\text{عوارض زیربنا مسکونی} = \text{قیمت منطقه‌بندی} \times (\text{مساحت مشاعات}) \times 1.2\% \times 60\%$$

$$\text{عوارض زیربنا غیر مسکونی} = \text{مساحت} \times (\text{قیمت منطقه‌بندی}) \times \text{ضریب نوع استفاده} \times 1.2\%$$

شهرداری برای محاسبه عوارض ساختمانی ملزم به استفاده از قیمت منطقه‌بندی است. لذا از دفترچه قیمت‌های منطقه‌بندی دارای به عنوان مبنای محاسبات استفاده می‌کند. در این دفترچه یک تقسیم‌بندی بلوک ارزشی انجام شده و هر بلوک ارزشی بر اساس مؤلفه اراضی پشت جبهه، خیابان اصلی، کوچه‌های ۴ تا ۸ متری، کوچه‌های ۸ تا ۱۲ متری و کوچه‌های بالاتر از ۱۲ متر تقسیم‌بندی شده است. یکی از چالش‌های این فرایند اختلاف قابل توجه بین ارزش‌های منطقه‌بندی و قیمت‌های واقعی بازار است. تعیین ارزش عادلانه املاک که بتواند بین دیدگاه‌های کارشناسی و واقعیت‌های بازار تعادل ایجاد کند یک چالش مهم است که هدف پژوهش حاضر است؛ به این معنا که تعیین قیمت‌بندی منطقه با لحاظ اظهارات کارشناسی و واقعیت بازار باید انجام شود.

۴. روش پژوهش

پژوهش حاضر که با رویکرد پیمایشی و مبتنی بر تحلیل داده‌های میدانی انجام شد. هدف اصلی تحقیق، ارائه الگویی ترکیبی برای بهبود نظام ارزش‌گذاری املاک شهری در فرایند اخذ عوارض ساختمانی و کاهش شکاف میان ارزش‌های کارشناسی شهرداری و قیمت‌های واقعی بازار در شهر اصفهان است. جامعه آماری پژوهش شامل کارشناسان ارزش‌گذاری املاک شهرداری اصفهان و مشاوران املاک عضو اتحادیه مشاوران املاک شهر اصفهان^۱ بود که در مجموع ۹۱۴ نفر به عنوان نمونه آماری و به

۱. پاسخ‌دهندگان از مشاوران املاک عضو اتحادیه املاک اصفهان با همکاری اتحادیه، در سطح مناطق ۱۵گانه شهر تفکیک شدند. سپس طی همایش‌های آموزشی که با همکاری مدیران مناطق شهرداری اصفهان برگزار شد، شرکت‌کنندگان ضمن دریافت لینک پرسشنامه مربوط به منطقه خود و آموزش نحوه تکمیل آن، نسبت به ثبت اطلاعات اقدام کردند. پس از جمع‌آوری داده‌ها، اطلاعات با روش‌های تحلیل آماری پایش و پالایش شد و درنهایت، جدول قیمت‌های تعدیل‌شده املاک تجاری و مسکونی برای پهنه‌های جغرافیایی مناطق ۱۵گانه استخراج شد.

روش نمونه‌گیری تصادفی انتخاب شدند. به منظور افزایش دقت مکانی، فرایند جمع‌آوری اطلاعات بر اساس پهنه‌بندی جغرافیایی شهر و با تفکیک گذرهای اصلی و فرعی انجام شد. داده‌های مورد نیاز از طریق پرسشنامه‌های ساختاریافته، مصاحبه‌های تخصصی و اطلاعات معاملاتی ارائه‌شده توسط مشاوران املاک گردآوری شد.

در این پژوهش دو متغیر برای برآورد ارزش مبانی ملک مورد بررسی قرار گرفت:

۱. قیمت کارشناسی شهرداری (E_i) مبنای رسمی تعیین عوارض ساختمانی است.

۲. قیمت بازار (M_i) بر اساس برآوردهای میدانی مشاورین املاک استخراج شد.

به منظور بررسی اختلاف میان قیمت‌های کارشناسی و قیمت‌های بازار، ابتدا شاخص‌های توصیفی شامل میانگین، انحراف معیار و دامنه تغییرات محاسبه شد. سپس برای آزمون معناداری اختلاف میان دو گروه قیمت، از آزمون t زوجی (Paired Sample t-test) استفاده شد. نتایج آزمون در هر دو بخش مسکونی و تجاری نشان داد اختلاف میان قیمت‌های کارشناسی و قیمت‌های بازار از نظر آماری معنادار است ($p < 0.05$) که بیانگر وجود اختلاف میان نظام ارزش‌گذاری رسمی و شرایط واقعی بازار املاک است. در مرحله بعد، به منظور کاهش این شکاف، مدل ترکیبی ارزش‌گذاری طراحی شد. در این مدل، ارزش نهایی هر ملک به صورت ترکیبی خطی از قیمت کارشناسی و قیمت بازار تعریف شد:

$$V_i = \alpha E_i + (1 - \alpha) M_i$$

V_i : ارزش نهایی ملک

E_i : قیمت کارشناسی شهرداری

M_i : قیمت بازار

α : ضریب وزنی

۴-۱. یافته‌های تجربی پژوهش

نرخ مشارکت مشاوران املاک در هر منطقه در جدول ۳ ارائه شده است. از مجموع ۳۰۳۱ مشاور املاک دارای مجوز، ۱۵۱۲ برای همکاری دعوت شدند. در نهایت، ۹۱۴ نفر با نرخ مشارکت ۶۰ درصد در پژوهش مشارکت فعال داشتند.

جدول ۲. تعداد محدوده‌ها و پاسخ‌های دریافتی به تفکیک منطقه

منطقه	تعداد سوال	تعداد پاسخ	منطقه	تعداد سوال	تعداد پاسخ
۱	۱۶۴	۵۱۲	۹	۱۰۷	۴۰۰
۲	۶۶	۱۱۹	۱۰	۱۶۹	۱۰۴۵
۳	۴۷۷	۶۹۵	۱۱	۷۷	۱۴۶
۴	۱۴۸	۵۶۲	۱۲	۱۵۵	۹۳۸
۵	۱۸۴	۱۴۷۱	۱۳	۸۵	۱۲۷۱
۶	۱۹۴	۹۹۶	۱۴	۷۹	۵۶۴
۷	۸۴	۱۰۱۴	۱۵	۱۲۰	۴۳۵
۸	۱۴۵	۱۳۳۹	کل	۲۲۵۴	۱۱۵۰۷

در مجموع، ۲۲۵۴ کد محدوده ردیف به مشارکت‌کنندگان ارائه شد که در نهایت ۱۱۵۰۷ قیمت در بخش مسکونی و ۱۱۵۰۷ قیمت در بخش تجاری توسط مشاوران و کارشناسان ثبت شد.

جدول ۳. نرخ مشارکت مشاوران املاک به تفکیک منطقه

منطقه	مشاورین املاک	مدعوین	مشارکت کنندگان	درصد مشارکت
۱	۱۲۰	۵۲	۳۷	۷۱٪
۲	۶۱	۲۳	۱۶	۷۰٪
۳	۱۷۵	۷۶	۳۳	۴۳٪
۴	۲۵۴	۱۵۲	۳۲	۲۱٪
۵	۳۵۹	۱۶۳	۹۵	۵۸٪
۶	۲۲۲	۹۸	۸۲	۸۴٪
۷	۲۳۰	۱۲۶	۹۷	۷۷٪
۸	۳۷۰	۱۹۳	۱۳۴	۶۹٪
۹	۸۸	۴۷	۲۴	۵۱٪
۱۰	۲۸۵	۱۲۰	۹۸	۸۲٪
۱۱	۵۰	۲۱	۱۴	۶۷٪
۱۲	۲۹۰	۱۳۶	۶۹	۵۱٪
۱۳	۲۲۰	۱۱۹	۱۰۹	۹۲٪
۱۴	۱۷۴	۸۰	۴۸	۶۰٪
۱۵	۱۳۳	۱۰۶	۲۶	۲۵٪
کل	۳۰۳۱	۱۵۱۲	۹۱۴	۶۰٪

برای مقایسهٔ قیمت‌گذاری مشاوران املاک و کارشناسان رسمی، میزان اختلاف قیمت در هر کد محدوده، ردیف محاسبه و به سه طبقه تقسیم شد:

- اختلاف کمتر از ۱۰ درصد
- اختلاف بین ۱۰ تا ۳۰ درصد
- اختلاف بیش از ۳۰ درصد

جدول ۴. توزیع فراوانی اختلاف قیمت کارشناسی و بازار

نوع کاربری	کل نمونه‌ها	اختلاف کمتر از ۱۰٪	اختلاف ۱۰ تا ۳۰٪	اختلاف بیش از ۳۰٪
مسکونی	۲۲۵۴	۴۹۰	۶۹۵	۱۰۶۹
		۲۲٪-	۳۱٪-	۴۷٪-
تجاری	۲۲۵۴	۲۰۲	۴۳۷	۱۶۱۵
		۹٪-	۱۹٪-	۷۲٪-

به طور میانگین، اختلاف قیمت در بخش مسکونی معادل ۶۰ میلیون ریال و در بخش تجاری معادل ۱۳۰ میلیون ریال برآورد شد. بر اساس تحلیل نهایی، کدهای منطقه‌بندی در ۲۰۲ محدوده به شرح زیر طبقه‌بندی شد:

- اختلاف کم استفاده از قیمت کارشناسی
- اختلاف متوسط (۱۰-۳۰٪): میانگین وزنی
- اختلاف زیاد بازبینی کارشناسی و ارزش‌گذاری مجدد، در مرحلهٔ دوم اعمال میانگین وزنی

جدول ۵. اختلاف قیمت گذاری مشاوران املاک و کارشناسان املاک

منطقه	کل	بیش از ۳۰	بین ۱۰ تا ۳۰	۱۰ درصد و کمتر
۱	مسکونی	۱۶۴	۵۰	۶۸
	تجاری	۱۶۴	۹۵	۴۱
۲	مسکونی	۶۶	۲۲	۲۲
	تجاری	۶۶	۴۷	۹
۳	مسکونی	۴۷۷	۳۲۴	۱۰۲
	تجاری	۴۷۷	۳۷۸	۶۸
۴	مسکونی	۱۴۸	۷۶	۴۱
	تجاری	۱۴۸	۱۱۶	۲۲
۵	مسکونی	۱۸۴	۶۹	۶۸
	تجاری	۱۸۴	۱۱۴	۴۸
۶	مسکونی	۱۹۴	۸۳	۶۱
	تجاری	۱۹۴	۱۲۶	۵۳
۷	مسکونی	۸۴	۱۷	۳۳
	تجاری	۸۴	۷۶	۷
۸	مسکونی	۱۴۵	۱۳۱	۱۱
	تجاری	۱۴۵	۱۱۵	۲۴
۹	مسکونی	۱۰۷	۳۳	۴۸
	تجاری	۱۰۷	۶۹	۲۳
۱۰	مسکونی	۱۶۹	۸۵	۵۹
	تجاری	۱۶۹	۱۱۴	۴۰
۱۱	مسکونی	۷۷	۲۱	۳۹
	تجاری	۷۷	۴۴	۲۰
۱۲	مسکونی	۱۵۵	۶۳	۴۷
	تجاری	۱۵۵	۱۲۰	۲۵
۱۳	مسکونی	۸۵	۱۶	۳۶
	تجاری	۸۵	۷۲	۱۰
۱۴	مسکونی	۷۹	۱۶	۳۵
	تجاری	۷۹	۲۶	۳۶
۱۵	مسکونی	۱۲۰	۶۳	۴۵
	تجاری	۱۲۰	۱۰۳	۱۱
کل	مسکونی	۲۲۵۴	۱۰۶۹	۶۹۵
	تجاری	۲۲۵۴	۱۶۱۵	۴۳۷

این نتایج بیانگر شکاف میان ارزش های رسمی و واقعیت های بازار مسکن است. شدت این شکاف در بخش تجاری بیشتر است.

۴-۲. تحلیل اختلاف میان قیمت کارشناسی و قیمت بازار

به منظور بررسی میزان اختلاف میان قیمت های کارشناسی شهرداری و قیمت های بازار، اختلافات در سه طبقه شامل:

- اختلاف کمتر از ۱۰ درصد؛
- اختلاف بین ۱۰ تا ۳۰ درصد؛
- اختلاف بیش از ۳۰ درصد؛

نتایج در جدول های ۴ و ۵ نشان می دهد در بخش مسکونی از مجموع ۲۲۵۴ نمونه، تعداد ۱۰۶۹ مورد (۴۷ درصد) دارای اختلاف بیش از ۳۰ درصد، ۶۹۵ مورد (۳۱ درصد) دارای اختلاف بین ۱۰ تا ۳۰ درصد و تنها ۴۹۰ مورد (۲۲ درصد) دارای اختلاف کمتر از ۱۰ درصد است.

در بخش تجاری شدت اختلاف ها به مراتب بیشتر بوده است؛ به طوری که از مجموع ۲۲۵۴ نمونه، تعداد ۱۶۱۵ مورد (۷۲)

درصد) دارای اختلاف بیش از ۳۰ درصد، ۴۳۷ مورد (۱۹ درصد) دارای اختلاف متوسط و تنها ۲۰۲ مورد (۹ درصد) دارای اختلاف کمتر از ۱۰ درصد است.

به منظور بررسی آماری اختلاف میان قیمت‌های کارشناسی شهرداری و قیمت‌های بازار، از آزمون t زوجی استفاده شد. این آزمون با توجه به وابسته بودن داده‌ها و تعلق هر دو نوع قیمت به یک ردیف در دفترچه ارزش‌گذاری املاک، روش مناسبی برای مقایسه میانگین‌ها است. نتایج آزمون در هر دو بخش مسکونی و تجاری نشان داد اختلاف میان قیمت کارشناسی و قیمت بازار از نظر آماری معنادار است و فرض برابری میانگین‌ها رد می‌شود.

جدول ۶. نتایج آزمون t زوجی بین قیمت کارشناسی و قیمت بازار

کاربری	میانگین اختلاف (میلیون ریال)	آماره t	سطح معناداری	نتیجه
مسکونی	۶۰	۴.۸۷	۰	اختلاف معنادار
تجاری	۱۳۰	۷.۱۴	۰	اختلاف معنادار

بر اساس نتایج آزمون، میانگین اختلاف قیمت کارشناسی و قیمت بازار در بخش مسکونی برابر با ۶۰ میلیون ریال و در بخش تجاری برابر با ۱۳۰ میلیون ریال بوده است. همچنین، مقادیر آماره t و سطح معناداری کمتر از ۰/۰۵ نشان می‌دهد این اختلافات تصادفی نیست و از وجود شکاف ساختاری میان نظام ارزش‌گذاری رسمی و شرایط واقعی بازار حکایت دارد. این یافته بیانگر آن است که نظام ارزش‌گذاری موجود، به‌ویژه در بخش تجاری، توانایی کافی برای انعکاس پویایی‌های بازار را ندارد و در نتیجه، استفاده از مدل‌های ترکیبی ارزش‌گذاری می‌تواند به کاهش خطای برآورد و افزایش عدالت در تعیین عوارض شهری کمک کند.

۳-۴. مدل ترکیبی ارزش‌گذاری

به منظور کاهش شکاف میان قیمت‌های کارشناسی شهرداری و قیمت‌های واقعی بازار، یک مدل ترکیبی خطی پیشنهاد شد. در این مدل، ارزش نهایی ملک به صورت ترکیبی از ارزش کارشناسی و قیمت بازار تعیین می‌شود. برای تعیین مقدار مناسب α ، مقادیر مختلف در بازه صفر تا یک با فواصل ۰/۱ آزمون شد. معیار انتخاب، حداقل‌سازی میانگین خطای مطلق (MAE) همچنین کاهش واریانس اختلاف بین ارزش‌های برآوردی و قیمت‌های مبنا بود.

جدول ۷ نتایج آزمون ضرایب مختلف مدل ترکیبی ارزش‌گذاری را بر اساس معیار حداقل‌سازی خطا نشان می‌دهد. در این فرایند، مقادیر مختلف ضریب α در بازه صفر تا یک مورد آزمون قرار گرفت و برای هر حالت، میانگین خطای مطلق (MAE) و واریانس اختلاف بین قیمت برآوردی و قیمت مبنا محاسبه شد.

جدول ۷. آزمون ضرایب مدل ترکیبی ارزش‌گذاری

ردیف	ضریب α	میانگین خطای	واریانس خطا	توضیح
1	0	98	214	اتکای کامل به بازار
2	0.1	87	196	
3	0.2	76	174	
4	0.3	68	153	
5	0.4	59	137	
6	0.5	51	121	
7	0.6	43	104	
8	0.7	36	88	مناسب
9	0.8	41	96	
10	0.9	52	118	
11	1	64	146	اتکای کامل به کارشناسی

نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد با افزایش تدریجی سهم نظرات کارشناسی تا سطح ۰/۷، میزان خطای برآورد روندی کاهشی داشته است. کمترین مقدار میانگین خطای مطلق و همچنین حداقل واریانس خطا در مقدار $\alpha=0.7$ مشاهده شد. پس از این نقطه، با افزایش بیشتر وزن قیمت کارشناسی، دوباره میزان خطا افزایش یافته است. ترکیب متعادل اطلاعات رسمی و اطلاعات می‌کند. بر این اساس، مدل نهایی پژوهش به صورت زیر تعیین شد:

$$V_i = 0.7E_i + 0.3M_i$$

M_i : قیمت بازار	V_i : ارزش نهایی ملک
α : ضریب وزنی	E_i : قیمت کارشناسی شهرداری

این مدل ضمن حفظ نظام کارشناسی شهرداری، بخشی از اطلاعات واقعی بازار را نیز وارد فرایند ارزش‌گذاری می‌کند، در نتیجه موجب کاهش عدم تقارن اطلاعاتی، افزایش دقت ارزش‌گذاری و بهبود کارایی نظام تعیین عوارض شهری می‌شود.

۴-۴. بحث و بررسی نتایج

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد میان قیمت‌های کارشناسی شهرداری و قیمت‌های استخراج‌شده از بازار (مشاوران املاک)، شکاف معناداری وجود دارد. این شکاف نه یک خطای ساده آماری، بلکه نشانه‌ای از **ناهماهنگی ساختاری در سازوکار کشف قیمت**^۱ در بازار املاک شهری است. از منظر اقتصاد شهری، بازار املاک به طور کامل واجد شرایط یک بازار رقابتی با اطلاعات کامل نیست. وجود اطلاعات نامتقارن^۲ میان بازیگران بازار و نهادهای عمومی، موجب می‌شود قیمت‌های رسمی با تأخیر نسبت به تحولات واقعی بازار تعدیل شود. این موضوع در بخش تجاری شدیدتر است که حساسیت بالاتر این بازار به انتظارات و تغییرات تقاضای سرمایه‌ای را نشان می‌دهد.

الف) تفسیر شکاف قیمت‌ها

اختلاف مشاهده‌شده میان قیمت کارشناسی و قیمت بازار را می‌توان از سه منظر تحلیل کرد:

شکست اطلاعاتی^۳: شهرداری به دلیل اتکا به داده‌های دوره‌ای و غیرپویا، با تأخیر در به‌روزرسانی قیمت‌ها مواجه است، در حالی که بازار به صورت لحظه‌ای واکنش نشان می‌دهد.

ناکارایی نهادی^۴: نظام ارزش‌گذاری فعلی مبتنی بر ارزیابی کارشناسی سنتی است که قادر به جذب سریع تغییرات بازار نیست. این امر موجب ایجاد فاصله بین «ارزش اداری» و «ارزش بازار» شده است.

رفتار انتظاری و سفته‌بازی^۵: در بخش تجاری، انتظارات سودآوری آتی و نقش سرمایه‌گذاری غیرمصرفی، موجب افزایش نوسانات قیمت و تشدید اختلاف با ارزش‌های کارشناسی شده است.

ب) تحلیل الگوی توزیع اختلاف (نابرابری اطلاعاتی در سطح شهر)

توزیع نامتقارن اختلاف قیمت‌ها در مناطق مختلف نشان می‌دهد مسئله فقط یک پدیده کلی نیست، بلکه دارای بعد فضایی^۶ است. در برخی مناطق، همگرایی نسبی بین قیمت کارشناسی و بازار مشاهده می‌شود، در حالی که در مناطق دیگر شکاف‌های شدید وجود دارد. این امر مؤید این نکته در اقتصاد فضایی است که: بازار مسکن یک بازار محلی است و تابع ساختارهای متفاوت تقاضا است. بنابراین، سیاست قیمت‌گذاری یکنواخت شهری، با شکست در بازتاب واقعیت اقتصادی مواجه می‌شود.

مدل ترکیبی در واقع یک سازوکار تعدیل اطلاعات ناقص^۷ است که:

1. Price Discovery Mechanism
2. Information Asymmetry
3. Information Failure
4. Institutional Inefficiency
5. Expectations & Speculation
6. Spatial Heterogeneity
7. Information Correction Mechanism

- خطای سیستماتیک ارزیابی کارشناسی را کاهش می‌دهد.
 - در عین حال از نوسانات و نویز بازار نیز جلوگیری می‌کند.
- از دیدگاه نظری، این مدل نزدیک به مفهوم میانگین‌گیری بیزی^۱ در اقتصاد اطلاعات است که در آن، اطلاعات رسمی و اطلاعات بازار با وزن‌های متفاوت ترکیب می‌شود.

ج) توصیه‌های سیاستی

- شهرداری‌ها باید نظام ارزش‌گذاری سنتی را به یک سیستم AVM ارتقا دهد که در آن:
- داده‌های بازار به صورت مستمر وارد مدل شود.
 - قیمت کارشناسی به عنوان نهادی حفظ شود.
 - خروجی مدل به صورت دوره‌ای به‌روزرسانی شود.
- ایجاد پایگاه داده یکپارچه معاملات املاک و ارزش‌گذاری مکان‌محور
- رصد نظام‌مند داده‌های اتحادیه املاک
- ایجاد نظام کارشناسان مستقل ارزش‌گذاری املاک بر پایه استفاده از وان تخصصی دانش آموختگان علم اقتصاد

۵. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد نظام فعلی ارزش‌گذاری املاک شهری در اصفهان با شکاف معناداری میان ارزش اداری و ارزش بازار مواجه است. این شکاف نه تنها به ناکارایی در نظام اخذ عوارض شهری منجر می‌شود، بلکه پیامدهای مهمی در حوزه عدالت مالیاتی، تخصیص منابع شهری و اعتماد عمومی دارد.

از منظر اقتصاد عمومی، این وضعیت مصداقی از شکست بازار و شکست دولت در هماهنگی اطلاعات قیمتی است. در چنین شرایطی، اتکای صرف به ارزیابی کارشناسی یا فقط داده‌های بازار، هر دو به خطا منجر می‌شود. بنابراین، استفاده از مدل‌های ترکیبی مبتنی بر داده‌های بازار و ارزیابی کارشناسی، به عنوان یک راه‌حل میانی، می‌تواند به افزایش کارایی، کاهش خطای ارزش‌گذاری و بهبود عدالت مالیاتی منجر شود. در نهایت، توصیه می‌شود نظام ارزش‌گذاری املاک شهری به سمت یک چارچوب داده‌محور^۲ حرکت کند که در آن به‌روزرسانی مستمر، تحلیل فضایی و تلفیق منابع اطلاعاتی به عنوان اصول پایه مورد توجه قرار گیرد.

سپاسگزاری

به پاس ارائه داده‌های کارشناسی و حمایت‌های انجام‌شده از کارشناسان امور درآمد و همچنین، از اتحادیه مشاوران املاک استان اصفهان که با همکاری اعضای گرامی خود در تکمیل پرسشنامه‌ها و ارائه نظرات کارشناسی ارزشمند، سهم به‌سزایی در جمع‌آوری اطلاعات داشتند، صمیمانه سپاسگزاریم. همچنین، بر خود لازم می‌دانیم از کلیه کارشناسان و مشاوران املاک که با حوصله و دقت نظر، داده‌های مورد نیاز پژوهش را در اختیار ما قرار دادند، قدردانی کنیم. همچنین، از مدیران مناطق پانزده‌گانه شهرداری اصفهان که با هماهنگی جلسات و تسهیل ارتباط با مشاوران املاک، زمینه اجرای مطلوب این تحقیق را فراهم آوردند، تشکر ویژه می‌کنیم.

منابع

1. Slack E. The property tax: In theory and practice. IMFG Papers on Municipal Finance and Governance No. 7. Toronto: Institute on Municipal Finance and Governance; 2011.
2. Bird RM, Slack E. *International handbook of land and property taxation*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing; 2004.
3. Horvath S, Soot M, Zaddach S, Neuner H, Weitkamp A. Deriving adequate sample sizes for ANN-based modelling of real estate valuation tasks by complexity analysis. *Land Use Policy*. 2021;107:105475.
4. Silver H, Scott A, Kazepov Y. Participation in urban contention and deliberation. *Int J Urban Reg Res*. 2010;34(3):453-477.
5. Blok A, Meilvang ML. Picturing urban green attachments: Civic activists moving between familiar and public engagements in the city. *Sociology*. 2015;49(1):19-37.
6. Wilson A, Tewdwr-Jones M, Comber R. Urban planning, public participation and digital technology: App development as a method of generating citizen involvement in local planning processes. *Environ Plan B Urban Anal City Sci*. 2019;46:286-302.
7. Meilvang ML, Carlsen HB, Blok A. Methods of engagement: On civic participation formats as composition devices in urban planning. *Eur J Cult Polit Sociol*. 2018;5(1-2):12-41.
8. McCluskey W, Franzsen R. *Property tax in Africa: Status, challenges, and prospects*. Cambridge (MA): Lincoln Institute of Land Policy; 2017.
9. Cheyne C. Changing urban governance in New Zealand: Public participation and democratic legitimacy in local authority planning and decision-making 1989-2014. *Urban Policy Res*. 2015;33(4):416-432.
10. Bauer A, Steurer R. Innovation in climate adaptation policy: Are regional partnerships catalysts or talking shops? *Environ Polit*. 2014;23(5):818-838.
11. Freeman RE, Harrison JS, Wicks AC, Parmar BL, De Colle S. *Stakeholder theory: The state of the art*. Cambridge: Cambridge University Press; 2010.
12. Slack E, Bird RM. *How to reform the property tax: Lessons from around the world*. IMFG Paper No. 25. Toronto: Institute on Municipal Finance and Governance; 2015.
13. United Nations Human Settlements Programme. *The value capture toolkit: Land-based financing for urban development*. Nairobi: UN-Habitat; 2019.
14. Pagourtzi E, Assimakopoulos V, Hatzichristos T, French N. Real estate appraisal: A review of valuation methods. *J Prop Invest Finance*. 2003;21(4):383-401.
15. International Valuation Standards Council. *International valuation standards*. London: International Valuation Standards Council; 2021.
16. Direction Générale des Finances Publiques. *Révision des valeurs locatives cadastrales* [Revision of cadastral rental values]. Paris: Ministry of Economy and Finance; 2021.
17. International Association of Assessing Officers. *Standard on mass appraisal of real property*. Kansas City (MO): International Association of Assessing Officers; 2013.
18. Grover R. Mass valuations. *J Prop Invest Finance*. 2016;34(2):191-204.
19. Lieske SN, van den Nouwelant R, Han JH, Pettit C. A novel hedonic price modelling approach for estimating the impact of transportation infrastructure on property prices. *Urban Stud*. 2021;58(1):182-202.
20. Youngman J. *A good tax: Legal and policy issues for the property tax in the United States*. Cambridge (MA): Lincoln Institute of Land Policy; 2016.
21. Midgley G, Cavana RY, Brocklesby J, Foote JL, Wood DR, Ahuriri-Driscoll A. Towards a new framework for evaluating systemic problem structuring methods. *Eur J Oper Res*. 2013;229(1):143-154.
22. Municipal Property Assessment Corporation. *Annual report*. Ontario: Municipal Property Assessment Corporation; 2021.
23. Bundesministerium der Finanzen. *Reform der Grundsteuer in Deutschland* [Reform of property tax in Germany]. Berlin: Federal Ministry of Finance; 2022.
24. Peterson GE. *Unlocking land values to finance urban infrastructure*. Washington (DC): World Bank; 2008.

25. World Bank. *Philippines urbanization review*. Washington (DC): World Bank; 2018.
26. Iranian National Tax Administration. *Direct Taxes Act. Updated ed.* Tehran: Iranian National Tax Administration; 2020. [Persian].
27. Majlis Research Center of the Islamic Republic of Iran. *Evaluation report on the National Real Estate System and challenges of vacant housing tax*. Tehran: Majlis Research Center; 2022. [Persian].



Intelligent Detection and Separation of Recyclable Urban Waste Using a Deep Learning-Based Computer Vision Model

Ali Jelokhani 

School of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: ali.jelokhani@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received 27 February 2026
Revised 07 April 2026
Accepted 28 May 2026
Published Online 23 September 2026

Keywords:

Municipal waste,
Recycling,
Intelligent waste separation,
Computer vision,
Deep learning,
Object detection.

ABSTRACT

Urban waste management is one of the major environmental and economic challenges in modern cities. A considerable part of municipal solid waste consists of recyclable materials such as cardboard, glass, metal, paper, and plastic. Accurate detection and separation of these materials can improve recycling quality and reduce the environmental burden of urban waste. This study proposes a deep learning-based computer vision framework for intelligent detection and separation of recyclable urban waste. Unlike single-label image classification methods, the proposed framework performs multi-instance object detection and generates a bounding box, class label, and confidence score for each detected item. The architecture includes preprocessing and augmentation, lightweight feature extraction, a combined attention module, multi-level feature fusion, and a final detection stage. The dataset contains 4250 images and 6815 annotated waste instances. The proposed method achieved Precision, Recall, F1-score, mAP@0.5, and mAP@0.5:0.95 values of 0.934, 0.919, 0.926, 0.947, and 0.742, respectively. The results indicate that the proposed framework can support automated waste sorting systems, smart bins, robotic separators, and recycling facilities.

Cite this article: Jelokhani, A. (2026). Intelligent Detection and Separation of Recyclable Urban Waste Using a Deep Learning-Based Computer Vision Model. *Urban Development Policy Making*, 3 (3), 411-431. DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.582800.1106>



© Authors retain the copyright and full publishing rights.
DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.582800.1106>

Introduction

The growth of urban population, consumption, and disposable packaging has increased the amount of municipal waste. In many cities, recyclable waste separation is still performed manually or semi-automatically, which can be slow, costly, and prone to human error. Since recyclable materials may appear together in real waste sorting environments, simple image classification is not sufficient for practical separation. Object detection is more suitable because it can determine both the class and location of each waste item. This study focuses on five recyclable categories: cardboard, glass, metal, paper, and plastic, and aims to provide an intelligent framework for detecting multiple waste objects in a single image.

Methodology

This research is applied-developmental in purpose and quantitative-experimental in approach. The study uses the public EE297_Project dataset published in Roboflow Universe under the CC BY 4.0 license. The dataset includes 4250 images and 6815 bounding-box annotations from five recyclable waste classes. The data were divided into training, validation, and test sets with ratios of 70%, 15%, and 15%, respectively. Data augmentation was applied only to the training set to improve

generalization and prevent data leakage. After augmentation, the effective number of training images increased from 2975 to 14875, and the effective number of training instances increased from 4773 to 23865.

The proposed architecture consists of preprocessing, lightweight feature extraction, a combined attention module, multi-level feature fusion, and a detection head. In the feature extraction stage, depthwise and pointwise convolutions are used to reduce computational complexity. The combined attention module emphasizes informative feature channels and important spatial regions. Multi-level feature fusion combines local and semantic features from different layers, allowing the model to detect objects with different sizes and appearances. The final detection stage produces a bounding box, class label, and confidence score for each detected waste object.

The model was trained using 640×640 input images, a batch size of 16, 120 epochs, and the AdamW optimizer with an initial learning rate of 0.0001. Performance was evaluated using Precision, Recall, F1-score, mAP@0.5, and mAP@0.5:0.95. To assess reliability, each model was evaluated in five independent runs with different random seeds, and paired t-tests were used to examine the statistical significance of performance differences.

Results

The proposed method achieved a Precision of 0.934, Recall of 0.919, F1-score of 0.926, mAP@0.5 of 0.947, and mAP@0.5:0.95 of 0.742 on the test set. These results show that the model performs well in both waste recognition and localization. Class-wise evaluation showed stable performance across all five classes, with stronger results for plastic and metal and relatively lower performance for paper. The difference between mAP@0.5 and mAP@0.5:0.95 indicates that part of the challenge is related to precise localization of bounding boxes.

The proposed method was compared with Faster R-CNN, SSD, RetinaNet, YOLOv8n, MRS-YOLO, and a lightweight recyclable domestic waste detection method. The proposed model achieved higher overall performance across the main metrics. Statistical analysis showed that the improvements were significant at the 0.05 level. The model was also evaluated under difficult imaging conditions, including brightness changes, contrast reduction, noise, blur, cluttered background, and partial occlusion. In all tested conditions, mAP@0.5 remained above 0.91, although blur and cluttered backgrounds caused the largest performance drops. Qualitative results also showed that the proposed method can detect multiple waste objects in a single image and produce accurate bounding boxes in complex scenes.

Conclusion

This study presented a deep learning-based computer vision framework for intelligent detection and separation of recyclable urban waste. The proposed method can identify multiple waste objects in a single image and generate object-level outputs suitable for practical sorting systems. The results show that lightweight feature extraction, combined attention, and multi-level feature fusion improve recyclable waste detection, especially in multi-object scenes and difficult imaging conditions. Although the results are promising, future research should use more diverse real-world data, optimize the model for edge devices, and integrate the detection framework with robotic sorting mechanisms.



تشخیص و جداسازی هوشمند پسماندهای شهری قابل بازیافت با استفاده از مدل بینایی ماشین مبتنی بر یادگیری عمیق

علی جلوخانی

دانشکده کامپیوتر، دانشکده فنی دانشگاه تهران. رایانامه: ali.jelokhani@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

کلیدواژه:

پسماند شهری،

بازیافت،

جداسازی هوشمند پسماند،

بینایی ماشین،

یادگیری عمیق،

تشخیص شیء.

با افزایش حجم پسماندهای شهری و اهمیت بازیافت در کاهش آلودگی محیط زیست، جداسازی دقیق مواد قابل بازیافت به یکی از مراحل مهم مدیریت هوشمند پسماند تبدیل شده است. روش‌های سنتی تفکیک پسماند معمولاً به نیروی انسانی وابسته بوده و در مقیاس‌های بزرگ با محدودیت‌هایی مانند سرعت پایین، خطای انسانی، هزینه عملیاتی بالا و خطرات بهداشتی همراه هستند. در این پژوهش، یک چارچوب مبتنی بر بینایی ماشین و یادگیری عمیق برای تشخیص و جداسازی هوشمند پسماندهای شهری قابل بازیافت ارائه می‌شود. هدف روش پیشنهادی، تشخیص و مکان‌یابی پسماندها در پنج گروه اصلی شامل مقوا، شیشه، فلز، کاغذ و پلاستیک است. به خلاف روش‌های طبقه‌بندی ساده که تنها یک برچسب برای کل تصویر تولید می‌کنند، چارچوب پیشنهادی قادر است در تصاویر تک‌شیء و چندشیء، چند نوع پسماند را به صورت هم‌زمان شناسایی کرده و برای هر نمونه، جعبه محدودکننده، کلاس و امتیاز اطمینان تولید کند. در معماری پیشنهادی، از استخراج ویژگی سبک، ماژول توجه ترکیبی و تلفیق ویژگی‌های چندسطحی استفاده شده است تا سامانه بتواند ویژگی‌های ظاهری، بافتی و ساختاری مواد مختلف را بهتر تشخیص دهد. مجموعه داده مورد استفاده شامل ۴۲۵۰ تصویر و ۶۸۱۵ نمونه برچسب‌خورده در قالب جعبه محدودکننده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد روش پیشنهادی با دستیابی به Precision برابر با ۰/۹۳۴، Recall برابر با ۰/۹۱۹، F1-score برابر با ۰/۹۲۶، مقدار mAP@0.5 برابر با ۰/۹۴۷ و مقدار mAP@0.5:0.95 برابر با ۰/۷۴۲ عملکرد مناسبی در تشخیص و مکان‌یابی پسماندهای قابل بازیافت دارد. همچنین، نتایج به تفکیک کلاس‌ها نشان داد مدل در تشخیص پلاستیک و فلز عملکرد بالاتری داشته و بیشترین چالش مربوط به شباهت ظاهری میان کاغذ و مقوا و همچنین، شیشه و پلاستیک شفاف است. بر اساس نتایج، روش پیشنهادی می‌تواند در سامانه‌هایی مانند خطوط تفکیک خودکار، سطوح‌های هوشمند و ربات‌های جداساز مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: جلوخانی، علی (۱۴۰۵). تشخیص و جداسازی هوشمند پسماندهای شهری قابل بازیافت با استفاده از مدل بینایی ماشین مبتنی بر یادگیری عمیق. *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۳(۳) ۴۱۱-۴۳۱.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.582800.1106>

© نویسندگان

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.582800.1106>



۱. مقدمه

افزایش جمعیت شهرنشین، رشد مصرف‌گرایی و گسترش استفاده از بسته‌بندی‌های یک‌بارمصرف باعث شده است مدیریت پسماندهای شهری به یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی و اقتصادی در شهرهای امروزی تبدیل شود. بخش قابل توجهی از این پسماندها شامل موادی مانند مقوا، شیشه، فلز، کاغذ و پلاستیک است که در صورت جداسازی صحیح، می‌توانند دوباره وارد چرخه تولید شوند. با این حال، در بسیاری از سامانه‌های مدیریت پسماند، جداسازی مواد قابل بازیافت هنوز به صورت دستی یا نیمه‌خودکار انجام می‌شود و همین موضوع باعث کاهش سرعت پردازش، افزایش هزینه عملیاتی و افت کیفیت مواد بازیافتی می‌شود [۱ و ۲]. پژوهش‌های جدید نیز نشان می‌دهند دسته‌بندی دقیق پسماند یکی از مراحل کلیدی در بهبود بازیافت، کاهش دفن زباله و حرکت به سمت شهرهای هوشمند و پایدار است [۳].

کیفیت بازیافت تا حد زیادی به دقت مرحله تفکیک بستگی دارد؛ زیرا خطای جداسازی می‌تواند ارزش اقتصادی مواد بازیافتی و کارایی مراحل پردازش بعدی را کاهش دهد. به همین دلیل، استفاده از روش‌های هوشمند برای شناسایی و تفکیک پسماندهای قابل بازیافت در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۴ و ۵].

اهمیت این مسئله در کلان‌شهری مانند تهران پررنگ‌تر است؛ زیرا حجم بالای تولید پسماند، تراکم جمعیت و هزینه‌های جمع‌آوری و پردازش، مدیریت پسماند را به یکی از چالش‌های اصلی شهری تبدیل کرده است. از آنجا که بخشی از پسماند خشک تهران شامل موادی مانند کاغذ، مقوا، پلاستیک، شیشه و فلز است، بهبود فرایند تشخیص و تفکیک این مواد می‌تواند به افزایش کیفیت بازیافت و کاهش خطای انسانی کمک کند.

در سال‌های اخیر، بینایی ماشین و یادگیری عمیق به عنوان راهکاری مؤثر برای خودکارسازی تشخیص پسماند مورد توجه قرار گرفته‌اند. با وجود این، بسیاری از روش‌های موجود یا بر طبقه‌بندی تک‌برچسبی تصویر تمرکز دارند، یا مدل‌های عمومی تشخیص شیء را بدون توجه کافی به شرایط واقعی پسماندهای قابل بازیافت به کار گرفته‌اند. در محیط واقعی، یک تصویر ممکن است شامل چند نوع پسماند باشد و کیفیت تصویر نیز تحت تأثیر عواملی مانند تغییر روشنایی، هم‌پوشانی اشیاء، پس‌زمینه شلوغ و تغییر شکل مواد قرار گیرد.

در این پژوهش، یک چارچوب مبتنی بر یادگیری عمیق برای تشخیص چندنمونه‌ای پسماندهای شهری قابل بازیافت ارائه می‌شود. روش پیشنهادی برای پنج کلاس مقوا، شیشه، فلز، کاغذ و پلاستیک طراحی شده و برای هر پسماند موجود در تصویر، جعبه محدودکننده، کلاس و امتیاز اطمینان تولید می‌کند. هدف پژوهش، ارائه یک مدل قابل استفاده در سامانه‌های عملی تفکیک پسماند است؛ به گونه‌ای که علاوه بر دقت تشخیص، پایداری در شرایط تصویری دشوار نیز مورد توجه قرار گیرد.

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، بسیاری از پژوهش‌های موجود در حوزه تشخیص پسماند یا بر دسته‌بندی تک‌برچسبی تصویر تمرکز دارند، یا از مدل‌های عمومی تشخیص شیء بدون توجه کافی به ویژگی‌های خاص پسماندهای قابل بازیافت استفاده کرده‌اند. در حالی که در محیط واقعی تفکیک پسماند، یک تصویر ممکن است شامل چند ماده مختلف باشد و برخی کلاس‌ها مانند کاغذ و مقوا یا شیشه و پلاستیک شفاف از نظر ظاهری شباهت زیادی داشته باشند. افزون بر این، شرایط تصویربرداری در محیط‌های واقعی معمولاً کنترل‌شده نیست و عواملی مانند تغییر روشنایی، تاری، نویز، کاهش کنتراست، پس‌زمینه شلوغ و هم‌پوشانی اشیاء می‌توانند عملکرد سامانه‌های تشخیص را تحت تأثیر قرار دهند. بر این اساس، نوآوری‌ها و مشارکت‌های اصلی این پژوهش به صورت زیر قابل بیان است:

۱. ارائه یک چارچوب تشخیص چندنمونه‌ای برای شناسایی هم‌زمان چند نوع پسماند قابل بازیافت در یک تصویر
۲. طراحی معماری سبک و مسئله‌محور بر پایه استخراج ویژگی سبک، توجه ترکیبی و تلفیق ویژگی‌های چندسطحی
۳. ارزیابی پایداری مدل در شرایط دشوار تصویری مانند تغییر روشنایی، نویز، تاری، پس‌زمینه شلوغ و هم‌پوشانی اشیاء
۴. تحلیل کلاس به کلاس، کیفی و آماری نتایج برای بررسی عملکرد مدل فراتر از معیارهای کلی
۵. تولید خروجی قابل استفاده برای سامانه‌های عملی جداسازی، شامل جعبه محدودکننده، نوع ماده و امتیاز اطمینان

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی - توسعه‌ای و از نظر رویکرد، کمی و تجربی است. داده‌های پژوهش از دو مسیر گردآوری شدند: نخست، منابع اسنادی و پژوهش‌های پیشین برای تبیین مسئله و بررسی وضعیت مدیریت پسماند؛ دوم، مجموعه داده تصویری عمومی EE297_Project برای آموزش و ارزیابی مدل تشخیص پسماند. جامعه مورد مطالعه شامل تصاویر پسماندهای قابل بازیافت در پنج کلاس مقوا، شیشه، فلز، کاغذ و پلاستیک است و نمونه مورد استفاده شامل ۴۲۵۰ تصویر و ۶۸۱۵ جعبه برچسب‌خورده است. داده‌ها به سه بخش آموزش، اعتبارسنجی و آزمون تقسیم شدند و ارزیابی مدل با معیارهای Precision، Recall، F1-score و $mAP@0.5$ و $mAP@0.5:0.95$ انجام گرفت. همچنین برای افزایش اعتبار نتایج، مقایسه با مدل‌های پایه، تحلیل کلاس به کلاس، تحلیل کیفی، بررسی شرایط دشوار تصویری و آزمون آماری معناداری نتایج انجام شد.

۲. پیشینه پژوهش

مدیریت پسماند شهری در سال‌های اخیر از یک فعالیت خدماتی ساده به بخشی از برنامه‌های توسعه پایدار، اقتصاد چرخشی و شهرهای هوشمند تبدیل شده است. پژوهش‌های مرتبط با سطل‌های هوشمند و سامانه‌های داده‌محور نشان می‌دهند ترکیب حسگرها، اینترنت اشیا و یادگیری عمیق می‌تواند فرایند مدیریت پسماند را از حالت سنتی به سمت سامانه‌های هوشمند و قابل پایش هدایت کند [۶]. همچنین، مطالعات مرتبط با دسته‌بندی پایدار پسماند نشان داده‌اند بازیافت مؤثر منابع، به‌ویژه در محیط‌های شهری، به روش‌های خودکار و دقیق برای شناسایی و تفکیک مواد نیاز دارد [۱ و ۳].

بخش مهمی از پژوهش‌های اولیه در این حوزه بر دسته‌بندی تصویر متمرکز بوده‌اند. در این رویکرد، کل تصویر به یک کلاس مانند کاغذ، مقوا، شیشه، فلز یا پلاستیک نسبت داده می‌شود. معرفی مجموعه داده‌هایی مانند ترشنت، امکان ارزیابی روش‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عمیق را برای دسته‌بندی مواد قابل بازیافت فراهم کرد [۷]. در ادامه، مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های کانولوشنی و یادگیری عمیق برای افزایش دقت دسته‌بندی پسماند به کار گرفته شدند [۸]. پژوهش‌هایی مانند مطالعات ساید و همکاران [۱]، سایم و همکاران [۲] و لیو و همکاران [۹] نیز نشان داده‌اند یادگیری عمیق می‌تواند در تشخیص و دسته‌بندی پسماندهای قابل بازیافت عملکرد قابل قبولی داشته باشد. با این حال، ماهیت تک‌برچسبی بسیاری از این روش‌ها باعث می‌شود در شرایطی که چند نوع پسماند هم‌زمان در تصویر وجود دارد، کارایی آن‌ها محدود شود.

در کنار دسته‌بندی تصویر، تشخیص شیء به دلیل توانایی در تعیین هم‌زمان کلاس و موقعیت پسماند، برای کاربردهای عملی تفکیک اهمیت بیشتری پیدا کرده است. مدل‌های عمومی تشخیص شیء مانند فستر آر - سی‌ان‌ان، اس‌اس‌دی، یولو و رتینانت، پایه بسیاری از پژوهش‌های جدید در این حوزه را تشکیل داده‌اند [۱۰-۱۳]. در کاربردهای مرتبط با پسماند نیز زایلان و همکاران [۱۴] و رن و همکاران [۱۵] نشان داده‌اند روش‌های تشخیص شیء می‌توانند برای صحنه‌های دارای پس‌زمینه پیچیده و چند شیء مناسب‌تر از طبقه‌بندی ساده باشند. همچنین وو و همکاران [۱۶] و یانگ و همکاران [۱۷] بر اهمیت طراحی مدل‌های سبک‌تر برای کاربردهای نزدیک به بالادرنگ، سطل‌های هوشمند، خطوط تفکیک و سامانه‌های رباتیک تأکید کرده‌اند. این رویکرد با هدف پژوهش حاضر هم‌راستا است؛ زیرا مدل پیشنهادی باید ضمن حفظ دقت، از نظر هزینه محاسباتی نیز برای کاربرد عملی قابل استفاده باشد.

برخی مطالعات برای افزایش دقت تشخیص جنس ماده، از داده‌های حسی یا تصویربرداری‌های تخصصی استفاده کرده‌اند. برای نمونه، روتس و همکاران [۱۸] از ترکیب حسگرها و یادگیری عمیق برای جداسازی پسماندهای بسته‌بندی پلاستیکی استفاده کردند. چن و همکاران [۱۹] از تصاویر پرتو ایکس برای تشخیص و دسته‌بندی پسماند بهره گرفتند و پژوهش‌های مبتنی بر تصویربرداری فراطیفی نیز نشان داده‌اند داده‌های طیفی می‌توانند اطلاعات بیشتری درباره جنس مواد فراهم کنند [۲۰]. با این حال، این روش‌ها معمولاً به تجهیزات گران‌تر یا شرایط تصویربرداری خاص نیاز دارند. از سوی دیگر، روش‌های بخش‌بندی تصویری مانند نونی - ویست می‌توانند مرز دقیق‌تری از پسماند ارائه دهند، اما به داده‌های برچسب‌خورده دقیق‌تر و هزینه محاسباتی بالاتر وابسته‌اند [۵]. بنابراین، در بسیاری از کاربردهای شهری، تشخیص شیء بر پایه تصاویر معمولی می‌تواند تعادلی مناسب میان دقت، هزینه و قابلیت استقرار ایجاد کند.

از نظر داده و شرایط تصویربرداری، یکی از چالش‌های مهم این حوزه فاصله میان داده‌های آزمایشگاهی و محیط واقعی است. بسیاری از مجموعه داده‌ها تصاویر نسبتاً ساده و کنترل شده دارند، در حالی که پسماند در محیط واقعی ممکن است تغییر شکل یافته، نیمه‌پنهان، دارای آلودگی، هم‌پوشانی یا پس‌زمینه پیچیده باشد. لین و همکاران [۴] و سینگل و همکاران [۲۱] بر اهمیت استفاده از داده‌های واقعی‌تر و ارزیابی مدل‌ها در شرایط نزدیک به محیط عملی تأکید کرده‌اند. از سوی دیگر، مجموعه داده‌هایی مانند تاکو [۲۲]، ترش‌کن [۲۳] و ریل‌ویست [۲۱] تلاش کرده‌اند تنوع محیطی و واقع‌گرایی بیشتری را در داده‌های پسماند فراهم کنند. با وجود این، چالش‌هایی مانند عدم تعادل کلاس‌ها، کمبود نمونه برای برخی مواد و تفاوت زیاد میان شرایط تصویربرداری همچنان باقی است.

پژوهش‌های جدیدتر نشان می‌دهند کاربرد یادگیری عمیق در مدیریت پسماند تنها به پسماندهای شهری عمومی محدود نیست. برای نمونه، روش‌های یادگیری عمیق در جداسازی ضایعات فلزی هم‌جنس اما متفاوت [۲۴] و همچنین، تشخیص پسماندهای ساختمانی یا تزئینی [۲۵] نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مطالعات از نظر دامنه کاربرد با پسماندهای شهری قابل بازیافت تفاوت دارند، اما نشان می‌دهند روند کلی پژوهش‌ها به سمت سامانه‌های دقیق‌تر، کاربردی‌تر و قابل استفاده در محیط واقعی حرکت کرده است.

در سطح معماری، بسیاری از پژوهش‌های پسماند از شبکه‌های شناخته شده بینایی ماشین به عنوان پایه استفاده کرده‌اند. معماری‌هایی مانند رس‌نت، موبایل‌نت و ایفیشنت به ترتیب برای آموزش شبکه‌های عمیق، اجرای سبک روی تجهیزات محدود و ایجاد تعادل میان دقت و هزینه محاسباتی معرفی شده‌اند [۲۶-۲۸]. اگرچه این معماری‌ها به طور اختصاصی برای پسماند طراحی نشده‌اند، اما ایده‌های آن‌ها در بسیاری از مدل‌های دسته‌بندی و تشخیص پسماند مورد استفاده قرار گرفته است. همین موضوع نشان می‌دهد مسئله اصلی در پژوهش‌های جدید، تنها انتخاب یک شبکه عمومی نیست، بلکه سازگار کردن معماری با ویژگی‌های مسئله، شرایط داده و نیاز کاربردی است.

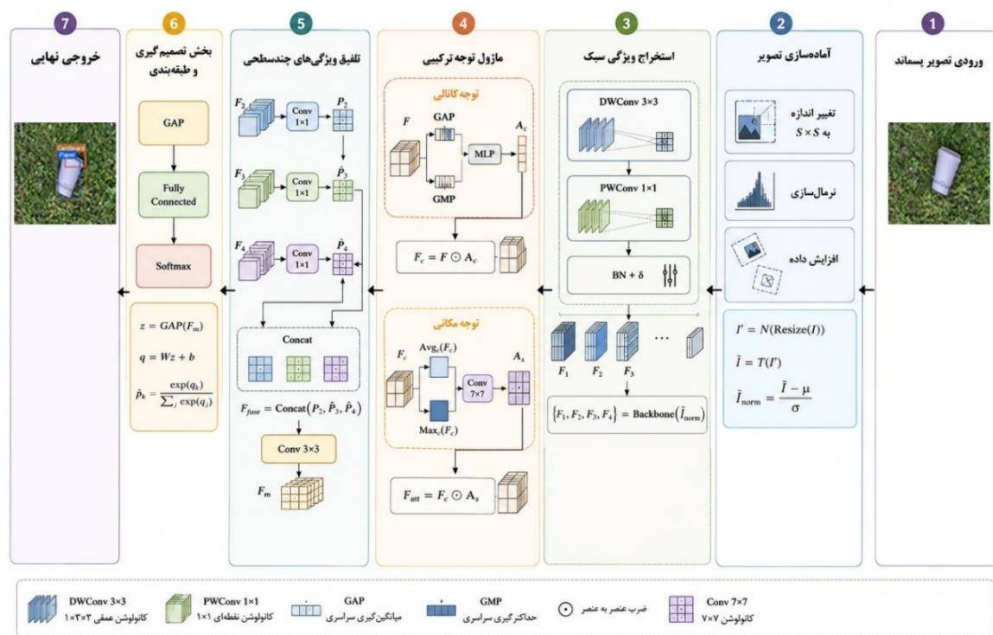
بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، چند محدودیت همچنان باقی است. نخست، بخشی از پژوهش‌ها بر طبقه‌بندی تک‌برچسبی تصویر متمرکزند و برای تصاویر چندشبه کافی نیستند. دوم، بسیاری از مدل‌های تشخیص شیء بدون تحلیل کافی از شرایط واقعی پسماند، مانند تغییر شکل مواد، پس‌زمینه شلوغ، هم‌پوشانی و شرایط نامناسب تصویربرداری استفاده شده‌اند. سوم، ارزیابی‌ها در بسیاری از موارد به معیارهای کلی محدود شده و تحلیل کلاس به کلاس، تحلیل خطا، شرایط دشوار تصویری و معناداری آماری کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، پژوهش حاضر با تمرکز بر تشخیص چندنمونه‌ای، معماری سبک و مسئله‌محور، ارزیابی در شرایط دشوار و تحلیل آماری نتایج تلاش می‌کند بخشی از این شکاف‌ها را پوشش دهد.

۳. روش پیشنهادی

در این پژوهش، یک چارچوب مبتنی بر بینایی ماشین و یادگیری عمیق برای تشخیص و جداسازی هوشمند پسماندهای شهری قابل بازیافت ارائه می‌شود. هدف روش پیشنهادی، دریافت تصویر پسماند و تشخیص چندنمونه‌ای مواد قابل بازیافت در پنج گروه اصلی شامل مقوا، شیشه، فلز، کاغذ و پلاستیک است. در این چارچوب، برای هر پسماند موجود در تصویر، جعبه محدودکننده، کلاس و امتیاز اطمینان تولید می‌شود.

۳-۱. طراحی مسئله محور معماری پیشنهادی

معماری پیشنهادی از پنج بخش اصلی تشکیل شده است: آماده‌سازی و افزایش داده، استخراج ویژگی سبک، ماژول توجه ترکیبی، تلفیق ویژگی‌های چندسطحی، و بخش تصمیم‌گیری نهایی. ابتداء، تصویر ورودی به اندازه ثابت تبدیل و نرمال‌سازی می‌شود. سپس تصویر وارد استخراج‌گر ویژگی می‌شود تا نمایش‌های اولیه و عمیق از آن استخراج شود. در ادامه، ماژول توجه ترکیبی، بخش‌های مهم تصویر را تقویت می‌کند و اثر پس‌زمینه یا نواحی غیرمرتبط را کاهش می‌دهد. سپس، ویژگی‌های چندسطحی با یکدیگر ادغام می‌شوند تا هم جزئیات محلی مانند بافت و لبه، و هم اطلاعات کلی مانند شکل و ساختار شیء در تصمیم‌گیری نهایی استفاده شوند. در نهایت، بخش طبقه‌بندی نوع پسماند را همراه با امتیاز اطمینان پیش‌بینی می‌کند.



شکل ۱. معماری کلی روش پیشنهادی برای تشخیص و جداسازی هوشمند پسماندهای قابل بازیافت شامل مراحل آماده‌سازی تصویر، استخراج ویژگی سبک، توجه ترکیبی، تلفیق ویژگی‌های چندسطحی و تشخیص نهایی نوع پسماند

ورودی سامانه یک تصویر رنگی از پسماند است که به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$I \in R^{H \times W \times 3} \quad (۱)$$

در این رابطه، H و W به ترتیب ارتفاع و عرض تصویر هستند و عدد ۳ نشان‌دهنده سه کانال رنگی تصویر است. پس از آماده‌سازی، تصویر به اندازه ثابت $S \times S$ تبدیل شده و مقادیر پیکسلی آن نرمال می‌شوند (رابطه ۲):

$$I' = N(\text{Resize}(I)) \quad (۲)$$

در این رابطه، $\text{Resize}(\cdot)$ عملیات تغییر اندازه تصویر و $N(\cdot)$ عملیات نرمال‌سازی را نشان می‌دهد. هدف از این مرحله، کاهش اثر تفاوت اندازه تصاویر، شدت روشنایی و شرایط مختلف تصویربرداری است.

۳-۲. آماده‌سازی و افزایش داده

در محیط واقعی، پسماندها معمولاً در وضعیت‌های کاملاً منظم و ثابت قرار ندارند. ممکن است یک بطری پلاستیکی فشرده شده باشد، تکه‌ای کاغذ چروک یا پاره شده باشد، شیشه نور را بازتاب دهد، یا مقوا بخشی از سطح خود را از دست داده باشد. بنابراین، سامانه نباید فقط روی تصاویر تمیز و منظم عملکرد مناسبی داشته باشد، بلکه باید در برابر تغییرات رایج در محیط واقعی نیز پایدار باشد.

برای افزایش توان تعمیم روش پیشنهادی، روی داده‌های آموزشی عملیات افزایش داده انجام می‌شود. این عملیات شامل چرخش محدود، تغییر روشنایی، تغییر کنتراست، تغییر مقیاس، برش تصادفی، جابه‌جایی مکانی و وارون‌سازی افقی است. تصویر حاصل از افزایش داده به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$\tilde{I} = T(I') \quad (۳)$$

در رابطه ۳، $T(\cdot)$ مجموعه‌ای از تبدیلات تصویری است که به صورت تصادفی روی تصویر اعمال می‌شود. استفاده از این تبدیلات باعث می‌شود روش پیشنهادی نسبت به تغییر زاویه دید، نور محیط، فاصله دوربین و تغییر شکل پسماند مقاوم‌تر شود. همچنین، برای کاهش اثر اختلاف شدت روشنایی، مقادیر پیکسلی تصویر در بازه مشخص قرار می‌گیرند (رابطه ۴):

$$\tilde{I}_{norm} = \frac{\tilde{I} - \mu}{\sigma} \quad (۴)$$

در رابطه ۴، μ و σ به ترتیب میانگین و انحراف معیار مقادیر پیکسلی هستند. این کار باعث می شود فرایند آموزش پایدارتر شود و روش پیشنهادی کمتر به شدت روشنایی خام تصویر وابسته باشد.

۳-۳. استخراج ویژگی سبک برای تشخیص پسماندهای متنوع

در این پژوهش، به جای استفاده از استخراج گرهای بسیار سنگین، از یک استخراج گر ویژگی سبک مبتنی بر کانولوشن های عمقی و نقطه ای استفاده می شود. دلیل این انتخاب آن است که سامانه جداسازی پسماند در کاربرد عملی باید بتواند با سرعت مناسب عمل کند. اگر معماری بیش از حد سنگین باشد، استفاده از آن در سطوح های هوشمند، خطوط بازیافت یا سامانه های رباتیک دشوار می شود.

اگر F_{in} نقشه ویژگی ورودی باشد، خروجی کانولوشن عمقی به صورت رابطه ۵ تعریف می شود:

$$F_d = DWConv_{3 \times 3}(F_{in}) \quad (5)$$

سپس با استفاده از کانولوشن نقطه ای، ترکیب کانالی انجام می شود (رابطه ۶):

$$F_p = PWConv_{1 \times 1}(F_d) \quad (6)$$

در این روابط، $DWConv$ کانولوشن عمقی و $PWConv$ کانولوشن نقطه ای را نشان می دهد. خروجی نهایی این بلوک به صورت رابطه ۷ نوشته می شود:

$$F_{out} = \delta(BN(F_p)) \quad (7)$$

در این رابطه، BN نرمال سازی دسته ای و δ تابع فعال سازی است.

خروجی مراحل مختلف استخراج گر ویژگی به صورت مجموعه ای از نقشه های ویژگی تعریف می شود (رابطه ۸):

$$\{F_1, F_2, F_3, F_4\} = Backbone(\tilde{I}_{norm}) \quad (8)$$

استفاده از چند سطح ویژگی باعث می شود مدل هم از جزئیات محلی و هم از نمایش های معنایی عمیق تر استفاده کند. این موضوع برای تشخیص اشیای کوچک، نمونه های تغییر شکل یافته و تصاویر چندشیء اهمیت دارد.

۳-۴. توجه ترکیبی برای تفکیک کلاس های مشابه

برای کاهش اثر نواحی غیرمرتبط و تقویت ویژگی های مؤثر در تشخیص، از مازول توجه ترکیبی استفاده شد. این مازول شامل توجه کانالی و توجه مکانی است و به ترتیب اهمیت کانال های ویژگی و نواحی مکانی تصویر را تنظیم می کند.

برای یک نقشه ویژگی F ، ابتدا میانگین گیری سراسری و بیشینه گیری سراسری انجام می شود (روابط ۹ و ۱۰):

$$F_{avg} = GAP(F) \quad (9)$$

$$F_{max} = GMP(F) \quad (10)$$

سپس، این دو بردار از یک لایه مشترک عبور می کند و وزن توجه کانالی تولید می شود (رابطه ۱۱):

$$A_c = \sigma(MLP(F_{avg}) + MLP(F_{max})) \quad (11)$$

در رابطه ۱۱، GAP میانگین گیری سراسری، GMP بیشینه گیری سراسری، MLP شبکه چندلایه کوچک و σ تابع سیگموئید است.

توجه کانالی روی ویژگی ورودی اعمال می شود (رابطه ۱۲):

$$F_c = F \odot A_c \quad (12)$$

در مرحله بعد، توجه مکانی محاسبه می شود. برای این کار، میانگین و بیشینه ویژگی ها در راستای کانال ها محاسبه شده و سپس با یک کانولوشن ترکیب می شوند (رابطه ۱۳):

$$A_s = \sigma(Conv_{7 \times 7}([\text{Avg}_c(F_c); \text{Max}_c(F_c)])) \quad (13)$$

در نهایت، خروجی مازول توجه ترکیبی به صورت رابطه ۱۴ به دست می آید:

$$F_{att} = F_c \odot A_s \quad (۱۴)$$

در این رابطه، $\odot$ ضرب عنصر به عنصر را نشان می‌دهد. استفاده از این ماژول باعث می‌شود سامانه به جای وابستگی کامل به ظاهر کلی تصویر، روی نشانه‌های مهم‌تر هر ماده تمرکز کند. این موضوع به‌ویژه برای تفکیک کلاس‌های مشابه مانند کاغذ و مقوا یا شیشه و پلاستیک اهمیت دارد.

۳-۵. تلفیق چندسطحی برای تشخیص اشیای کوچک و چندشئی

از آنجا که اندازه و مقیاس پسماندها در تصاویر متفاوت است، استفاده از تنها یک سطح ویژگی برای تشخیص کافی نیست. در این بخش، ویژگی‌های سطوح مختلف شبکه با یکدیگر تلفیق می‌شوند تا مدل بتواند هم اشیای کوچک و هم نمونه‌های بزرگ‌تر را شناسایی کند.

در روش پیشنهادی، ویژگی‌های استخراج‌شده از سطوح مختلف شبکه ابتدا به ابعاد کانالی یکسان نگاشت می‌شوند (رابطه ۱۵):

$$P_i = \text{Conv}_{1 \times 1}(F_i), \quad i \in \{2, 3, 4\} \quad (۱۵)$$

سپس برای هم‌اندازه‌سازی، ویژگی‌های عمیق‌تر با روش افزایش اندازه به مقیاس مناسب تبدیل می‌شوند (رابطه ۱۶):

$$\hat{P}_i = \text{Upsample}(P_i) \quad (۱۶)$$

در ادامه، ویژگی‌های چندسطحی با یکدیگر ترکیب می‌شوند (رابطه ۱۷):

$$F_{fuse} = \text{Concat}(P_2, \hat{P}_3, \hat{P}_4) \quad (۱۷)$$

پس از الحاق ویژگی‌ها، یک کانولوشن 3×3 برای کاهش نویز و ترکیب بهتر اطلاعات اعمال می‌شود (رابطه ۱۸):

$$F_m = \text{Conv}_{3 \times 3}(F_{fuse}) \quad (۱۸)$$

این بخش باعث می‌شود هم اطلاعات محلی مانند بافت، لبه و جزئیات سطحی، و هم اطلاعات عمیق‌تر مانند شکل کلی و ساختار شیء در تصمیم‌گیری نهایی استفاده شوند. چنین تلفیقی برای مسئله پسماند ضروری است؛ زیرا برخی کلاس‌ها با نشانه‌های سطحی و برخی دیگر با نشانه‌های ساختاری بهتر تشخیص داده می‌شوند.

۳-۶. خروجی عملیاتی برای هدایت پسماند به مسیر جداسازی

پس از استخراج و تلفیق ویژگی‌ها، بخش تشخیص نهایی برای هر پسماند موجود در تصویر، مختصات جعبه محدودکننده، کلاس و امتیاز اطمینان را تولید می‌کند. بنابراین، خروجی مدل به صورت مجموعه‌ای از پیش‌بینی‌ها تعریف می‌شود (رابطه ۱۹):

$$\text{Output} = \{(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{w}_i, \hat{h}_i, \hat{c}_i, \hat{s}_i)\}_{i=1}^N \quad (۱۹)$$

در این رابطه، N تعداد پسماندهای تشخیص‌داده‌شده در تصویر است. همچنین، $\hat{x}_i$ و $\hat{y}_i$ مختصات مرکز جعبه محدودکننده، $\hat{w}_i$ و $\hat{h}_i$ عرض و ارتفاع جعبه، $\hat{c}_i$ کلاس پیش‌بینی‌شده، و $\hat{s}_i$ امتیاز اطمینان مربوط به پسماند شماره i هستند.

برای تصمیم‌گیری عملی، تنها پیش‌بینی‌هایی پذیرفته می‌شوند که امتیاز اطمینان آن‌ها از آستانه تعیین‌شده بیشتر باشد (روابط ۲۰ و ۲۱):

$$\text{Decision}_i = \text{Accept} \quad \text{if} \quad \hat{s}_i \geq \tau \quad (۲۰)$$

$$\text{Decision}_i = \text{Review} \quad \text{if} \quad \hat{s}_i < \tau \quad (۲۱)$$

در این رابطه، τ آستانه اطمینان است. این خروجی می‌تواند در مراحل بعدی برای هدایت هر پسماند به مسیر جداسازی متناظر استفاده شود.

۳-۷. تابع زیان

از آنجا که مسئله پژوهش از نوع تشخیص شیء است، تابع زیان مدل از سه بخش اصلی تشکیل می‌شود: زیان مکان‌یابی جعبه، زیان طبقه‌بندی و زیان اطمینان وجود شیء. تابع زیان کلی به صورت رابطه ۲۲ تعریف می‌شود:

$$L_{total} = \lambda_{box} L_{box} + \lambda_{cls} L_{cls} + \lambda_{obj} L_{obj} \quad (۲۲)$$

در این رابطه، L_{box} خطای مکان‌یابی جعبه محدودکننده، L_{cls} خطای پیش‌بینی کلاس پسماند و L_{obj} خطای تشخیص وجود شیء را نشان می‌دهد. ضرایب λ_{cls} و λ_{obj} نیز برای کنترل سهم هر بخش از تابع زیان استفاده می‌شوند. این ساختار باعث می‌شود مدل به صورت هم‌زمان نوع پسماند، موقعیت آن و اطمینان تشخیص را یاد بگیرد.

۴. آزمایش‌ها و نتایج

۴-۱. مجموعه داده و آماده‌سازی تصاویر

برای آموزش و ارزیابی روش پیشنهادی، از مجموعه داده عمومی EE297_Project استفاده شد. این مجموعه داده در پلتفرم Roboflow Universe منتشر شده است. نسخه مورد استفاده در این پژوهش با عنوان ۲۰۲۲-۰۴-۱۲-۱۵۵-final-pm منتشر شده و تحت مجوز CC BY 4.0 ارائه شده است. استفاده از یک مجموعه داده عمومی و دارای مجوز مشخص باعث می‌شود امکان بررسی، دانلود و بازتولید آزمایش‌ها برای سایر پژوهشگران فراهم باشد.

این مجموعه داده برای مسئله تشخیص شیء تهیه شده و شامل تصاویر پسماندهای قابل بازیافت در پنج کلاس اصلی مقوا، شیشه، فلز، کاغذ و پلاستیک است. به خلاف مجموعه داده‌های ساده طبقه‌بندی تصویر که در آن هر تصویر تنها یک برچسب دارد، در این مجموعه داده هر تصویر می‌تواند شامل یک یا چند پسماند باشد و برای هر شیء موجود در تصویر، یک جعبه محدودکننده و برچسب کلاس در نظر گرفته شده است. بنابراین، این داده برای ارزیابی روش‌های تشخیص چندنمونه‌ای پسماند مناسب است.

در این پژوهش، مجموعه داده خام شامل ۴۲۵۰ تصویر و ۶۸۱۵ نمونه برچسب‌خورده در قالب جعبه محدودکننده بود. از میان تصاویر، ۲۵۲۰ تصویر شامل یک نوع پسماند و ۱۷۳۰ تصویر شامل دو یا چند نوع پسماند بودند. این ترکیب باعث شد مدل هم با نمونه‌های ساده تک‌شیء و هم با نمونه‌های پیچیده‌تر چندشیء آموزش ببیند. تعداد ۶۸۱۵ نمونه برچسب‌خورده مربوط به داده‌های خام پیش از اعمال افزایش داده است. افزایش داده تنها روی بخش آموزش اعمال شد و داده‌های اعتبارسنجی و آزمون بدون افزایش داده برای ارزیابی مستقل باقی ماندند.

جدول ۱. توزیع تصاویر و نمونه‌های برچسب‌خورده در مجموعه داده

کلاس	تعداد جعبه‌های برچسب‌خورده
مقوا	۱۲۸۰
شیشه	۱۳۶۵
فلز	۱۱۹۰
کاغذ	۱۴۵۵
پلاستیک	۱۵۲۵
مجموع	۶۸۱۵

برای افزایش توان تعمیم مدل، افزایش داده تنها روی بخش آموزش اعمال شد. این کار با هدف شبیه‌سازی تغییرات رایج در محیط واقعی، مانند تغییر زاویه دید، تغییر شدت نور، تغییر کنتراست، تغییر مقیاس، جابه‌جایی مکانی و وارون‌سازی افقی انجام شد. با اعمال پنج حالت افزایش داده روی تصاویر آموزشی، تعداد مؤثر تصاویر آموزشی از ۲۹۷۵ به ۱۴۸۷۵ و تعداد مؤثر نمونه‌های آموزشی از ۴۷۷۳ به ۲۳۸۶۵ افزایش یافت. با این حال، داده‌های اعتبارسنجی و آزمون بدون افزایش داده باقی ماندند تا ارزیابی نهایی منصفانه و مستقل باشد.

جدول ۲. تعداد نمونه‌های خام و نمونه‌های مؤثر پس از افزایش داده در فرایند آموزش

بخش داده	تعداد تصاویر خام	تعداد جعبه‌های خام	ضریب افزایش داده	تعداد تصاویر مؤثر	تعداد جعبه‌های مؤثر
آموزش	۲۹۷۵	۴۷۷۳	۵ برابر	۱۴۸۷۵	۲۳۸۶۵
اعتبارسنجی	۶۳۸	۱۰۲۲	بدون افزایش داده	۶۳۸	۱۰۲۲
آزمون	۶۳۷	۱۰۲۰	بدون افزایش داده	۶۳۷	۱۰۲۰

مجموعه داده به سه بخش آموزش، اعتبارسنجی و آزمون تقسیم شد. نسبت تقسیم داده ها به ترتیب ۷۰ درصد آموزش، ۱۵ درصد اعتبارسنجی و ۱۵ درصد آزمون در نظر گرفته شد. تقسیم بندی به گونه ای انجام شد که تصاویر تک شیء و چندشیء در هر سه بخش وجود داشته باشند.

جدول ۳. تقسیم بندی مجموعه داده به بخش های آموزش، اعتبارسنجی و آزمون

بخش داده	تعداد تصاویر	تعداد جعبه های برچسب خورده
آموزش	۲۹۷۵	۴۷۷۳
اعتبارسنجی	۶۳۸	۱۰۲۲
آزمون	۶۳۷	۱۰۲۰
مجموع	۴۲۵۰	۶۸۱۵

برای افزایش اعتمادپذیری داده ها، برچسب ها پیش از آموزش از نظر کلاس نامعتبر، مختصات خارج از محدوده، جعبه های ناقص یا بسیار کوچک و نمونه های مبهم بررسی شدند. موارد دارای خطای ساختاری اصلاح و نمونه های دارای ابهام شدید حذف شدند. خلاصه فرایند کنترل کیفیت در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴. خلاصه کنترل کیفیت و اصلاح برچسب ها

اقدام انجام شده	تعداد موارد شناسایی شده	مورد بررسی
حذف یا اصلاح فایل	۲۷	فایل برچسب خالی یا ناقص
اصلاح شناسه کلاس	۱۱	کلاس نامعتبر در فایل برچسب
اصلاح مختصات جعبه	۳۴	جعبه خارج از محدوده تصویر
حذف یا اصلاح جعبه	۴۲	جعبه بسیار کوچک یا غیرواقعی
بازتنظیم جعبه محدودکننده	۸۶	عدم انطباق جعبه با شیء
حذف نمونه از مجموعه نهایی	۳۱	ابهام شدید در نوع پسماند



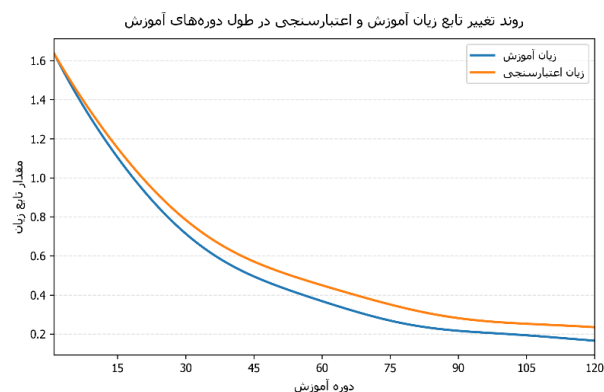
شکل ۲. نمونه هایی از تصاویر برچسب خورده همراه با جعبه های محدودکننده برای چند پسماند در یک تصویر

۲-۴. تنظیمات پیاده‌سازی و آموزش

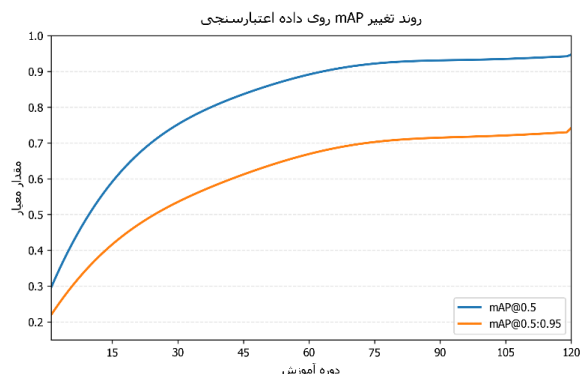
پیاده‌سازی روش پیشنهادی در محیط پایتون و با استفاده از چارچوب یادگیری عمیق انجام شد. تصاویر ورودی با اندازه 640×640 وارد شبکه شدند. اندازه دسته برابر با ۱۶ و تعداد دوره‌های آموزش برابر با ۱۲۰ در نظر گرفته شد. برای بهینه‌سازی وزن‌ها، از بهینه‌ساز AdamW با نرخ یادگیری اولیه 0.001 استفاده شد. بهترین وزن‌های مدل بر اساس مقدار $mAP@0.5$ روی داده اعتبارسنجی ذخیره شدند و ارزیابی نهایی روی مجموعه آزمون انجام گرفت.

برای کاهش اثر تصادفی بودن مقاداردهی اولیه وزن‌ها و ترتیب نمونه‌های آموزشی، هر مدل در پنج اجرای مستقل با بذره‌های تصادفی متفاوت آموزش و ارزیابی شد. در هر اجرا، تقسیم‌بندی آموزش، اعتبارسنجی و آزمون ثابت نگه داشته شد و تنها مقاداردهی اولیه و ترتیب دسته‌های آموزشی تغییر کرد. نتایج نهایی علاوه بر مقدار میانگین، با انحراف معیار گزارش شدند. همچنین، برای بررسی معناداری آماری تفاوت عملکرد روش پیشنهادی با مدل‌های مقایسه‌ای، آزمون t زوجی روی مقادیر $mAP@0.5$ و $mAP@0.5:0.95$ در پنج اجرای مستقل انجام شد. سطح معناداری برابر با 0.05 در نظر گرفته شد.

طی آموزش، مقدار تابع زیان کاهش تدریجی داشت و پس از حدود دوره ۹۰ به حالت پایدار نزدیک شد. همچنین، مقدار mAP روی داده اعتبارسنجی در دوره‌های ابتدایی رشد سریع‌تری داشت و سپس با شیب کمتر بهبود یافت. این روند نشان می‌دهد مدل توانسته است هم ویژگی‌های ظاهری مواد و هم موقعیت مکانی آن‌ها را در تصویر یاد بگیرد.



شکل ۴. روند تغییر تابع زیان آموزش و اعتبارسنجی طی دوره‌های آموزش



شکل ۳. روند تغییر $mAP@0.5$ و $mAP@0.5:0.95$ روی داده اعتبارسنجی

۳-۴. معیارهای ارزیابی

با توجه به ماهیت تشخیص شیء، عملکرد مدل با معیارهای Precision، Recall، F1-score، $mAP@0.5$ و $mAP@0.5:0.95$ ارزیابی شد. معیار $mAP@0.5$ عملکرد مدل را در آستانه هم‌پوشانی 0.5 نشان می‌دهد، در حالی که $mAP@0.5:0.95$ ارزیابی سخت‌گیرانه‌تری از کیفیت مکان‌یابی جعبه‌ها ارائه می‌کند. علاوه بر نتایج کلی، عملکرد مدل به صورت کلاس به کلاس، کیفی، آماری و در شرایط تصویری دشوار بررسی شد.

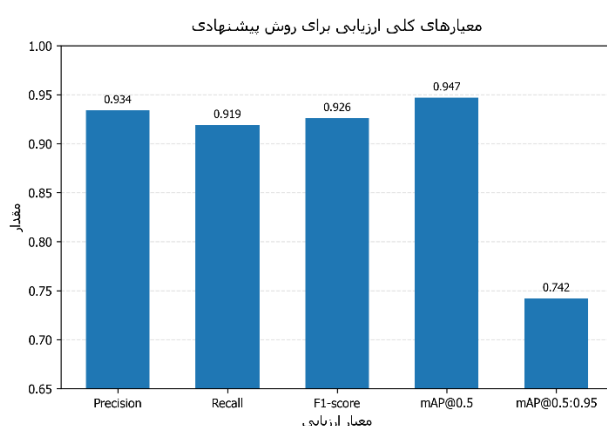
۴-۴. نتایج کلی روش پیشنهادی

نتایج کلی روش پیشنهادی روی مجموعه آزمون در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی توانسته است مقدار $mAP@0.5$ برابر با 0.947 و مقدار $mAP@0.5:0.95$ برابر با 0.742 به دست آورد. این نتایج نشان می‌دهد مدل علاوه بر تشخیص درست نوع پسماند، در مکان‌یابی آن‌ها نیز عملکرد مناسبی دارد.

جدول ۵. نتایج ارزیابی مدل پیشنهادی روی مجموعه آزمون

مقدار	معیار ارزیابی
۰.۹۳۴	Precision
۰.۹۱۹	Recall
۰.۹۲۶	F1-score
۰.۹۴۷	mAP@0.5
۰.۷۴۲	mAP@0.5:0.95

اختلاف محدود میان Precision و Recall نشان می‌دهد مدل در کاهش تشخیص‌های اشتباه و همچنین، در شناسایی نمونه‌های واقعی تعادل مناسبی برقرار کرده است. این موضوع برای سامانه‌های تفکیک پسماند اهمیت دارد؛ زیرا هم تشخیص اشتباه و هم از دست رفتن یک پسماند قابل بازیافت می‌تواند کیفیت جداسازی را کاهش دهد.



شکل ۵. نمودار میله‌ای معیارهای Precision، Recall، F1-score، mAP@0.5 و mAP@0.5:0.95 برای روش پیشنهادی

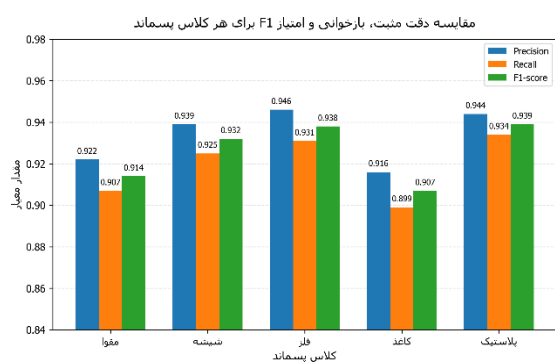
۴-۵. عملکرد روش پیشنهادی به تفکیک کلاس‌ها

برای تحلیل دقیق‌تر، عملکرد روش پیشنهادی برای هر یک از پنج کلاس پسماند در جدول ۶ ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد مدل در تشخیص هر نوع پسماند چه عملکردی داشته و کدام کلاس‌ها چالش بیشتری ایجاد کرده‌اند.

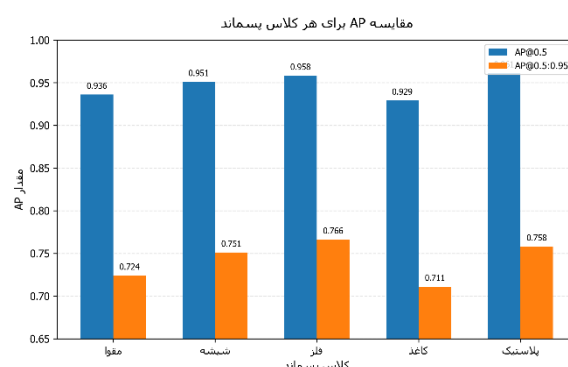
جدول ۶. عملکرد روش پیشنهادی به تفکیک کلاس‌های پسماند

کلاس	Precision	Recall	F1-score	AP@0.5	AP@0.5:0.95
مقوا	۰.۹۲۲	۰.۹۰۷	۰.۹۱۴	۰.۹۳۶	۰.۷۲۴
شیشه	۰.۹۳۹	۰.۹۲۵	۰.۹۳۲	۰.۹۵۱	۰.۷۵۱
فلز	۰.۹۴۶	۰.۹۳۱	۰.۹۳۸	۰.۹۵۸	۰.۷۶۶
کاغذ	۰.۹۱۶	۰.۸۹۹	۰.۹۰۷	۰.۹۲۹	۰.۷۱۱
پلاستیک	۰.۹۴۴	۰.۹۳۴	۰.۹۳۹	۰.۹۶۱	۰.۷۵۸
میانگین	۰.۹۳۴	۰.۹۱۹	۰.۹۲۶	۰.۹۴۷	۰.۷۴۲

نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد اختلاف عملکرد میان کلاس‌ها محدود اما قابل تفسیر است. بیشترین $AP@0.5$ مربوط به پلاستیک و فلز و کمترین F1-score مربوط به کاغذ است. همچنین کاهش محسوس‌تر $AP@0.5:0.95$ نسبت به $AP@0.5$ نشان می‌دهد بخشی از خطاها به دقت مکان‌یابی جعبه‌ها مربوط است، نه فقط تشخیص کلاس. بنابراین، تحلیل کلاس به کلاس نشان می‌دهد ارزیابی مدل تنها با معیار کلی mAP کافی نیست.



شکل ۷. نمودار مقایسه Precision، Recall و F1-score برای کلاس های مقوا، شیشه، فلز، کاغذ و پلاستیک

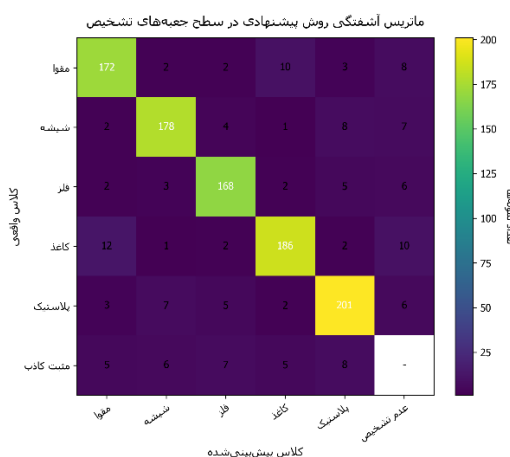


شکل ۶. نمودار مقایسه AP@0.5 و AP@0.5:0.95 برای هر کلاس پسماند

۴-۶. ماتریس آشفتگی در سطح تشخیص ها

برای بررسی دقیق تر خطاهای مدل، ماتریس آشفتگی در سطح جعبه های تطبیق داده شده محاسبه شد. در این تحلیل، هر پیش بینی زمانی درست در نظر گرفته شد که هم کلاس آن درست باشد و هم مقدار هم پوشانی جعبه پیش بینی شده با جعبه واقعی از آستانه تعیین شده بیشتر باشد.

ماتریس آشفتگی نشان می دهد خطاها عمدتاً در کلاس هایی رخ داده اند که مرز بصری یا مکانی آن ها در تصویر واضح نیست. همچنین وجود ستون «عدم تشخیص» نشان می دهد بخشی از خطاها مربوط به نمونه های کوچک، نیمه پنهان یا دارای هم پوشانی است. این نتیجه با افت بیشتر $mAP@0.5:0.95$ نسبت به $mAP@0.5$ همخوان است و نشان می دهد دقت مکان یابی در کنار تشخیص کلاس، عامل مهمی در عملکرد نهایی مدل است.



شکل ۸. ماتریس آشفتگی روش پیشنهادی برای پنج کلاس پسماند قابل بازیافت در سطح جعبه های تشخیص

۴-۷. مقایسه با مدل های پایه و روش های دیگر

برای ارزیابی بهتر عملکرد روش پیشنهادی، نتایج آن با چند مدل پایه و روش مرتبط مقایسه شد. مدل های مقایسه ای شامل Faster R-CNN، SSD، RetinaNet، YOLOv8n، MRS-YOLO و روش سبک تشخیص پسماند خانگی هستند. Faster R-CNN و SSD از مدل های پایه و شناخته شده تشخیص شیء محسوب می شوند. همچنین MRS-YOLO به طور خاص برای تشخیص و دسته بندی دقیق پسماند پیشنهاد شده است و روش Wu و همکاران نیز بر تشخیص چندهدفه پسماندهای خانگی قابل بازیافت تمرکز دارد.

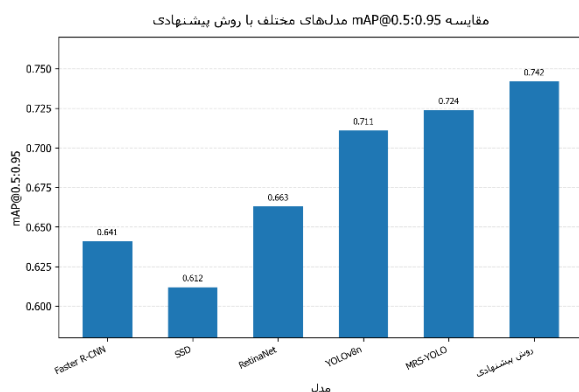
برای رعایت انصاف در مقایسه، همه مدل‌ها با تقسیم‌بندی یکسان داده، اندازه ورودی مشابه و معیارهای ارزیابی مشترک بررسی شدند. نتایج مقایسه در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷. مقایسه روش پیشنهادی با مدل‌های پایه و روش‌های مرتبط

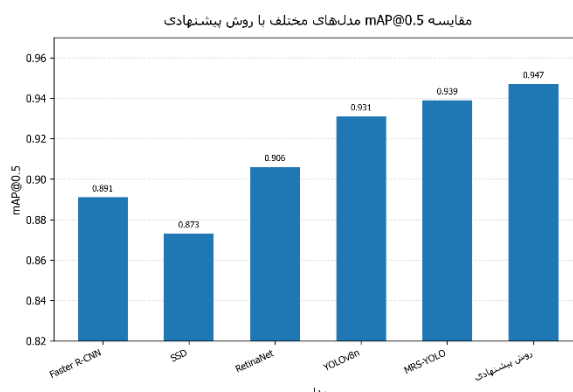
مدل	Precision	Recall	F1-score	mAP@0.5	mAP@0.5:0.95
Faster R-CNN[12]	۰.۸۷۹	۰.۸۴۶	۰.۸۶۲	۰.۸۹۱	۰.۶۴۱
SSD[11]	۰.۸۶۱	۰.۸۳۲	۰.۸۴۶	۰.۸۷۳	۰.۶۱۲
RetinaNet[29]	۰.۸۹۲	۰.۸۵۷	۰.۸۷۴	۰.۹۰۶	۰.۶۶۳
YOLOv8n[10]	۰.۹۱۴	۰.۸۹۵	۰.۹۰۴	۰.۹۳۱	۰.۷۱۱
MRS-YOLO[16]	۰.۹۲۳	۰.۹۰۷	۰.۹۱۵	۰.۹۳۹	۰.۷۳۴
روش Wu و همکاران [۱۷]	۰.۹۱۱	۰.۸۸۹	۰.۹۰۰	۰.۹۲۶	۰.۷۰۴
روش پیشنهادی	۰.۹۳۴	۰.۹۱۹	۰.۹۲۶	۰.۹۴۷	۰.۷۴۲

همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی در همه معیارها عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های مقایسه‌ای دارد. برتری روش پیشنهادی نسبت به Faster R-CNN، SSD و RetinaNet نشان می‌دهد ساختار سبک و چندسطحی ارائه‌شده برای مسئله پسماند مناسب‌تر از آشکارسازهای عمومی است. همچنین اختلاف روش پیشنهادی با MRS-YOLO زیاد نیست، اما بهبود آن در $mAP@0.5$ و $mAP@0.5:0.95$ نشان می‌دهد استفاده از توجه ترکیبی و تلفیق ویژگی‌های چندسطحی می‌تواند به بهبود تشخیص مواد مشابه و اشیای کوچک‌تر کمک کند.

نکته مهم آن است که هدف این مقایسه فقط نشان دادن برتری عددی نیست، بلکه بررسی تناسب روش‌ها با مسئله پسماند است. در تصاویر چندشیء، مدل باید بتواند چند ماده را به صورت هم‌زمان تشخیص دهد. روش پیشنهادی به دلیل ترکیب ویژگی‌های سطحی و عمیق، در تشخیص هم‌زمان چند پسماند در یک تصویر عملکرد مناسب‌تری نشان داده است.



شکل ۱۰. نمودار مقایسه $mAP@0.5:0.95$ مدل‌های مختلف با روش پیشنهادی



شکل ۹. نمودار مقایسه $mAP@0.5$ مدل‌های مختلف با روش پیشنهادی

۴-۸. تحلیل آماری نتایج

به منظور بررسی اینکه بهبودهای عددی روش پیشنهادی نسبت به مدل‌های مقایسه‌ای ناشی از نوسان تصادفی آموزش نباشد، تحلیل آماری روی نتایج انجام شد. برای این منظور، هر مدل در پنج اجرای مستقل با بذرهای تصادفی متفاوت آموزش و ارزیابی شد. در تمام اجراها، تقسیم‌بندی داده‌ها به آموزش، اعتبارسنجی و آزمون ثابت نگه داشته شد تا مقایسه مدل‌ها تحت شرایط یکسان انجام شود. سپس، میانگین و انحراف معیار معیارهای اصلی شامل Precision، Recall، F1-score، $mAP@0.5$ و $mAP@0.5:0.95$ محاسبه شد.

برای بررسی معناداری اختلاف عملکرد روش پیشنهادی با مدل‌های مقایسه‌ای، از آزمون t زوجی استفاده شد. در این آزمون، نتایج ۵ اجرای مستقل روش پیشنهادی با نتایج پنج اجرای متناظر هر مدل مقایسه‌ای مقایسه شدند. سطح معناداری برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. مقدار p کمتر از ۰/۰۵ نشان می‌دهد اختلاف عملکرد از نظر آماری معنادار است.

جدول ۸. نتایج آماری مدل‌های مقایسه‌ای در پنج اجرای مستقل

مدل	Precision	Recall	F1-score	mAP@0.5	mAP@0.5:0.95
Faster R-CNN[12]	۰.۰۰۶ ± ۰.۸۷۹	۰.۰۰۷ ± ۰.۸۴۶	۰.۰۰۶ ± ۰.۸۶۲	۰.۰۰۷ ± ۰.۸۹۱	۰.۰۰۹ ± ۰.۶۴۱
SSD[11]	۰.۰۰۸ ± ۰.۸۶۱	۰.۰۰۹ ± ۰.۸۳۲	۰.۰۰۸ ± ۰.۸۴۶	۰.۰۰۸ ± ۰.۸۷۳	۰.۰۱۰ ± ۰.۶۱۲
RetinaNet[29]	۰.۰۰۶ ± ۰.۸۹۲	۰.۰۰۷ ± ۰.۸۵۷	۰.۰۰۶ ± ۰.۸۷۴	۰.۰۰۶ ± ۰.۹۰۶	۰.۰۰۸ ± ۰.۶۶۳
YOLOv8n[10]	۰.۰۰۵ ± ۰.۹۱۴	۰.۰۰۶ ± ۰.۸۹۵	۰.۰۰۵ ± ۰.۹۰۴	۰.۰۰۵ ± ۰.۹۳۱	۰.۰۰۷ ± ۰.۷۱۱
MRS-YOLO[16]	۰.۰۰۴ ± ۰.۹۲۳	۰.۰۰۵ ± ۰.۹۰۷	۰.۰۰۵ ± ۰.۹۱۵	۰.۰۰۴ ± ۰.۹۳۹	۰.۰۰۶ ± ۰.۷۲۴
روش Wu و همکاران [۱۷]	۰.۰۰۶ ± ۰.۹۱۱	۰.۰۰۶ ± ۰.۸۸۹	۰.۰۰۶ ± ۰.۹۰۰	۰.۰۰۵ ± ۰.۹۲۶	۰.۰۰۷ ± ۰.۷۰۴
روش پیشنهادی	۰.۰۰۴ ± ۰.۹۳۴	۰.۰۰۵ ± ۰.۹۱۹	۰.۰۰۴ ± ۰.۹۲۶	۰.۰۰۴ ± ۰.۹۴۷	۰.۰۰۵ ± ۰.۷۴۲

نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد روش پیشنهادی علاوه بر دستیابی به مقدار میانگین بالاتر، دارای نوسان کمی در اجراهای مختلف است. این موضوع نشان می‌دهد عملکرد مدل تنها به یک اجرای خاص وابسته نیست و پایداری مناسبی در آموزش‌های مستقل دارد. کمترین اختلاف میان روش پیشنهادی و مدل MRS-YOLO مشاهده می‌شود، اما روش پیشنهادی همچنان در همه معیارها مقدار میانگین بالاتری به دست آورده است.

برای بررسی دقیق‌تر معناداری اختلاف‌ها، آزمون t زوجی بین روش پیشنهادی و هر یک از مدل‌های مقایسه‌ای انجام شد. مقدار p در تمام مقایسه‌ها کمتر از ۰/۰۵ است. بنابراین، اختلاف عملکرد روش پیشنهادی با مدل‌های مقایسه‌ای از نظر آماری معنادار است. همان‌طور که انتظار می‌رود، اختلاف روش پیشنهادی با SSD، Faster R-CNN و RetinaNet بسیار معنادارتر است، زیرا فاصله عملکردی آن‌ها با روش پیشنهادی بیشتر است. در مقابل، اختلاف با MRS-YOLO کمتر است، اما همچنان مقدار p کمتر از ۰/۰۵ به دست آمده و نشان می‌دهد بهبود روش پیشنهادی نسبت به این مدل نیز از نظر آماری قابل قبول است.

۴-۹. تحلیل کیفی نتایج

علاوه بر ارزیابی کمی، برای بررسی دقیق‌تر رفتار مدل‌ها، نتایج تشخیص به صورت کیفی نیز تحلیل شد. در این بخش، خروجی روش پیشنهادی با چند مدل مقایسه‌ای شامل Faster R-CNN، SSD، RetinaNet، YOLOv8n و MRS-YOLO روی چند تصویر نمونه بررسی شد. هدف از این تحلیل، مشاهده تفاوت مدل‌ها در شرایط واقعی‌تر، مانند حضور چند پسماند در یک تصویر، شباهت ظاهری میان کلاس‌ها، اشیای کوچک، هم‌پوشانی بخشی و پس‌زمینه شلوغ است.

تحلیل کیفی خروجی مدل‌ها در شکل ۱۱ نشان می‌دهد تفاوت اصلی روش پیشنهادی با مدل‌های مقایسه‌ای در سه حالت آشکارتر است: تصاویر چندشیء، اشیای کوچک یا نیمه‌پنهان، و صحنه‌های دارای پس‌زمینه شلوغ. در این شرایط، برخی مدل‌های پایه مانند SSD و Faster R-CNN بخشی از اشیای کوچک را از دست داده یا جعبه‌هایی با پوشش بیش از حد تولید کرده‌اند. مدل‌های YOLOv8n و MRS-YOLO عملکرد بهتری داشته‌اند، اما در برخی نمونه‌ها دچار خطای کلاس یا مکان‌یابی ناقص شده‌اند.

روش پیشنهادی در بیشتر نمونه‌های کیفی، جعبه‌های محدودکننده دقیق‌تری تولید کرده و تعداد بیشتری از اشیای موجود در تصویر را شناسایی کرده است. این نتیجه با یافته‌های کمی و آماری همخوان است و نشان می‌دهد تلفیق ویژگی‌های چندسطحی و توجه ترکیبی به‌ویژه در صحنه‌های پیچیده‌تر مفید بوده است. با این حال، نمونه‌های دارای بازتاب، تاری یا هم‌پوشانی شدید همچنان چالش‌برانگیز هستند و نیاز به داده‌های آموزشی متنوع‌تر دارند.



شکل ۱۱. مقایسه کیفی خروجی مدل‌های مختلف و روش پیشنهادی روی نمونه‌هایی از تصاویر تک‌شیء و چندشیء پسماندهای قابل بازیافت

۴-۱۰. ارزیابی پایداری در شرایط تصویری دشوار

در کاربردهای واقعی، تصاویر پسماند همیشه در شرایط کنترل‌شده و با کیفیت مناسب ثبت نمی‌شوند. در خطوط تفکیک پسماند، سطل‌های هوشمند یا سامانه‌های رباتیک، عواملی مانند نور کم، نور بیش از حد، کاهش کنتراست، نویز تصویری، تاری، پس‌زمینه شلوغ و هم‌پوشانی اشیا می‌توانند کیفیت تصویر را کاهش دهند. بنابراین، ارزیابی مدل تنها روی تصاویر اصلی کافی نیست و لازم است پایداری روش پیشنهادی در شرایط دشوار نیز بررسی شود.

برای این منظور، مجموعه آزمون در چند حالت تصویری مختلف ارزیابی شد. در هر حالت، یک نوع اختلال کنترل‌شده روی تصاویر آزمون اعمال شد و سپس، عملکرد مدل با معیارهای Precision، Recall، F1-score، و $mAP@0.5$ و $mAP@0.5:0.95$ محاسبه شد. هدف از این آزمایش، بررسی میزان افت عملکرد مدل در شرایطی است که احتمال وقوع آن‌ها در محیط واقعی زیاد است.

جدول ۹. ارزیابی پایداری روش پیشنهادی در شرایط تصویری دشوار

شرایط تصویر	Precision	Recall	F1-score	$mAP@0.5$	$mAP@0.5:0.95$
تصویر اصلی	۰.۹۳۴	۰.۹۱۹	۰.۹۲۶	۰.۹۴۷	۰.۷۴۲
کاهش روشنایی	۰.۹۲۲	۰.۹۰۴	۰.۹۱۳	۰.۹۳۴	۰.۷۱۸
افزایش روشنایی	۰.۹۲۶	۰.۹۰۹	۰.۹۱۷	۰.۹۳۸	۰.۷۲۴
کاهش کنتراست	۰.۹۱۸	۰.۸۹۸	۰.۹۰۸	۰.۹۲۹	۰.۷۰۷
نویز تصویری	۰.۹۱۲	۰.۸۹۱	۰.۹۰۱	۰.۹۲۲	۰.۶۹۳
تاری تصویر	۰.۹۰۳	۰.۸۷۸	۰.۸۹۰	۰.۹۱۱	۰.۶۷۱
پس‌زمینه شلوغ	۰.۹۰۷	۰.۸۸۴	۰.۸۹۵	۰.۹۱۶	۰.۶۸۲
هم‌پوشانی بخشی اشیا	۰.۹۰۹	۰.۸۸۷	۰.۸۹۸	۰.۹۱۹	۰.۶۸۹

نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد روش پیشنهادی در همه شرایط دشوار مقدار $mAP@0.5$ بالاتر از ۰/۹۱ را حفظ کرده است. بیشترین افت عملکرد مربوط به تاری تصویر و پس‌زمینه شلوغ است. همچنین افت بیشتر در $mAP@0.5:0.95$ نسبت به $mAP@0.5$ نشان می‌دهد شرایط دشوار بیش از آنکه باعث خطای کامل در تشخیص کلاس شوند، دقت مکان‌یابی جعبه‌ها را

کاهش می‌دهند. این نتیجه نشان می‌دهد افزایش داده، توجه ترکیبی و تلفیق ویژگی‌های چندسطحی توانسته‌اند بخشی از اثر اختلال‌های تصویری را کنترل کنند.

۴-۱۱. تحلیل خطاهای مدل

برای بررسی دقیق‌تر خطاهای باقی‌مانده، نمونه‌های نادرست مجموعه آزمون تحلیل شدند. جدول ۱۰ نشان می‌دهد بیشترین خطاها مربوط به اشتباه میان کلاس‌های مشابه، عدم تشخیص اشیای کوچک و نمونه‌های دارای هم‌پوشانی است. نتایج این تحلیل با ماتریس آشفتگی و ارزیابی شرایط دشوار همخوان است. خطاها عمدتاً زمانی رخ می‌دهند که مرز مکانی شیء واضح نیست، شیء اندازه کوچکی دارد، یا اطلاعات ظاهری برای تفکیک کلاس‌ها کافی نیست. بنابراین، بهبود آینده مدل باید بیشتر بر افزایش نمونه‌های مرزی، تصاویر چندشیء و داده‌های دارای هم‌پوشانی یا کیفیت پایین تمرکز کند.

جدول ۱۰. فراوانی نسبی خطاهای مهم مشاهده‌شده در مجموعه آزمون

نوع خطا	درصد از کل خطاها
اشتباه میان کاغذ و مقوا	۲۹٪
اشتباه میان شیشه و پلاستیک	۲۲٪
عدم تشخیص اشیای کوچک	۱۸٪
خطا در تصاویر چندشیء با هم‌پوشانی	۱۶٪
خطا در تصاویر تار یا دارای پس‌زمینه شلوغ	۱۵٪

این نتیجه نشان می‌دهد توسعه داده‌های آموزشی باید بیشتر بر نمونه‌های مرزی، اشیای کوچک، هم‌پوشانی و شرایط تصویری دشوار متمرکز شود.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک چارچوب مبتنی بر بینایی ماشین و یادگیری عمیق برای تشخیص و جداسازی هوشمند پسماندهای شهری قابل بازیافت ارائه شد. هدف اصلی پژوهش، شناسایی و مکان‌یابی پسماندها در پنج گروه مهم شامل مقوا، شیشه، فلز، کاغذ و پلاستیک بود. اهمیت این موضوع از آن جهت است که این مواد بخش ارزشمند پسماند خشک شهری را تشکیل می‌دهند و در صورت جداسازی صحیح می‌توانند دوباره وارد چرخه تولید شوند. در کلان‌شهری مانند تهران که سالانه حجم بسیار زیادی پسماند تولید و جمع‌آوری می‌شود، بهبود فرایند تشخیص و تفکیک پسماندهای قابل بازیافت می‌تواند اثر قابل توجهی بر کاهش دفن زباله، افزایش کیفیت بازیافت و کاهش هزینه‌های مدیریت پسماند داشته باشد.

نتایج پژوهش نشان داد روش پیشنهادی توانسته است در تشخیص و مکان‌یابی پسماندهای قابل بازیافت عملکرد مناسبی به دست آورد. مقدار Precision برابر با ۰/۹۳۴، Recall برابر با ۰/۹۱۹، F1-score برابر با ۰/۹۲۶، [mAP@0.5](#) برابر با ۰/۹۴۷ و [mAP@0.5:0.95](#) برابر با ۰/۷۴۲ نشان می‌دهد مدل هم در شناسایی نوع پسماند و هم در تعیین موقعیت آن عملکرد قابل قبولی دارد. این موضوع برای کاربردهای عملی اهمیت دارد؛ زیرا در سامانه‌های جداسازی واقعی، تنها دانستن نوع ماده کافی نیست و موقعیت هر شیء نیز باید مشخص باشد تا بتوان آن را به مسیر مناسب پردازش هدایت کرد.

از نظر کاربرد مدیریتی، خروجی مدل پیشنهادی می‌تواند در چند سطح مورد استفاده قرار گیرد. در سطح عملیاتی، این مدل می‌تواند در سطوح هوشمند، خطوط تفکیک خودکار و ربات‌های جداساز برای تشخیص هم‌زمان چند نوع پسماند در یک تصویر به کار گرفته شود. در سطح مدیریتی، داده‌های حاصل از چنین سامانه‌هایی می‌توانند به شناسایی الگوی تولید پسماند خشک، میزان خطا در تفکیک، فراوانی مواد قابل بازیافت و نقاط دارای نیاز بیشتر به مداخله کمک کنند. در نتیجه، استفاده از سامانه‌های هوشمند تشخیص پسماند می‌تواند علاوه بر افزایش دقت جداسازی، به تصمیم‌گیری بهتر در مدیریت شهری و برنامه‌ریزی بازیافت نیز کمک کند.

تحلیل کلاس به کلاس نشان داد مدل در تشخیص پلاستیک و فلز عملکرد بهتری داشته است، در حالی که تشخیص کاغذ و مقوا به دلیل شباهت رنگ، بافت و ساختار سطحی چالش بیشتری ایجاد کرده است. همچنین بخشی از خطاها میان شیشه و پلاستیک شفاف رخ داده است. این یافته‌ها از نظر اجرایی مهم هستند؛ زیرا نشان می‌دهند در طراحی سامانه‌های واقعی تفکیک پسماند، تنها دقت کلی مدل کافی نیست و باید به خطاهای هر کلاس و پیامدهای آن در چرخه بازیافت توجه شود. برای نمونه، اشتباه گرفتن شیشه با پلاستیک یا کاغذ با مقوا می‌تواند کیفیت خروجی بازیافت را کاهش دهد و هزینه پردازش مجدد را افزایش دهد.

نتایج ارزیابی در شرایط تصویری دشوار نیز نشان داد روش پیشنهادی در برابر تغییرات روشنایی، کاهش کنتراست، نویز تصویری، تاری، پس‌زمینه شلوغ و هم‌پوشانی بخشی اشیاء پایداری قابل قبولی دارد. اگرچه بیشترین افت عملکرد در حالت تاری تصویر و پس‌زمینه شلوغ مشاهده شد، اما مدل همچنان توانست مقدار $mAP@0.5$ بالاتر از ۰/۹۱ را حفظ کند. این نتیجه نشان می‌دهد ترکیب افزایش داده، توجه ترکیبی و تلفیق ویژگی‌های چندسطحی می‌تواند به افزایش مقاومت مدل در شرایط نزدیک به محیط واقعی کمک کند. این ویژگی برای شهرهایی مانند تهران اهمیت دارد؛ زیرا تصاویر پسماند در محیط واقعی معمولاً در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی ثبت نمی‌شوند و ممکن است با نور نامناسب، پس‌زمینه پیچیده یا هم‌پوشانی مواد همراه باشند.

مقایسه با مدل‌های پایه و روش‌های مرتبط نشان داد روش پیشنهادی نسبت به RetinaNet، SSD، Faster R-CNN، YOLOv8n، MRS-YOLO و روش سبک تشخیص پسماند خانگی عملکرد بهتری دارد. همچنین، تحلیل آماری نتایج نشان داد بهبودهای گزارش‌شده فقط ناشی از نوسان تصادفی آموزش نیستند و اختلاف عملکرد روش پیشنهادی با مدل‌های مقایسه‌ای از نظر آماری معنادار است. این موضوع اعتبار نتایج را افزایش می‌دهد و نشان می‌دهد طراحی مسئله‌محور معماری، شامل استخراج ویژگی سبک، توجه ترکیبی و تلفیق چندسطحی، توانسته است به بهبود پایدار عملکرد در تشخیص چندنمونه‌ای پسماندهای قابل بازیافت کمک کند.

با وجود این، پژوهش حاضر محدودیت‌هایی نیز دارد. نخست، اگرچه از یک مجموعه داده عمومی و دارای مجوز استفاده شده است، اما اندازه و تنوع آن همچنان در مقایسه با شرایط واقعی کلان‌شهرها محدود است. دوم، برخی نمونه‌های پسماند در محیط واقعی ممکن است آلوده، فشرده، نیمه‌پنهان، مخلوط با مواد دیگر یا دارای شکل‌های بسیار نامنظم باشند؛ در حالی که همه این شرایط در مجموعه داده موجود به طور کامل پوشش داده نشده‌اند. سوم، پژوهش حاضر بیشتر بر تشخیص تصویری تمرکز دارد و هنوز به صورت کامل با زیرساخت مکانیکی یا رباتیک جداسازی در محیط واقعی یکپارچه نشده است. بنابراین، برای استقرار عملی، لازم است عملکرد مدل در شرایط میدانی و روی تصاویر واقعی‌تر از خطوط تفکیک یا سطوحی هوشمند نیز بررسی شود. از منظر سیاست‌گذاری شهری، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد استفاده از سامانه‌های هوشمند تشخیص پسماند می‌تواند به‌عنوان مکمل برنامه‌های مدیریت پسماند شهری مورد توجه قرار گیرد. در تهران، حجم بالای پسماند خشک قابل بازیافت و هزینه‌های جداسازی دستی، ضرورت توسعه ابزارهای هوشمند و نیمه‌خودکار را افزایش می‌دهد. چنین سامانه‌هایی می‌توانند در مراکز بازیافت، ایستگاه‌های جمع‌آوری پسماند خشک، سطوحی هوشمند و خطوط تفکیک به کار گرفته شوند و به کاهش خطای انسانی، افزایش سرعت تفکیک و بهبود کیفیت مواد بازیافتی کمک کنند.

در پژوهش‌های آینده، پیشنهاد می‌شود داده‌های تصویری بیشتری از شرایط واقعی مدیریت پسماند در تهران و سایر کلان‌شهرها جمع‌آوری شود تا تنوع محیطی، نوری و ظاهری پسماندها بهتر پوشش داده شود. همچنین ترکیب تصاویر معمولی با داده‌های حسگری، بررسی مدل‌های سبک‌تر برای اجرا روی سخت‌افزارهای کم‌مصرف، استفاده از یادگیری نیمه‌نظارتی برای کاهش وابستگی به برچسب‌گذاری دستی و اتصال مدل به بازوهای رباتیک یا سامانه‌های جداسازی مکانیکی می‌تواند مسیرهای مهم توسعه این پژوهش باشد. به‌طور کلی، روش پیشنهادی می‌تواند گامی در جهت حرکت از تفکیک سنتی و وابسته به نیروی انسانی به سمت مدیریت هوشمند، داده‌محور و پایدار پسماندهای شهری باشد.

منابع

1. G. I. Sayed, M. Abd Elfattah, A. Darwish, and A. E. Hassanien, "Intelligent and sustainable waste classification model based on multi-objective beluga whale optimization and deep learning," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, no. 21, pp. 31492-31510, 2024/05/01 2024, doi: 10.1007/s11356-024-33233-w.
2. F. R. Sayem *et al.*, "Enhancing waste sorting and recycling efficiency: robust deep learning-based approach for classification and detection," *Neural Computing and Applications*, vol. ۳۷, no. 6, pp. 4567-4583, 2025/02/01 2025, doi: 10.1007/s00521-024-10855-2.
3. H. Ahmed Khan, S. S. Naqvi, A. A. K. Alharbi, S. Alotaibi, and M. Alkhatami, "Enhancing trash classification in smart cities using federated deep learning," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 11816, 2024/05/23 2024, doi: 10.1038/s41598-024-62003-4.
4. H. Lin, X. Zhang, J. Yu, J. Xiang, and H.-L. Shen, "Deep Recyclable Trash Sorting Using Integrated Parallel Attention," *Sensors*, vol. 24, no. 19, p. 6434, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/19/6434>.
5. J. Qi, M. Nguyen, and W. Q. Yan, "NUNI-Waste: novel semi-supervised semantic segmentation waste classification with non-uniform data augmentation," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 83, no. 26, pp. 68651-68669, 2024/08/01 2024, doi: 10.1007/s11042-024-18265-1.
6. A. Rahmatulloh, I. Darmawan, A. P. Aldya, and F. M. S. Nursuwars, "WasteInNet: Deep Learning Model for Real-time Identification of Various Types of Waste," *Cleaner Waste Systems*, vol. ۱۰, p. 100198, 2025/03/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100198>.
7. Y. Chen *et al.*, "Classification and recycling of recyclable garbage based on deep learning," *Journal of Cleaner Production*, vol. 414, p. 137558, 2023/08/15/ 2023, doi : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137558>.
8. G. Thung and M. Yang, "Classification of Trash for Recyclability Status," 2016 .
9. M. P. Arthur, S. Shoba, and A. Pandey, "A survey of smart dustbin systems using the IoT and deep learning," *Artificial Intelligence Review*, vol. 57, no. 3, p. 56, 2024/02/15 2024, doi: 10.1007/s10462-023-10646-6.
10. J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You only look once: Unified, real-time object detection," in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 779-788 .
11. W. Liu *et al.*, "Ssd: Single shot multibox detector," in *European conference on computer vision*, 2016: Springer, pp. 21-37 .
12. S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun, "Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 39, no. 6, pp. 1137-1149, 2016.
13. M. Tan and Q. Le, "Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks," in *International conference on machine learning*, 2019: PMLR, pp. 6105-6114 .
14. M. Chhabra, B. Sharan, M. Elbarachi, and M. Kumar, "Intelligent waste classification approach based on improved multi-layered convolutional neural network," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 83, no. 36, pp. 84095-84120, 2024/11/01 2024, doi: 10.1007/s11042-024-18939-w.
15. N. A. Zailan, A. S. Mohd Khairuddin, K. Hasikin, M. H. Junos, and U. Khairuddin, "An automatic garbage detection using optimized YOLO model ", *Signal, Image and Video Processing*, vol. 18, no. 1, pp. 315-323, 2024/02/01 2024, doi: 10.1007/s11760-023-02736-3.
16. Y. Ren, Y. Li, and X. Gao, "An MRS-YOLO Model for High-Precision Waste Detection and Classification," *Sensors*, vol. 24, no. 13, p. 4339, ۲۰۲۴. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/13/4339>.
17. Q. Wu, T. Liang, H. Fang, Y. Wei, M. Wang, and D. He, "A Lightweight Deep Learning Algorithm for Multi-Objective Detection of Recyclable Domestic Waste," *Environmental Engineering Science*, vol. 40, no. 12, pp. 667-677, 2023.
18. M. M. Hossen *et al.*, "GCDN-Net: Garbage classifier deep neural network for recyclable urban waste management," *Waste Management*, vol. 174, pp. 439-450, 2024/02/15/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.12.014>.

19. Y. Yang, Y. Li, and M. Tao, "FE-YOLO: a lightweight model for construction waste detection based on improved YOLOv8 model," *Buildings*, vol. 14, no. 9, p. 2672, 2024.
20. Y. Li and X. Zhang, "Intelligent X-ray waste detection and classification via X-ray characteristic enhancement and deep learning," *Journal of Cleaner Production*, vol. 435, p. 140573, 2024.
21. Z. Cai *et al.*, "Application of hyperspectral band selection method based on deep reinforcement learning to low-value recyclable waste classification," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 192, pp. 1138-1150, 2024.
22. S. Single, S. Iranmanesh, and R. Raad, "Realwaste: a novel real-life data set for landfill waste classification using deep learning," *Information*, vol. 14, no. 12, p. 633, 2023.
23. P. F. Proença and P. Simões, "Taco: Trash annotations in context for litter detection," *arXiv preprint arXiv:2003.06975*, 2020.
24. J. Hong, M. Fulton, and J. Sattar, "Trashcan: A semantically-segmented dataset towards visual detection of marine debris," *arXiv preprint arXiv:2007.08097*, 2020.
25. G. Koinig *et al.*, "Deep learning approaches for classification of copper-containing metal scrap in recycling processes," *Waste Management*, vol. 190, pp. 520-530, 2024.
26. A. G. Howard *et al.*, "Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications," *arXiv preprint arXiv:1704.04861*, 2017.
27. K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, "Deep residual learning for image recognition," in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 770-778.
28. Z. Li *et al.*, "An intelligent identification and classification system of decoration waste based on deep learning model," *Waste Management*, vol. 174, pp. 462-475, 2024.
29. T.-Y. Lin, P. Goyal, R. Girshick, K. He, and P. Dollár, "Focal loss for dense object detection," in *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2017, pp. 2980-2988.



Forecasting Residential Electricity Demand under Climate Change Scenarios: A Python-based Model Incorporating Cooling and Heating Degree Days

Mona Mirrazavi¹ | Younes Noorollahi^{2*} | Saba Amouzadeh³ | Mohanna Baba Hoseinpour⁴ | Hosein Yousefi⁵

1. M.Sc. Student of Energy Systems Engineering, Faculty of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mona.mirrazavi@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Full Professor of Energy Systems Engineering, Faculty of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: noorollahi@ut.ac.ir
3. M.Sc. Student of Energy Systems Engineering, Faculty of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: saba.amouzadeh@ut.ac.ir
4. M.Sc. Student of Energy Systems Engineering, Faculty of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: M.hoseinpour1@ut.ac.ir
5. Full Professor of Energy Systems Engineering, Faculty of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: hosseinyousefi@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 28 January 2026
Revised 27 February 2026
Accepted 22 May 2026
Published Online 23 September 2026

Keywords:
Climate change,
Cooling and heating degree days,
Load management,
Power system planning,
Residential electricity demand forecasting.

ABSTRACT

This research aims to forecast the long-term household electricity demand under various climate change scenarios, including temperature increases of 1°C and 0.5°C per year, as well as decreases of 1°C and 0.5°C per year, utilizing CMIP6 climate projection models. With the rise in average temperatures and the intensification of heatwaves, cooling requirements in the residential sector have increased, leading to higher summer peak loads. To analyze this trend, a data-driven framework is proposed that employs a multivariate annual regression model incorporating Cooling Degree Days (CDD), Heating Degree Days (HDD), the number of subscribers, and temporal trends. Furthermore, daily temperature data are used to disaggregate annual consumption into daily and hourly scales, enabling the examination of peak load variations. Model evaluation indicates highly accurate performance, with coefficients of determination (R^2) of 0.995 for the training set and 0.979 for the test set. The Root Mean Square Error (RMSE) is approximately 547.82 kWh, corresponding to less than one percent of annual consumption. Climate scenario analysis reveals that the CDD index is the primary driver of rising electricity use in Tehran expanding from roughly 780 units in the baseline year to 3,000 in the mild warming scenario and over 7,200 units in the severe one, representing growth of 285% to 820%. Conversely, the HDD index declines under warmer scenarios, contributing little to overall demand. Forecasts suggest that household electricity consumption will increase by 75–132% by 2050, with the difference between the warmest and coldest scenarios exceeding 77,000 kWh. Hourly analysis shows an evening peak load of approximately 21.5 kWh and an early-morning minimum of about 7 kWh. The proposed framework can serve as an effective tool for power system planning and load management under global warming conditions.

Cite this article: Mirrazavi, M.; Noorollahi, Y.; Amouzadeh, S.; Baba Hoseinpour, M. & Yousefi, H. (2026). Forecasting Residential Electricity Demand under Climate Change Scenarios: A Python-based Model Incorporating Cooling and Heating Degree Days. *Urban Development Policy Making*, 3 (3), 433-453. DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.579252.1097>



© Authors retain the copyright and full publishing rights.
DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.579252.1097>

Introduction

Climate change has become a major driver of change in residential electricity consumption, especially in regions with hot summers and increasing cooling needs. Rising temperatures intensify the use of cooling equipment, shift peak demand toward summer months, and create new challenges for long-term power system planning. In Tehran, where household electricity demand is highly sensitive to temperature fluctuations, understanding the climate-energy relationship is particularly important. This study aims to develop a climate-responsive forecasting framework for residential electricity demand by directly incorporating thermal indicators into the prediction process. Unlike conventional forecasting approaches that rely mainly on historical trends or macroeconomic variables, this research explicitly links future electricity demand to climate change through temperature-based indicators.

Materials and methods

A Python-based data-driven framework was developed to estimate future household electricity demand under different climate scenarios. The annual model uses multivariate linear regression in which residential electricity consumption is explained by CDD, HDD, number of subscribers, and a time trend. Historical annual electricity consumption and subscriber data for Tehran were combined with daily temperature observations to calculate annual thermal indices. Future temperature scenarios included no change, annual increases and decreases of 0.5°C and 1°C, and climate projections derived from CMIP6 datasets up to 2050. After estimating annual demand, the predicted energy was distributed into daily and hourly scales using temperature-based weighting factors and seasonal hourly load profiles. Model performance was evaluated using R^2 and RMSE.

Result

The proposed model showed very strong predictive performance. The coefficient of determination reached 0.995 for the training period and 0.979 for the testing period, while the RMSE in the test set was about 547.82 kWh, representing less than one percent of annual consumption. Scenario analysis showed that rising temperature strongly increases cooling demand. By 2050, annual household electricity consumption is projected to rise by about 75% under the CMIP6 scenario and by up to 132% under the severe warming scenario. CDD increases sharply under warmer scenarios, reaching more than 7,200 units in the most extreme case, whereas HDD declines substantially. Hourly analysis also revealed a clear evening peak, with maximum load around 21.5 kWh and minimum load near 7 kWh during early morning hours.

Discussion and Conclusion

The findings indicate that cooling demand is the dominant factor shaping future residential electricity consumption in Tehran. While warmer winters reduce heating requirements, this reduction does not offset the rapid growth of summer cooling demand. The developed framework successfully captures the impact of climate change on annual, daily, and hourly electricity use, offering a practical tool for long-term energy planning. The results highlight the need for adaptive strategies such as demand-side management, cooling efficiency improvements, and expansion of generation capacity to maintain power system reliability under future warming conditions.



پیش بینی تقاضای برق خانگی تحت سناریوهای تغییرات اقلیمی: یک مدل مبتنی بر پایتون با بهره گیری از روز درجه های سرمایش و گرمایش

مونا میررضوی^۱ | یونس نوراللهی^۲ | صبا عموزاده^۳ | مهنا بابا حسین پور^۴ | حسین یوسفی^۵

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سیستم های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده علوم و فناوری های میان رشته ای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mona.mirrazavi@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، استاد تمام مهندسی سیستم های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده علوم و فناوری های میان رشته ای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: noorollahi@ut.ac.ir
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سیستم های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده علوم و فناوری های میان رشته ای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: saba.amouzade@ut.ac.ir
۴. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سیستم های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده علوم و فناوری های میان رشته ای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: M.hoseinpour1@ut.ac.ir
۵. استاد تمام مهندسی سیستم های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده علوم و فناوری های میان رشته ای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: hosseinyousefi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

کلیدواژه:

برنامه ریزی شبکه،
تغییرات اقلیمی،
درجه روز سرمایش و گرمایش،
پیش بینی تقاضای برق خانگی و مدیریت بار.

این پژوهش با هدف پیش بینی بلندمدت تقاضای برق خانگی تحت سناریوهای مختلف تغییرات اقلیمی از جمله افزایش و کاهش دما به ازای هر سال ۱ و ۵/۰ درجه و مدل های اقلیم سنجی CMIP6 انجام شده است. با افزایش دمای متوسط و تشدید امواج گرما، نیاز به سرمایش در بخش خانگی رشد می کند و اوج بار در تابستان افزایش می یابد. برای تحلیل این روند، یک چهارچوب داده محور ارائه شده که در آن شاخص های درجه روز سرمایش^۱ و گرمایش^۲، به همراه تعداد مشترکان و روند زمانی، در قالب یک مدل رگرسیون چندمتغیره سالانه به کار گرفته شده اند. همچنین، از داده های دمای روزانه برای توزیع مصرف سالانه به مقیاس های روزانه و ساعتی استفاده شده تا تغییرات پیک بار قابل بررسی باشد. ارزیابی مدل نشان می دهد عملکرد بسیار دقیقی دارد؛ ضریب تعیین در داده های آموزش ۰/۹۹۵ و در آزمون ۰/۹۷۹ بوده و مقدار خطای مربعات میانگین جذر^۳ حدود ۵۴۷/۸۲ کیلووات ساعت، یعنی کمتر از یک درصد مصرف سالانه است. نتایج سناریوهای اقلیمی نشان می دهد شاخص درجه روز سرمایشی محرک اصلی افزایش مصرف برق در تهران است و از حدود ۷۸۰ واحد در سال پایه به ۳ هزار واحد در سناریوی افزایش ملایم و بیش از ۷۲۰۰ واحد در سناریوی شدید می رسد؛ یعنی رشدی بین ۲۸۵ تا ۸۲۰ درصد. در مقابل، شاخص درجه روز گرمایشی در سناریوهای گرم تر کاهش می یابد و اثر قابل توجهی بر مصرف ندارد. بر اساس پیش بینی ها، مصرف برق خانگی تا سال ۲۰۵۰ بین ۷۵ تا ۱۳۲ درصد افزایش می یابد و تفاوت میان گرم ترین و سردترین سناریوها بیش از ۷۷ هزار کیلووات ساعت خواهد بود. تحلیل ساعتی نیز نشان می دهد پیک بار عصرگاهی حدود ۲۱/۵ و کمینه بامدادی حدود ۷ کیلووات ساعت است. این چهارچوب می تواند ابزاری مؤثر برای برنامه ریزی شبکه و مدیریت بار تحت شرایط گرمایش جهانی باشد.

استناد: میررضوی، مونا؛ نوراللهی، یونس؛ عموزاده، صبا؛ بابا حسین پور، مهنا و یوسفی، حسین (۱۴۰۵). پیش بینی تقاضای برق خانگی تحت سناریوهای تغییرات اقلیمی: یک مدل مبتنی بر پایتون با بهره گیری از روز درجه های سرمایش و گرمایش. *سیاست گذاری پیشرفت شهری*، ۳ (۳۳-۴۵۳).
DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.579252.1097>

© نویسندگان

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.579252.1097>



1. Cooling Degree Day-CDD
2. Heating Degree Day-HDD
3. Root Mean Square Error-RMSE

۱. مقدمه

در عصر حاضر، مدیریت پایدار و امن سیستم‌های انرژی در برابر شوک‌های خارجی به اولویتی جهانی تبدیل شده است [۱ و ۲]. تغییرات اقلیمی، ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، مستقیم بر الگوهای مصرف انرژی، به‌ویژه در بخش خانگی، تأثیر گذاشته و نیازهای سرمایشی را افزایش داده است [۳]. افزایش دمای متوسط جهانی به تشدید تقاضا برای سرمایش در ماه‌های گرم منجر شده و با وجود کاهش احتمالی نیازهای گرمایشی در زمستان، اثر خالص این روندها خطی نیست؛ زیرا سامانه‌های سرمایشی به نوسانات دمایی واکنش سریع‌تری نشان می‌دهند [۴]. دما، به عنوان مؤثرترین عامل بر نوسانات مصرف برق، نقش اصلی را در شکل‌دهی به الگوی تقاضا ایفا می‌کند [۵]. برای ارزیابی این اثر از شاخص‌های درجه‌روز سرمایش و گرمایش استفاده می‌شود [۶].

روش‌های رایج پیش‌بینی تقاضای برق مسکونی مبتنی بر الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی^۱ و شبکه‌های عصبی عمیق^۲ هستند [۷]. با این حال، استفاده از شاخص‌های دمایی مرسوم مانند شاخص درجه‌روز سرمایش با محدودیت‌هایی همچون اتکا به میانگین‌های روزانه و آستانه دمایی ثابت همراه است که دقت تخمین را کاهش می‌دهد [۵]. همچنین، مدل‌های یادگیری عمیق علی‌رغم قدرت بالا، به دلیل زمان محاسباتی طولانی، کارایی کمتری در تحلیل‌های گسترده دارند، در حالی که مدل‌هایی مانند جنگل تصادفی سرعت پردازش بالاتری دارند [۸]. پژوهش حاضر با هدف ارتقای دقت پیش‌بینی تقاضای برق در بخش مسکونی تحت سناریوهای تغییر اقلیم، یک مدل محاسباتی مبتنی بر پایتون با جایگزینی شاخص‌های سنتی با شاخص‌های پیشرفته مانند «روز درجه‌های سرمایش و گرمایش» در الگوریتم‌های یادگیری ماشین توسعه می‌دهد. این رویکرد امکان تحلیل دقیق حساسیت تقاضای برق نسبت به نوسانات دمایی روزانه را فراهم می‌کند و چهارچوبی قابل اعتماد برای سنجش آسیب‌پذیری شبکه‌های برق در برابر گرمایش جهانی ارائه می‌دهد که به برنامه‌ریزان انرژی در اتخاذ تصمیمات مدیریتی کم‌ریسک‌تر یاری می‌رساند [۹].

این پژوهش بر پیش‌بینی تقاضای برق خانگی با تمرکز بر اثرات تغییرات اقلیمی تمرکز دارد. مدل توسعه‌یافته در محیط پایتون، از درجه‌روزهای سرمایش به عنوان شاخصی کلیدی برای سنجش نیازهای سرمایشی بهره می‌گیرد [۱۰]. در این چهارچوب، از روش‌های مدل‌سازی پیش‌بینی‌کننده مبتنی بر یادگیری ماشین برای تحلیل دقیق‌تر استفاده می‌شود؛ که خروجی این مدل‌ها می‌تواند نقش مهمی در برنامه‌ریزی بلندمدت زیرساخت‌های انرژی و تعیین راهبردهای سازگاری با روند فزاینده گرمایش جهانی داشته باشد [۷].

با مروری بر مطالعات قبلی به این موضوع می‌رسیم که پژوهش‌های مرتبط با تقاضای برق خانگی تحت شرایط تغییرات اقلیمی در چند بخش دسته‌بندی می‌شوند. در دسته اول بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها به رابطه بین دما و مصرف برق پرداخته‌اند و حساسیت مقدار بار الکتریکی نسبت به تغییرات حرارتی را بررسی کرده‌اند. دسته دوم شامل پژوهش‌هایی هستند که از شاخص درجه‌روز سرمایشی و درجه‌روز گرمایشی برای پیش‌بینی و تعیین تقاضای انرژی استفاده کردند. دسته سوم مطالعات به پژوهش‌هایی اختصاص دارد که سناریوهای تغییر اقلیم را در طولانی‌مدت شبیه‌سازی کردند و تأثیر آن بر تقاضای برق خانگی را ارائه دادند. دسته چهارم به طور اختصاصی به روش‌های مدل‌سازی مبتنی بر پایتون تمرکز دارند که هر بخش در ادامه به تفکیک بررسی می‌شود.

مطالعات اخیر نشان داده‌اند الگوی مصرف برق خانگی تحت تأثیر دما به صورت غیرخطی و نامتقارن در محدوده‌های دمایی سرد و گرم تغییر می‌کند. کیونگ‌شیک نام و وون کی سو [۱۱] دریافتند که با هر درجه سانتی‌گراد تغییر میانگین دما، مصرف در سرما ۷/۳۱ درصد و در گرما ۳/۹۳ درصد افزایش می‌یابد. رابرتز و همکاران [۱۲] با تحلیل داده‌های ساعتی در ایالات متحده، متوسط ۱۹ درصد مصرف برق را دما - حساس دانستند که در ساعت‌های اوج این سهم بیشتر می‌شود و پیشنهاد کردند با جابه‌جایی بار دما - حساس، پیک مصرف روزانه تا ۱۳ درصد کاهش یابد. کومار و همکاران [۱۳] نیز در کالیفرنیا، پاسخ نامتقارن بار به دما و افزایش شدید مصرف برق هنگام عبور دما از آستانه موج گرما و همچنین، افزایش بیشتر بار با ترکیب گرما و رطوبت

1. Random Forest-RF

2. Deep Neural Networks-DNN

را گزارش کردند و پیش‌بینی کردند تحت سناریوی RCP8.5^۱، پیک برق آینده بیش از مدل‌های متوسط رشد خواهد کرد. فاجه و بات [۱۴] در فلوریدا، افزایش ۵/۵ درصد مصرف بار مسکونی را با ۱۰۰ واحد تغییر شاخص درجه‌روز سرمایشی گزارش کردند و پیش‌بینی کردند تا سال ۲۰۵۰ مصرف تا ۵۰ درصد افزایش یابد، آن‌ها پیشنهاد دادند که اجرای استاندارد سید انرژی‌های تجدیدپذیر^۲ و بازنگری در قانون خرید تضمینی برق مازاد بر مصرف صورت گیرد.

مطالعات نشان می‌دهند شاخص‌های گرمایش و سرمایش معیارهای مؤثری برای سنجش نیازهای گرمایشی و سرمایشی بخش خانگی هستند. دایی و همکاران [۱۵] دریافتند که کابل پنج برابر بیشتر به گرمایش نیاز دارد تا سرمایش و تقاضای انرژی به شدت وابسته به زمستان است. گومز و همکاران [۱۶] مدلی تطبیقی را با کمترین خطا (۰/۰۲ درصد) برای محاسبه روزهای درجه سرمایش در مناطق گرم و خشک معرفی کردند. آندرو [۱۷] در پژوهشی در آمریکا و اروپا، درآمد را مهم‌ترین عامل تغییر الگوی مصرف سالانه و دمای روزانه را محرک اصلی مصرف در تابستان دانست، در حالی که در اروپا، خرید سیستم تهویه مطبوع عامل اصلی رشد مصرف سرمایشی است؛ او همچنین اشاره کرد که تغییر اقلیم نقش مهمی دارد اما عامل اصلی نیست. مصلح [۱۸] نیز با بررسی داده‌های شهرهای عراق، کاهش شدید شاخص درجه‌روزهای گرمایش و افزایش شدید شاخص درجه روزهای سرمایش را مشاهده کرد که نشان‌دهنده افزایش نیاز به انرژی سرمایشی است، به‌ویژه در بصره که بیشترین رشد شاخص درجه‌روزهای سرمایش را دارد.

با توجه به شتاب تغییرات اقلیمی، تحقیقات بسیاری به بررسی اثر سناریوهای آینده دمایی بر تقاضای برق خانگی پرداخته‌اند. گوون و همکاران [۱۹] در ترکیه پیش‌بینی کردند که با افزایش سالانه شاخص درجه‌روزهای سرمایش، مصرف برق خانگی تا سال ۲۰۳۱ بین ۸۰ تا ۱۵۱ تراوات - ساعت افزایش یابد و بیشترین اثر بر بخش‌های مسکونی و تجاری باشد. لی و همکاران [۲۰] در شانگهای با استفاده از توابع اسپالین، رابطه U شکلی بین مصرف و دما یافتند؛ به طوری که هر یک درجه افزایش دما بالای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، مصرف را ۱۴/۵ درصد افزایش و هر یک درجه کاهش دما زیر ۷ درجه سانتی‌گراد، مصرف را ۲/۸ درصد کاهش می‌دهد. دائو [۲۱] در نیوبرانزویک دریافت که اثر سرمایشی دو برابر اثر گرمایشی است و در سناریوی RCP8.5، رشد شدید شاخص درجه‌روزهای سرمایش به افزایش و سپس کاهش مصرف بار منجر می‌شود. سولان و سردا [۲۲] در اسپانیا پیش‌بینی کردند که با توجه به اقلیم عمدتاً سرد، گرمایش بیشتر باعث کاهش تقاضای گرمایش خواهد شد و حساسیت مصرف به دما بیشتر در روزهای سرد است که در نهایت به کاهش ۲ تا ۴ درصدی مصرف و صرفه‌جویی اقتصادی سالانه ۲۰ میلیون یورویی منجر می‌شود.

با افزایش دسترسی به داده‌ها و توان پردازشی، استفاده از پایتون و الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی تقاضای برق رواج یافته است. پانیگراهی [۲۳] با مقایسه مدل‌های SARIMAX^۳، ARIMAX^۴، Prophet^۵ و LSTM^۶ در لندن، دریافت که LSTM بهترین عملکرد را برای داده‌های مصرف خانگی دارد. شایک [۲۴] نیز در تحقیقی دیگر در لندن، مدل MLP^۷ را با دقت بیشتری نسبت به SARIMAX برای پیش‌بینی مصرف برق با در نظر گرفتن دما، رطوبت، باد و تابش فرابنفش خورشید معرفی کرد. هرجونا و همکاران [۲۵] در اندونزی مدل ANN^۸ را با دقت بالا و توانایی خوب در پیش‌بینی پیک بار ارائه دادند، هرچند در برخی ساعت‌های پیک خطا مشاهده شد. اسلیم و سید [۲۶] در اردن، مدل GPR^۹ و مدل ترکیبی Ridge^{۱۰} را به عنوان بهترین مدل‌ها برای پیش‌بینی تقاضای برق با در نظر گرفتن دمای صبح و عصر، تعطیلات، جمعیت و رشد بار معرفی کردند، در حالی که مدل STL^{۱۰} ضعیف‌ترین عملکرد را داشت.

1. Representative Concentration Pathway 8.5 scenario

2. Renewable Portfolio Standard-RPS

3. Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables

4. Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables

5. Long Short-Term Memory

6. Multilayer Perceptron

7. Artificial Neural Network

8. Gaussian Process Regression

9. Ridge Regression

10. Seasonal and Trend decomposition using Loess

این پژوهش با هدف پر کردن یک شکاف مهم در ادغام مدل‌های انرژی با سناریوهای تغییر اقلیم انجام شده است؛ شکافی که در بسیاری از مطالعات پیشین دیده می‌شود، زیرا معمولاً پیش‌بینی تقاضای انرژی به‌خصوص در افق‌های بلندمدت، بیش از حد بر روندهای تاریخی یا متغیرهای کلان اقتصادی متکی بوده و در نتیجه، اثر مستقیم تغییرات اقلیمی بر بارهای حرارتی و الگوی مصرف واقعی را با دقت کافی وارد نکرده است. در شرایطی که افزایش دما و تغییر الگوهای اقلیمی می‌تواند مستقیم رفتار مصرف خانگی را تحت تأثیر قرار دهد، ضرورت توسعه مدلی که این اثر را از مسیر علمی قابل استناد لحاظ کند، بیش از پیش احساس می‌شود. بر این اساس، این تحقیق با رویکردی کاربردی، توسعه یک مدل آماری مبتنی بر شاخص‌های درجه‌روز سرمایشی و گرمایشی را دنبال می‌کند. مدل پیشنهادی با استفاده از پایتون ساخته می‌شود و تلاش دارد به جای اتکای صرف به گذشته، تغییر اقلیم را به صورت مستقیم وارد فرایند پیش‌بینی کند. به بیان دقیق‌تر، مدل با پیوند دادن داده‌های واقعی مصرف برق خانگی به سناریوهای افزایش دمای آینده (برآمده از تغییر اقلیم)، امکان تخمین واقع‌بینانه‌تر نیازهای انرژی خانگی تهران را در افق‌های زمانی بلندمدت فراهم می‌سازد. اهمیت این رویکرد در آن است که خروجی پژوهش تنها یک پیش‌بینی عددی نیست، بلکه یک چهارچوب تصمیم‌ساز برای برنامه‌ریزی انرژی کشور است؛ چهارچوبی که می‌تواند به سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان کمک کند تا حساسیت تقاضای برق خانگی به تغییرات دما را بهتر بشناسند، پیامدهای ناشی از سناریوهای اقلیمی را در زمان‌بندی تولید و مدیریت شبکه برق لحاظ کنند و برنامه‌ریزی‌های سرمایه‌گذاری و مدیریت تقاضا را با واقعیت‌های آینده هم‌راستا کنند. در نتیجه، مدل پیشنهادی با ایجاد پیوند معنادار بین داده‌های مصرف واقعی و سناریوهای اقلیمی، تصویری دقیق‌تر و عملی‌تر از تقاضای آتی برق خانگی در تهران ارائه می‌دهد و می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی بخش انرژی مورد استفاده قرار گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. چهارچوب کلی و هدف پژوهش

این پژوهش با هدف پر کردن شکاف مدل‌های پیش‌بینی تقاضای برق در ایران، یک مدل داده‌محور مبتنی بر رابطه میان متغیرهای حرارتی و مصرف انرژی خانگی تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم توسعه داده است. نوآوری این مطالعه شامل وارد کردن مستقیم تغییر اقلیم در پیش‌بینی بار با استفاده از داده‌های دمای روزانه به جای میانگین‌های ماهانه، توسعه سناریوهای اقلیمی متنوع از جمله CMIP6^۱، تبدیل مصرف سالانه به الگوهای بار روزانه و ساعتی بر پایه رفتار حرارتی، و به‌کارگیری روش‌های نوین داده‌محور به جای رویکردهای صرفاً آماری است. این رویکرد دقت پیش‌بینی را ارتقا می‌بخشد و ابزاری ارزشمند برای تحلیل اثرات تغییر اقلیم و برنامه‌ریزی بلندمدت توسعه شبکه، به‌ویژه در شرایط رشد سریع تقاضای سرمایش، فراهم می‌آورد.

۲-۲. مدل ریاضی و تئوری حاکم

مدل این پژوهش از چهار مرحله اصلی تشکیل می‌شود که عبارت‌اند از: مدل سالانه، مدل ماهانه، مدل روزانه و مدل ساعتی.

۲-۲-۱. مدل رگرسیون سالانه مصرف برق

این پژوهش مصرف سالانه برق خانگی را با استفاده از یک مدل رگرسیون خطی چندمتغیره بر اساس شاخص‌های حرارتی (HDD و CDD)، تعداد مشترکان خانگی (Cust) و روند زمانی (Trend) مدل‌سازی می‌کند (معادله ۱) [۲۷ و ۲۸].

$$E_y = \beta_0 + \beta_1 CDD_y + \beta_2 HDD_y + \beta_3 Cust_y + \beta_4 Trend_y + \varepsilon_y \quad (1)$$

در این مدل، E_y انرژی سالانه مصرف برق خانگی، β ضرایب رگرسیون که با روش حداقل مربعات معمولی^۲ برآورد می‌شوند و ε جمله خطا است. در تحلیل سرانه، متغیر وابسته انرژی سرانه $E_y^{(pc)}$ تعریف می‌شود و مدل به شکل معادله ۲ درمی‌آید [۲۷ و ۲۸].

$$E_y^{(pc)} = \beta_0 + \beta_1 CDD_y + \beta_2 HDD_y + \beta_3 Trend_y + \varepsilon_y \quad (2)$$

سپس با ضرب انرژی سرانه در تعداد مشترکان، انرژی کل E_y طبق معادله ۳ به دست می‌آید. ضرایب β با کمینه‌سازی تابع هدف در معادله ۴ برآورد می‌شوند که $\hat{E}_y(\beta)$ مقدار پیش‌بینی‌شده مصرف برق در سال y است. این رویکرد امکان تحلیل و پیش‌بینی مصرف برق را با در نظر گرفتن عوامل حرارتی و جمعیتی فراهم می‌کند [۲۷ و ۲۸].

$$E_y = E_y^{(pc)} \times Cust_y \quad (3)$$

$$\min_{\beta} \sum_y (E_y - \hat{E}_y(\beta))^2 \quad (4)$$

۲-۲-۲. محاسبه شاخص‌های درجه‌روز سرمایش و گرمایش

این بخش از پژوهش به تعریف شاخص‌های درجه‌روزهای سرمایش و درجه‌روزهای گرمایش برای هر روز و سپس محاسبه مقادیر سالانه آنها می‌پردازد. برای هر روز d در سال y ، با داشتن دمای میانگین روزانه $T(y, d)$ و دمای مبنا $T_{base} = 24^\circ C$ ، شاخص‌های CDD و HDD به صورت معادله ۵ و معادله ۶ تعریف شده و سپس مقادیر سالانه از جمع روی همه روزهای سال با معادله ۷ به دست می‌آید [۲۹ و ۳۰].

$$CDD(y, d) = \max(0, T(y, d) - T_{base}) \quad (5)$$

$$HDD(y, d) = \max(0, T_{base} - T(y, d)) \quad (6)$$

$$CDD_y = \sum_{d \in year\ y} CDD(y, d), HDD_y = \sum_{d \in year\ y} HDD(y, d) \quad (7)$$

این مقادیر سالانه، ورودی مدل رگرسیون مصرف برق هستند. برای پیش‌بینی در سناریوهای تغییر اقلیم، دو رویکرد اتخاذ شده است. ۱) سناریوهای دمایی مصنوعی که دمای روزانه برای سال‌های آینده با افزودن تغییر دمای سالانه (ΔT) به دمای سال پایه محاسبه می‌شود (معادله ۸). این شامل سناریوهای بدون تغییر، افزایش و کاهش 0.5 درجه سانتی‌گراد و 1 درجه سانتی‌گراد در سال است. ۲) سناریوهای مبتنی بر CMIP6 که دمای ماهانه مدل‌های اقلیمی به دمای روزانه تبدیل شده و مستقیم استفاده می‌شود. در صورت نیاز به پیش‌بینی فراتر از دوره داده CMIP6، روند خطی ماهانه برای تعمیم به سال افق به کار می‌رود. در نهایت، شاخص‌های CDD و HDD محاسبه‌شده برای هر سناریو در مدل رگرسیون سالانه مصرف قرار گرفته تا اثرات تغییر اقلیم بر تقاضای برق پیش‌بینی شود [۳۱ و ۳۲].

$$T_{scen}(y, d) = T_{baseYear}(d) + (y - y_{base})\Delta T \quad (8)$$

۲-۲-۳. توزیع انرژی سالانه به مقیاس روزانه و ساخت پروفایل بار ساعتی

این بخش به تشریح فرایند تبدیل پیش‌بینی‌های انرژی سالانه و ماهانه به مقیاس‌های روزانه و ساعتی با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف تغییر اقلیم می‌پردازد.

تبدیل به مقیاس روزانه:

۱. وزن خام (معادله ۹): برای هر روز، وزنی خام بر اساس شاخص‌های حرارتی CDD و HDD روزانه در آن سناریو محاسبه می‌شود. ضرایب $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ مقادیر ثابتی هستند که در این پژوهش مقادیر نمونه‌ای برای آنها در نظر گرفته شده است. ضرایب ثابت $\alpha_0 = 1.0, \alpha_1 = 0.1, \alpha_2 = 0.05$ بر اساس کالیبراسیون اولیه مدل و آزمون و خطا انتخاب شده‌اند تا توزیع روزانه‌ای واقع‌بینانه از مصرف سالانه برق برای شرایط دمایی تاریخی استان تهران حاصل شود [۳۳].

$$w_{raw}^{(s)}(y, d) = \alpha_0 + \alpha_1 CDD^{(s)}(y, d) + \alpha_2 HDD^{(s)}(y, d) \quad (9)$$

۲. نرمال‌سازی وزن‌ها (معادله ۱۰): وزن خام هر روز نسبت به مجموع وزن‌های خام کل روزهای سال نرمال‌سازی می‌شود تا مجموع وزن‌های روزانه برابر با ۱ شود [۳۴].

$$W^{(s)}(y, d) = \frac{w_{\text{raw}}^{(s)}(y, d)}{\sum_{d' \in \text{year} \square y} w_{\text{raw}}^{(s)}(y, d')} \quad (10)$$

۳. محاسبه انرژی روزانه (معادله ۱۱): انرژی سالانه پیش‌بینی شده در وزن نرمال شده روزانه ضرب می‌شود تا انرژی روزانه

$$E^{(s)}(y, d) \text{ به دست آید. این تضمین می‌کند که مجموع انرژی روزانه طی سال با انرژی سالانه پیش‌بینی شده برابر است [۳۴].} \\ E^{(s)}(y, d) = W^{(s)}(y, d) \times \hat{E}_y^{(s)} \quad (11)$$

۴. محاسبه انرژی ماهانه (معادله ۱۲): انرژی روزانه در هر ماه جمع زده می‌شود تا انرژی ماهانه $E_{\text{month}}(y, m)$ محاسبه شود [۳۴].

$$E_{\text{month}}(y, m) = \sum_{d \in m} E_{\text{day}}(y, d) \quad (12)$$

ساخت پروفایل بار ساعتی:

۱. پروفایل‌های پایه (تابستانی و زمستانی): دو پروفایل بار ساعتی پایه تعریف می‌شود. پروفایل تابستانی $H_{\text{sum}}(h)$ که اوج مصرف را در عصر و شب نشان می‌دهد و پروفایل زمستانی $H_{\text{win}}(h)$ که اوج مصرف را در صبح و شب دارد. هر دو پروفایل طوری نرمال‌سازی می‌شوند که مجموع وزنی آن‌ها در ۲۴ ساعت برابر با ۱ باشد (معادله ۱۳).

$$\sum_{h=0}^{23} H_{\text{sum}}(h) = \sum_{h=0}^{23} H_{\text{win}}(h) = 1 \quad (13)$$

۲. تعیین وزن‌های تابستانی و زمستانی (معادلات ۱۴ - ۱۶): شاخص D (مجموع CDD و HDD) برای هر روز محاسبه می‌شود. سپس، نسبت CDD و HDD به D برای تعیین وزن‌های تابستانی λ_{sum} و زمستانی λ_{win} استفاده می‌شود. اگر D صفر باشد، وزن‌ها به طور مساوی بین تابستان و زمستان تقسیم می‌شوند (۰/۵) [۳۵].

$$D^{(s)}(y, d) = CDD^{(s)}(y, d) + HDD^{(s)}(y, d) \quad (14)$$

$$\lambda_{\text{sum}}^{(s)}(y, d) = \begin{cases} \frac{CDD^{(s)}(y, d)}{D^{(s)}(y, d)}, & D^{(s)}(y, d) > 0 \\ 0.5, & D^{(s)}(y, d) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\lambda_{\text{win}}^{(s)}(y, d) = \begin{cases} \frac{HDD^{(s)}(y, d)}{D^{(s)}(y, d)}, & D^{(s)}(y, d) > 0 \\ 0.5, & D^{(s)}(y, d) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

۳. ساخت پروفایل ساعتی ترکیبی (معادله ۱۷): پروفایل ساعتی هر روز با ترکیب وزن‌دار پروفایل‌های پایه تابستانی و زمستانی، بر اساس وزن‌های محاسبه شده λ_{sum} و λ_{win} به دست می‌آید [۳۶].

$$H^{(s)}(y, d, h) = \lambda_{\text{sum}}^{(s)}(y, d) H_{\text{sum}}(h) + \lambda_{\text{win}}^{(s)}(y, d) H_{\text{win}}(h) \quad (17)$$

۴. محاسبه انرژی ساعتی (معادله ۱۸): انرژی روزانه $E^{(s)}(y, d)$ در پروفایل ساعتی آن روز ضرب می‌شود تا انرژی ساعتی $E^{(s)}(y, d, h)$ برای هر سناریو، سال، روز و ساعت محاسبه شود [۳۶].

$$E^{(s)}(y, d, h) = H^{(s)}(y, d, h) \times E^{(s)}(y, d) \quad (18)$$

این روش تضمین می‌کند که مجموع انرژی ساعتی طی روز برابر با انرژی روزانه و مجموع انرژی ساعتی طی سال برابر با انرژی سالانه پیش‌بینی شده $E^{(s)}(y, d)$ باقی بماند (معادلات ۱۹ و ۲۰) [۳۶].

$$\sum_{h=0}^{23} E^{(s)}(y, d, h) = E^{(s)}(y, d) \quad (19)$$

$$\sum_d \sum_h E^{(s)}(y, d, h) = \hat{E}_y^{(s)} \quad (20)$$

۲-۳. داده‌ها و اعتبارسنجی

این پژوهش از سه دسته داده اصلی برای تحلیل و مدل‌سازی مصرف برق خانگی در سناریوهای تغییر اقلیم استفاده کرده است. نخست داده‌های مصرف برق خانگی و تعداد مشترکان که این داده‌ها به صورت سالانه از وزارت نیرو (ترازنامه انرژی) استخراج شده و پس از پاک‌سازی و استانداردسازی، سری زمانی منظم مصرف برق و تعداد مشترکان خانگی را برای استان تهران فراهم کرده‌اند. دوم داده‌های دمای روزانه تاریخی که میانگین دمای روزانه از سامانه NASA POWER دریافت شده و برای محاسبه شاخص‌های HDD و CDD در دوره تاریخی مورد نیاز، پاک‌سازی و ساختاربندی شده است. سوم داده‌های سناریوهای تغییر اقلیم (CMIP6) که دمای سطحی هوا به صورت ماهانه از مجموعه مدل‌های CMIP6 تحت سناریوی انتشار SSP2-4.5 از طریق پایگاه CDS کپرنیکوس بازیابی شده و سپس به دمای روزانه تبدیل شده است تا بتواند تا افق ۲۰۵۰ برای شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر مصرف برق مورد استفاده قرار گیرد. مدل تقاضای برق خانگی بر اساس شاخص‌های حرارتی سالانه CDD و HDD، تعداد مشترکان و روند زمانی بنا شده است. این مدل از طریق رگرسیون خطی چندمتغیره، مصرف برق را پیش‌بینی می‌کند. فرایند مدل‌سازی شامل آماده‌سازی داده‌ها، برازش مدل با استفاده از روش حداقل مربعات معمولی، و اعتبارسنجی نتایج با معیارهایی مانند R^2 و RMSE است. شاخص‌های HDD و CDD که بر اساس دمای روزانه و دمای مبنا (۲۴ درجه سانتی‌گراد) محاسبه می‌شوند، نقش کلیدی در توضیح نوسانات مصرف برق ناشی از سرمایش و گرمایش دارند [۳۷]. تمام مراحل تحلیل و پیش‌بینی تقاضای برق (شامل سناریوهای آینده و پروفایل‌های مصرف ساعتی/روزانه) با استفاده از زبان Python و کتابخانه‌های علمی مانند NumPy، Pandas، Scikit-Learn و Matplotlib انجام شده است. این رویکرد، مدلی قابل تکرار، شفاف و توسعه‌پذیر را ایجاد کرده است.

۲-۴. مطالعه موردی: استان تهران

استان تهران به دلیل جمعیت بالا، مصرف قابل توجه برق خانگی، و اقلیم تابستانی گرم و خشک، به عنوان مطالعه موردی برای تحلیل اثر تغییر اقلیم بر مصرف برق انتخاب شده است. رشد مصرف برق در تابستان‌ها و همبستگی آن با دما، نشان‌دهنده اهمیت شاخص درجه‌روز سرمایش در این منطقه است. نتایج این تحلیل برای برنامه‌ریزی ظرفیت نیروگاهی، مدیریت بار، و سیاستگذاری‌های کلان انرژی در ایران کاربرد خواهد داشت.

۳. نتایج

برای پیش‌بینی مصرف برق در آینده با توجه به تغییر اقلیم، از چندین سناریوی دمایی استفاده می‌شود. این سناریوها شامل موارد ساده‌سازی شده با شیب افزایش دمای ثابت و همچنین، سناریوهای پیچیده‌تر مبتنی بر مدل‌های جهانی اقلیم هستند. هدف این است که واکنش مصرف برق (سالانه، ماهانه، روزانه و پیک‌بار) به طیف وسیعی از احتمالات گرمایش، از کمترین تا شدیدترین حالت، ارزیابی شود.

برای پیش‌بینی مصرف برق در تهران تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، شش حالت در نظر گرفته شده است. سناریوی پایه که دما را ثابت فرض می‌کند و تغییرات مصرف را به رشد مشترکان نسبت می‌دهد؛ سناریوی افزایش ملایم دما (۰/۵+ درجه در سال) که به رشد تدریجی تقاضای سرمایشی و پیک‌بار تابستانی منجر می‌شود؛ سناریوی افزایش شدید دما (۱+ درجه در سال) که باعث جهش مصرف سرمایشی و افزایش قابل توجه پیک‌بار می‌شود؛ سناریوی کاهش ملایم دما (۰/۵- درجه در سال) که کاهش مصرف تابستانی و پیک‌بار را به همراه دارد؛ سناریوی کاهش شدید دما (۱- درجه در سال) که کاهش چشمگیر مصرف تابستانی، جابه‌جایی پیک بار به زمستان و هموار شدن منحنی بار سالانه را نتیجه می‌دهد و سناریوی مبتنی بر مدل‌های اقلیم‌سنجی CMIP6 و سناریوهای انتشار SSP تا افق ۲۰۵۰ اضافه شده است. این سناریو با استفاده از دمای ماهانه جهانی و تبدیل آن به دمای روزانه، الگوی واقعی گرمایش اقلیم را با در نظر گرفتن شدت امواج گرما و تغییرات فصلی منعکس می‌کند.

پیش‌بینی می‌شود این سناریو به CDD بالاتر و افزایش مصرف برق قابل توجه‌تری نسبت به سناریوهای خطی منجر شود و با تحلیل دقیق‌تر داده‌ها، تصویر جامعی از تأثیر تغییر اقلیم بر مصرف برق تهران ارائه دهد. خلاصه این شش سناریو در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. خلاصه شش سناریوی پیش‌بینی مصرف برق تهران تحت تغییر اقلیم

شماره سناریو	عنوان سناریو	توضیح دمایی	اثر بر مصرف برق	نکات کلیدی
۱	سناریوی پایه	دما ثابت فرض می‌شود	تغییر مصرف فقط به دلیل رشد مشترکان	مبنای مقایسه با سایر سناریوها
۲	افزایش ملایم دما	هر سال ۵+ درجه سانتی‌گراد	افزایش تدریجی مصرف سرمایشی و رشد آرام پیک تابستان	نشان‌دهنده گرمایش خفیف و پایدار
۳	افزایش شدید دما	هر سال ۱۱+ درجه سانتی‌گراد	جهش قابل توجه در مصرف کولرها و افزایش شدید پیک تابستان	مناسب تحلیل شرایط تنش حرارتی بالا
۴	کاهش ملایم دما	هر سال ۰.۵- درجه سانتی‌گراد	کاهش مصرف سرمایشی و کاهش نسبی پیک تابستان	سناریوی خنک‌تر با اثر متعادل‌کننده
۵	کاهش شدید دما	هر سال ۱- درجه سانتی‌گراد	کاهش چشمگیر مصرف تابستانی، جابه‌جایی پیک به زمستان، هموار شدن منحنی سالانه	بررسی شرایط سرمایش شدید اقلیمی
۶	سناریوی مبتنی بر مدل‌های اقلیم‌سنجی CMIP6/SSP	مبتنی بر خروجی مدل‌های جهانی تا سال ۲۰۵۰، شامل تبدیل دمایی ماهانه به روزانه	افزایش CDD، مصرف سرمایشی بالاتر از سناریوهای خطی	واقع‌گرایانه‌ترین سناریو با بازتاب موج گرما، تغییرات فصلی و نوسانات اقلیمی

۳-۱. معادله نهایی پیش‌بینی مصرف سالانه برق

با استفاده از یک مدل رگرسیون چندمتغیره، مصرف سالانه برق خانگی تهران ($E_{year}(y)$) بر اساس مجموع درجه‌روزهای سرمایشی (CDD_y)، گرمایشی (HDD_y)، تعداد مشترکان (N_y) و روند زمانی (T_y) با دقت بالا پیش‌بینی می‌شود. معادله نهایی استخراج‌شده از محیط پایتون به صورت رابطه ۲۱ است [۲۷ و ۲۸].

$$E_{year}(y) = -28758.8842 + 10.2139CDD_y + 2.4894HDD_y + 0.0032N_y + 1238.0854T_y \quad (21)$$

شاخص‌های آماری مانند R^2 (۰/۹۹۵ در آموزش و ۰/۹۷۹ در آزمون) نشان‌دهنده توانایی بالای مدل در توضیح تغییرات مصرف هستند.

تبدیل به مصرف ماهانه: مصرف سالانه به‌دست‌آمده، سپس با استفاده از وزن‌های حرارتی روزانه ($w_{norm}(y, d)$) به مصرف روزانه ($E_{day}(y, d)$) و در نهایت به مصرف ماهانه ($E_{month}(y, m)$) تبدیل می‌شود. معادله مصرف روزانه به صورت رابطه ۲۲ است [۳۴].

$$E_{day}(y, d) = w_{norm}(y, d) E_{year}(y) \quad (22)$$

مصرف ماهانه از جمع مصرف روزانه در روزهای هر ماه محاسبه می‌شود (معادله ۲۳). این مرحله امکان لحاظ کردن نوسانات حرارتی و توزیع مصرف طی ماه را فراهم می‌کند. $w_{norm}(y, d)$ وزن نهایی روز d در سال y (که در ادامه تعریف می‌شود) است [۳۴].

$$E_{month}(y, m) = \sum_{d \in m} E_{day}(y, d) = \left(\sum_{d \in m} w_{norm}(y, d) \right) E_{year}(y) \quad (23)$$

محاسبه وزن‌های حرارتی روزانه

وزن خام روز ($w_{raw}(y, d)$): با استفاده از معادله ۲۴، وزن خام هر روز بر اساس مجموع درجه‌روزهای سرمایشی ($CDD(y, d)$) و گرمایشی ($HDD(y, d)$) محاسبه می‌شود [۳۳].

$$w_{raw}(y, d) = 1.000 + 0.100CDD(y, d) + 0.050HDD(y, d) \quad (24)$$

وزن نهایی / نرمال‌شده روز $w_{norm}(y, d)$: با تقسیم وزن خام هر روز بر مجموع وزن خام تمام روزهای سال، وزن نهایی به دست می‌آید (معادله ۲۵). این کار تضمین می‌کند که مجموع وزن‌های نرمال‌شده برابر با ۱ باشد و تعادل انرژی سالانه حفظ شود [۳۴].

$$w_{norm}(y, d) = \frac{w_{raw}(y, d)}{\sum_{d'=1}^{365} w_{raw}(y, d')} \quad (25)$$

محاسبه مصرف روزانه $(E_{day}(y, d))$: مصرف روزانه از ضرب وزن نرمال‌شده هر روز در مصرف سالانه به دست می‌آید (معادله ۲۶). این روش نشان می‌دهد روزهای با شرایط حرارتی شدیدتر (CDD یا HDD بالاتر)، سهم بیشتری از مصرف سالانه را به خود اختصاص می‌دهند [۳۴].

$$E_{day}(y, d) = w_{norm}(y, d) \times E_{year}(y) \quad (26)$$

مدل نهایی مصرف ساعتی $(E(y, d, h))$:

این بخش به پیش‌بینی الگوی ساعتی بار می‌پردازد.

تعیین وزن پروفایل تابستانی / زمستانی روز: برای هر روز، سهم پروفایل تابستانی (w_{summer}) و زمستانی (w_{winter}) بر اساس نسبت CDD و HDD تعیین می‌شود. در روزهای معتدل ($CDD + HDD = 0$)، هر دو وزن ۰/۵ هستند (معادله ۲۷). در غیر این صورت، از معادلات ۲۸ و ۲۹ استفاده می‌شود [۳۵].

$$w_{summer} = w_{winter} = 0.5 \quad (27)$$

$$w_{summer}(y, d) = \frac{CDD(y, d)}{CDD(y, d) + HDD(y, d)} \quad (28)$$

$$w_{winter}(y, d) = \frac{HDD(y, d)}{CDD(y, d) + HDD(y, d)} \quad (29)$$

ساخت پروفایل ساعتی ترکیبی روز $H(y, d, h)$: با استفاده از دو پروفایل پایه ساعتی تابستانی ($H_{summer}(h)$) و زمستانی ($H_{winter}(h)$)، که مجموع آن‌ها در هر شبانه‌روز برابر ۱ است (معادله ۳۰)، پروفایل ترکیبی برای هر روز ساخته می‌شود (معادله ۳۱) [۳۶].

$$\sum_{h=0}^{23} H(h) = 1 \quad (30)$$

$$H(y, d, h) = w_{summer}(y, d) H_{summer}(h) + w_{winter}(y, d) H_{winter}(h) \quad (31)$$

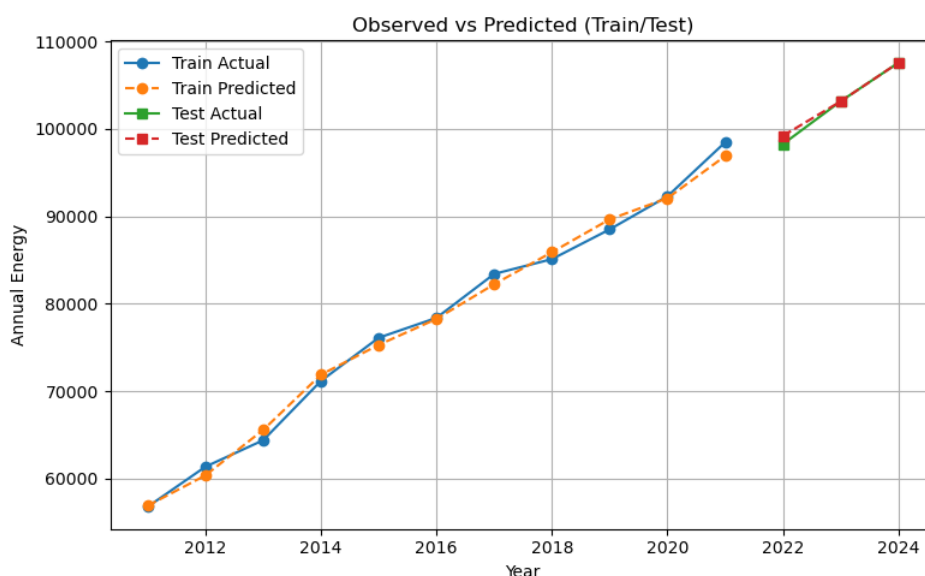
معادله نهایی مصرف ساعتی $E(y, d, h)$: مصرف نهایی در هر ساعت با ضرب پروفایل ترکیبی ساعتی در مصرف روزانه به دست می‌آید (معادله ۳۲) [۳۶].

$$E(y, d, h) = H(y, d, h) \times E_{day}(y, d) \quad (32)$$

در نهایت، این مدل سه سطحی (سالانه، ماهانه/روزانه، ساعتی) امکان پیش‌بینی دقیق مصرف برق خانگی را با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی و رفتار فصلی/ساعتی فراهم می‌کند.

۳-۲. عملکرد مدل در داده‌های آموزش و آزمون

نمودار مقایسه‌ی مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده در شکل ۱ نشان می‌دهد مدل رگرسیون توسعه‌یافته توانایی بسیار بالایی در بازتولید الگوی تاریخی مصرف برق خانگی استان تهران دارد. خطوط پیش‌بینی در داده‌های آموزش تقریباً منطبق بر داده‌های واقعی هستند و در دوره‌ی آزمون نیز خطای مدل اندک و روند آن کاملاً مطابق روند واقعی مشاهده می‌شود.



شکل ۱. نمودار آموزش و آزمون

مدل توانسته است تغییرات تدریجی مصرف را در بازه سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۴ به خوبی بازسازی کند و در داده‌های آزمون (از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴)، پیش‌بینی‌ها اختلاف بسیار کمی با مقادیر واقعی دارند. این انطباق بالا نشان می‌دهد متغیرهایی مانند درجه‌روهای سرمایش، درجه‌روهای گرمایش، تعداد مشترکان و روند زمانی، توانسته‌اند رفتار مصرف را به طور پایدار توضیح دهند. شاخص دقت مدل در داده‌های آموزش^۱ برابر با ۰/۹۹۵ (۹۹/۵ درصد) و در داده‌های آزمون^۲ برابر با ۰/۹۷۹ (۹۷/۹ درصد) بوده است که نشان‌دهنده قدرت تعمیم بالای مدل است. خطای میانگین مربعات ریشه‌ای مدل در داده‌های آموزش ۹۲۶ کیلووات‌ساعت و در داده‌های آزمون ۵۴۷/۸۲ کیلووات‌ساعت بوده است. با در نظر گرفتن مصرف سالانه که حدود ۱۰۰ هزار کیلووات‌ساعت تخمین زده می‌شود، خطای مدل کمتر از ۱ درصد مقدار واقعی است. تنها سال‌های دارای انحراف نسبی بالا به شرح جدول ۲ است.

جدول ۲. سال‌های با انحراف نسبی بالا

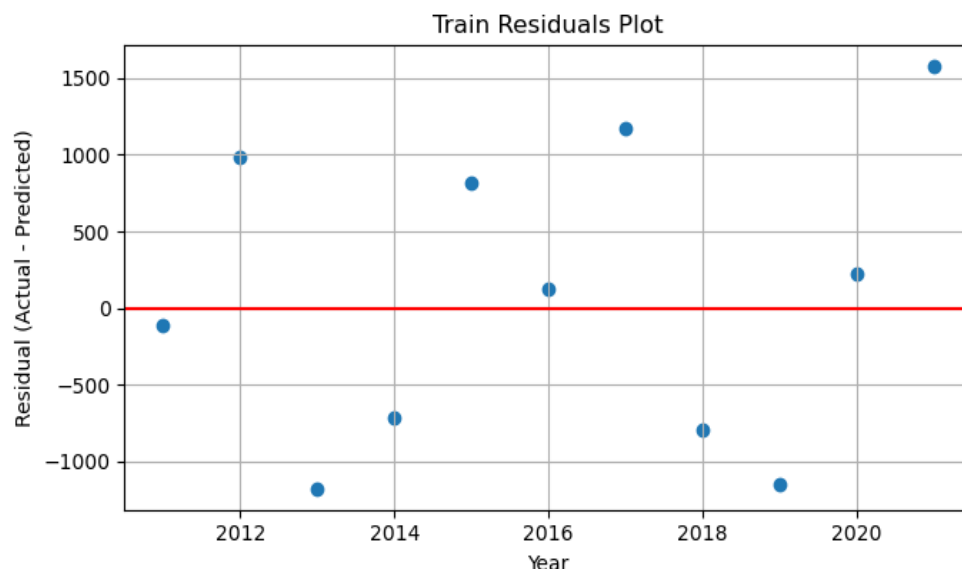
سال	مقدار واقعی	مقدار پیش‌بینی	اختلاف	%
۲۰۱۲	۶۰۲۰۰~	۵۹۹۰۰~	-۳۰۰~	۰.۵~%
۲۰۱۴	۷۲۰۰۰~	۷۱۴۰۰~	-۶۰۰~	۰.۸~%
۲۰۱۹	۹۸۷۰۰~	۹۷۴۰۰~	-۱۳۰۰~	۱.۳~%

نمودار باقی‌مانده‌ها که در شکل ۲ نشان داده شده است، خطای مدل در داده‌های آموزش فاقد الگوی سیستماتیک است. باقی‌مانده‌ها به صورت تصادفی بالا و پایین محور صفر توزیع شده‌اند و این به معنای آن است که مدل دچار بایاس سیستماتیک نیست، اثر متغیرهای اقلیمی و جمعیتی به درستی در مدل لحاظ شده است و خطاها عمدتاً ناشی از نوسانات کوتاه‌مدت غیرقابل توضیح هستند. بیشترین باقی‌مانده مثبت حدود ۱۵۰۰ واحد و بیشترین مقدار منفی حدود ۱۲۰۰ واحد است که نسبت به مقدار کل مصرف سالانه، ناچیز محسوب می‌شود.

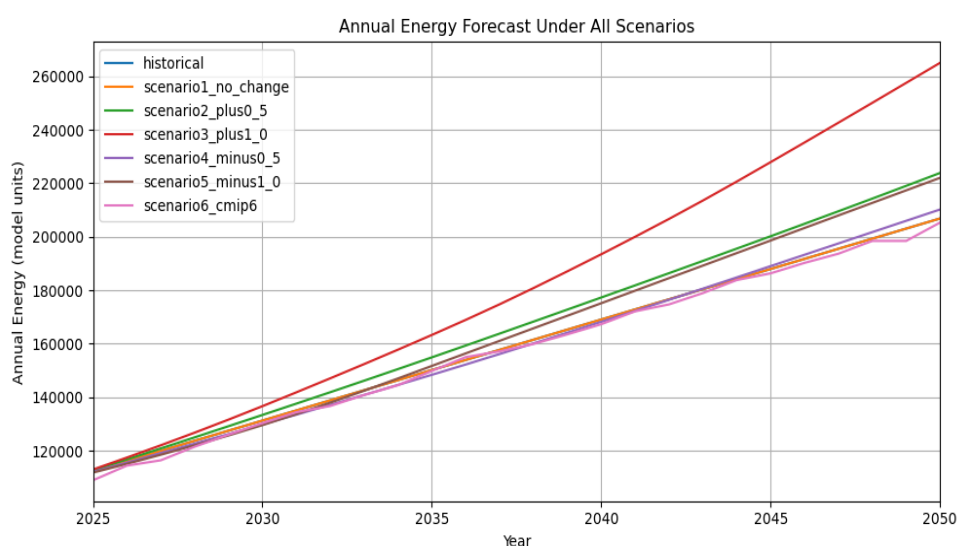
نمودار پیش‌بینی مصرف سالانه (شکل ۳) تا افق ۲۰۵۰ نشان می‌دهد مصرف برق در تمام سناریوها روند صعودی دارد. از دلایل آن می‌توان به رشد تعداد مشترکان، روند تاریخی افزایش مصرف و تشدید اثرات اقلیمی در سناریوهای گرم‌تر اشاره کرد. سناریوی افزایش شدید دما (+۱ C/year) بیشترین رشد مصرف را دارد. در این سناریو، مصرف برق تا ۲۰۵۰ جهش بسیار قابل

1. Train R²2. Test R²

توجهی پیدا می‌کند. این تفاوت شدید به دلیل رشد نمایی شاخص CDD در سناریوی گرم است. سناریوهای کاهش دما کمترین رشد مصرف را نشان می‌دهند. سناریوی CMIP6 بین سناریوهای بدون تغییر و $+0.5$ درجه قرار دارد. این نشان می‌دهد مدل‌های اقلیمی جهانی گرمایش ملایم اما پیوسته‌ای را برای تهران پیش‌بینی می‌کنند.



شکل ۲. نمودار توزیع خطا در داده‌های آموزش



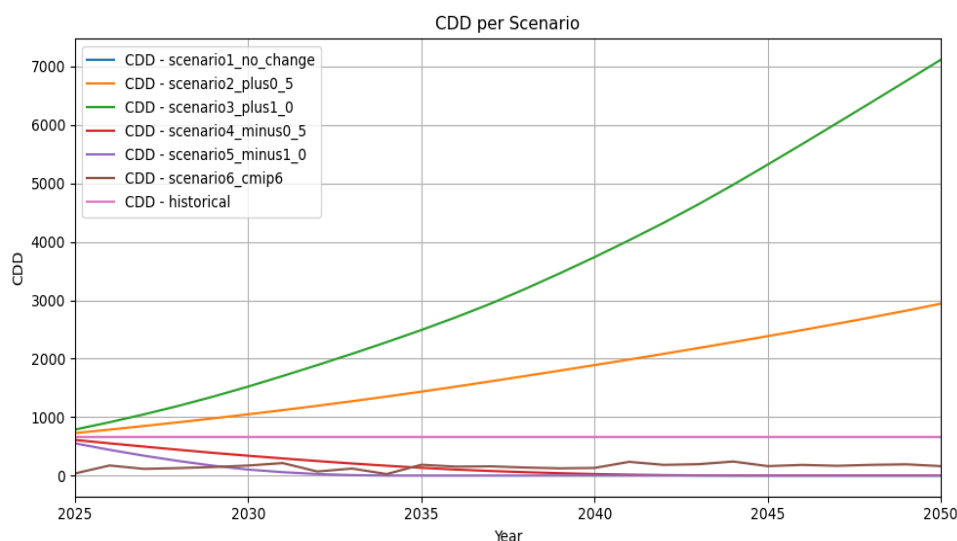
شکل ۳. نمودار پیش‌بینی سالانه انرژی تحت تمامی سناریوها

مصرف برق در سال ۲۰۲۵ (پایه پیش‌بینی) حدود ۱۱۴ هزار کیلووات ساعت است. در جدول ۳ مصرف برق در سال ۲۰۵۰ تحت هر سناریو آمده است. شدیدترین افزایش مصرف مربوط به سناریوی $1\text{ }^{\circ}\text{C/year} +$ است. کاهش دما، رشد مصرف را بین ۶۵ - ۷۰ درصد محدود می‌کند. سناریوی CMIP6 مقدار میانی و نزدیک به سناریوی بدون تغییر دما دارد. تفاوت مصرف ۲۰۵۰ در گرم‌ترین و سردترین سناریو تقریباً برابر با ۷۷ هزار کیلووات ساعت است (بیش از ۶۷ درصد اختلاف). محاسبه شاخص درجه‌روز سرمایش برای دوره ۲۰۲۵ تا ۲۰۵۰ (شکل ۴) نشان می‌دهد رفتار این شاخص در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم تفاوت چشمگیری با یکدیگر دارد. در سناریوی افزایش شدید دما ($+1$ درجه سانتی‌گراد در سال) شیب رشد

CDD بسیار تند است؛ به گونه‌ای که مقدار آن تا افق ۲۰۵۰ از ۷۰۰۰ واحد فراتر می‌رود. چنین افزایشی بیانگر تابستان‌هایی به مراتب طولانی‌تر، گرم‌تر و نیاز فزاینده به سرمایش برقی است و می‌تواند به افزایش قابل توجه بار سرمایشی در شبکه برق منجر شود. در مقابل، سناریوی افزایش ملایم دما ($+0.5$ درجه) روندی افزایشی اما با شیبی ملایم‌تر نشان می‌دهد؛ بنابراین گرچه شدت گرمایش در این سناریو کمتر است، اما افزایش پایدار CDD همچنان تأثیر محسوس بر الگوی مصرف برق و پیک‌بار تابستانی خواهد داشت. بررسی سناریوهای کاهشی (-0.5 و -1 درجه در سال) حاکی از آن است که CDD در این حالات با کاهش چشمگیر همراه است. در سناریوی -1 درجه مقدار CDD تا حدود صفر کاهش می‌یابد؛ این وضعیت نشان‌دهنده کاهش یا حتی حذف نیاز سرمایشی و غلبه شرایط خنک بر دوره تابستان است، به طوری که گرمایش اقلیمی در عمل محو می‌شود. در سوی دیگر، سناریوی مبتنی بر مدل‌های اقلیم‌سنجی CMIP6 تقریباً مقادیر نزدیک به گذشته تاریخی را حفظ می‌کند و روندی نسبتاً ثابت دارد. این موضوع نشان می‌دهد با وجود نگرانی‌های جهانی درباره گرمایش، مدل‌های اقلیمی جهانی برای تهران افزایش شدید و خطی دما را مشابه سناریوی $+1$ درجه پیش‌بینی نمی‌کنند و الگوی گرمایش در این سناریو متعادل‌تر و واقع‌بینانه‌تر است.

جدول ۳. مصرف برق در سال ۲۰۵۰ تحت هر سناریو

سناریو	مصرف ۲۰۵۰ (kWh)	تغییر نسبت به ۲۰۲۵	درصد رشد
بدون تغییر دما	$20500 \approx$	$+9100$	$+79\%$
افزایش 5.0°C/year	$21500 \approx$	$+10100$	$+88\%$
افزایش 1°C/year	$26500 \approx$	$+15100$	$+132\%$
کاهش 5.0°C/year	$19500 \approx$	$+8100$	$+71\%$
کاهش 1°C/year	$18800 \approx$	$+7400$	$+65\%$
CMIP6	$20000 \approx$	$+8600$	$+75\%$



شکل ۴. نمودار درجه‌روزهای سرمایش به ازای هر سناریو

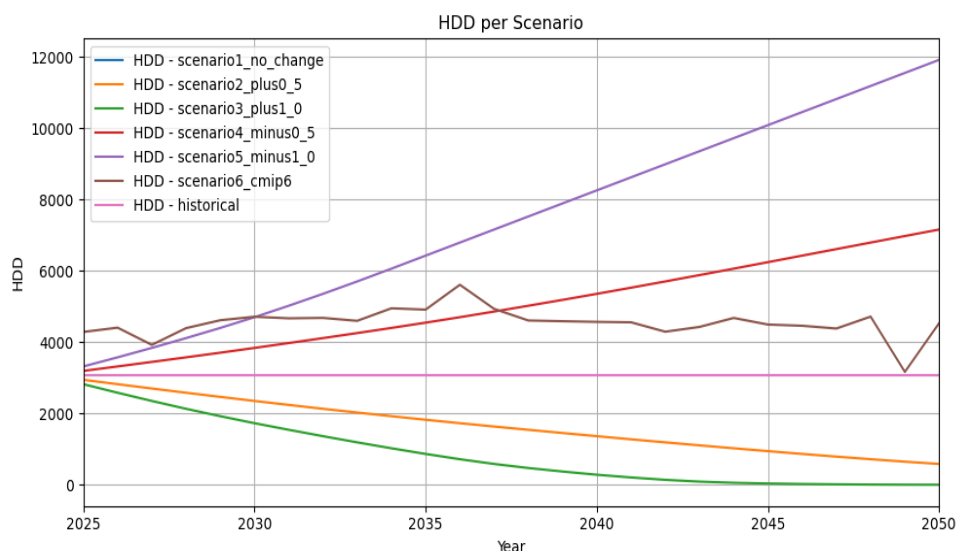
در جدول ۴ مقادیر کمی CDD برای افق ۲۰۵۰ ارائه شده که این اختلافات را به صورت عددی و قابل مقایسه میان سناریوها نشان می‌دهد و به تحلیل دقیق‌تر آثار تغییر اقلیم بر مصرف برق تهران کمک می‌کند. در سناریوی افزایش شدید دما ($+1$ درجه سانتی‌گراد)، شاخص درجه‌روز سرمایش افزایش چشمگیری می‌یابد و مقدار آن به بیش از ۹ برابر مقدار پایه می‌رسد. این جهش به‌روشنی بیانگر افزایش قابل توجه تعداد روزهای گرم و طولانی‌تر شدن فصل گرما است. در چنین شرایطی، نیاز به سرمایش مکانیکی و استفاده گسترده از وسایل سرمایشی به طور محسوسی افزایش خواهد یافت و به عنوان مهم‌ترین عامل رشد

مصرف برق در سال‌های آینده شناخته می‌شود. در مقابل، در سناریوهای سردتر (مانند ۱- درجه سانتی‌گراد) مقدار CDD عملاً به صفر میل می‌کند؛ به این معنا که شرایط حرارتی آن قدر سرد است که نیازی به سرمایش احساس نمی‌شود و مصرف برق مرتبط با تجهیزات سرمایشی حذف می‌شود.

شاخص درجه‌روز گرمایش مطابق انتظار رفتاری معکوس با CDD دارد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در سناریوهای افزایش دما مقدار HDD کاهش می‌یابد. در سناریوی افزایش شدید دما (۱+ درجه در سال) این شاخص تقریباً به صفر نزدیک می‌شود؛ به این معنا که تعداد روزهای سرد سال به شدت کاهش می‌یابد و نیاز به گرمایش تقریباً از میان می‌رود. در مقابل، در سناریوی کاهش شدید دما (۱- درجه در سال) بالاترین مقادیر HDD ثبت می‌شود. با این حال، با توجه به اینکه گرمایش برقی در تهران سهم اندکی در مصرف کل برق دارد، افزایش HDD اثر قابل توجهی بر بار شبکه و الگوی مصرف برق نخواهد داشت. در سناریوی مبتنی بر مدل‌های اقلیمی CMIP6 مقدار HDD روندی تقریباً پایدار و نزدیک به مقادیر تاریخی دارد. این رفتار تأیید می‌کند که براساس مدل‌های جهانی، برای تهران نه گرمایش افراطی و نه سرمایش شدید پیش‌بینی نمی‌شود و تغییرات حرارتی آینده بیشتر در محدوده نوسانات طبیعی و کنترل شده قرار دارد.

جدول ۴. نتایج کمی CDD در سناریوهای آینده

سناریو	CDD در سال ۲۰۲۵	CDD در سال ۲۰۵۰	رشد CDD
بدون تغییر دما	۷۸۰~	۷۸۰~	%۰
۵۰ C/year	۷۸۰~	۳۰۰~	٪۲۸۵+
۱ C/year	۷۸۰~	۷۲۰~	٪۸۲۰+
۵۰ C/year-	۷۸۰~	۲۵۰~	٪۶۸-
۱ C/year-	۷۸۰~	۰~	٪۱۰۰-
CMIP6	۷۸۰~	۸۲۰~	٪۵+



شکل ۵. نمودار درجه‌روزهای گرمایش به ازای هر سناریو

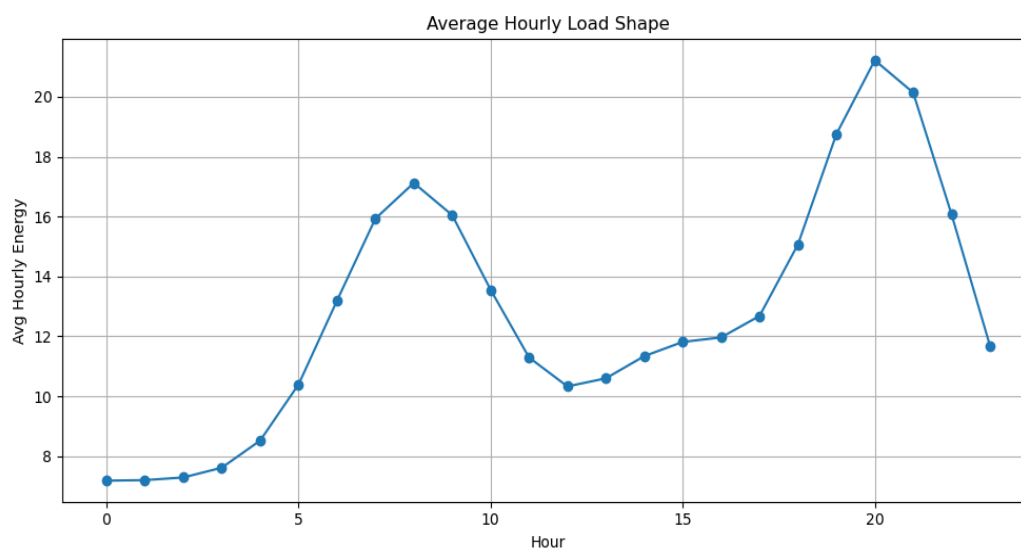
نتایج کمی HDD در سناریوهای آینده (۲۰۵۰) در جدول ۵ آمده است. در سناریوی افزایش شدید دما (۱+ درجه سانتی‌گراد در سال)، نیاز به گرمایش تقریباً به طور کامل از میان می‌رود؛ به طوری که شاخص HDD به مقادیر نزدیک صفر می‌رسد و نشان‌دهنده حذف مؤثر دوره‌های سرمای سالانه است. در مقابل، در سردترین سناریوی تغییر اقلیم (۱- درجه در سال) مقدار HDD تقریباً چهار برابر مقدار پایه می‌شود. این افزایش بیانگر زمستان‌های طولانی‌تر و سردتر است که اگرچه می‌تواند نیاز

گرمایشی را به شکل چشمگیری افزایش دهد، اما به دلیل سهم اندک گرمایش برقی در تهران تأثیر آن بر کل مصرف برق همچنان محدود باقی می‌ماند.

جدول ۵. نتایج کمی HDD در سناریوهای آینده

سناریو	HDD ۲۰۲۵	HDD ۲۰۵۰	تغییر
بدون تغییر	۳۳۰۰~	۳۳۰۰~	۰٪
+۵.۰C/year	۳۳۰۰~	۱۲۰۰~	-۶۴٪
+۱C/year	۳۳۰۰~	۰~	-۱۰۰٪
-۵.۰C/year	۳۳۰۰~	۷۲۰۰~	+۱۱۸٪
-۱C/year	۳۳۰۰~	۱۲۰۰~	+۲۶۴٪
CMIP6	۳۳۰۰~	۳۴۰۰~	+۳٪

داده‌های استخراج‌شده از مدل اقلیمی (نمایش داده‌شده در شکل ۶) بیانگر وجود دو الگوی مشخص و تکرارشونده در مصرف روزانه برق است. (۱) پیک عصرگاهی - شبانه: این پیک در بازه زمانی ساعت ۲۰ تا ۲۱ رخ می‌دهد. این زمان مصادف با اوج فعالیت‌های خانگی پس از بازگشت افراد از محل کار و آغاز استفاده هم‌زمان از وسایل روشنایی، سرمایشی/گرمایشی و سایر لوازم برقی است. (۲) پیک ظهرگاهی - بعدازظهر: پیک دوم در بازه زمانی ساعت ۱۴ تا ۱۵ مشاهده می‌شود. این زمان معمولاً با استفاده از وسایل سرمایشی در اوج گرمای روز و همچنین، فعالیت‌های خانگی مرتبط با ناهار و سایر امور روزمره هم‌زمان است. این الگوی دو پیکی مصرف، همخوانی کاملی با واقعیت‌های مصرف برق بخش خانگی در شهر تهران دارد و نشان‌دهنده تطابق مدل با شرایط واقعی است. کمترین میزان مصرف برق طی شبانه‌روز، بین ساعت‌های ۲ تا ۵ صبح به ثبت رسیده است. این دوره که مصادف با ساعت‌های پایانی شب و اوایل بامداد است، به طور طبیعی با کاهش چشمگیر فعالیت‌های انسانی و خاموشی بخش وسیعی از لوازم برقی همراه بوده و لذا کمترین بار را بر شبکه تحمیل می‌کند.



شکل ۶. میانگین بار ساعتی

نتایج حاصل از تحلیل کمی بار ساعتی میانگین، که در جدول ۶ ارائه شده است، جزئیات دقیقی از الگوی مصرف را آشکار می‌سازد. بر اساس این داده‌ها، اختلاف قابل توجهی بین پیک مصرف روزانه و کمینه مصرف مشاهده می‌شود. به طور مشخص، این اختلاف به حدود ۱۴/۵ کیلووات ساعت می‌رسد که نشان‌دهنده افزایش مصرف بیش از ۲۰۰ درصدی در ساعت‌های اوج نسبت به ساعت‌های کم مصرف است. پیک اصلی و بیشترین میزان مصرف برق طی شبانه‌روز، بین ساعت‌های ۲۰ تا ۲۱ (عصرگاهی - شبانه)

رخ می‌دهد. این بازه زمانی، همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، با اوج فعالیت‌های خانگی و استفاده هم‌زمان از طیف گسترده‌ای از لوازم برقی (روشنایی، سرمایش/گرمایش، صوتی-تصویری و غیره) منطبق است. این تحلیل کمی، شدت و گستردگی نوسانات مصرف طی شبانه‌روز را به طور دقیق مشخص می‌کند و اهمیت مدیریت بار در ساعت‌های اوج را برجسته می‌سازد.

جدول ۶. نتایج کمی بار ساعتی میانگین

ساعت	مقدار متوسط (kWh)
پایین‌ترین مصرف (۲-۴ صبح)	۷~
افزایش تدریجی تا ساعت ۱۰	۱۳~
پیک بعدازظهر (۱۴-۱۶)	۱۷~
بالا‌ترین پیک روز (۲۰-۲۱)	۲۱.۵~
کاهش بعد از ۲۲-۲۳ شب	۱۳~

نمودار ارائه‌شده در شکل ۷ به مقایسه دو پروفایل مصرف ساعتی برق در شرایط اقلیمی متفاوت می‌پردازد:

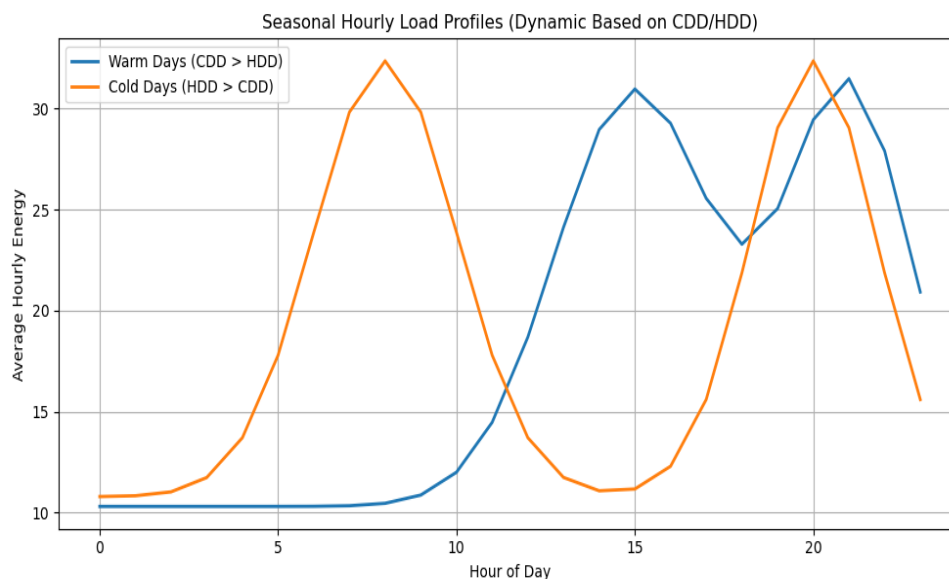
(الف) روزهای گرم ($HDD < CDD$): در روزهای گرم که شاخص درجه‌روز سرمایش بر شاخص درجه‌روز گرمایش غلبه دارد، الگوی مصرف برق به شرح زیر است:

- پیک اصلی مصرف: در بازه زمانی ۲۰ تا ۲۱ (عصرگاهی - شبانه) با مقدار تقریبی ۳۲ کیلووات ساعت رخ می‌دهد. این پیک نشان‌دهنده اوج فعالیت‌های خانگی و استفاده گسترده از وسایل سرمایشی در پایان روز است.
- پیک دوم مصرف: در بازه زمانی ۱۵ تا ۱۶ (ظهرگاهی - بعدازظهر) با مقدار تقریبی ۳۰ کیلووات ساعت مشاهده می‌شود. این پیک نیز عمدتاً ناشی از عملکرد وسایل سرمایشی (کولرهای گازی و آبی) در گرم‌ترین ساعت‌های روز است.
- کمترین مصرف: در ساعت‌های پایانی شب و اوایل بامداد (حدود ۲ تا ۵ صبح) با مقدار تقریبی ۱۰/۵ کیلووات ساعت به ثبت رسیده است.

منحنی بار کلی در این روزها، روندی صعودی طی روز را نشان می‌دهد که بیانگر افزایش مداوم نیاز به سرمایش و فعالیت وسایل مرتبط با آن است.

(ب) روزهای سرد ($CDD < HDD$): در روزهای سرد که شاخص درجه‌روز گرمایش بر شاخص درجه‌روز سرمایش برتری دارد، الگوی مصرف برق به شکل متفاوتی نمایان می‌شود:

- پیک اصلی مصرف: در بازه زمانی ۸ تا ۹ (صبحگاهی) با مقدار تقریبی ۳۳ کیلووات ساعت رخ می‌دهد. این پیک عمدتاً به دلیل روشن کردن وسایل گرمایشی (مانند بخاری‌های برقی، هرچند استفاده از آن‌ها ممکن است محدود باشد) و همچنین، تأمین روشنایی در اوایل روز است.
 - پیک دوم مصرف: در بازه زمانی ۲۰ تا ۲۱ (عصرگاهی - شبانه) با مقدار تقریبی ۳۱ کیلووات ساعت مشاهده می‌شود. این پیک همچنان نشان‌دهنده فعالیت‌های خانگی در عصر است، اما شدت آن نسبت به روزهای گرم کمتر است.
 - کمترین مصرف: در ساعت‌های بعدازظهر (حدود ۱۴ تا ۱۷) با مقدار تقریبی ۱۱ کیلووات ساعت ثبت شده است.
- مصرف در میانه روز در این سناریو پایین‌تر است که بازتاب‌دهنده کاهش نیاز به سرمایش و تمرکز بیشتر بر روشنایی و گرمایش محدود است. این مقایسه به‌وضوح نشان می‌دهد نوع و شدت نیازهای حرارتی (سرمایش یا گرمایش) نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌دهی به پروفایل مصرف ساعتی برق ایفا می‌کند.



شکل ۷. نمودار الگوی بار فصلی

الگوی بار فصلی مدل دقیقاً منطبق با رفتار واقعی مصرف در تهران است و نشان می‌دهد مدل ساعتی توسعه‌یافته توانایی بازنمایی صحیح تغییرات فصلی و ساعتی مصرف را دارد. پایداری رفتار دو پیک (صبح/ شب) در زمستان و (عصر/ ظهر) در تابستان کاملاً حفظ شده است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

مصرف برق خانگی به‌شدت تحت تأثیر بار سرمایشی و رشد دما در دهه‌های اخیر قرار دارد، به همین دلیل مدل‌های سستی مبتنی بر داده‌های تاریخی و پارامترهای اقتصادی به‌تنهایی قادر به پیش‌بینی دقیق تقاضا نیستند. این مطالعه با استفاده از شاخص‌های درجه‌روز سرمایشی و گرمایشی به عنوان متغیرهای اصلی و با به‌کارگیری یک چارچوب داده‌محور، حساسیت تقاضای برق به تغییرات اقلیمی را به صورت کمی برآورد کرده است. مدل توسعه‌یافته با ترکیب رگرسیون چندمتغیره سالانه، داده‌های دمای روزانه و توزیع حرارتی مصرف، دقت پیش‌بینی بالایی را در داده‌های آموزش (۰/۹۹۵) و آزمون (۰/۹۷۹) به دست آورده است، به طوری که آزمون خطای میانگین مربعات ریشه‌ای (۵۴۷/۸۲ کیلووات‌ساعت) کمتر از ۱ درصد مصرف سالانه است. این نتایج نشان می‌دهند CDD، HDD، تعداد مشترکان و روند زمانی قادر به تبیین بخش عمده‌ای از نوسانات مصرف برق خانگی هستند و مدل از توان تعمیم‌پذیری خوبی برخوردار است. تحلیل سناریوهای اقلیمی بیانگر آن است که CDD مهم‌ترین عامل افزایش مصرف برق در تهران است؛ به طوری که پیش‌بینی می‌شود مقدار آن از حدود ۷۸۰ واحد در سال پایه، در سناریوی افزایش ملایم دما به حدود ۳ هزار واحد و در سناریوی افزایش شدید به بیش از ۷۲۰۰ واحد برسد (رشد ۲۸۵ و ۸۲۰ درصد). در مقابل، HDD در سناریوهای گرم‌تر به شدت کاهش می‌یابد. این تغییرات منجر به رشد قابل ملاحظه مصرف سالانه تا ۷۵ تا ۱۳۲ درصد تا سال ۲۰۵۰ خواهد شد. در مقیاس ساعتی نیز، تمرکز بار در دوره‌های گرم سال بیشتر بوده و پیک مصرف در ساعات عصرگاهی به حدود ۲۱/۵ کیلووات‌ساعت و کمینه آن در بامداد به حدود ۷ کیلووات‌ساعت می‌رسد. در روزهای گرم، پیک‌های مصرف در بعدازظهر و شب تقویت می‌شوند، در حالی که روزهای سرد الگوی متفاوتی دارند. در مجموع، این چهارچوب ابزاری کاربردی برای پیش‌بینی اقلیم‌محور تقاضای برق و پشتیبانی از برنامه‌ریزی شبکه است و بر ضرورت توسعه ظرفیت تولید، مدیریت سمت تقاضا، بهینه‌سازی تجهیزات سرمایشی و گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر تأکید می‌کند.

۵. پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده

بر اساس نتایج این مطالعه، پژوهش‌های آتی توصیه می‌شود که با استفاده از روش‌های پیشرفته یادگیری ماشین مانند LSTM، جنگل تصادفی یا XGBoost^۱، دقت پیش‌بینی و مدل‌سازی رفتارهای پیچیده مصرف انرژی را افزایش دهند. همچنین، افزودن متغیرهای اقتصادی - اجتماعی مانند قیمت برق، درآمد خانوار، ساخت‌وساز شهری و میزان نفوذ تجهیزات سرمایشی/گرمایشی، مدل‌سازی مکانی با تفکیک استان تهران به نواحی مختلف برای تحلیل تفاوت‌های اقلیمی و جمعیتی، و بررسی سناریوهای سیاست‌های مدیریت مصرف (مانند تعرفه‌های زمان‌مند، بهینه‌سازی انرژی و توسعه سامانه‌های خورشیدی خانگی) پیشنهاد شده است. علاوه بر این، گسترش مدل به سایر بخش‌های مصرف‌کننده (تجاری، صنعتی، اداری) و توسعه یک مدل یکپارچه بار برای کل استان تهران و تحلیل عدم قطعیت سناریوهای اقلیمی با استفاده از روش‌هایی مانند مونت کارلو یا تحلیل بیزی، از دیگر حوزه‌های پیشنهادی برای پژوهش‌های آینده هستند. این مطالعه با وجود ارائه یک چهارچوب دقیق برای پیش‌بینی تقاضای برق خانگی تحت سناریوهای تغییر اقلیم، دارای برخی محدودیت‌ها است. نخست، مدل توسعه‌یافته مبتنی بر رگرسیون خطی چندمتغیره است و قادر به شناسایی روابط غیرخطی پیچیده میان متغیرهای اقلیمی و مصرف برق نیست. دوم، تحلیل‌ها عمدتاً بر داده‌های استان تهران متمرکز بوده و ممکن است قابلیت تعمیم مستقیم به سایر مناطق با اقلیم متفاوت محدود باشد. سوم، استفاده از سناریوهای اقلیمی CMIP6 و تبدیل آن‌ها به داده‌های روزانه ممکن است همراه با عدم قطعیت‌های ذاتی در مدل‌های اقلیمی باشد. در نهایت، برخی ضرایب مورد استفاده در فرایند توزیع زمانی مصرف، به صورت کالیبره‌شده تجربی تعیین شده‌اند که می‌تواند بر دقت نتایج اثرگذار باشد.

منابع

1. Sharmina M, Broad O, Barrett J, Brand C, Garvey A, Kennard H, et al. Policymaker-led scenarios and public dialogue facilitate energy demand analysis for net-zero futures. *Nature Energy*. 2025;1-11.
2. El-Araby R. Biofuel production: exploring renewable energy solutions for a greener future. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. 2024;17(1):129.
3. Zhang C, Liao H, Mi Z. Climate impacts: temperature and electricity consumption. *Natural Hazards*. 2019;99(3):1259-75.
4. Rezaei EE, Webber H, Asseng S, Boote K, Durand JL, Ewert F, et al. Climate change impacts on crop yields. *nature reviews earth & environment*. 2023;4(12):831-46.
5. Silva S, Soares I, Pinho C. Climate change impacts on electricity demand: The case of a Southern European country. *Utilities Policy*. 2020;67:101115.
6. Fan J-L, Tang B-J, Yu H, Hou Y-B, Wei Y-M. Impact of climatic factors on monthly electricity consumption of China's sectors. *Natural Hazards*. 2015;75(2):2027-37.
7. Gulaydin O, Mourshed M. Machine learning for subnational residential electricity demand forecasting to 2050 under shared socioeconomic pathways: Comparing tree-based, neural and kernel methods. *Energy*. 2025:138195.
8. Yeşilyurt H, Dokuz Y, Dokuz AS. Building Energy Consumption Prediction Based on Meteorological, Temporal and Meta Features Using Machine Learning Algorithms. *Temporal and Meta Features Using Machine Learning Algorithms*.
9. Kheiri F, Haberl JS, Baltazar J-C. Split-degree day method: A novel degree day method for improving building energy performance estimation. *Energy and Buildings*. 2023;289:113034.
10. Zhang S, Guo Q, Smyth R, Yao Y. Extreme temperatures and residential electricity consumption: Evidence from Chinese households. *Energy Economics*. 2022;107:105890.
11. Nam K, Seo W-K. Nonlinear temperature sensitivity of residential electricity demand: Evidence from a distributional regression approach. *Energy Economics*. 2025:109076.
12. Roberts MJ, Zhang S, Yuan E, Jones J, Fripp M. Using temperature sensitivity to estimate shiftable electricity demand. *Iscience*. 2022;25(9).
13. Kumar R, Rachunok B, Maia-Silva D, Nateghi R. Asymmetrical response of California electricity demand to summer-time temperature variation. *Scientific reports*. 2020;10(1):10904.
14. Fache A, Bhat MG. Temperature sensitive electricity demand and policy implications for energy transition: a case study of Florida, USA. *Frontiers in Sustainable Energy Policy*. 2024;2:1271035.
15. Daie B, Arian H, Sharifi H. Assessment of Residential Electrical Energy Demands Using Heating and Cooling Degree Days in Kabul City. Available at SSRN 4835583.
16. Gómez G, Soto S, Suástegui JA, Acuña A, Magaña HD. A New Proposal for the Use of Cooling Degree Hours for the Energy Simulation of Residential Buildings in Mexico. *Energies*. 2025;18(17):4554.
17. Andreou A. Improving projections of residential space cooling electricity demand: University of Leeds; 2020.
18. Muslih KD. Annual and Monthly Trends of Cooling and Heating Degree-Days in Four Different Cities in Iraq as an Index of Energy Consumption: Annual and Monthly Trends of Cooling and Heating Degree-Days in Four Different Cities in Iraq as an Index of Energy Consumption. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. 2022;58(1):33-43.
19. Guven D, Kayalica MO, Kayakutlu G, Isikli E. Impact of climate change on sectoral electricity demand in Turkey. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*. 2021;16(3):235-57.
20. Li Y, Pizer WA, Wu L. Climate change and residential electricity consumption in the Yangtze River Delta, China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019;116(2):472-7.
21. Dao CD. Impacts of climate change on residential demand for electricity in New Brunswick. 2021.
22. Solaun K, Cerda E. THE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON ELECTRICITY DEMAND. CASE STUDY IN THE BASQUE COUNTRY. *DYNA-Ingeniería e Industria*. 2020;95(2).
23. Panigrahi A. Forecasting Residential Electricity Load Demand using Machine Learning: Dublin, National College of Ireland; 2020.
24. Shaik SA. Forecasting the electricity demand using machine learning algorithms: Dublin Business School; 2020.

25. Herjuna SAS, Budisusila EN, Haddin M. Electricity demand forecasting in Ambon using machine learning techniques. *International Journal of Mechanical Computational and Manufacturing Research*. 2024;13(2):57-67.
26. Sleem AA, Syed MN. Novel Predictive Factors to Boost Short-Term Electricity Demand Forecasting Using Machine Learning Models. *IEEE Access*. 2025.
27. Aroonruengsawat A, Auffhammer M. Impacts of climate change on residential electricity consumption: evidence from billing data. *The Economics of climate change: Adaptations past and present*: University of Chicago Press; 2011. p. 311-42.
28. Salari M, Javid RJ. Residential energy demand in the United States: Analysis using static and dynamic approaches. *Energy Policy*. 2016;98:637-49.
29. Petri Y, Caldeira K. Impacts of global warming on residential heating and cooling degree-days in the United States. *Scientific reports*. 2015;5(1):12427.
30. Omidvar K, Ebrahimi R, Mazidi A, Alizadeh T. Comparative Analysis of Iran's Average Monthly Heating and Cooling Degree Days during the Past and Future Periods. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*. 2018;26(104):197-209.
31. Zabihi O, Ahmadi A. Multi-criteria evaluation of CMIP6 precipitation and temperature simulations over Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2024;52:101707.
32. Zarrin A, Dadashi-Roudbari A. Projected changes in temperature over Iran by 2040 based on CMIP6 multi-model ensemble. *Physical Geography Research*. 2021;53(1):75-90.
33. Brown RE, Koomey JG. Electricity use in California: past trends and present usage patterns. *Energy policy*. 2003;31(9):849-64.
34. Atallah T, Lanza A, Gualdi S, editors. Normalizing residential and commercial energy demand for climatic conditions. *Sustainable Energy Policy and Strategies for Europe*, 14th IAEE European Conference, October 28-31, 2014; 2014: International Association for Energy Economics.
35. Wilson E, Parker A, Fontanini A, Present E, Reyna J, Adhikari R, et al. End-use load profiles for the us building stock. *DOE Open Energy Data Initiative (OEDI)*; National Renewable Energy Laboratory ...; 2021.
36. Eshraghi H, Ansari M, Moshari S, Gholami J. Climatic zoning and per capita demand forecast of Iran using degree-day method. *Advances in Building Energy Research*. 2021;15(6):683-708.
37. Emenekwe CC, Emodi NV. Temperature and residential electricity demand for heating and cooling in G7 economies: A method of moments panel quantile regression approach. *Climate*. 2022;10(10):142.



The Application of Artificial Intelligence in Developing a Local Climate Change Adaptation Strategy for Qanats: Evaluating the Performance of XGBoost in Estimating the Discharge of Qaen Qanats

Mohamad Fouladi Nasrabad¹  | Mohammad Reza Farzaneh^{2*}  | Sepideh Zeraati Neyshabouri³ 

1. Ph.D. Student in Water Resources, Department of Water Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran. Email: mohamadfouladi-nsrbd@birjand.ac.ir

2. Corresponding Author, Assistant Prof. at Research Group of Environmental Engineering and Pollution Monitoring, Research Center for Environment and Sustainable Development, RCESD, Tehran, Iran. Email: mrf.farzaneh.env@gmail.com

3. Ph.D. in Water Resources, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran. Email: sepideh_zeraatineyshabouri@birjand.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received 27 February 2026

Revised 07 April 2026

Accepted 26 May 2026

Published Online 23 September 2026

Keywords:

Machine learning in hydrology,
Climate change adaptation,
Sensitivity analysis,
Qanat management,
Gradient boosting modeling.

ABSTRACT

Climate change, as a fundamental challenge of the present century, has made it inevitable for urban and regional policymakers to revise adaptation strategies and develop accurate prediction tools by affecting water resources in arid regions. Qanats, as strategic and vital infrastructures for water supply in settlements of Iran's arid regions, are currently facing threats due to declining groundwater levels, which doubles the need for applying artificial intelligence-based decision support systems. The present study aims to strengthen the foundations of water resources management planning by evaluating the performance of the XGBoost machine learning model in predicting the discharge of qanats in the Qaen Plain. To this end, 12-year data on qanat discharge (2007–2018), climatic variables (precipitation and temperature), and elevation were used. After preprocessing, the data were split into training (70%) and testing (30%) sets, and the model hyperparameters were tuned using RandomizedSearchCV with RMSE as the optimization objective. The evaluation results showed that XGBoost, with $R^2 \approx 0.88$ and $NS = 0.76$ in the testing phase, has high reliability for use in hydrological analyses. Based on sensitivity analysis, the optimal combination of hyperparameters was $n_estimators=500$, $max_depth=6$, $learning_rate=0.08$, and $min_child_weight=4$. However, it was observed that the model suffers from poor performance in predicting discharges exceeding 20 L/s due to the RMSE loss function and data imbalance. The findings of this study, while confirming the effectiveness of machine learning models in smartening water management, emphasize the need for caution in policymaking based on extreme flow predictions and provide an operational framework for enhancing the resilience of traditional water infrastructures against climate change.

Cite this article: Fouladi Nasrabad, M.; Farzaneh, M. R. & Zeraati Neyshabouri, S. (2026). The Application of Artificial Intelligence in Developing a Local Climate Change Adaptation Strategy for Qanats: Evaluating the Performance of XGBoost in Estimating the Discharge of Qaen Qanats. *Urban Development Policy Making*, 3 (3), 455-469. DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.579182.1096>



© Authors retain the copyright and full publishing rights.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.579182.1096>

Introduction

Climate change has emerged as one of the most pressing challenges of the twenty-first century, exerting significant pressure on water resources in arid and semi-arid regions. Qanats, as historic and strategic water-supply infrastructures in Iran's dry regions, are increasingly threatened by declining

groundwater levels, underscoring the need for artificial intelligence-based decision-support systems in water resources management. While previous studies have applied various machine learning techniques to qanat and groundwater discharge prediction, the application of XGBoost specifically for qanat discharge estimation in arid regions such as Qaen has received limited attention. This study therefore aims to evaluate the performance of the XGBoost algorithm in predicting the discharge of qanats in the Qaen Plain, Iran, as a basis for developing a localized climate change adaptation strategy for traditional water infrastructure.

Materials and Methods

This study used 12 years of qanat discharge data (2007–2018) along with climatic variables (precipitation and temperature) and elevation as a spatial parameter for the Qaen Plain in South Khorasan Province. After data collection, a preprocessing stage was carried out, including outlier detection and removal using the interquartile range (IQR) method, and data scaling through min-max normalization and Z-score standardization. The dataset was then divided chronologically into training (70%) and testing (30%) subsets using a temporal split to prevent information leakage and to realistically simulate prediction conditions. The XGBoost model was trained with hyperparameters optimized through RandomizedSearchCV using RMSE as the objective function. Model performance was assessed using RMSE, R^2 , Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), and Kling-Gupta Efficiency (KGE). In addition, a sensitivity analysis of the key hyperparameters (`n_estimators`, `max_depth`, `learning_rate`, and `min_child_weight`) was conducted using a five-fold temporal cross-validation approach.

Results

The results indicated that XGBoost achieved high predictive accuracy, with R^2 values of 0.875 and 0.881, NSE values of 0.757 and 0.764, and KGE values of 0.749 and 0.747 for the training and testing phases, respectively, while RMSE increased only slightly from 2.905 in training to 3.058 in testing, reflecting good model stability and generalizability. Statistical visualizations (swarm, scatter, ECDF, and violin plots) showed that the model performed very well for mid-range discharge values (0–20 L/s) but tended to underestimate extreme discharge values (above 20 L/s), a limitation attributed to the RMSE-based loss function and an imbalance in the training data toward moderate flow values. Sensitivity analysis identified the optimal hyperparameter configuration as `n_estimators` = 500, `max_depth` between 4 and 6, `learning_rate` up to approximately 0.4, and `min_child_weight` showing high sensitivity without reaching a clear optimum within the tested range, suggesting that further tuning toward higher values may still improve performance.

Discussion and Conclusion

The findings confirm that XGBoost is a reliable and effective tool for predicting qanat discharge under arid climatic conditions, supporting its use in smart, data-driven water resources management and the design of local climate change adaptation strategies. At the same time, the model's reduced accuracy in predicting extreme discharge events highlights the need for caution when using such predictions as a sole basis for policymaking related to flow extremes, which are expected to become more frequent under climate change. To address this limitation, future studies are recommended to explore alternative loss functions such as MAE or Huber loss, to enrich training datasets with more observations of high- and low-flow events, and to consider hybrid approaches combining XGBoost with models such as LightGBM or deep learning architectures. Incorporating additional explanatory variables, including water quality, land use, and drought indices, could further enhance model performance. Overall, this study positions the qanat not merely as a traditional engineering structure but as a strategic and intelligent component of climate resilience, demonstrating how the integration of advanced machine learning tools with indigenous water management knowledge can support the sustainable management of arid-region water resources.



کاربرد هوش مصنوعی در تدوین استراتژی بومی سازگاری با تغییر اقلیم قنات: ارزیابی عملکرد XGBoost در تخمین دبی قنات قاین

محمد فولادی نصرآباد^۱ | محمدرضا فرزانه^{۲*} | سپیده زراعتی نیشابور^۳

۱. دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: mohamadfouladi-nsrbd@birjand.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه پژوهشی مهندسی محیط زیست و پایش آلودگی، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، تهران، ایران. رایانامه: mrf.farzaneh.env@gmail.com

۳. دانش‌آموخته دکتری منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: sepideh_zeraatineyshabouri@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

کلیدواژه:

یادگیری ماشین در هیدرولوژی،

سازگاری با تغییر اقلیم،

تحلیل حساسیت،

مدیریت قنات،

مدل‌سازی گرادیان بوستینگ.

تغییر اقلیم به عنوان چالشی بنیادین در قرن حاضر، با تحت تأثیر قرار دادن منابع آب مناطق خشک، بازنگری در راهبردهای سازگاری و توسعه ابزارهای پیش‌بینی دقیق را برای سیاست‌گذاران شهری و منطقه‌ای اجتناب‌ناپذیر کرده است. قنات به عنوان زیرساخت‌های استراتژیک و حیاتی در تأمین آب سکونتگاه‌های مناطق خشک ایران، امروزه با تهدیدهای ناشی از کاهش تراز آب‌های زیرزمینی روبه‌رو هستند که این امر لزوم به‌کارگیری سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری مبتنی بر هوش مصنوعی را دوجندان می‌کند. پژوهش حاضر با هدف تقویت مبانی برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب، به بررسی عملکرد مدل یادگیری ماشین XGBoost در پیش‌بینی دبی قنات دشت قاین پرداخته است. در این راستا، از داده‌های ۱۲ ساله آینده قنات (۱۳۸۶ - ۱۳۹۷)، متغیرهای اقلیمی بارش و دما و متغیر ارتفاع استفاده شد که پس از پیش‌پردازش، داده‌ها به دو بخش آموزش (۷۰ درصد) و آزمون (۳۰ درصد) تقسیم و فراسنجه‌های مدل با روش RandomizedSearchCV و هدف بهینه‌سازی RMSE تعیین شدند. نتایج حاصل از ارزیابی مدل نشان داد XGBoost با مقادیر R^2 حدود ۰/۸۸ و معیار NS برابر با ۰/۷۶ در بخش آزمون، از قابلیت اعتماد بالایی برای استفاده در تحلیل‌های هیدرولوژیکی برخوردار است. بر اساس تحلیل حساسیت، ترکیب بهینه فراسنجه‌ها شامل $\text{max_depth}=6$ ، $\text{a_estimators}=500$ ، $\text{min_child_weight}=4$ و $\text{learning_rate}=0.08$ حاصل شد؛ با این وجود، مشاهده شد که مدل در پیش‌بینی دبی‌های فراتر از ۲۰ لیتر بر ثانیه به دلیل تابع خطای RMSE و عدم تعادل داده‌ها دچار ضعف است. یافته‌های این پژوهش ضمن تأیید کارایی مدل‌های یادگیری ماشین در هوشمندسازی مدیریت آب، بر ضرورت احتیاط در سیاست‌گذاری‌های مبتنی بر پیش‌بینی جریان‌های حدی تأکید دارد و چارچوبی عملیاتی برای ارتقای تاب‌آوری زیرساخت‌های سستی آب در برابر تغییرات اقلیمی ارائه می‌دهد.

استناد: فولادی نصرآباد، محمد؛ فرزانه، محمدرضا و زراعتی نیشابور، سپیده (۱۴۰۵). کاربرد هوش مصنوعی در تدوین استراتژی بومی سازگاری با تغییر اقلیم قنات: ارزیابی عملکرد XGBoost در تخمین دبی قنات قاین. *سیاست‌گذاری پیشرفت شهری*، ۳ (۳) ۴۵۵-۴۶۹.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.579182.1096>

© نویسندگان

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.579182.1096>



۱. مقدمه

تغییر اقلیم به عنوان یکی از چالش‌های مهم قرن بیست‌ویکم، تأثیرات گسترده و عمیقی بر چرخه آب جهانی و منابع آبی منطقه‌ای وارد می‌کند [۱ و ۲]. این پدیده با تغییر الگوهای بارش، افزایش شدت و فراوانی پدیده‌های حدی هیدرولوژیکی و نوسانات دمایی، به تشدید تنش آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک منجر می‌شود [۳ و ۴]. براساس گزارش‌های هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC)، پیش‌بینی می‌شود که این مناطق در دهه‌های آینده با کاهش قابل توجه منابع آب تجدیدپذیر مواجه شوند [۵ و ۶]. اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی نیز به‌ویژه در مناطق خشک قابل توجه است. کاهش تغذیه آبخوان‌ها، تغییر رژیم‌های هیدرولوژیکی و افزایش تبخیر و تعرق، به کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و در نتیجه، کاهش آبدی منابع آب سنتی مانند چشمه‌ها و قنوات منجر می‌شود [۱ و ۳]. این روند نه تنها امنیت آب شرب جوامع محلی را تهدید می‌کند، بلکه پایداری کشاورزی و معیشت میلیون‌ها نفر در جهان را نیز در معرض خطر قرار می‌دهد [۴ و ۷].

یکی از راهبردهای مهم سازگاری با تغییر اقلیم، حفظ و احیای سیستم‌های آب سنتی مانند قنوات است که نه تنها از نظر فنی کارآمد، بلکه از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی نیز پایدار هستند [۸ و ۹]. قنوات به عنوان فناوری بومی و سازگار با محیط، قابلیت تطبیق با شرایط متغیر اقلیمی را دارد و می‌توانند نقش مهمی در تأمین امنیت آبی مناطق خشک ایفا کنند [۹ و ۱۰]. قنات به عنوان شاخص‌ترین میراث بومی سازگاری با کم‌آبی، به گذار از مدیریت سنتی به الگوهای مدیریتی هوشمند نیاز دارد. تدوین استراتژی‌های بومی سازگاری با تغییر اقلیم، امروزه مستلزم فراتر رفتن از روش‌های کلاسیک و بهره‌گیری از توانمندی‌های هوش مصنوعی است؛ چرا که الگوریتم‌های هوشمند قادرند با تحلیل پیچیدگی‌های رفتار آبخوان‌ها، الگوهای پنهان در نوسانات دبی قنوات را شناسایی کنند و به بستری برای تصمیم‌گیری‌های علمی بدل شوند. به بیان دیگر، کاربرد هوش مصنوعی نه تنها به افزایش دقت برآورد منابع آبی کمک می‌کند، بلکه به عنوان یک پیشران استراتژیک، امکان بازتولید دانش بومی قنات را در قالب راهکارهای نوین سازگاری فراهم می‌سازد. در حال حاضر، حدود ۳۵ هزار رشته قنات در سراسر ایران شناسایی شده است که سهم قابل توجهی در تأمین آب زیرزمینی دارند. میزان برداشت سالانه آب از قنات‌های ایران بین ۶ تا ۸ میلیارد متر مکعب برآورد می‌شود. استان‌های خراسان رضوی، یزد، کرمان و خراسان جنوبی بیشترین تعداد قنات را دارند، به طوری که استان خراسان جنوبی با بیش از ۴ هزار رشته قنات معمولاً در رتبه چهارم کشور قرار می‌گیرد [۱۱ و ۱۲].

دشت قاین در استان خراسان جنوبی، با اقلیمی خشک و نیمه‌خشک و میانگین بارش محدود، از دیرباز حیات اقتصادی و اجتماعی خود را مدیون شبکه گسترده قنات بوده است. با این حال، تغییر اقلیم، کاهش منابع آب زیرزمینی و افزایش تقاضا، ضرورت پیش‌بینی دقیق دبی قنات را برای مدیریت بهینه و پایدار این منابع ارزشمند بیش از پیش آشکار کرده است. در این راستا، توسعه ابزارهای مدل‌سازی پیشرفته برای پیش‌بینی رفتار قنات در شرایط متغیر اقلیمی، نقش کلیدی در برنامه‌ریزی و اجرای راهبردهای سازگاری دارد [۱۳ و ۱۴].

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیر در هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، ابزارهای نوینی برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی فراهم کرده‌اند. مطالعات نشان داده‌اند الگوریتم‌هایی مانند تقویت شدید گرادیان (به اختصار XGBoost)، به دلیل توانایی پردازش داده‌های پیچیده و غیرخطی، در پیش‌بینی پدیده‌های هیدرولوژیکی مانند دبی رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی موفق عمل کرده‌اند. این مدل با ترکیب درخت‌های تصمیم‌گیری و تکنیک‌های تقویت گرادیان، به دلیل سرعت زیاد، دقت قابل اعتماد و توانایی استخراج الگوهای پنهان، به یکی از ابزارهای محبوب در مطالعات هیدرولوژیکی تبدیل شده است [۱۵].

پژوهش‌های داخلی در حوزه هیدرولوژی و قنات‌ها نشان می‌دهد تمرکز مطالعات از روش‌های ترکیبی و هوشمند به سمت مدل‌های پیشرفته‌تری حرکت کرده است. در این زمینه، سامانی و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی به ارزیابی عملکرد پنج مدل یادگیری ماشین شامل شبکه عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج عصبی - فازی، روش گروهی پردازش داده، برنامه‌ریزی بیان ژن و ماشین بردار پشتیبان در پیش‌بینی جریان آب قنات در آبخوان چالندی ایران پرداختند. مطالعه ایشان با استفاده از داده‌های ماهانه ۱۴ ساله (۲۰۰۷-۲۰۲۱) نشان داد ترکیب تبدیل موجک با مدل‌های یادگیری ماشین به بهبود چشمگیر دقت پیش‌بینی جریان آب قنات برای افق‌های زمانی یک تا سه ماهه منجر می‌شود. در میان مدل‌های مورد بررسی، مدل ترکیبی به‌دست‌آمده

از روش گروهی پردازش داده‌ها و تبدیل موجک (به اختصار WT-GMDH) با مقادیر خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برابر با ۱۴/۴۶، خطای میانگین مطلق (MAE) برابر با ۱۰/۷۸، ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۹۳ و ضریب نش - ساتکلیف (NSE) برابر با ۰/۸۵ بهترین عملکرد را در پیش‌بینی یک‌ماهه جریان آب قنات از خود نشان داد [۱۶]. هم‌زمان با این پژوهش، پیرائی و همکاران (۲۰۲۳) با بهره‌گیری از XGBoost توانستند دقت قابل توجهی در پیش‌بینی بار رسوبی به دست آورند و اذعان داشتند که XGBoost می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر و قابل اعتماد در مدیریت منابع آب و کنترل رسوبات در رودخانه‌ها مورد استفاده قرار گیرد [۱۷]. همچنین، سفیرا و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهش خود با استفاده از الگوریتم XGBoost و ادغام داده‌های هیدروکلیمایی مدل‌های سطح زمین Noah، شکاف داده‌ای بین ماهواره‌های GRACE و GRACE-FO را پوشش دادند و توانستند تغییرات مکانی - زمانی ذخیره آب زمینی را با دقت بالا مدل‌سازی کنند. نتایج پژوهش آن‌ها با معیارهای آماری قوی مانند ضریب همبستگی ۰/۹۴۳ و کارایی نش - ساتکلیف ۰/۸۸۷ نشان‌دهنده کارآمدی این روش در تحلیل منابع آب در مقیاس محلی بود [۱۸]. درنهایت، خسروی و همکاران (۲۰۲۶) در مطالعه‌ای به بررسی عملکرد مدل‌های آر، ما و آرما (AR، MA و ARMA) در پیش‌بینی آبدی قنات بلده فردوس پرداختند. پژوهش یادشده بر تحلیل داده‌های ماهانه ۲۰ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۰) مبتنی بود. نتایج پژوهش یادشده نشان داد مدل ۲AR با کمترین مقدار معیار آکائیک به عنوان مدل بهینه انتخاب شد. اما در مقایسه با مدل‌های هوشمند مورد استفاده در مطالعات پیشین (مانند ANFIS و WT-GMDH)، دقت کمتری در پیش‌بینی بلندمدت از خود نشان داد. این موضوع بیانگر محدودیت مدل‌های خطی سنتی در مدل‌سازی پویایی‌های غیرخطی سیستم‌های آب زیرزمینی است [۱۹].

علاوه بر مطالعات داخلی، در سطح بین‌المللی نیز مطالعات متعددی کاربرد XGBoost را در کاربردهای گسترده هیدرولوژیکی تأیید کرده‌اند. جیانگ و همکاران (۲۰۲۲) نخستین مطالعه را در این بازه زمانی ارائه دادند که تأیید می‌کند XGBoost ابزاری کارآمد برای ارزیابی ویژگی‌های خشک‌سالی هیدرولوژیکی با استفاده از داده‌های GNSS است [۲۰]. وو و همکاران (۲۰۲۲) نیز در پژوهش خود به شناسایی نشت‌ها در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم XGBoost پرداختند. آن‌ها با به‌کارگیری این الگوریتم یادگیری ماشین توانستند نشت‌های آب را با دقت بالا تشخیص دهند و عملکرد شبکه‌های توزیع آب را بهبود بخشند. نتایج این مطالعه نشان داد XGBoost ابزار مؤثری برای پایش و مدیریت شبکه‌های آب شهری است و می‌تواند به کاهش هدررفت آب و افزایش بهره‌وری سیستم‌های توزیع کمک کند [۲۱]. همچنین، ژو و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای با به‌کارگیری XGBoost، مدل دقیقی برای پیش‌بینی جریان رواناب در مقیاس بلوک ارائه کردند که نشان داد پیکرندی‌های مختلف ساختمان‌ها می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر مدیریت رواناب و کاهش خطر سیلاب‌های شهری داشته باشد [۲۲]. علی و همکاران (۲۰۲۳) با به‌کارگیری XGBoost برای تحلیل خشک‌سالی در حوضه آبریز ایندوس، بهبود قابل توجهی در دقت پیش‌بینی فراسنجه‌های هیدرولوژیکی گزارش کردند [۲۳]. به عنوان مثال، ژانگ و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه خود (منطقه مطالعاتی فلات تبت) از XGBoost برای شبیه‌سازی تغییرات ذخیره آب زمینی (TWS) با دقت بالا استفاده کردند و اذعان داشتند که این مدل می‌تواند حتی در مناطق با توزیع نامناسب ایستگاه‌های سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای جهانی (GNSS) نتایج قابل اعتمادی تولید کند [۲۴].

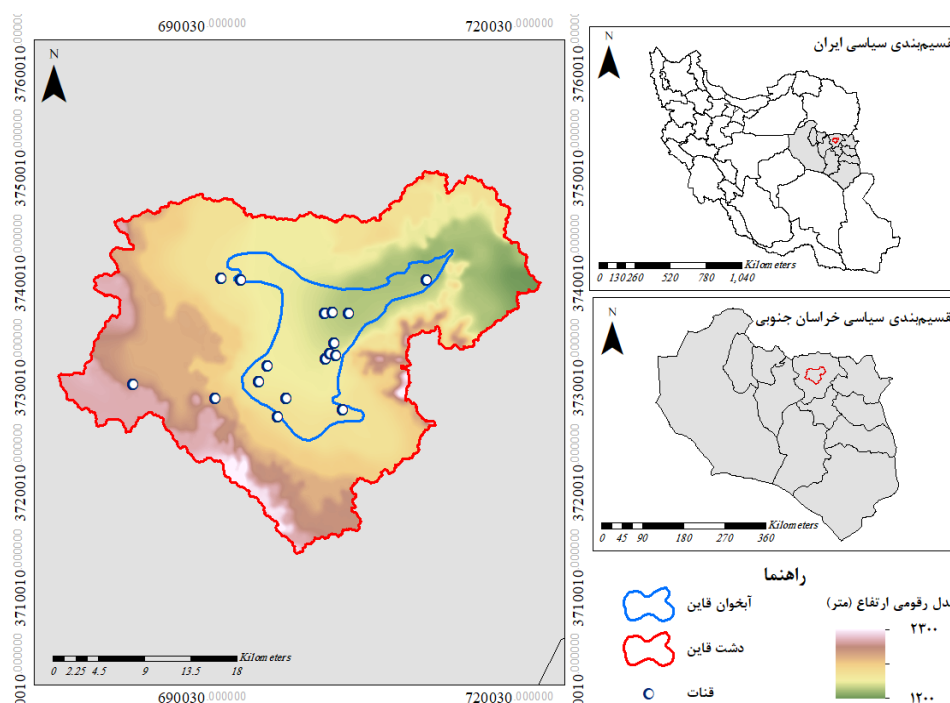
علی‌رغم کاربردهای موفق XGBoost در حوزه‌های مختلف منابع آب در ایران و جهان، استفاده از آن برای پیش‌بینی دبی قنات در مناطق خشک مانند قاین کمتر مورد توجه قرار گرفته است و تحقیقات انجام‌شده عموماً روی کارایی سایر روش‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین یا مدل‌های دیگر متمرکز بوده‌اند. این در حالی است که ویژگی‌های منحصر به فرد XGBoost از قبیل مقاومت در برابر داده‌های نویزی، قابلیت مدیریت متغیرهای زیاد و عملکرد بالا در مسائل پیش‌بینی سری زمانی، آن را به گزینه‌ای جذاب برای مدل‌سازی دبی قنات در شرایط اقلیمی ناپایدار تبدیل می‌کند [۱۵]. علاوه بر این، با توجه به ضرورت توسعه ابزارهای مدل‌سازی قابل اعتماد برای پشتیبانی از برنامه‌ریزی سازگاری با تغییر اقلیم، کاربرد مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین مانند XGBoost می‌تواند نقش مهمی در بهبود دقت پیش‌بینی دبی قنات و در نتیجه، ارتقای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی ایفا کند.

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی توانایی مدل XGBoost در برآورد دبی قنوات دشت قاین طراحی شده است؛ چراکه قنات به عنوان یکی از ارکان اساسی استراتژی بومی سازگاری با تغییر اقلیم در مناطق خشک ایران، نقش کلیدی در تأمین پایدار آب و تاب‌آوری جوامع محلی ایفا می‌کند. در این راستا، برآورد دقیق و قابل اعتماد دبی قنات، پیش‌نیاز اساسی برای تدوین هرگونه برنامه مدیریتی و راهبرد سازگاری مبتنی بر این میراث هیدرولیکی کهن محسوب می‌شود. داده‌های مورد استفاده شامل آمار ابدی ۱۲ ساله قنات (۱۳۸۶ تا ۱۳۹۷)، داده‌های بارش و دمای ماهانه و فراسنجه‌های مکانی مانند ارتفاع هستند. نتایج این تحقیق نه تنها درک بهتری از کارایی XGBoost در تخمین دبی قنات ارائه می‌دهد، بلکه نشان می‌دهد چگونه بهره‌گیری از هوش مصنوعی می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد در خدمت استراتژی‌های بومی و دانش سنتی قرار گیرد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به عنوان راهکاری علمی برای مدیریت پایدار منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک و توسعه راهبردهای بومی سازگاری با تغییر اقلیم مبتنی بر حفاظت و بهره‌برداری بهینه از قنات مورد استفاده قرار گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مطالعه شده

دشت قاین، واقع در استان خراسان جنوبی، نمونه بارزی از مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است که با چالش‌های جدی در مدیریت منابع آبی دست‌وپنجه نرم می‌کند. این منطقه که در مختصات جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۳ دقیقه عرض شمالی و ۵۹ درجه و ۱۱ دقیقه طول شرقی قرار گرفته، با میانگین بارش سالانه‌ای کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد، شرایط اقلیمی دشواری را تجربه می‌کند. تبخیر شدید همراه با خاک‌های رسی - شنی که ظرفیت نگهداری آب پایینی دارند، وابستگی این منطقه به منابع آبی زیرزمینی به‌ویژه قنات را به امری حیاتی تبدیل کرده است [۲۵].



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی دشت و آبخوان قاین در استان خراسان جنوبی و کشور ایران

در این پژوهش، برای بررسی دقیق وضعیت منابع آبی و تحلیل تأثیر تغییر اقلیم، از مجموعه‌ای جامع از داده‌ها استفاده شد که شامل آمار ابدی ۱۲ ساله قنات (۱۳۸۶ - ۱۳۹۷)، داده‌های ماهانه بارش و دما از ایستگاه‌های هواشناسی محلی، و اطلاعات ارتفاعی و موقعیت مکانی قنات بود. به این صورت که داده‌های بارش، دما و ارتفاع به عنوان متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و داده دبی قنات به عنوان متغیر پیش‌بینی‌شونده در مدل یادگیری لحاظ شده است.

۲-۲. الگوریتم XGBoost

در سال ۲۰۱۶، چن و گس‌ترین (Chen and Guestrin, 2016) الگوریتم XGBoost را به عنوان یک روش پیشرفته برای حل مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون معرفی کردند که به سرعت به دلیل کارایی محاسباتی بالا مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت. این الگوریتم با استفاده از فنون یادگیری افزایشی، مجموعه‌ای از مدل‌های ضعیف را به صورت هوشمندانه ترکیب می‌کند تا در نهایت به یک مدل پیش‌بین قوی دست یابد [۲۶ و ۲۷]. از جمله مزایای کلیدی این روش می‌توان به قابلیت پردازش موازی، انعطاف‌پذیری ساختاری بالا و سیستم اعتبارسنجی داخلی اشاره کرد که همگی به تولید نتایج دقیق‌تر منجر می‌شوند. هسته اصلی عملکرد XGBoost بر محاسبه خطای باقی‌مانده و بهبود تدریجی مدل از طریق ساختارهای درختی استوار است. این الگوریتم با به‌کارگیری سه راهبرد مهم شامل تنظیم تابع هدف، کنترل نرخ یادگیری و نمونه‌برداری انتخابی، به طور مؤثری از مشکل بیش‌برازش جلوگیری می‌کند. ویژگی‌های منحصر به فرد یادشده، همراه با بهینه‌سازی مصرف حافظه، XGBoost را به انتخابی ایده‌آل برای کار با مجموعه داده‌های حجیم تبدیل کرده است [۲۶ و ۲۷].

۲-۳. پیش‌پردازش داده‌ها

داده‌های جمع‌آوری شده شامل آبدهی قنات، بارش، دما و ارتفاع، قبل از ورود به مدل XGBoost، تحت فرایند پیش‌پردازش قرار گرفتند. این مرحله شامل سه بخش اصلی بود: حذف داده‌های پرت و نوفه، نرمال‌سازی داده‌ها و تقسیم داده‌ها به دو بخش آموزش و آزمون.

۲-۴. شناسایی و حذف داده‌های پرت

در مرحله پیش‌پردازش داده‌ها، ابتدا داده‌های پرت و نوفه شناسایی و حذف شد. داده‌های پرت به مقادیری گفته می‌شوند که به طور قابل توجهی با الگوی کلی داده‌ها تفاوت دارند و می‌توانند نتایج مدل‌سازی را به شدت تحت تأثیر قرار دهند. حضور این داده‌ها ممکن است باعث انحراف معیارهای ارزیابی و کاهش دقت پیش‌بینی‌های مدل شود. به همین دلیل، حذف آن‌ها گامی ضروری در بهبود کیفیت داده‌ها و افزایش قابلیت اطمینان مدل محسوب می‌شود [۲۸].

برای شناسایی داده‌های پرت، از روش‌های آماری قوی مانند تحلیل چارک‌ها^۱ و محاسبه فاصله بین چارکی^۲ (IQR) استفاده شد. در این روش، ابتدا چارک‌های اول (Q1)، دوم (میانه یا Q2) و سوم (Q3) محاسبه می‌شوند. سپس، IQR که برابر با تفاوت Q3 و Q1 است، به عنوان معیاری برای تشخیص داده‌های پرت در نظر گرفته می‌شود. معمولاً مقادیری که خارج از محدوده $(Q1 - 1.5 \times IQR)$ تا $(Q3 + 1.5 \times IQR)$ قرار بگیرند، به عنوان داده‌های پرت شناسایی و از مجموعه داده حذف می‌شوند. این روش به دلیل سادگی و اثربخشی بالا، به طور گسترده در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۹ و ۳۰].

۲-۵. نرمال‌سازی و استانداردسازی داده‌ها

در گام بعدی، نرمال‌سازی داده‌ها انجام شد. نرمال‌سازی داده‌ها به بهبود عملکرد مدل و افزایش سرعت همگرایی آن کمک می‌کند. با نرمال‌سازی، مقادیر داده‌ها در یک محدوده مشخص قرار می‌گیرند و تأثیر متغیرهای با مقیاس بزرگ بر مدل کاهش می‌یابد [۲۹ و ۳۰]. در این پژوهش، برای نرمال‌سازی داده‌ها از روش کمینه - بیشینه^۳ استفاده شد که یکی از روش‌های متداول برای تغییر مقیاس داده‌ها به یک بازه مشخص، معمولاً بین ۰ و ۱ است. این روش با محاسبه نسبت اختلاف هر مقدار از حداقل داده‌ها به دامنه کلی داده‌ها (تفاوت بین کمینه و بیشینه) کار می‌کند [۲۹ و ۳۰]. به بیان دیگر، برای هر مقدار (x) از یک ویژگی، مقدار نرمال‌شده x' از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$x' = \frac{x - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (1)$$

1. Quartile analysis
2. Interquartile range
3. Min-Max

در مرحله تکمیلی، استانداردسازی شاخص زد (z) نیز روی داده‌ها اعمال شد. در این روش، هر مقدار ویژگی با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$Z = (x - \mu) / \sigma \quad (2)$$

در رابطه بالا x مقدار اولیه، μ میانگین و σ انحراف معیار کل داده‌هاست.

۲-۶. تقسیم داده‌ها

در این پژوهش، پس از انجام مراحل پیش‌پردازش و نرمال‌سازی داده‌ها، رویکردی نظام‌مند برای تقسیم داده‌ها به کار گرفته شد که هم از نظر آماری صحیح باشد و هم شرایط واقعی پیش‌بینی را به‌درستی شبیه‌سازی کند. داده‌ها به صورت زمانی و با حفظ ترتیب تاریخی به دو بخش مجزا تقسیم شدند، به طوری که ۷۰ درصد ابتدایی داده‌ها به عنوان مجموعه آموزش و ۳۰ درصد پایانی به عنوان مجموعه آزمون در نظر گرفته شدند. این روش تقسیم زمانی^۱ به طور خاص طراحی شده تا از هرگونه نشت اطلاعات بین دو مجموعه جلوگیری کند، مسئله‌ای که در صورت بی‌توجهی می‌تواند به برآوردهای بیش از حد خوش‌بینانه از عملکرد مدل منجر شود [۳۰].

انتخاب نسبت ۷۰ به ۳۰ برای تقسیم داده‌ها بر اساس ملاحظات کارشناسی و مطابقت با استانداردهای رایج در مطالعات یادگیری ماشین انجام شده است. این نسبت از یک سو حجم کافی از داده‌ها را برای آموزش مؤثر مدل فراهم می‌کند و از سوی دیگر، نمونه‌های آزمون کافی برای ارزیابی معنادار آماری در اختیار قرار می‌دهد [۲۹]. نتایج حاصل از این روش‌شناسی نه تنها برای اهداف پژوهشی معتبر است، بلکه می‌تواند مبنای قابل اعتمادی برای تصمیم‌گیری‌های عملیاتی در مدیریت منابع آب باشد.

۲-۷. مدل‌سازی با XGBoost و بهینه‌سازی فراسنجه‌ها

پژوهش حاضر با بهره‌گیری از چارچوب پیشرفته XGBoost به مدل‌سازی و پیش‌بینی داده‌های پیچیده پرداخته است. XGBoost به عنوان یک الگوریتم تقویت گرادیان، با ترکیب بهینه‌ای از درختان تصمیم ضعیف، مدل‌های پیش‌بینی دقیقی ایجاد می‌کند که در برابر مشکلات رایجی مانند بیش‌برازش مقاوم هستند. برای یافتن مقادیر بهینه این فراسنجه‌ها، از روش RandomizedSearchCV استفاده شده که با نمونه‌گیری هوشمند از فضای فراسنجه‌ها، هم دقت بالا و هم کارایی محاسباتی مطلوبی ارائه می‌دهد.

تابع زیان در این پژوهش بر پایه معیار RMSE طراحی شده که از رابطه ۳ محاسبه می‌شود و به دلیل حساسیت به خطاهای بزرگ و تفسیرپذیری آسان، معیار مناسبی برای سنجش دقت مدل است [۳۱].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

۲-۸. معیارهای ارزیابی عملکرد مدل

برای اطمینان از جامعیت ارزیابی، علاوه بر معیار RMSR مجموعه‌ای از معیارهای تکمیلی شامل NSE (برای سنجش نسبت به مدل پایه، رابطه ۴)، R^2 (برای اندازه‌گیری تناسب کلی مدل، رابطه ۵) و KGE (برای ارزیابی توان همبستگی، تغییرپذیری و بایاس، رابطه ۶) به کار گرفته شده‌اند [۳۲ - ۳۴].

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (۶)$$

در معادلات بالا، y_{max} بیشینه مقدار مشاهده شده، y_{min} کمینه مقدار مشاهده شده، y_i مقدار مشاهده شده (واقعی) برای نمونه i ام، $\hat{y}_i$ مقدار پیش‌بینی شده برای نمونه i ام، $\bar{y}$ میانگین مقادیر مشاهده شده، $\bar{\hat{y}}$ میانگین مقادیر پیش‌بینی شده، r ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده، α نسبت ضریب تغییرات پیش‌بینی به ضریب تغییرات مشاهده شده (معیار تغییرپذیری) و β نسبت میانگین پیش‌بینی به میانگین مشاهده شده (معیار بایاس) هستند.

۲-۹. تحلیل حساسیت فراسنجه‌ها

در این پژوهش، تحلیل حساسیت فراسنجه‌های مدل XGBoost با رویکردی نظام‌مند و با استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع زمانی انجام شد تا تأثیر چهار فراسنجه کلیدی $\max_depth$ ، learning_rate ، min_child_weight و $n_estimators$ بر دقت پیش‌بینی آینده قنات در منطقه قاین به‌دقت بررسی شود. فرایند تحلیل با تعیین محدوده‌های مناسب برای هر فراسنجه آغاز شد. برای اجرای تحلیل حساسیت، از روش RandomizedSearchCV استفاده شد که در چارچوب اعتبارسنجی متقاطع زمانی با ۵ لایه اجرا شد. این روش به‌خصوص برای داده‌های سری زمانی مانند داده‌های آینده قنات که وابستگی زمانی دارند، طراحی شده است و از نشت اطلاعات بین داده‌های آموزش و آزمون جلوگیری می‌کند. در هر مرحله از اعتبارسنجی متقاطع، مدل روی ۴ لایه آموزش داده شده و روی لایه پنجم ارزیابی می‌شد تا اطمینان حاصل شود که ارزیابی‌ها در شرایطی مشابه با پیش‌بینی‌های واقعی انجام می‌پذیرد.

۳. نتایج و بحث

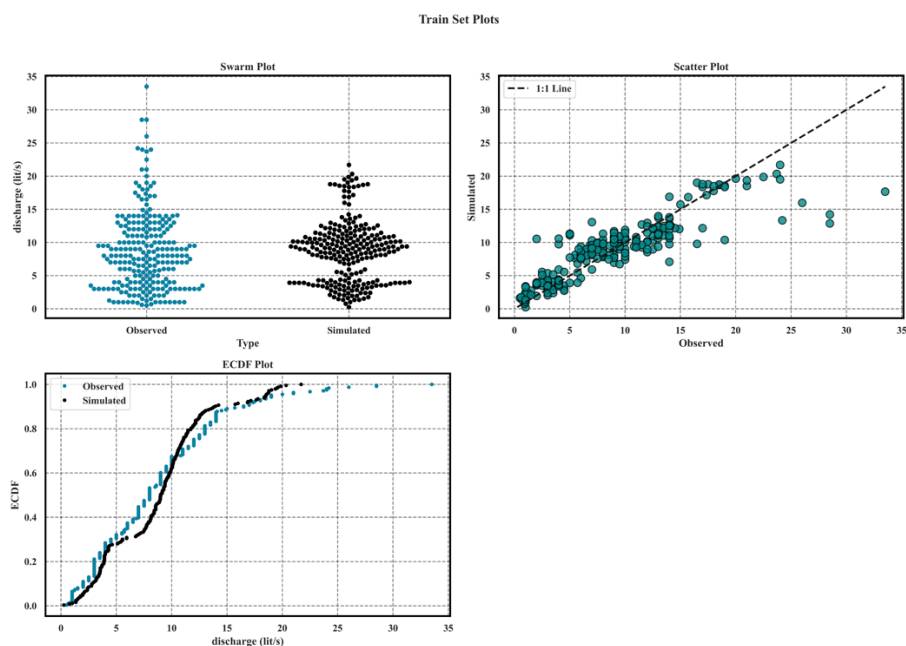
به منظور بررسی عملکرد مدل XGBOOST در برآورد دبی قنات دشت قاین، داده‌های آینده قنات، بارش و دمای دشت قاین طی سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۷ تهیه و عملیات پیش‌پردازش روی آن انجام گرفت و سپس عملکرد مدل XGBOOST با استفاده از معیارهای ارزیابی R^2 ، NS، NRMSE و KGE در دو بخش آموزش و آزمون به نسبت ۷۰ به ۳۰ بررسی شد. درخور یادآوری است که به دلیل اعمال اثر مکانی قنات، فراسنجه ارتفاع (موقعیت مکانی هر قنات) نیز در فرایند آموزش مدل استفاده شد. فراسنجه‌های مدل XGBOOST با استفاده از روش RandomizedSearchCV و با تابع هدف RMSE بهینه‌سازی شدند. جدول ۱ مقادیر معیارهای ارزیابی در بخش آموزش و آزمون دبی قنات را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقادیر معیارهای ارزیابی در بخش آموزش و تست فراسنجه‌های رطوبت نسبی و دمای میانه

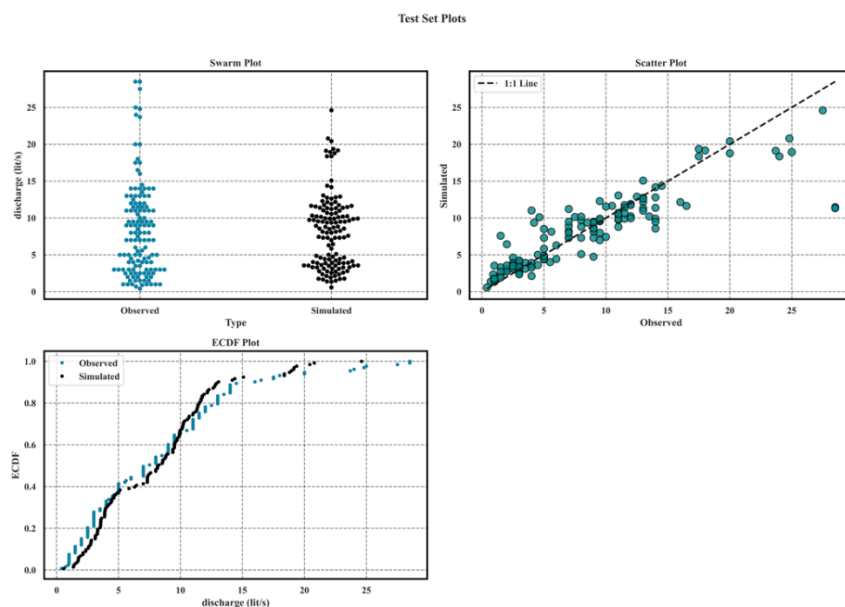
معیار ارزیابی (Evaluation criteria)	آبدهی (Discharge)	
	Train	Test
RMSE	2.905	3.058
R^2	0.875	0.881
NSE	0.757	0.764
KGE	0.749	0.747

نتایج ارزیابی عملکرد مدل XGBoost در برآورد دبی قنات دشت قاین نشان می‌دهد این مدل از دقت و کارایی بالایی برخوردار است. مقادیر R^2 نزدیک به ۰/۹ در هر دو بخش آموزش و آزمون، بیانگر تطابق قابل توجه بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر مشاهداتی است. این موضوع نشان می‌دهد مدل توانسته است الگوهای موجود در داده‌ها را به‌خوبی شناسایی و بازتولید کند. همچنین، تغییرات اندک معیارهای ارزیابی مانند RMSE که از ۲۵/۹۰۵ در بخش آموزش به ۳/۰۵۸ در بخش آزمون رسیده، بیانگر پایداری و تعمیم‌پذیری مطلوب مدل است. این ثبات عملکرد در بخش‌های مختلف داده‌ها، نشان‌دهنده قابلیت اعتماد مدل در شرایط مختلف است. علاوه بر این، مقادیر NS و KGE نیز عملکرد قابل قبول مدل را تأیید می‌کنند و نمایانگر دقت و کارایی مناسبی مدل در برآورد دبی قنات محدوده مطالعاتی هستند.

برای بررسی دقیق‌تر عملکرد مدل، از نمودارهای آماری خوشه‌ای، پراکندگی، تابع توزیع تجمعی تجربی و ویولن در بخش‌های آموزش و آزمون استفاده شد (شکل‌های ۲ و ۳).



شکل ۲. مقایسه توزیع مقادیر آبدهی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده قنات با استفاده از نمودارهای آماری (Swarm, KDE, ECDF و Violin) در بخش آموزش

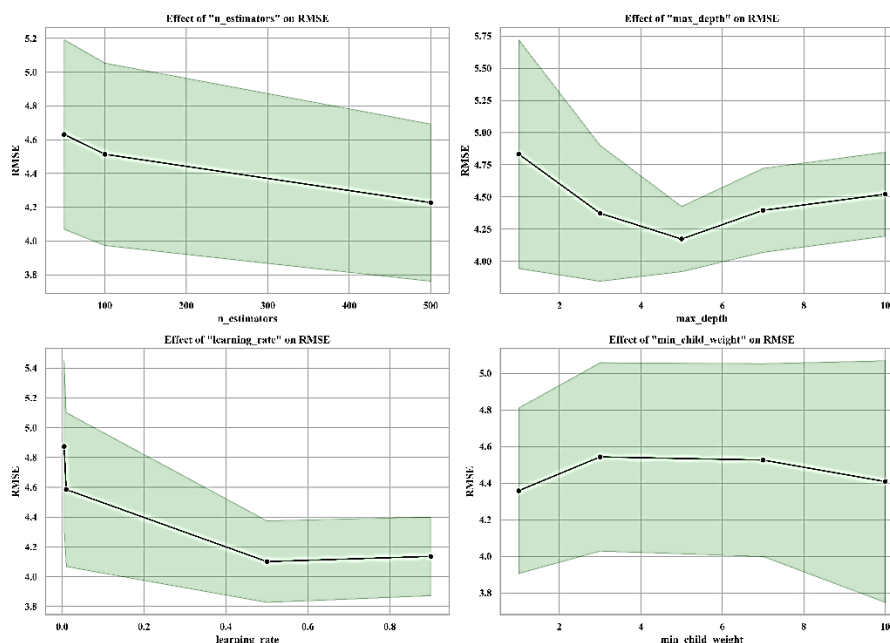


شکل ۳. مقایسه توزیع مقادیر آبدهی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده قنات با استفاده از نمودارهای آماری (Swarm, KDE, ECDF و Violin) در بخش آزمون

با توجه به شکل‌های ۲ و ۳، مدل در بازه‌های میانی دبی (۰ تا ۲۰ لیتر بر ثانیه) عملکرد بسیار خوبی دارد و می‌تواند مقادیر را با دقت بالایی پیش‌بینی کند. با این حال، در پیش‌بینی مقادیر حدی (بیش از ۲۰ لیتر بر ثانیه) مدل دچار ضعف شده است. این ضعف می‌تواند ناشی از استفاده از تابع خطای RMSE باشد که تمایل به تولید مقادیر میانی دارد و در نتیجه، مدل را به سمت پیش‌بینی مقادیر متوسط سوق می‌دهد. بررسی دقیق خروجی‌های مدل XGBoost در برآورد دبی قنات، چه در مرحله آموزش و

چه در مرحله آزمون، تصویر نسبتاً روشنی از قوت‌ها و ضعف‌های این مدل ارائه می‌دهد. در هر دو مجموعه داده، نمودار Swarm Plot نشان می‌دهد مقادیر مشاهده‌شده دارای پراکندگی و دامنه وسیع‌تری نسبت به مقادیر شبیه‌سازی‌شده هستند؛ به طوری که مدل تمایل دارد مقادیر بسیار پایین و بسیار بالا را به سمت میانه فشرده کند. نمودار Scatter Plot در هر دو مجموعه بیانگر آن است که برازش کلی مدل در بازه میانی دبی (حدود ۵ تا ۱۵ لیتر بر ثانیه) قابل قبول است و نقاط به‌خوبی در اطراف خط ۱:۱ تجمع یافته‌اند، اما در مقادیر دبی بالا (بیش از ۱۵-۲۰ لیتر بر ثانیه) انحراف محسوسی به سمت دست‌کم‌برآوردی مشاهده می‌شود و مدل قادر به یادگیری کافی از رویدادهای پیک جریان نیست؛ این موضوع در مجموعه آزمون با وجود دو نقطه پرت بیشتر نمایان است. نمودار ECDF در هر دو مجموعه فاصله‌ای میان منحنی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده را آشکار می‌کند؛ منحنی شبیه‌سازی در مقادیر کم سریع‌تر صعود می‌کند که به معنای کم‌برآوردی فراوانی دبی‌های پایین است، در حالی که در دامنه بالای توزیع کندتر حرکت می‌کند و تأییدکننده ضعف مدل در بازتولید دبی‌های بالاست. بر اساس یافته‌های یادشده، برای بهبود عملکرد مدل در پیش‌بینی مقادیر حدی، ممکن است نیاز به استفاده از توابع خطای جایگزین یا روش‌های دیگر باشد.

برای بهبود دقت مدل XGBoost در پیش‌بینی دبی قنات، تحلیل حساسیت فراسنجه‌های کلیدی مدل شامل `max_depth`، `learning_rate`، `min_child_weight` و `n_estimators` با روش Cross Validation انجام شد. این یافته‌ها در نمودار تحلیل حساسیت فراسنجه‌های مدل (شکل ۴) به‌وضوح قابل مشاهده است.



شکل ۴. نمودار تحلیل حساسیت فراسنجه‌های مدل Xgboost

از آنجا که در روش تحلیل حساسیت Cross Validation، میزان حساسیت و اثرگذاری هر فراسنجه در دوره‌های آموزش مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد، بررسی نتایج این روش می‌تواند به تعیین محدوده بهینه هر فراسنجه و همچنین، میزان حساسیت مدل نسبت به هر فراسنجه منجر شود. به این‌صورت که پهنای باند در این نمودارها، بیانگر میزان اثرگذاری آن فراسنجه در دوره‌های مختلف (هرچه پهنای باند بیشتر، اثرگذاری بیشتر) و شیب خط موجود در نمودارها بیانگر اثر هر فراسنجه در مقدار متوسط تابع خطا در دوره‌های مختلف است. به بیانی، در محل‌هایی که پهنای باند کم و مقدار تابع خطا در حداقل قرار دارد، می‌تواند محدوده بهینه هر فراسنجه باشد. بنابراین با توجه به شکل ۴، می‌توان گفت که فراسنجه `n_estimate` (تعداد درختان) دارای حساسیت بالا است (پهنای باند بالا) و همچنین از آنجا که در مقدار حد بالای تعیین‌شده (تعداد ۵۰۰ درخت) تابع خطا شیب منفی دارد، نشان می‌دهد این فراسنجه به مقدار بهینه نرسیده و می‌تواند تعداد درختان در فرایند آموزش افزایش یابد. بررسی تحلیل حساسیت فراسنجه `max_depth` نشان می‌دهد مدل در محدوده ۰ تا ۳ به این فراسنجه حساسیت بالا نشان داده

است و همچنین شیب منفی تابع خطا در محدوده ۴ تا ۶ به سمت مثبت میل کرده و از آنجا که در این محدوده پهنای باند نیز در حداقل ممکن است، می‌توان گفت که محدوده بهینه این فراسنجه در بازه مقادیر ۴ تا ۶ قرار دارد. با تحلیل مشابه مشابه فراسنجه Learning_Rate نیز در محدوده ۰ تا ۰/۴ می‌تواند محدوده بهینه این فراسنجه باشد. در بررسی حساسیت فراسنجه min_Child_Weight می‌توان گفت که مدل به این فراسنجه حساسیت بالایی نشان داده و از طرفی شیب خط تابع خطا در محدوده حد بالای تعیین شده (مقدار ۱۰) کاهشی است که نشان می‌دهد این فراسنجه به محدوده بهینه نرسیده و همچنان می‌توان برای این فراسنجه در بخش آموزش مقادیر بیشتری را در نظر گرفت.

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین بیانگر آن است که مدل XGBoost در برآورد دبی قنوت عملکرد قابل قبولی داشته و یافته‌های آن با بسیاری از پژوهش‌های مشابه در حوزه منابع آب زیرزمینی همخوانی دارد. برای مثال، مقبول و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند XGBoost در پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی (به‌ویژه در مناطقی با داده‌های بارش) عملکرد دقیقی دارد (Maqbool et al., 2024). همچنین، چادهری و همکاران (۲۰۲۲) نیز تأکید کردند که بهینه‌سازی فراسنجه‌های مدل از جمله نرخ یادگیری و عمق درخت در افزایش دقت مدل مؤثر است، یافته‌ای که در پژوهش حاضر نیز با تحلیل حساسیت به اثبات رسید (Choudhary et al., 2022). به‌علاوه، پژوهش المتوکل و همکاران (۲۰۲۴) به ضعف مدل در پیش‌بینی مقادیر حدی اشاره کرده و پیشنهادهایی در زمینه تغییر توابع خطا ارائه داده است، که این نیز با یافته‌های فعلی تطابق دارد (Elmotawakkil et al., 2024). مطالعات دیگری مانند رزاق و همکاران (۲۰۲۲) و نجف‌زاده و همکاران (۲۰۲۴) نیز تأیید کرده‌اند که XGBoost در برآورد فراسنجه‌های منابع آب زیرزمینی، به‌ویژه زمانی که با داده‌های مکانی و اقلیمی ترکیب می‌شود، توانایی بالایی از خود نشان می‌دهد (Razzagh et al., 2022; Najafzadeh et al., 2024). در نهایت، وانگ و همکاران (۲۰۲۴) و رضوی ترمه و همکاران (۲۰۲۴) نیز عملکرد بالای مدل در محیط‌های خشک را با تأکید بر انتخاب ویژگی‌های ورودی مناسب تأیید کرده‌اند (Wang et al., 2024; Razavi-Termeh et al., 2024)، که مؤید نتایج پژوهش حاضر در منطقه قاین است.

۴. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با ارزیابی عملکرد مدل XGBoost در پیش‌بینی دبی قنوت دشت قاین، گامی مهم به منظور استفاده از روش‌های یادگیری ماشین برای مدیریت منابع آب در مناطق خشک در مواجهه با چالش‌های تغییر اقلیم برداشت. در شرایطی که تغییر اقلیم به عنوان بزرگ‌ترین تهدید قرن حاضر، بر سیستم‌های آب سنتی مانند قنوت فشار فزاینده‌ای وارد می‌کند، توسعه ابزارهای پیش‌بینی دقیق ضروری است. یافته‌های اصلی این مطالعه نشان داد مدل XGBoost با دقت بالا (مقادیر $R^2 > 0.87$ و $NS > 0.75$) قادر به برآورد دبی قنوت در بازه‌های میانی (۰ تا ۲۰ لیتر بر ثانیه) است و می‌تواند به عنوان ابزاری قابل اعتماد در سازگاری با تأثیرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. این نتایج، پایداری و قابلیت تعمیم مدل را در شرایط اقلیمی خشک و در حال تغییر تأیید می‌کند. با این حال، کاهش دقت مدل در پیش‌بینی مقادیر حدی (بیش از ۲۰ لیتر بر ثانیه) نشان‌دهنده محدودیت‌های ناشی از تابع خطای RMSE و احتمالاً عدم تعادل در داده‌های آموزشی است که در شرایط تغییر اقلیم و وقوع رخداد‌های حدی اهمیت ویژه‌ای دارد. تحلیل حساسیت فراسنجه‌های مدل نیز نقش کلیدی فراسنجه‌هایی مانند learning_rate و max_depth n_estimators را در بهبود دقت پیش‌بینی آشکار ساخت.

به منظور توسعه و بهبود نتایج این پژوهش در راستای سازگاری با تغییر اقلیم، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده از توابع خطای جایگزین مانند میانگین قدر مطلق خطاها^۱ (به‌اختصار MAE) یا تابع زیان^۲ استفاده شود تا سوگیری مدل در پیش‌بینی مقادیر حدی که در شرایط تغییر اقلیم احتمال وقوع بیشتری دارند، کاهش یابد. همچنین، افزایش داده‌های آموزشی در بازه‌های دبی بالا و پایین (رخداد‌های حدی) می‌تواند به بهبود تعادل داده‌ها و در نتیجه افزایش دقت مدل کمک کند. از سوی دیگر، ترکیب مدل XGBoost با سایر الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند ماشین تقویت گرادیان سبک^۳ (به‌اختصار LightGBM) و یا

1. Mean Absolute Error

2. Huber Loss

3. Light Gradient Boosting Machine

روش‌های یادگیری عمیق^۱ می‌تواند به افزایش دقت پیش‌بینی در شرایط پیچیده اقلیمی منجر شود. بررسی تأثیر ویژگی‌های اضافی نظیر کیفیت آب، کاربری اراضی و شاخص‌های خشک‌سالی نیز می‌تواند ابعاد جدیدی از تحلیل را به مدل اضافه کند و عملکرد آن را در پیش‌بینی تأثیرات تغییر اقلیم بهبود بخشد.

این پژوهش نشان داد مدل‌های یادگیری ماشین مانند XGBoost، علی‌رغم چالش‌های موجود، ابزاری کارآمد در مدیریت پایدار منابع آب سنتی مانند قنات در عصر تغییر اقلیم هستند. ادامه این مسیر پژوهشی با تمرکز بر بهبود مدل و تعمیم آن به شرایط متنوع اقلیمی، نه تنها می‌تواند به ارتقای دقت پیش‌بینی‌ها در شرایط عدم قطعیت اقلیمی منجر شود، بلکه راه‌حل‌های علمی و عملی برای مقابله با بحران آب ناشی از تغییر اقلیم در مناطق خشک ارائه خواهد داد. در نهایت، این پژوهش با تلفیق دقت الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین با دانش سنتی مدیریت منابع آب، جایگاه قنات را فراتر از یک سازه مهندسی قدیمی، به عنوان یک «رکن استراتژیک و هوشمند» در سازگاری با تغییر اقلیم تثبیت می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد با بهره‌گیری از ابزارهای پیش‌بینی مدرن نظیر XGBoost، می‌توان عدم قطعیت‌های اقلیمی که حیات این سیستم‌های پایدار را تهدید می‌کنند، به طور مؤثری مدیریت کرد. این هم‌افزایی میان سنت و تکنولوژی، نه تنها کارآمدی قنات‌ها را در برابر نوسانات شدید آبی حفظ می‌کند، بلکه این میراث بومی را به بخشی از شبکه تاب‌آوری مدرن در مناطق خشک تبدیل می‌کند؛ به طوری که با پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار این سیستم‌ها، می‌توان برنامه‌ریزی‌های کلان برای تضمین امنیت آبی و پایداری زیست‌بوم‌های کویری در عصر تغییر اقلیم را با اطمینان بیشتری پیاده‌سازی کرد.

منابع

1. Samaniego L. Permanent shifts in the global water cycle. *Science*. 2025;387(6741):1348-1350.
2. Ogunrinde AT, Adeyeri OE, Xian X, Yu H, Jing Q, Faloye OT. Long-term spatiotemporal trends in precipitation, temperature, and evapotranspiration across arid Asia and Africa. *Water*. 2024;16(22):3161.
3. Abdelkhalek AM, Awadallah AG, Awadallah NA. Rainfall Extremes Analysis in Arid Regions Under Climate Change: A Structured Review of Methods and Approaches. *Climate*. 2026 May 3;14(5):100.
4. Scanlon BR, Fakhreddine S, Rateb A, de Graaf I, Famiglietti J, Gleeson T, et al. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nat Rev Earth Environ*. 2023;4(2):87-101.
5. Wang D, Li K, Li H, Zhang Y, Fu T, Sun L, Wang Y, Zhang J. Water resource utilization and future supply-demand scenarios in energy cities of semi-arid regions. *Scientific reports*. 2025 Feb 11;15(1):5005.
6. Granata F, Di Nunno F. Pathways for hydrological resilience: strategies for adaptation in a changing climate. *Earth Systems and Environment*. 2026 Feb;10(1):203-31.
7. Bartlett JA, Dedekorkut-Howes A. Adaptation strategies for climate change impacts on water quality: a systematic review of the literature. *J Water Clim Change*. 2023;14(3):651-675.
8. Hosen N, Nakamura H, Hamzah A. Adaptation to Climate Change: Does Traditional Ecological Knowledge Hold the Key? *Sustainability*. 2020;12(2):676.
9. Akhondi Z, Khayat A, Yaghoobzadeh M. Investigating the Impact of Climate Change on Qanat Discharge: A Case Study of Qanats in Birjand County. *J Aquifer Qanat*. 2026;5(2):1-18. (In Persian with English abstract)
10. Ferdowsi A, Piadeh F, Behzadian K, Mousavi SF, Ehteram M. Urban water infrastructure: A critical review on climate change impacts and adaptation strategies. *Urban Clim*. 2024;58:102132.
11. Agricultural Research, Education, and Extension Organization. Research on groundwater resources management in Iran (Report No. 1401). Tehran, Iran: Agricultural Research, Education and Extension Organization; 2022.
12. Ministry of Energy, Office of Basic Water Studies. Annual report on the status of qanats in Iran (Report No. 1402). Tehran, Iran: Ministry of Energy; 2023.
13. Foruzanmehr M, Khozaymehnezhad H. Investigation of spatial and temporal changes of qualitative parameters of Qaen plain aquifer using interpolation methods. *J Aquifer Qanat*. 2023;4(1):1-15. (In Persian with English abstract)
14. Hosseini Fahraji RS, Sharifzadeh M. Qanat maintenance from key informants' viewpoint: A qualitative research in Taft County. *J Community Dev (Rural-Urban)*. 2016;8(2):295-312. (In Persian with English abstract)
15. Niazkar M, Menapace A, Brentan B, Piraei R, Jimenez D, Dhawan P, Righetti M. Applications of XGBoost in water resources engineering: A systematic literature review (Dec 2018–May 2023). *Environ Model Softw*. 2024;174:105971.
16. Samani S, Vadiati M, Kisi O, Ghasemi L, Farajzadeh R. Qanat discharge prediction using a comparative analysis of machine learning methods. *Earth Sci Inform*. 2024;17(5):4597-4618.
17. Piraei R, Afzali SH, Niazkar M. Assessment of XGBoost to estimate total sediment loads in rivers. *Water Resour Manag*. 2023;37(13):5289-5306.
18. Safira RAD, Anjasmara IM, Awange JL. Predictive Modeling of Terrestrial Water Storage Anomalies in Kalimantan Basins: Bridging the GRACE and GRACE-FO Data Gap with Extreme Gradient Boosting. *GEOID*. 2024;19(3):508-518.
19. Kosravi S, Khozimeh Nejad H, Khayat A, Akhoondi Z. Forecasting the water level of Baldeh Qanat in Ferdows Using Time Series Methods. *J Aquifer Qanat*. 2026;5(2):189-202. (In Persian with English abstract)
20. Jiang X, Fan C, Liu K, Chen T, Cao Z, Song C. Centenary covariations of water salinity and storage of the largest lake of Northwest China reconstructed by machine learning. *J Hydrol*. 2022;612:128095.

21. Wu J, Ma D, Wang W. Leakage identification in water distribution networks based on XGBoost algorithm. *J Water Resour Plan Manag.* 2022;148(3):04021107.
22. Zhou S, Liu Z, Wang M, Gan W, Zhao Z, Wu Z. Impacts of building configurations on urban stormwater management at a block scale using XGBoost. *Sustain Cities Soc.* 2022;87:104235.
23. Ali S, Khorrami B, Jehanzaib M, Tariq A, Ajmal M, Arshad A, et al. Spatial downscaling of GRACE data based on XGBoost model for improved understanding of hydrological droughts in the Indus Basin Irrigation System (IBIS). *Remote Sens.* 2023;15(4):873.
24. Zhang T, Wang Z, Huang L, He L, Yao C. A novel XGBoost-based approach for reconstruction terrestrial water storage variations with GNSS in the Northeastern Tibetan Plateau. *J Hydrol.* 2025;659:133255.
25. Dastourani M, Mamirabadizadeh M, Mohammadie K. The Impact Assessment of Changes in Agricultural Cropping Patterns on the Quantitative Status of Groundwater Resources in the Qaen Plain Aquifer Using the MODFLOW Model. *Iran J Irrig Drain.* 2025;e223369. (In Persian with English abstract)
26. Chen T, Guestrin C. Xgboost: A scalable tree boosting system. In: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*; 2016 Aug 13-17; San Francisco, CA. New York: ACM; 2016. p. 785-794.
27. Knoben WJ, Freer JE, Woods RA. Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrol Earth Syst Sci.* 2019;23(10):4323-4331.
28. Falah F, Tahmasbipour N. Identification of outliers in flood data analysis using range and statistical methods. In: *Proceedings of the 2nd National Conference on Hydrology of Iran*; 2017; (location unknown). (publisher unknown); 2017.
29. Mohammadi M. Statistics and its applications in experimental sciences. Tehran, Iran: Daneshgah Publishing; 2016. (In Persian with English abstract)
30. Karimi M, Hosseini A. Time series analysis and its applications in engineering. Tehran, Iran: Daneshgah Publishing; 2015. (In Persian with English abstract)
31. Willmott CJ, Matsuura K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Clim Res.* 2005;30(1):79-82.
32. Samantaray S, Sahoo A, Yaseen ZM, Al-Suwaiyan MS. River discharge prediction based multivariate climatological variables using hybridized long short-term memory with nature inspired algorithm. *Journal of Hydrology.* 2025 Mar 1;649:132453
33. Ebrahimzadeh Z, Abdollahi K, Bidaki RZ, Eslamian S. A comparative analysis of machine learning models for predicting groundwater and surface water in a stressed semi-arid watershed: The Khanmirza case study. *Environmental Earth Sciences.* 2026 Mar 17;85(7):159.
34. Gupta HV, Kling H, Yilmaz KK, Martinez GF. Decomposition of the mean squared error and NSE performance metrics: Implications for improving hydrological modelling. *J Hydrol.* 2009;377(1-2):80-91.



Analysis of Urban Policy-Making Paradigms in Tehran in the Context of National Urban Policy

Gholamhossin Mohammadi^{1*}  | Rahmatollah Gholipor Souteh² 

1. Corresponding Author, PhD in Public Administration, Department of Public Administration, Alborz Campus, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: ghm624@gmail.com

2. PhD in Public Administration, Department of Public Administration, Faculty of Management, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: rgholipor@ut.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:

Urban Policy-Making Paradigm,
National Urban Policy,
Urban Regime,
Wicked Problems,
Tehran.

ABSTRACT

Urban policy-making in the metropolitan city of Tehran has undergone fundamental paradigmatic transformations in recent decades; transformations that, in the absence of a coherent National Urban Policy, have been largely reactive, fragmented, and lacking institutional coherence. This study aims to identify and analyze the paradigms of urban policy-making in Tehran in the light of the concept of National Urban Policy. The research approach is qualitative and based on a critical-interpretive paradigm, and data were collected and analyzed through documentary analysis, semi-structured interviews with 12 urban management experts, and thematic analysis. The findings indicate that Tehran's urban policy-making is transitioning from the first paradigm (physical-spatial) through the second paradigm (growth management) to the third paradigm (network governance), although this transition remains incomplete and contentious. The core of this tension is the conflict between two opposing regimes, "city-selling" versus "city-preservation", rooted in the lack of sustainable urban revenues and the weakness of National Urban Policy. Accordingly, a conceptual model of Tehran's urban policy-making space is presented, which provides an analytical framework for understanding the complexities of urban policy-making and practical guidance for addressing urban wicked problems.

Cite this article: Mohammadi, Gh. & Gholipor Souteh, R. (2026). Analysis of Urban Policy-Making Paradigms in Tehran in the Context of National Urban Policy. *Urban Development Policy Making*, 3 (3), 471-494. DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.587096.1124>



© Authors retain the copyright and full publishing rights.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.587096.1124>

Introduction

Urban policy-making in metropolitan Tehran has undergone fundamental paradigmatic transformations over the past seven decades, remaining largely reactive and fragmented in the absence of a coherent National Urban Policy (NUP). Tehran faces complex multidimensional challenges including spatial inequality, environmental pollution, and dependency on unsustainable revenues. The core tension centers on the conflict between two opposing regimes: the "city-selling" regime based on rentier political economy, and the "city-preservation" regime grounded in progressive governance. Despite numerous studies on urban governance in Iran, a comprehensive analysis linking paradigmatic shifts to National Urban Policy remains a significant gap. This study addresses this gap by examining the evolution of Tehran's urban policy-making paradigms and their relationship with NUP.

Materials and Methods

This qualitative study was conducted within a critical-interpretive paradigm using Thematic Analysis. Theoretical frameworks including Hall's paradigm change theory, Stone's urban regime theory, Rittel

and Webber's wicked problems concept, and National Urban Policy were employed as interpretive lenses. Data were collected through documentary analysis and semi-structured interviews with 12 urban management experts selected via purposive and snowball sampling. Theoretical saturation was achieved after the ninth interview. Validity was ensured through triangulation and participant review.

Results

Findings reveal that Tehran's urban policy-making has traversed three main paradigms. The first paradigm (physical-spatial planning, 1960s-1990s) treated the city as a physical entity managed through top-down master plans, with municipalities lacking financial and political autonomy. The second paradigm (urban growth management, late 1980s-present) emerged from a severe municipal financial crisis, giving rise to the "city-selling" regime as an inevitable consequence of NUP absence. This regime, characterized by density trading and permit selling, created a self-reinforcing cycle of unsustainable revenues and institutional corruption persisting for over three decades. The third paradigm (network governance) reflects an incomplete and contentious transition toward participatory governance. Key features of the current paradigm include: the entrenched conflict between city-selling and city-preservation regimes; deepening of wicked urban problems including spatial inequality and environmental crises; gradual institutionalization of network governance discourse; increased politicization of urban management; and initial steps toward NUP through sustainable municipal revenue legislation and revival of urban development monitoring institutions.

Discussion and Conclusion

Each paradigm maintains a distinct relationship with National Urban Policy: the first considered NUP unnecessary; the second filled its absence with the city-selling regime; and the third cannot be realized without it. Supported by Pierson's policy feedback theory, this analysis explains how the city-selling regime, by creating powerful stakeholder networks, became an obstacle to NUP formation. A conceptual model of Tehran's urban policy-making space is proposed, integrating the Multiple Streams Framework, Advocacy Coalition Framework, and Incremental Decision-Making Loop. The model's core mechanism rests on a fundamental question: does a stable policy regime with institutional infrastructure exist? In its presence, the advocacy coalition path guides policy formulation; in its absence, the predominant condition in Tehran's wicked problem environment, the incremental decision-making loop becomes the appropriate pathway. The study concludes that Tehran's primary challenge is not the absence of plans, but the absence of a coherent policy paradigm capable of aligning developmental goals, stakeholder interests, and NUP requirements. Five strategic recommendations are offered: developing a coherent National Urban Policy; reforming municipal financial structures; strengthening intermediary institutions; adopting incremental decision-making for wicked problems; and institutionalizing genuine citizen participation.



واکاوی پارادایم‌های خط‌مشی‌گذاری شهری تهران در پرتو سیاست ملی شهری

غلامحسین محمدی^۱ | رحمت‌اله قلی‌پور سوته^۲

۱. نویسنده مسئول، دانش‌آموخته دکتری تصمیم‌گیری و خط‌مشی‌گذاری، گروه مدیریت دولتی، دانشکده پردیس البرز، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: ghm624@gmail.com
۲. استاد، گروه مدیریت دولتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: rgholipor@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

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:

پارادایم خط‌مشی‌گذاری شهری،

سیاست ملی شهری،

رژیم شهری،

مسائل بدخیم،

تهران.

خط‌مشی‌گذاری شهری در کلان‌شهر تهران طی دهه‌های اخیر دستخوش تحولات پارادایمیک بنیادین بوده است؛ تحولاتی که در غیاب یک سیاست ملی شهری منسجم، عمدتاً واکنشی، پراکنده و فاقد انسجام نهادی بوده‌اند. این پژوهش با هدف شناسایی و تحلیل پارادایم‌های خط‌مشی‌گذاری شهری تهران در پرتو مفهوم سیاست ملی شهری انجام شده است. رویکرد پژوهش کیفی و مبتنی بر پارادایم تفسیری - انتقادی است و داده‌ها از طریق تحلیل اسناد، مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با ۱۲ نفر از خبرگان مدیریت شهری و تحلیل مضمون گردآوری و تحلیل شده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد خط‌مشی‌گذاری شهری تهران از پارادایم اول (برنامه‌ریزی کالبدی - فضایی) از طریق پارادایم دوم (مدیریت رشد شهری) به سمت پارادایم سوم (حکمرانی شبکه‌ای) در حال گذار است، هرچند این گذار ناتمام، غیرخطی و همراه با تنش‌های نهادی است. محور اصلی این تنش، تعارض دو رژیم متضاد شهرفروشی در برابر شهرنفروشی است که ریشه در فقدان درآمدهای پایدار شهری و ضعف سیاست ملی شهری دارد. بر این اساس، مدل مفهومی فضای خط‌مشی‌گذاری شهری تهران ارائه می‌شود که چارچوبی تحلیلی برای فهم پیچیدگی‌های خط‌مشی‌گذاری شهری و راهنمایی عملی برای مواجهه با مسائل بدخیم شهری فراهم می‌آورد.

استناد: محمدی، غلامحسین و قلی‌پور سوته، رحمت‌اله (۱۴۰۵). واکاوی پارادایم‌های خط‌مشی‌گذاری شهری تهران در پرتو سیاست ملی شهری. *سیاست‌گذاری پیشرفت شهری*، ۳ (۳) ۴۷۱-۴۹۴.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.587096.1124>

© نویسندگان

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.587096.1124>



۱. مقدمه

شهرها به مثابه کانون‌های اصلی توسعه اقتصادی، اجتماعی و سیاسی، همواره در مرکز توجه خط‌مشی‌گذاری عمومی قرار داشته‌اند. رشد شتابان شهرنشینی و تمرکز جمعیت، سرمایه و قدرت در کلان‌شهرها، آن‌ها را به یکی از عرصه‌های مهم سیاستگذاری عمومی تبدیل کرده است [۱]. این روند در کشورهای درحال توسعه، به ویژه ایران، با چالش‌های فزاینده‌ای همراه بوده؛ چراکه ظرفیت پاسخگویی نهادهای ملی و محلی به نیازهای گسترده جمعیت شهری محدود بوده و ناهماهنگی‌ها و ضعف‌های ساختاری در نظام مدیریت شهری، پیامدهای متعددی بر کیفیت زندگی شهروندان و توسعه پایدار شهرها همراه داشته است [۲].

کلان‌شهر تهران به عنوان پایتخت سیاسی، اقتصادی و اداری ایران، نمونه‌ای برجسته از این پیچیدگی‌ها به شمار می‌رود. این شهر با مجموعه‌ای از مسائل چندبعدی از جمله نابرابری‌های فضایی و اجتماعی، گسترش سکونتگاه‌های غیررسمی، ناکارآمدی حمل‌ونقل، آلودگی محیطی، وابستگی مدیریت شهری به منابع درآمدی ناپایدار و تعارض میان نهادهای ذی‌نفع مواجه است [۳]. افزون بر این تهران طی هفت دهه گذشته تحولات گسترده‌ای را در عرصه خط‌مشی‌گذاری شهری تجربه کرده است؛ تحولاتی که از غلبه رویکردهای کالبدی - فضایی آغاز شده و به تدریج به سمت رویکردهای مدیریتی، حکمرانی شبکه‌ای و توجه به سیاست‌های ملی مؤثر بر توسعه شهری حرکت کرده‌اند.

با وجود این تحولات، مسیر خط‌مشی‌گذاری شهری در تهران همواره با چالش‌های ساختاری و نهادی همراه بوده است. فقدان سیاست ملی شهری منسجم، تمرکزگرایی در نظام تصمیم‌گیری، وابستگی مالی مدیریت شهری به منابع درآمدی ناپایدار و تعارض منافع میان بازیگران و نهادهای مختلف، موجب شده است که بسیاری از سیاست‌ها ماهیتی واکنشی، کوتاه‌مدت و کم‌اثر داشته باشند و در چرخه‌ای از تصمیمات ناپیوسته گرفتار شوند. در این میان، تقابل میان رویکردهای مبتنی بر اقتصاد سیاسی رانتی، یعنی بهره‌برداری درآمدی از زمین و فضاها (شهرفروشی) و رویکردهای مبتنی بر حکمرانی مترقی و درآمدهای پایدار، یعنی حکمرانی پایدار و توسعه متوازن (شهرنفروشی) به یکی از محورهای مهم منازعه در سیاستگذاری شهری تهران تبدیل شده است [۴ و ۵].

مرور ادبیات پژوهشی نشان می‌دهد مطالعات انجام‌شده در این حوزه را می‌توان در چند دسته کلی طبقه‌بندی کرد. دسته نخست بر حکمرانی شهری و مدیریت یکپارچه تمرکز داشته‌اند؛ برای نمونه زیاری و همکاران [۶] و سرور و خلیجی [۷] نشان داده‌اند نظام مدیریت شهری ایران از فقدان رویکردهای راهبردی و فرابخشی رنج می‌برد. دسته دوم به پیامدهای سیاست‌های شهری پرداخته‌اند؛ چنان که کاظمیان (۱۳۹۵) تأثیر اقتصاد سیاسی رانتی و پدیده شهرفروشی بر نابرابری‌های شهری را تبیین کرده‌اند. دسته سوم بر فرایندهای خط‌مشی‌گذاری و نظریه‌های سیاست‌گذاری متمرکز بوده‌اند؛ از جمله محمدی و همکاران [۸] که فرایند خط‌مشی‌گذاری شهری تهران را در قالب چارچوب پنج‌جریانی تحلیل کرده‌اند و با رویکردی فرانظری به مقایسه نظریه‌های فرایند خط‌مشی پرداخته‌اند. دسته چهارم نیز به سیاست ملی شهری و ضرورت هماهنگی میان سطوح ملی و محلی توجه کرده‌اند [۹ و ۱۰].

با وجود تعدد مطالعات این حوزه، شکافی جدی در ادبیات پژوهشی وجود دارد؛ بخش عمده پژوهش‌های پیشین یا بر فرایندهای خط‌مشی‌گذاری شهری متمرکز بوده‌اند، یا به بررسی پیامدهای سیاست‌های شهری و یا مباحث مرتبط با سیاست ملی شهری پرداخته‌اند. در مقابل، تحلیل تحولات پارادایمیک خط‌مشی‌گذاری شهری تهران در ارتباط با رژیم‌های مسلط سیاستی و نسبت آن با سیاست ملی شهری، کمتر به صورت یکپارچه مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، ارائه یک مدل مفهومی منسجم که بتواند این تحولات تاریخی، نهادی و سیاستی را در قالب یک چارچوب تحلیلی واحد تبیین کند، در ادبیات موجود کمتر مشاهده می‌شود. بر این اساس پژوهش حاضر در صدد پاسخ به پرسش‌های زیر است:

- پارادایم‌های اصلی خط‌مشی‌گذاری شهری تهران طی هفت دهه گذشته کدام‌اند و چه تحولاتی را تجربه کرده‌اند؟
- نسبت این پارادایم‌ها با سیاست ملی شهری چیست؟
- فضای کنونی خط‌مشی‌گذاری شهری تهران چه ویژگی‌هایی دارد؟

این پژوهش با تحلیل تحولات پارادایمیک خط‌مشی‌گذاری شهری تهران و تبیین نسبت آن با سیاست ملی شهری، در پی ارائه چارچوبی تحلیلی برای فهم الگوهای تحول در خط‌مشی‌گذاری شهری است. نتایج پژوهش می‌تواند به غنای ادبیات نظری خط‌مشی‌گذاری شهری کمک کند و زمینه‌ای برای تحلیل، ارزیابی و طراحی سیاست‌های شهری در کلان‌شهر تهران فراهم آورد.

۲. مبانی نظری

۲-۱. مفهوم پارادایم در خط‌مشی‌گذاری شهری

مفهوم پارادایم در خط‌مشی‌گذاری عمومی ریشه در کار توماس کوهن دارد که آن را به عنوان چارچوبی از مفروضات، ارزش‌ها و روش‌های مشترک تعریف کرد که درک و عمل اعضای یک جامعه علمی را هدایت می‌کند. هال^۱ [۱۱] این مفهوم را به حوزه سیاست‌گذاری عمومی وارد کرد و تغییرات سیاستی را در سه سطح تحلیل کرد: تغییر در ابزارهای سیاستی، تغییر در اهداف سیاستی و تغییر در چارچوب‌های تفسیری زیرین که از آن با عنوان تغییر پارادایم یاد می‌شود. در این معنا تغییر پارادایم فقط اصلاح سیاست‌ها نیست، بلکه دگرگونی در منطق مسلط سیاست‌گذاری است که معمولاً در پس بحران‌های سیاستی رخ می‌دهد. در حوزه خط‌مشی‌گذاری شهری، این تغییرات پارادایمیک به طور تاریخی در قالب سه الگوی اصلی قابل شناسایی است که توسط سویرین^۲ و همکاران [۱۲] تبیین شده‌اند: پارادایم برنامه‌ریزی کالبدی - فضایی که در آن شهر اساساً به مثابه یک موجودیت فیزیکی فهمیده می‌شود و خط‌مشی‌گذاری معادل برنامه‌ریزی کالبدی است. پارادایم مدیریت رشد شهری که در آن توجه از کالبد به فرایندهای اقتصادی و اجتماعی حاکم بر رشد شهر معطوف می‌شود و پارادایم حکمرانی شبکه‌ای که بر تعامل دولت، بازار و جامعه مدنی و سیاست‌های ملی شهری استوار است. اهمیت این دسته‌بندی در آن است که نشان می‌دهد خط‌مشی‌گذاری شهری از یک منطق کاملاً فنی و کالبدی، به تدریج به سمت منطق اقتصادی - اجتماعی و درنهایت به منطق شبکه‌ای و چندسطحی تحول یافته است. فرانس و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای تطبیقی نشان می‌دهند کشورهای در حال توسعه در مسیر گذار پارادایمیک با چالش‌های خاصی مواجه‌اند که ریشه در ضعف نهادی، وابستگی به درآمدهای ناپایدار و فقدان هماهنگی بین سطوح ملی و محلی دارد [۱۳].

۲-۲. نظریه‌های قدرت شهری و رژیم‌های خط‌مشی‌گذاری

فهم خط‌مشی‌گذاری شهری بدون توجه به ساختار قدرت، ناقص خواهد بود؛ زیرا پارادایم‌های سیاستی در عمل از طریق ائتلاف‌های قدرت و رژیم‌های حکمرانی تحقق می‌یابند. به بیان دیگر، اگر پارادایم‌ها منطق‌های فکری مسلط باشند، رژیم‌های شهری سازوکارهای نهادی تحقق آن منطق‌ها محسوب می‌شوند.

در این زمینه، نظریه قدرت چندبعدی لوکس^۳ [۱۴] با شناسایی قدرت در سه بعد: اثرگذاری در انتخاب راه‌حل‌ها و اتخاذ تصمیم‌ها، نقش‌آفرینی در تعیین راه‌حل‌ها، و اثرگذاری بر دستورگذاری‌ها و تعیین اینکه چه مسئله‌ای وارد دستور کار شود، قدرت را در کنترل دستور کار سیاستی دخیل می‌داند؛ این امر در شهرها به شکل‌گیری رژیم‌های پایدار قدرت منجر می‌شود. باید توجه داشت بعد سوم در بستر خط‌مشی‌گذاری شهری ایران به‌ویژه مشهود است.

در همین راستا نظریه ماشین رشد توضیح می‌دهد که چگونه ائتلافی از بازیگران اقتصادی و نهادی حول منافع زمین و مستغلات شکل می‌گیرد. این رژیم را می‌توان صورت‌نهادی شده پارادایم‌های مبتنی بر رشد و سوداگری شهری دانست [۱۵]. در مقابل، نظریه رژیم شهری استون^۴ [۱۶] نشان می‌دهد چگونه ائتلاف‌های مختلف می‌توانند شکل‌های متفاوتی از حکمرانی شهری را شکل دهند؛ از رژیم‌های توسعه‌گرا تا رژیم‌های مترقی. بنابراین رژیم‌های شهری در این پژوهش به مثابه پل مفهومی

1. Hall
2. Sewerin
3. Lukes
4. Stone

میان پارادایم‌های کلان و رفتارهای سیاستی عمل می‌کنند. در این چارچوب، نزاع میان شهرفروشی و شهرنفروشی نیز نه فقط یک اختلاف سیاستی، بلکه تعارض میان دو رژیم مبتنی بر دو منطق متفاوت تولید و توزیع قدرت در شهر است.

این تقسیم‌بندی دقیقاً با نزاع شهرفروشی در برابر شهرنفروشی در تهران قابل تطبیق است. به بیان دقیق‌تر، رژیم شهرفروشی در تهران مصداقی از نظریه ماشین رشد است که در آن ائتلافی از صاحبان مستغلات، سازندگان و مدیران شهری حول اقتصاد سیاسی زمین شکل گرفته، در حالی که رویکرد شهرنفروشی تلاشی برای گذار به رژیم مترقی استون (۱۹۸۹) است که در آن منافع عمومی شهروندان بر منافع گروه‌های رانت‌جو اولویت می‌یابد. هایرا و استیل (۲۰۲۱) در بسط نظریه رژیم شهری استدلال می‌کنند که بحران شهری جدید در بسیاری از کلان‌شهرهای جهان ریشه در تداوم ائتلاف‌های رشدمحور و فقدان مکانیزم‌های حکمرانی مشارکتی دارد [۱۷].

نظریه کثرت‌گرایی [۱۸] استدلال می‌کند که قدرت نه تنها متفرق و پراکنده است، بلکه این تمرکززدایی در خط‌مشی‌گذاری شهری مطلوب نیز هست. اما منتقدان این نظریه نشان داده‌اند در عمل همه صداها برابر نیستند و سرمایه‌داران و ثروتمندان قدرت نامتناسبی دارند. دیدگاه اقتصاد سیاسی (هاروی، کاستلز) نیز با تأکید بر انباشت سرمایه و تضادهای طبقاتی، توسعه شهری را نه نتیجه برنامه‌ریزی فنی، بلکه محصول مبارزه بین گروه‌هایی می‌داند که به دنبال سودآوری از زمین‌های شهری هستند.

مقایسه این نظریه‌ها نشان می‌دهد هیچ‌یک به تنهایی برای تحلیل خط‌مشی‌گذاری شهری جامع‌و‌مانع نیستند. نظریه رژیم شهری که نزدیک‌ترین نظریه به رویکردهای جدید حکمرانی شهری است، بدون توجه به ملاحظات ساختاری و اقتصاد سیاسی نمی‌تواند از قدرت تحلیل لازم برخوردار باشد. پژوهش حاضر با ترکیب این نظریه‌ها، چارچوب تحلیلی خود را برای فهم رژیم‌های خط‌مشی‌گذاری شهری تهران بنا می‌کند.

لازم است تمایز مفهومی میان «پارادایم» و «رژیم شهری» در این پژوهش روشن شود. پارادایم در سطح ایده‌ها و چارچوب‌های تفسیری قرار دارد و نشان می‌دهد بازیگران چگونه مسائل شهری را می‌فهمند و راه‌حل‌ها را تعریف می‌کنند. رژیم شهری در سطح ساختار و نهاد قرار دارد و سازوکار عملی است که از طریق آن پارادایم در قالب ائتلاف‌های بازیگران، منابع و روابط قدرت تجلی می‌یابد. به بیان ساده‌تر، پارادایم «چرا» و «چگونه فکر کردن» است و رژیم «چه کسانی» و «با چه منابعی» آن فکر را عملی می‌کنند (جدول ۱).

جدول ۱. مقایسه پارادایم‌های خط‌مشی‌گذاری شهری تهران و رژیم‌های متناظر

معیار	پارادایم اول	پارادایم دوم	پارادایم سوم	منبع نظری
عنوان	برنامه‌ریزی کالبدی-فضایی	مدیریت رشد شهری	حکمرانی شبکه‌ای	سویرین و هاوالت (۲۰۲۲)
دوره زمانی	۱۳۳۰ تا اواخر ۱۳۷۰	اواخر ۱۳۶۰ تا ۱۳۹۰	۱۳۹۰ تا کنون	یافته‌های پژوهش
منطق غالب	شهر به مثابه موجودیت فیزیکی	شهر به مثابه ماشین رشد اقتصادی	شهر به مثابه شبکه چندبازیگری	هال (۱۹۹۳)
رژیم متناظر	برنامه‌ریزی دولت‌محور از بالا به پایین	رژیم شهرفروشی (تراکم‌فروشی)	رژیم در حال شکل‌گیری (مترقی)	استون (۱۹۸۹): لوگان و مولاج (۱۹۸۷)
بازیگران اصلی	دولت مرکزی و برنامه‌ریزان فنی	صاحبان مستغلات، سازندگان و شهرداری	شبکه چندبازیگری شامل دولت، جامعه مدنی و بخش خصوصی	یافته‌های پژوهش
ابزار سیاستی اصلی	طرح‌های جامع کالبدی	فروش تراکم و تغییر کاربری	قوانین درآمد پایدار و نهادهای مشارکتی	یافته‌های پژوهش
نسبت با سیاست ملی شهری	غیر ضروری (سیاست ضمنی از طریق برنامه‌های عمرانی)	جایگزین شده با رژیم شهرفروشی	ضروری و ناکافی (در حال شکل‌گیری)	توروک (۲۰۱۴): یافته‌های پژوهش

۲-۳. مسائل بدخیم شهری

یکی از پیامدهای مستقیم تعامل میان پارادایم‌های متغیر و رژیم‌های قدرت، پیچیده‌تر شدن ماهیت مسائل شهری است. در این چارچوب مفهوم مسائل بدخیم که نخستین بار توسط ریتل و وبر^۱ [۱۹] مطرح شد توضیح می‌دهد که مسائل بدخیم مسائلی هستند که وابستگی‌های بسیاری دارند و اغلب چند علتی هستند، تلاش‌ها برای مدیریت آن‌ها اغلب به نتایج پیش‌بینی‌ناپذیر می‌انجامد، ماهیتی پویا دارند و از نظر اجتماعی پیچیده‌اند. در مقابل، مسائل رام^۲ مسائلی هستند که تعریف مشخص، راه‌حل قابل آزمون و معیار موفقیت واضح دارند.

ترمیر و همکاران (۲۰۲۱) نشان داده‌اند حکمرانی مسائل بدخیم در بستر شهری نیازمند ظرفیت‌های خاصی شامل بازاندیشی، انعطاف‌پذیری و پاسخگویی است که در اغلب نظام‌های مدیریت شهری کشورهای درحال توسعه ناقص است [۲۰].

شهرها به‌ویژه کلان‌شهرها به دلایل متعددی مستعد بروز مسائل بدخیم هستند. از نظر تاریخی، صنعتی شدن و رشد شهرنشینی اثرات انباشته‌ای ایجاد کرده که حل آن‌ها نیازمند اقدام هماهنگ در سطوح متعدد است. از نظر ساختاری، پیچیدگی نهادی، تکثر بازیگران، تعارض منافع و وابستگی‌های متقابل، مانع از شکل‌گیری اجماع درباره تعریف مسئله و راه‌حل آن می‌شود. و در بستر ایران، رابطه ناسالم دولت - ملت، فقدان نهادهای مدنی مستقل و غلبه منطق سیاسی بر منطق کارشناسی، عوامل ساختاری مضاعفی را برای بدخیم‌شدگی مسائل شهری فراهم کرده است [۲۱].

راهبردهای مواجهه با مسائل بدخیم شهری از سه نوع اصلی تشکیل می‌شوند: راهبرد اقتدارگرایانه که حل مسئله را به گروه‌های محدودی واگذار می‌کند، راهبرد رقابتی که جست‌وجوی قدرت و سهم را محور قرار می‌دهد و راهبرد مشارکتی که راه‌حل برد - برد را در کانون خود دارد. صاحب‌نظران بر این باورند که راهبرد مشارکتی بهترین رهیافت مقابله با مسائل بدخیم است، چراکه تنها از طریق مشارکت‌افزایی می‌توان بر تبادل دانش، یادگیری مستمر و تعهد ذی‌نفعان به اجرای سیاست‌ها دست یافت [۲۲]. مورونی و همکاران (۲۰۲۰) نشان می‌دهند قوانین ساده و منعطف در مواجهه با مسائل پیچیده شهری کارآمدتر از مقررات جامع و دقیق هستند؛ رویکردی که با منطق تصمیم‌گیری رویشی در این پژوهش همخوانی دارد [۲۳].

۲-۴. سیاست ملی شهری

سیاست ملی شهری از نظر دفتر برنامه اسکان بشر ملل متحد، مجموعه‌ای منسجم از تصمیماتی که حاصل فرایند آگاهانه دولت‌محور است، تعریف می‌شود؛ فرایندی که هماهنگ‌کننده و سامان‌دهنده بازیگران مختلف برای آرمان و بینشی مشترک است [۹]. توروک^۳ (۲۰۱۴) استدلال‌های مهمی برای ضرورت سیاست ملی شهری ارائه داده است. نخست، دولت مرکزی موقعیت بهتری برای تجزیه و تحلیل نیروهای شکل‌دهنده قلمرو ملی و تفکر استراتژیک درازمدت دارد. دوم، دولت ملی بر اهرم‌های مهم سیاستی نظیر بودجه، قوانین کاربری زمین و اختیارات سازماندهی کنترل دارد. سوم، دولت می‌تواند با سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها و تنظیم عرضه زمین، از رفتارهای سوداگران شهرداری‌ها جلوگیری کند. گزارش وضعیت جهانی سیاست ملی شهری (۲۰۲۴) نشان می‌دهد بیش از ۸۰ درصد کشورها اکنون دارای سیاست ملی شهری هستند و این سیاست به ابزاری کلیدی برای مدیریت چالش‌های شهری و پیشبرد شهرنشینی پایدار تبدیل شده است [۲۴ و ۲۵].

پژوهشگران میان خط‌مشی‌هایی که مستقیم به نفع شهرها هستند و سیاست‌هایی که تأثیر غیرمستقیم بر شهرها دارند مانند مسکن، حمل‌ونقل و برنامه‌ریزی فضایی تمایز قائل می‌شوند [۲۶]. توروک (۲۰۱۴) همچنین تأکید می‌کند که سیاست ملی شهری با اصل تمرکززدایی در تضاد نیست، بلکه نوعی استقرار قدرت‌ها و ابزارهای دولت به نفع تقویت تلاش‌های سایر لایه‌های مدیریتی است.

در ایران، با وجود کوشش‌هایی برای شکل‌دهی به مدیریت یکپارچه شهری، منظومه‌ای منسجم به نام «سیاست ملی شهری» وجود ندارد. تاریخچه خط‌مشی‌گذاری برای شهرها و به‌ویژه تهران تا اواخر دهه ۱۳۷۰ تا حد زیادی تاریخچه

1. Rittel & Webber

2. Tame

3. Turok

خطامشی‌گذاری کالبدی بوده است. گذاری تدریجی از تدوین خطامشی‌های صرفاً کالبدی به سیاست‌های ملی شهری در حال شکل‌گیری است، اما این مسیر ناتمام و همراه با تعارض‌های جدی بوده است [۲۷].

در این پژوهش، فقدان سیاست ملی شهری در ایران به‌صورت عملیاتی از طریق چهار بعد تعریف می‌شود. بعد اول؛ فقدان سند رسمی؛ ایران تا کنون فاقد یک سند مصوب و الزام‌آور با عنوان سیاست ملی شهری بوده است، هرچند تلاش‌هایی در این زمینه با همکاری یوان هیئتات در جریان است. بعد دوم؛ ضعف هماهنگی نهادی؛ نهادهای متعددی از جمله وزارت کشور، وزارت راه و شهرسازی، شهرداری‌ها و شورای عالی شهرسازی بدون چارچوب هماهنگ‌کننده ملی به صورت موازی و گاه متعارض عمل می‌کنند. بعد سوم؛ فقدان نظام درآمد پایدار؛ شهرداری‌ها در غیاب تعریف روشن مالیه محلی، به درآمدهای ناپایدار ناشی از فروش تراکم و کاربری وابسته شده‌اند، وضعیتی که قانون منابع مالی پایدار (۱۳۹۶) تلاش کرد آن را اصلاح کند، اما هنوز به طور کامل اجرایی نشده است. بعد چهارم؛ ناکارآمدی سیاست‌های موجود؛ مجموعه سیاست‌های ملی مؤثر بر شهرها، از برنامه‌های عمرانی تا طرح‌های جامع، فاقد انسجام، پیوستگی و سازوکار اجرایی بوده‌اند. منظور این پژوهش از فقدان سیاست ملی شهری ترکیب این چهار بُعد است، نه فقط نبود یک سند رسمی.

۲-۵. چارچوب نظری پژوهش

چارچوب نظری این پژوهش بر یک منطق چندلایه و یکپارچه استوار است که تلاش می‌کند تحولات خطامشی‌گذاری شهری تهران را در پیوند میان سطوح فکری، نهادی و ساختاری تبیین کند. این چارچوب از ترکیب چهار دسته نظریه مکمل شکل گرفته است که هر یک بخشی از پازل تحلیل را پوشش می‌دهند و در کنار یکدیگر، یک مدل تحلیلی منسجم برای فهم فضای خطامشی‌گذاری شهری ارائه می‌کنند.

در سطح نخست، نظریه تغییر پارادایم سیاستی هال (۱۹۹۳) و مدل پارادایم‌های خطامشی‌گذاری شهری سویرین و همکاران (۲۰۲۲) مبنای تحلیل تاریخی تحولات خطامشی‌گذاری تهران را فراهم می‌کنند. این بخش نشان می‌دهد خطامشی‌گذاری شهری از منطق‌های کالبدی - فضایی به سمت مدیریت رشد و سپس، حکمرانی شبکه‌ای تحول یافته است. بنابراین، پارادایم‌ها در این پژوهش به عنوان سطح شناختی و هنجاری سیاستگذاری در نظر گرفته می‌شوند که تعیین می‌کنند چه چیزی مسئله تلقی شود و چه نوع راه‌حلی مشروعیت داشته باشند. در سطح دوم، نظریه رژیم شهری استون (۱۹۸۹) و نظریه ماشین رشد لوگان و مولاچ (۱۹۸۷) چارچوب تحلیل ساختارهای قدرت و ائتلاف‌های نهادی را فراهم می‌کنند. این نظریه‌ها نشان می‌دهند چگونه پارادایم‌های مسلط در سطح فکری، در عمل از طریق ائتلاف‌های اقتصادی - سیاسی و رژیم‌های حکمرانی شهری بازتولید یا دگرگون می‌شوند. در این سطح، رژیم‌های شهری به عنوان مکانیزم‌های واسط میان ایده‌ها و عمل سیاستی عمل می‌کنند و توضیح می‌دهند که چگونه منافع زمین، سرمایه و نهادهای رسمی در شکل‌دهی به تصمیمات شهری نقش‌آفرینی می‌کنند.

در سطح سوم، مفهوم مسائل بدخیم ریتل و وبر (۱۹۷۳) به عنوان چارچوب تحلیل پیامدهای تعارض میان پارادایم‌ها و رژیم‌ها به کار گرفته می‌شود. بر این اساس، مسائل شهری تهران نه فقط مشکلات اجرایی، بلکه پیامد طبیعی هم‌پوشانی پارادایم‌های ناهم‌ساز و تعارض رژیم‌های قدرت هستند که موجب چندعلتی شدن، عدم قطعیت و بازتولید مسائل می‌شوند. در سطح چهارم، مفهوم سیاست ملی شهری [۹ و ۲۸] نقش لایه تنظیمی و هماهنگ‌کننده را در این ساختار ایفا می‌کند. سیاست ملی شهری به عنوان چارچوبی فرادست، می‌کوشد میان پارادایم‌های متکثر و رژیم‌های متعارض انسجام ایجاد کند و اثرات منفی بدخیم‌شدگی مسائل شهری را کاهش دهد. در این معنا، سیاست ملی شهری نه یک سطح مستقل از سیاستگذاری، بلکه سازوکاری برای هم‌راستاسازی سطوح مختلف حکمرانی شهری است. براساس تلفیق این چهار حوزه نظری، چارچوب مفهومی پژوهش حاضر نشان می‌دهد:

پارادایم‌ها سطح معرفتی و جهت‌دهنده سیاستگذاری را شکل می‌دهند، رژیم‌های شهری سازوکار تحقق و بازتولید این پارادایم‌ها در ساختار قدرت هستند، مسائل بدخیم پیامد تعامل و تعارض این دو سطح هستند و سیاست ملی شهری نقش تنظیم‌گر و هماهنگ‌کننده میان سطوح مختلف را ایفا می‌کنند. در نتیجه، خطامشی‌گذاری شهری تهران در این پژوهش به عنوان یک نظام چندسطحی و پویا در نظر گرفته می‌شود که در آن تغییرات پارادایمیک، ساختارهای رژیمی، پیچیدگی مسائل و فقدان یا

حضور سیاست ملی شهری به صورت درهم‌تنیده بر یکدیگر اثر می‌گذارند. این چارچوب مبنای تحلیل تجربی پژوهش در بخش‌های بعدی قرار می‌گیرد و امکان تبیین یکپارچه تحولات خط‌مشی‌گذاری شهری تهران را فراهم می‌سازد. وایل^۱ و کرنی^۲ (۲۰۲۱) تأکید می‌کنند که ترکیب چارچوب‌های نظری متعدد در تحلیل خط‌مشی‌گذاری، درک دقیق‌تری از پیچیدگی‌های واقعی فرایند سیاستی فراهم می‌کند [۲۹].

نخست، نظریه تغییر پارادایم هال (۱۹۹۳) و مدل سویرین و هاوالت (۲۰۲۲) چارچوب تحلیل تاریخی تحولات خط‌مشی‌گذاری تهران را فراهم می‌کنند و مستقیم در بخش ۴-۱ (الگوی تغییرات پارادایمیک) به کار گرفته شده‌اند. دوم، نظریه رژیم شهری استون (۱۹۸۹) و نظریه ماشین رشد لوگان و مولاج (۱۹۸۷) ابزار تحلیل ائتلاف‌های حاکم را فراهم می‌کنند و در بخش ۴-۲-الف (تثبیت نزاع دو رژیم) و بخش ۵-۲ (بحث) به کار رفته‌اند. سوم، مفهوم مسائل بدخیم ریتل و وبر (۱۹۷۳) توضیح می‌دهد چرا مسائل شهری تهران در برابر راه‌حل‌های متعارف مقاوم بوده‌اند و در بخش ۴-۲-ب و بخش ۵-۳ استفاده شده است. چهارم، مفهوم سیاست ملی شهری معیار ارزیابی وضعیت موجود را تعیین می‌کند و محور اصلی بخش‌های ۴-۲-ه، ۴-۵ و ۶ است. و پنجم، چارچوب‌های تبیین فرایند شامل جریان‌ات چندگانه، ائتلاف مدافع و مدل تصمیم‌گیری ریشی، شالوده اصلی مدل مفهومی پژوهش را تشکیل می‌دهند و به طور مشخص در بخش ۴-۳ (مدل مفهومی فضای خط‌مشی‌گذاری) برای تبیین مسیرهای تصمیم‌گیری و نحوه تقابل ائتلاف‌ها در حضور یا غیاب رژیم پایدار به کار گرفته شده‌اند.

۳. روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی - توسعه‌ای و از نظر ماهیت، کیفی است که با تکیه بر پارادایم تفسیری - انتقادی انجام شده است. انتخاب رویکرد کیفی به این دلیل است که پدیده مورد مطالعه، یعنی تحولات پارادایمیک خط‌مشی‌گذاری شهری، ماهیتی پیچیده، چندلایه و متأثر از بافتار سیاسی، اجتماعی و نهادی خاص دارد که درک عمیق آن مستلزم تفسیر عمیق کنش‌های نهادی، سیاسی و اجتماعی است. رویکرد انتقادی این پژوهش نیز بر این پیش‌فرض استوار است که فرایند خط‌مشی‌گذاری شهری در تهران در بستر روابط قدرت، منافع ائتلاف‌های ذی‌نفوذ و ساختارهای نهادی نابرابر شکل می‌گیرد و بنابراین تحلیل آن بدون توجه به این مناسبات امکان‌پذیر نیست.

راهبرد پژوهش مبتنی بر تحلیل مضمون^۳ است که امکان استخراج الگوهای معنایی عمیق از داده‌های کیفی را فراهم می‌کند [۳۰]. در این پژوهش، تحلیل مضمون به صورت ترکیبی از رویکرد استقرایی و قیاسی انجام شد؛ به گونه‌ای که داده‌های تجربی در عین استخراج کدهای اولیه، در پرتو چارچوب‌های نظری پژوهش نیز تفسیر شدند.

در این فرایند، نظریه تغییر پارادایم هال، نظریه رژیم شهری استون، نظریه ماشین رشد و مفهوم مسائل بدخیم به عنوان چارچوب‌های مفهومی هدایت‌کننده در مرحله کدگذاری و تفسیر به کار گرفته شدند. به این ترتیب، داده‌های حاصل از مصاحبه‌ها و اسناد، نه تنها در سطح توصیفی، بلکه در سطح تبیینی و انتقادی تحلیل شدند.

فرایند تحلیل مضمون در این پژوهش از رویکرد ترکیبی استقرایی - قیاسی استفاده کرد. در مرحله استقرایی، کدگذاری باز روی داده‌های خام مصاحبه‌ها و اسناد انجام شد و در مجموع ۱۸۷ کد اولیه استخراج شد. در مرحله قیاسی، این کدها در پرتو چارچوب‌های نظری پژوهش، از جمله نظریه تغییر پارادایم هال، نظریه رژیم شهری استون و مفهوم مسائل بدخیم، بازبینی و دسته‌بندی شدند. کدهای اولیه در ۳۲ مضمون فرعی و سپس در ۸ مضمون اصلی سازماندهی شدند که در نهایت به شناسایی سه پارادایم اصلی و ویژگی‌های پارادایم کنونی منجر شدند.

گردآوری داده‌ها طی دو روش اصلی انجام شد؛ نخست، مطالعه اسنادی شامل بررسی اسناد فرادست، قوانین، طرح‌های جامع شهری تهران، گزارش‌های سیاستی و متون تخصصی مرتبط با مدیریت شهری در ایران. اسناد مورد مطالعه شامل سه دسته اصلی است: نخست، اسناد فرادست ملی شامل قانون شهرداری‌ها، قانون منابع مالی پایدار شهرداری‌ها (۱۳۹۶)، برنامه‌های

1. Weible

2. Cairney

3. Thematic Analysis

پنج‌ساله توسعه و مصوبات شورای عالی شهرسازی و معماری ایران؛ دوم، اسناد توسعه شهری تهران شامل طرح جامع ۱۳۴۷، طرح جامع ۱۳۷۰ و طرح جامع - راهبردی ۱۳۸۶ تهران، طرح تفصیلی یکپارچه تهران (۱۳۹۱) و گزارش‌های پایش اجرای طرح جامع؛ سوم، گزارش‌های تحلیلی و سیاستی شامل گزارش تهران ۵۶، گزارش‌های مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی درباره مالیات شهری، گزارش‌های مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران و اسناد همکاری ایران با یوان - هبیتات در تدوین سیاست ملی شهری. دوم، مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته عمیق با دوازده نفر از خبرگان، مدیران ارشد و سیاستگذاران مرتبط با حوزه مدیریت شهری تهران. نمونه‌گیری به صورت هدفمند و با تکنیک گلوله‌برفی انجام شد و معیار انتخاب، برخورداری از تجربه علمی یا اجرایی مرتبط با خط‌مشی‌گذاری شهری بود. فرایند مصاحبه‌ها تا رسیدن به اشباع نظری ادامه یافت؛ به گونه‌ای که از حدود مصاحبه نهم به بعد، داده جدید معناداری استخراج نشد.

برای تضمین روایی و پایایی یافته‌ها از دو روش استفاده شد: (۱) چندجانبه‌نگری^۱ از طریق ترکیب منابع اسنادی؛ (۲) مصاحبه‌ای و بازبینی مشارکت‌کنندگان از طریق ارائه یافته‌های اولیه به تعدادی از مصاحبه‌شوندگان برای تأیید صحت تفسیرها. برای گردآوری داده‌های این پژوهش، از دیدگاه‌های یک گروه دوازده‌نفره از خبرگان حوزه خط‌مشی‌گذاری شهری بهره گرفته شد. برای انتخاب این افراد، از روش نمونه‌گیری غیرتصادفی از نوع هدفمند و استراتژی گلوله‌برفی استفاده شده است. معیار اصلی انتخاب، شامل بودن در یکی از گروه‌های اعضای هیئت علمی، مقامات اجرایی، سیاستمداران و مسئولان حاضر یا اسبق شهر تهران بود که علاوه بر دانش نظری و سابقه پژوهشی، دارای تجربه و مهارت کافی اجرایی نیز باشند. فرایند مصاحبه‌ها در بازه زمانی پاییز ۱۴۰۱ تا اواخر بهار ۱۴۰۲ انجام گرفت و میانگین مدت‌زمان هر مصاحبه بین ۴۵ تا ۹۰ دقیقه متغیر بود. همچنین، به منظور رعایت ملاحظات اخلاقی، اصل محرمانگی داده‌ها و هویت مصاحبه‌شوندگان کاملاً رعایت شد (جدول ۲).

جدول ۲. ترکیب‌شناسی و توزیع فراوانی پنل خبرگان پژوهش

متغیر مورد بررسی	طبقه‌بندی	فراوانی (تعداد)	درصد تقریبی
سطح تحصیلات	دکتری تخصصی (Ph.D)	۱۰	۸۳ درصد
	کارشناسی ارشد	۲	۱۷ درصد
گروه‌های سنی	کمتر از ۴۵ سال	۲	۱۷ درصد
	۴۵ تا ۵۵ سال	۳	۳۵ درصد
	۵۶ سال و بالاتر	۷	۵۸ درصد
حوزه‌های تمرکز تخصصی	مدیریت و سیاستگذاری شهری	۷	۵۸ درصد
	شهرسازی و برنامه‌ریزی شهری	۲	۱۷ درصد
	معماری و مرمت شهری	۲	۱۷ درصد
	برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری	۱	۸ درصد

قلمرو این پژوهش از سه بعد تعریف می‌شود. از نظر مکانی، پژوهش بر کلان‌شهر تهران به عنوان پیچیده‌ترین بافتار سیاستگذاری شهری در ایران متمرکز است؛ شهری که به دلیل تمرکز نهادهای ملی و محلی، نمونه‌ای شاخص از چالش‌های خط‌مشی‌گذاری شهری در کشورهای در حال توسعه محسوب می‌شود. از نظر زمانی، پژوهش تحولات هفت دهه گذشته (از دهه ۱۳۳۰ تا کنون) را با تأکید بر دهه‌های اخیر پوشش می‌دهد تا تغییرات پارادایمیک در نظام خط‌مشی‌گذاری شهری قابل تحلیل باشد. از نظر موضوعی، پژوهش بر فرایند خط‌مشی‌گذاری شهری، پارادایم‌های حاکم و نسبت آن‌ها با مفهوم سیاست ملی شهری تمرکز دارد و ابعاد فنی - کالبدی صرف را دربر نمی‌گیرد.

انتخاب رویکرد کیفی در این پژوهش از چند دلیل اساسی ناشی می‌شود. نخست، پدیده مورد مطالعه، تحولات پارادایمیک خط‌مشی‌گذاری شهری، ماهیتی تفسیری و بافتارمند دارد که درک عمیق آن از طریق داده‌های کمی امکان‌پذیر نیست. دوم، روابط قدرت، منافع ائتلاف‌های ذی‌نفوذ و فرایندهای نهادی پنهان که محور اصلی این پژوهش هستند، تنها از طریق

مصاحبه‌های عمیق و تحلیل اسناد قابل کشف‌اند. سوم، هدف پژوهش ارائه مدل مفهومی است نه آزمون فرضیه، که این هدف با رویکرد کیفی سازگاری بیشتری دارد (جدول ۳).

از طرفی تمرکز بر تهران امکان تعمیم مستقیم یافته‌ها به سایر کلان‌شهرهای ایران را محدود می‌کند. همچنین، در پژوهش‌های کیفی، سوگیری تفسیری پژوهشگر اجتناب‌ناپذیر است که در این پژوهش از طریق چندجانبه‌نگری و بازبینی مشارکت‌کنندگان به حداقل رسیده است. علاوه بر این، ماهیت پویای تحولات خط‌مشی‌گذاری شهری به معنای آن است که یافته‌ها در بازه‌های زمانی کوتاه ممکن است به به‌روزرسانی نیاز داشته باشند.

جدول ۳. نمونه‌ای از روند تحلیل مضمون، کدگذاری و استخراج پارادایم‌ها در پژوهش

نمونه داده	کد اولیه (مفاهیم پایه)	مضمون فرعی (محوری)	مضمون اصلی (انتخابی)	نتیجه نظری در مدل پژوهش
«نوعی اقتصاد سیاسی خیلی منسجم حاکم است که رژیم شهرفروشی را ایجاد کرده است. امروزه رژیم مسلط، تراکم‌فروشی است» [مشارکت‌کننده P5]	غلبه منافع مالی بر اداره شهر / رژیم شهرفروشی	اقتصاد سیاسی و رانت‌خواری در شهر	تثبیت نزاع دو رژیم (شهرفروشی در شهرنفرشی)	تبیین رژیم شهری مسلط (تطبیق با نظریه ماشین رشد لوگان)
«ما با تفرق مدیریتی، برنامه‌ای، بودجه‌ای، نظارتی و در نهایت با تفرق مقررات‌گذاری مواجه هستیم.» [مشارکت‌کننده P1]	ناهماهنگی بین سطوح ملی و محلی / تفرق نهادی	ضعف ائتلاف‌ها و تفرق مدیریتی	تثبیت مسائل بدخیم و تفرق‌های شهری	گذار به تصمیم‌گیری روبشی در غیاب رژیم پایدار
«سیاست ملی شهری ما پراکنده، چندپاره و مقطعی است... ساختار اجرایی شهرداری‌ها قدرت اجرایی لازم برای سیاست‌گذاری ملی را ندارد.» [مشارکت‌کننده‌های P1 و P4]	فقدان چارچوب یکپارچه ملی / ضعف ساختار اجرایی	نبود سیاست ملی شهری منسجم	تلاش برای شکل‌گیری سیاست ملی شهری	خلأ لایه تنظیمی و ضرورت سیاست ملی شهری در پارادایم سوم
«عمر کوتاه مدیریت شهری و مدیران سبب شده که هدف‌گذاری‌ها حل مسئله نباشد... برنامه‌ها بعد از هر دوره کنار گذاشته می‌شود.» [مشارکت‌کننده‌های P5 و P6]	عدم استمرار برنامه‌ها / رویکرد مقطعی به مسائل	استراتژی‌های کوتاه‌مدت و غیرپایدار	افزایش حضور بازیگران سیاسی و کوتاه‌مدت‌نگری	تأیید رویکرد جریان‌های چندگانه و غلبه ملاحظات سیاسی بر کارشناسی

۴. یافته‌های پژوهش

یافته‌های این پژوهش حاصل تحلیل داده‌های اسنادی (طرح‌های جامع، اسناد فرادست و گزارش‌های سیاستی) و مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با خبرگان حوزه مدیریت شهری است. یافته‌ها در دو سطح ارائه می‌شوند: نخست، الگوی تغییرات پارادایمیک خط‌مشی‌گذاری شهری تهران در هفت دهه گذشته؛ و دوم، ویژگی‌ها، آثار و پیامدهای پارادایم مسلط کنونی.

۴-۱. الگوی تغییرات پارادایمیک خط‌مشی‌گذاری شهری تهران

بر اساس سنتز شواهد متنوع از طرح‌های جامع شهری تهران و مطابق با تطور عمومی خط‌مشی‌گذاری شهری در ایران، خط‌مشی‌گذاری شهری تهران در هفت دهه گذشته سه پارادایم اصلی را طی کرده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، خط‌مشی‌گذاری شهری تهران در یک روند خطی و تکاملی ساده حرکت نکرده، بلکه در قالب سه پارادایم متمایز اما هم‌پوشان تحول یافته است: پارادایم اداره امور شهری (۱۳۴۰ - ۱۳۷۰) از طریق پارادایم مدیریت شهری (۱۳۷۰ - ۱۳۹۰) به پارادایم حکمرانی شهری (۱۳۹۰ تا کنون) سیر کرده است. این پارادایم‌ها به جای گسست کامل، به صورت لایه‌های انباشته در نظام خط‌مشی‌گذاری شهری تهران حضور دارند؛ هرچند در هر دوره، یکی از آن‌ها غلبه بیشتری داشته است.

پارادایم اول: برنامه‌ریزی کالبدی - فضایی (دهه ۱۳۳۰ تا دهه ۱۳۷۰)

ریشه‌های ساختاری این پارادایم را می‌توان در تاریخچه قانونی شهرداری‌های ایران جست‌وجو کرد. در این دوره، منطق مسلط خط‌مشی‌گذاری شهری بر برنامه‌ریزی فیزیکی و کنترل رشد کالبدی استوار بود. شهر اساساً به عنوان یک موجودیت فیزیکی دیده

همچنین، کاوه علی‌اکبری [۳۱] در تبیین زمینه‌های شکل‌گیری این رژیم می‌گوید: «در سال ۱۳۷۲ منافی که شهرداری‌ها از دولت دریافت می‌کنند دیگر پاسخگوی اداره شهر نیست و از طرفی، دولت مرکزی سیاست آزادسازی و خصوصی‌سازی اجرا کرد. بحث تراکم و مازاد تراکم و تغییر کاربری به عنوان درآمدهای اصلی تهران برای نخستین بار در این دوره مرکز توجه قرار گرفت.» پیامد این رژیم عمیق و چندوجهی بود؛ به طوری که آخوندی تأکید می‌کند: «افزایش قیمت سوداگرانه ملک در همین دوران رخ داد؛ چراکه املاک دیگر ارزش مصرفی صرف نداشتند و ارزش سوداگری و معاملاتی فراتر از ارزش مصرفی پیشین خود را بسته به میزان توافقی که با شهرداری قابل حصول بود، پیدا کردند.»

از طرف دیگر، رفیعیان و همکاران [۳۲] نشان می‌دهند در منطقه ۱ تهران حدود ۷۰ درصد انحراف در خصوص صدور پروانه وجود دارد و وقتی تعادل در نظام ضوابطی حاکم نباشد، شکاف زیاد خدماتی نیز برای جمعیت دیده می‌شود. از منظر نظری، این وضعیت با نظریه ماشین رشد لوگان و مولاج (۱۹۸۷) قابل تبیین است؛ جایی که توسعه شهری نه فقط یک فرایند برنامه‌ریزی، بلکه نتیجه ائتلاف‌های اقتصادی - سیاسی پیرامون زمین و سرمایه است.

پارادایم سوم: حکمرانی شبکه‌ای (دهه ۱۳۹۰ تا کنون)

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد از دهه ۱۳۹۰ به بعد، هم‌زمان با پیچیده‌تر شدن مسائل شهری و ناکارآمدی رژیم‌های پیشین، نوعی گذار تدریجی به سمت حکمرانی شبکه‌ای در خط‌مشی‌گذاری شهری تهران در حال شکل‌گیری است. این گذار ماهیتی ناتمام، غیرخطی و همراه با تعارض‌های نهادی و سیاسی دارد و هنوز به تثبیت یک الگوی پایدار حکمرانی منجر نشده است.

۴-۲. ویژگی‌ها، آثار و پیامدهای پارادایم مسلط کنونی (حکمرانی شبکه‌ای)

الف) تثبیت و تداوم نزاع دو رژیم خط‌مشی‌گذاری

بارزترین ویژگی پارادایم کنونی، تثبیت نزاع دو رویکرد متضاد شهرفروشی و شهرنفروشی است. این نزاع به‌ویژه در دوره مدیریت شورای پنجم اسلامی شهر تهران به مراحل جدی‌تری رسید. پیروز حناچی، شهردار تهران در سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰، در این باره می‌گوید [۳۳]: «در گذشته حساب شهرداری روی رابطه مالی و اقتصادی با ذی‌نفعان خاص پایه‌ریزی شده بود. ذی‌نفعان خاص، اقلیتی از سازنده‌ها هستند که همیشه دنبال گرفتن مجوزهای نجومی و کاملاً متضاد و مغایر با ضوابط طرح تفصیلی هستند.» در مقابل، علیرضا زاکانی، شهردار فعلی تهران رویکردی متفاوت را در پیش گرفته و افزایش صدور پروانه و توسعه ساخت‌وساز را به عنوان ابزاری برای مهار تورم و رشد اقتصادی معرفی می‌کند. داده‌های آماری این نزاع را به‌خوبی نشان می‌دهند. گلپایگانی [۳۴] اشاره می‌کند که بیشترین آمار صدور پروانه در تهران متعلق به سال ۱۳۹۲ با حدود ۴۸ میلیون مترمربع بوده و متوسط تراکم واگذاری در آن سال ۴۱۰ درصد یعنی متوسط هفت‌طبقه بوده است. این در حالی است که در سال ۱۳۹۹ تراکم ساختمانی واگذاری از ۴۸۸ درصد به ۳۳۷ درصد کاهش یافته است.

ب) تثبیت مسائل بدخیم و تفرق‌های شهری

یافته‌ها نشان می‌دهد مسائل بدخیم شهری تهران طی این دوره نه‌تنها حل نشده‌اند، بلکه تعمیق یافته‌اند. ایزدی [۳۵]، معاون اسبق شهرسازی وزارت مسکن، فهرست جامعی از این مسائل ارائه می‌دهد که شامل تنزل شدید کیفیت زندگی، فقر شهری، نابرابری‌های فضایی - کارکردی، ناکارآمدی نظام جابه‌جایی، بحران هویت، تاب‌آوری پایین در مواجهه با بلایا و بحران زیست‌محیطی است. این مسائل از منظر ریتل و وبر (۱۹۷۳) مصادیق بارز مسائل بدخیم هستند؛ نه تعریف مشخصی دارند، نه راه‌حل قطعی و نه معیار موفقیت واضح و همین است که طرح‌های جامع متعدد را در مواجهه با آن‌ها ناکام گذاشته است. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند ضعف در راهبردهای نهادی و تفرق مدیریتی در مجموعه شهری تهران، دستیابی به اهداف طرح‌های توسعه را با چالش جدی مواجه کرده است [۳۶]. این تفاوت آشکار بین آنچه امروز قابل مشاهده است و آنچه آرزوی طرح جامع شهر تهران ترسیم کرده، مؤید توسعه تفرق‌ها به نفع تثبیت مسائل بدخیم در کشور است.

ج) تثبیت ایده حکمرانی شبکه‌ای

در برابر الگوی مدیریت متمرکز، ایده حکمرانی شبکه‌ای به تدریج در گفتمان مدیریت شهری تهران تثبیت شده است. رویکردی که مطالعات اخیر نیز بر کارآمدی آن در مدیریت چالش‌های پیچیده‌ای نظیر حمل‌ونقل عمومی تهران تأکید دارند [۳۷]. آخوندی در تمایز این دو رویکرد می‌گوید [۵]: «مفهوم حکمرانی با مدیریت به طور ماهوی متفاوت است. در حکمرانی شهری، همه در ایجاد و بهره‌برداری از منافع شریک‌اند، اما در مدیریت، منافع برای ذی‌نفع است و مدیر منصوب از طرف اوست تا کار خاصی را به اجرا برساند.»

حناچی (۱۴۰۰) نیز بر ضرورت مدیریت یکپارچه شهری تأکید دارد و می‌گوید [۳۸]: «نگاه بخشی ما را به زمین خواهد زد. اینکه فرض کنیم جایی که قرار داریم مرکز کره زمین است و دیگران را به مشارکت نطلبیم، موفق نخواهیم شد.»

د) افزایش حضور بازیگران سیاسی و گروه‌های ذی‌نفوذ

از سال ۱۳۸۲ با حضور محمود احمدی‌نژاد و بعد از او محمدباقر قالیباف، که سودای جدی ریاست جمهوری داشت، شهرداری تهران رنگ‌وبوی سیاسی و جناحی گرفت و کرسی شهرداری و شورای شهر به عنوان عرصه جدی فعالیت گروه‌های سیاسی مد نظر قرار گرفت. این مسئله سبب افزایش تصمیمات و خطمشی‌های سیاسی در تهران شد و در نهایت، به تشدید کوتاه‌مدت‌نگری در مدیریت شهری انجامید و این نمونه‌ای از سیطره منطق سیاسی بر منطق کارشناسی در خطمشی‌گذاری شهری است. این سیاسی شدن مدیریت شهری پیامدهای چندگانه‌ای بر خطمشی‌گذاری شهری داشته است:

- نخست، کوتاه‌مدت‌نگری در تصمیم‌گیری: مدیران شهری با افق دید انتخاباتی، به جای تصمیمات راهبردی بلندمدت، بر اقدامات پرنمود و کم‌هزینه تمرکز کردند.
- دوم، تشدید تعارض منافع: ورود گروه‌های سیاسی به مدیریت شهری، مرز میان تصمیمات سیاسی و کارشناسی را از بین برد و زمینه را برای خطمشی‌های انتفاعی فراهم کرد.
- سوم، ناپایداری خطمشی‌ها: تغییر مدیریت شهری با هر چرخه انتخاباتی، تداوم سیاست‌ها را مختل کرد؛ به گونه‌ای که برنامه‌های بلندمدت شهری اغلب نیمه‌کاره ماندند.
- چهارم، تضعیف ظرفیت کارشناسی: غلبه ملاحظات سیاسی بر ملاحظات فنی، انگیزه کارشناسان حرفه‌ای را کاهش داد و دانش تخصصی را از فرایند تصمیم‌گیری دور کرد.

این پیامدها در کنار هم نشان می‌دهند سیاسی شدن مدیریت شهری نه تنها یک مشکل اخلاقی، بلکه یک آسیب ساختاری جدی برای فرایند خطمشی‌گذاری شهری تهران است. همان‌طور که یکی از مدیران ادوار مدیریت شهری (مشارکت‌کننده P10) اشاره می‌کند، غلبه نگاه سیاسی موجب شده تا شایسته‌سالاری فدای همسویی سیاسی شود و در نتیجه، «استفاده از یک نیروی ضعیف اما همسو، بر نیروی متخصص اما مستقل ترجیح داده شود.»

ه) تلاش برای شکل‌گیری سیاست ملی شهری

شاید مهم‌ترین ویژگی پارادایم سوم، تلاش‌های جدی‌تر برای شکل‌دهی به سیاست ملی شهری است. این تلاش‌ها در چند محور قابل شناسایی است. نخست، تصویب قانون منابع مالی پایدار برای شهرداری‌ها و دهیاری‌ها که حناچی آن را «لایحه‌ای که سال‌ها منتظرش بودیم» می‌نامد [۳۳ و ۳۸]. دوم، احیای نهاد پایش و راهبری طرح‌های توسعه شهری از طریق تفاهم‌نامه‌ای که در سال ۱۳۹۸ به امضای وزیر راه و شهرسازی، رئیس شورای شهر و شهردار تهران رسید. سوم، طرح جامع مدیریت شهری و روستایی در مجلس شورای اسلامی که در آن تأکید شده بخشی از خدمات شهری و دستگاه‌های اجرایی به مدیریت شهری و روستایی واگذار شود [۳۹]. چهارم، تدوین سیاست ملی شهری زیر نظر برنامه اسکان بشر ملل متحد که وزیر مسکن از آن به عنوان یکی از سه کشور پیش‌تاز در سطح بین‌المللی یاد کرده است [۴۰].

و) کاهش حمایت‌های مالی دولت و تعمیق بحران مالی شهرداری

یافته‌ها نشان می‌دهد سهم دولت در بودجه شهرداری از حدود ۵۰ درصد در گذشته به حدود ۶ درصد در سال‌های اخیر کاهش یافته است. علی‌نودرپور در این باره می‌گوید [۴۱]: «سهم دخالت کم نشده، بلکه سهم اعتباری کاهش داشته و اجبارهایی را هم بر مدیریت شهری تحمیل کرده است.»

این واقعیت ساختاری، شهرداری را در تناقض عمیق گرفتار کرده است؛ از یک طرف منابع مالی مستقل و پایدار ندارد و از طرف دیگر تحت فشار است که از رژیم ناپایدار شهرفروشی فاصله بگیرد.

جدول ۴. شاخص‌های کلیدی مالی و کالبدی مدیریت شهری تهران

منبع	روند	مقدار	دوره/سال	شاخص
الف (شاخص‌های مالی)				
[۳۴]	کاهشی	۵۰~ درصد	دهه ۱۳۶۰	سهم دولت در بودجه شهرداری
[۴۱]	کاهشی	۶~ درصد	سال‌های اخیر	سهم دولت در بودجه شهرداری
ب) شاخص‌های کالبدی (صدور پروانه)				
[۳۴]	کاهشی	۴۸ میلیون مترمربع	۱۳۹۲ (اوج)	مساحت پروانه صادر شده
[۳۴]	کاهشی	۱۱ میلیون مترمربع	۱۴۰۰ (کمترین)	مساحت پروانه صادر شده
[۳۴]	افزایشی	۱۳,۴ میلیون مترمربع	۱۴۰۱	مساحت پروانه صادر شده
ج) شاخص‌های تراکم و انحراف از ضوابط				
[۳۴]	کاهشی	۴۱۰ درصد (۷ طبقه)	۱۳۹۲	متوسط تراکم واگذاری
[۳۴]	کاهشی	۴۸۸ درصد	۱۳۹۸	متوسط تراکم واگذاری
[۳۴]	ثابت	۳۳۷ درصد	۱۳۹۹	متوسط تراکم واگذاری
[32]	ثابت	۷۰~ درصد پروانه‌ها	۱۴۰۰	انحراف از ضوابط در منطقه ۱ تهران

داده‌های جدول ۴ به‌روشنی نشان می‌دهد کاهش ۸۸ درصدی سهم دولت در بودجه شهرداری و نوسانات شدید در صدور پروانه، دو روی یک سکه هستند که هر دو ریشه در فقدان سیاست ملی شهری منسجم دارند.

ز) توسعه همکاری‌ها و تعارض‌های نهادی

به دلیل ماهیت فرابخشی مأموریت‌های شهرداری، طی سال‌های اخیر همکاری جدی‌تری با وزارت مسکن و شهرسازی و وزارت کشور از مسیر شوراهای عالی مرتبط شکل گرفته است. این همکاری درعین حال موجب بروز تعارض‌های متنوعی به‌ویژه در منافع بین دولت و شهرداری شده است. چنانچه در این باره می‌گوید: «مسئولیت‌ها و مدیران در شهر متفرق هستند و همین موضوع دسترسی به مدیریت یکپارچه برای رسیدن به هدف نهایی که همان سیاستگذاری برای تمرکززدایی از شهر است را سخت می‌کند.»

یافته‌های حاصل از مصاحبه‌ها نشان می‌دهد فقدان تفکیک دقیق نظام مدیریت ملی و محلی، عامل اصلی این تعارض‌ها است؛ به گونه‌ای که یکی از سیاستگذاران ارشد (مشارکت‌کننده P8) تصریح می‌کند: «عدم تفکیک دقیق و فنی مدیریت ملی و محلی، باعث شده که نهادهای محلی نتوانند به طور مستقل عمل کنند و همواره تحت تأثیر تصمیم‌گیری‌های کلان در سطح ملی قرار داشته باشند.»

بررسی دقیق‌تر این تعارض‌های نهادی نشان می‌دهد آن‌ها در سه سطح قابل شناسایی هستند. در سطح عمودی، تعارض میان دولت مرکزی و شهرداری بر سر منابع مالی، اختیارات قانونی و اولویت‌های توسعه‌ای مستمر بوده است؛ دولت مرکزی هم‌زمان هم ادعای حاکمیت بر سیاست‌های شهری را دارد و هم مسئولیت تأمین مالی آن را نمی‌پذیرد. در سطح افقی، تعارض میان شهرداری با سازمان‌های متعددی مثل سازمان حفاظت محیط زیست، وزارت راه، سازمان میراث فرهنگی و وزارت کشور وجود دارد که هر یک بخشی از فضای شهری را در اختیار دارند، اما هماهنگی میان آن‌ها ضعیف است. در سطح درونی، تعارض میان شورای شهر و شهرداری نیز گاه به مانعی جدی در برابر اجرای خط‌مشی‌های شهری تبدیل شده است. این سه‌گانه تعارض

نهادی، ریشه اصلی آن چیزی است که حناچی از آن به عنوان «تفرق مسئولیت‌ها» [۳۳] یاد می‌کند و تا زمانی که سیاست ملی شهری منسجمی چارچوب تعامل این نهادها را تعریف نکند، ادامه خواهد داشت.

ح) عدم تحقق اهداف طرح‌های جامع

یافته‌ها در نهایت نشان می‌دهند بخش عمده‌ای از اهداف و چشم‌اندازهای طرح‌های جامع پیشین و جاری محقق نشده‌اند. نصر اصفهانی [۴۲] با مرور گزارش تهران ۱۳۵۶ نشان می‌دهد هشدارهایی که در آن دوره درباره پیامدهای نابرابری فضایی داده شده بود، همچنان به قوت خود باقی است و حتی تشدید شده است. این واقعیت نشان می‌دهد مشکل اصلی نه در محتوای طرح‌ها بلکه در ساختار خط‌مشی‌گذاری‌ای است که اجرای پایدار آن‌ها را ناممکن می‌کند. ناکامی طرح‌های جامع شهری تهران را می‌توان از طریق چهار عامل ساختاری تبیین کرد. نخست، شکاف میان طراحی و اجرا؛ طرح‌های جامع اغلب با رویکردی آرمان‌گرایانه و فارغ از محدودیت‌های اجرایی تهیه می‌شوند. طرح جامع ۱۳۸۶ تهران با وجود کیفیت بالای محتوایی، در مواجهه با واقعیت‌های نهادی، از جمله فقدان منابع مالی پایدار و تعارض منافع بازیگران، به سند بایگانی تبدیل شد. دوم، فقدان نهادهای پایش مستقل: نهاد راهبری و پایش طرح‌های توسعه شهری که در سال ۱۳۹۸ احیا شد، نمونه‌ای از تلاش‌ها برای پر کردن این خلأ است، اما تاریخچه نشان می‌دهد چنین نهادهایی در مواجهه با فشارهای سیاسی و اقتصادی به سرعت تضعیف می‌شوند [۳۹]. سوم، انحراف تدریجی ضوابط: رفیعیان [۳۲] نشان می‌دهد در منطقه ۱ تهران حدود ۷۰ درصد انحراف از ضوابط طرح تفصیلی وجود دارد؛ این انحراف گسترده نشان می‌دهد طرح‌های جامع نه به دلیل ضعف محتوایی، بلکه به دلیل ناتوانی در مقاومت در برابر فشارهای رانتی شکست خورده‌اند. چهارم، فقدان پیوند با سیاست ملی شهری: طرح‌های جامع شهری در خلأ تهیه می‌شوند؛ بدون آنکه چارچوب ملی‌ای تکلیف منابع، اولویت‌ها و مسئولیت‌ها را روشن کرده باشد. این یعنی حتی بهترین طرح جامع نیز بدون پشتوانه سیاست ملی شهری محکوم به ناکامی است. در مجموع، الگوی تکرارشونده ناکامی طرح‌های جامع تهران گویاترین شاهد بر این ادعاست که مشکل اصلی خط‌مشی‌گذاری شهری تهران نه فقدان برنامه، بلکه فقدان آن لایه میانی سیاستی است که اجرای پایدار برنامه‌ها را ممکن سازد.

ط) ظهور و تقویت بازیگران شبکه‌ای در مدیریت شهری

تحقق پارادایم حکمرانی شبکه‌ای مستلزم حضور فعال بازیگران متنوعی فراتر از دولت و شهرداری است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد در تهران، این بازیگران طی دو دهه اخیر به تدریج در عرصه خط‌مشی‌گذاری شهری حضور یافته‌اند، هرچند این حضور هنوز پراکنده، ناپایدار و فاقد انسجام نهادی است.

تجربه شورای پنجم (۱۳۹۶-۱۴۰۰) نشان داد نهاد شورا، در صورت همراهی با جامعه مدنی و رسانه‌ها، می‌تواند نقش تعدیل‌کننده جدی در برابر رژیم شهرفروشی ایفا کند و در توقف صدور مجوزهای غیرقانونی مؤثر واقع شود. سازمان‌های مردم‌نهاد و تشکلهای زیست‌محیطی نیز طی سال‌های اخیر در فضای خط‌مشی‌گذاری شهری تهران فعال‌تر شده‌اند. فشار این تشکلهای در حوزه‌هایی مثل حفاظت از باغ‌ها، مقابله با ساخت‌وسازهای غیرمجاز و کاهش آلودگی هوا، گاه توانسته برخی خط‌مشی‌های شهری را تحت تأثیر قرار دهد. با این حال، محدودیت‌های قانونی و ضعف جامعه مدنی در ایران، این بازیگران را از ایفای نقش کامل خود در حکمرانی شبکه‌ای باز می‌دارد.

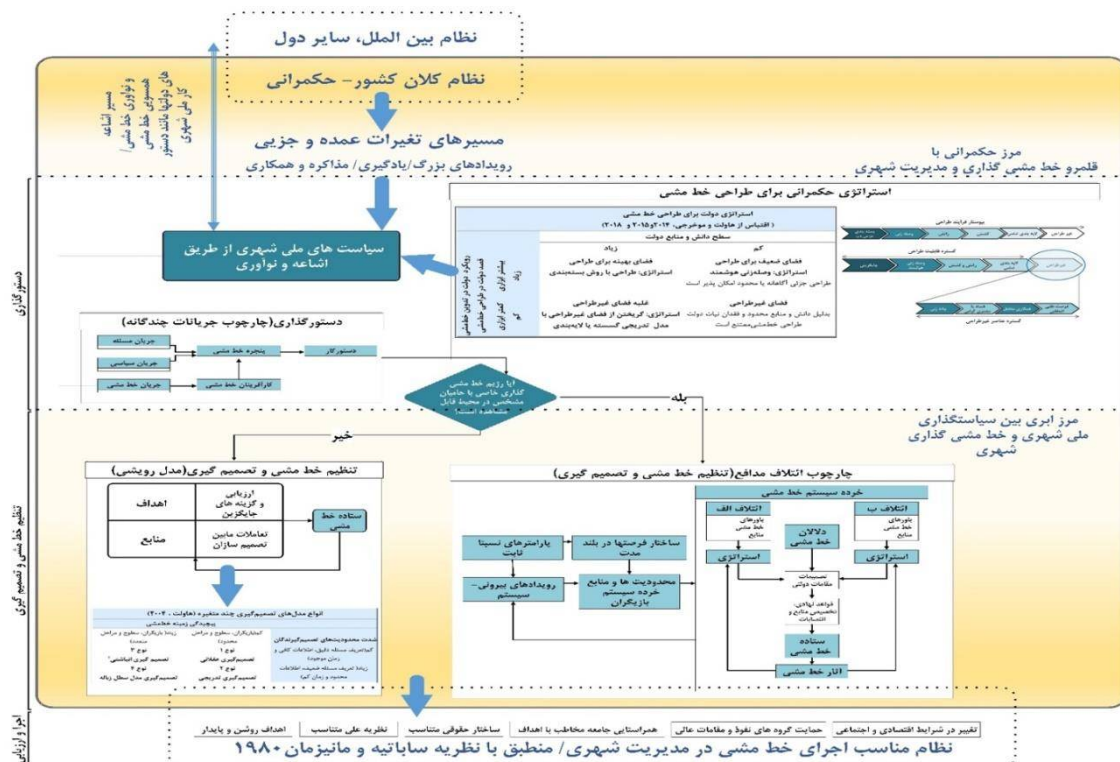
شورایاری‌های محلات که از سال ۱۳۷۹ شکل گرفتند، نیز نمونه‌ای از تلاش برای نهادینه کردن مشارکت شهروندی در سطح خرد هستند. اگرچه این نهادها در عمل اغلب با محدودیت‌های اختیاری، منابعی و ارتباطی مواجه‌اند، اما وجود آن‌ها نشانه‌ای از گذار تدریجی به سمت حکمرانی شبکه‌ای است. در مجموع، این بازیگران شبکه‌ای هنوز در مرحله شکل‌گیری هستند و فقدان چارچوب قانونی منسجم، که همان سیاست ملی شهری است، مانع از تبدیل شدن آن‌ها به بازیگران مؤثر و پایدار در فضای خط‌مشی‌گذاری شهری تهران می‌شود.

۴-۳. مدل مفهومی فضای خط‌مشی‌گذاری شهری تهران

مدل مفهومی پیشنهادی مستقیم از دل یافته‌های این پژوهش استخراج شده است. واقعیت تهران، که در آن گاهی رژیم خط‌مشی پایداری وجود دارد و گاهی ندارد، نیازمند مدلی بود که هر دو حالت را پوشش دهد.

مدل مفهومی پیشنهادی، چارچوب جریان‌های چندگانه، چارچوب ائتلاف مدافع، چرخه مراحل تصمیم‌گیری و حلقه تصمیم‌گیری رویشی را در یک سیستم یکپارچه و پویا ترکیب می‌کند. محور اصلی این مدل، پرسشی کلیدی در مرحله دستورگذاری است: آیا رژیم خط‌مشی مشخص و پایداری با حامیان برجسته و زیرساخت‌های نهادی در محیط سیاسی وجود دارد یا خیر؟

در حالت اول که رژیم خط‌مشی پایداری وجود دارد، فرایند طراحی و تنظیم خط‌مشی از مسیر چارچوب ائتلاف مدافع هدایت می‌شود. در این مسیر، شبکه‌های ذی‌نفعان، زیرنظام‌های خط‌مشی و تعامل بین بازیگران محور اصلی خط‌مشی‌گذاری هستند. موفقیت در این مسیر به انسجام ائتلاف‌ها، توافق ضمنی بین بازیگران کلیدی، پایداری منابع و حمایت سیاسی وابسته است. مدل مفهومی ارائه‌شده در شکل ۲ نشان می‌دهد محور تصمیم‌گیری در خط‌مشی‌گذاری شهری تهران، پرسش از وجود داشتن یا نداشتن رژیم خط‌مشی پایدار است. پاسخ به این پرسش، فرایند را به دو مسیر متفاوت هدایت می‌کند: مسیر ائتلاف مدافع در شرایط ثبات نهادی و مسیر تصمیم‌گیری رویشی در شرایط بی‌ثباتی و مسائل بدخیم.



شکل ۲. مدل مفهومی فضای خط‌مشی‌گذاری شهری تهران از منظر سیاست‌های ملی شهری

۴-۳-۱. راهنمای کاربرد مدل برای سیاستگذاران و پژوهشگران

مدل مفهومی ارائه‌شده را می‌توان در دو موقعیت متفاوت به کار گرفت: تحلیل وضعیت موجود و طراحی مداخله سیاستی.

در موقعیت تحلیل، پژوهشگر یا سیاستگذار باید این مراحل را طی کند:

گام اول: تشخیص وضعیت رژیم: آیا در حوزه مورد مطالعه (مثلاً مسکن، حمل‌ونقل یا محیط زیست شهری) رژیم خط‌مشی پایداری با ائتلاف مشخص، منابع تعریف‌شده و چارچوب نهادی روشن وجود دارد؟ اگر بله، مسیر ائتلاف مدافع را دنبال کن. اگر خیر، وارد مسیر تصمیم‌گیری رویشی شو.

گام دوم: شناسایی بازیگران و منافع: در هر مسیر، بازیگران کلیدی، منافع آن‌ها و شبکه‌های ارتباطی‌شان را شناسایی کن. این شناخت تعیین می‌کند که کدام ائتلاف‌ها قابل شکل‌گیری هستند و کدام تعارض‌ها غیرقابل حل‌اند.

گام سوم: ارزیابی نسبت با سیاست ملی شهری: آیا خطمشی مورد نظر با چارچوب سیاست ملی شهری همخوانی دارد؟ اگر این چارچوب وجود ندارد (مثل وضعیت ایران)، چه خلأهایی باید پیش از طراحی خطمشی پر شوند؟

در موقعیت طراحی مداخله، چنانچه رژیم پایداری وجود دارد، می‌توان از ظرفیت ائتلاف‌های موجود بهره برد (با احتیاط نسبت به قفل‌شدگی نهادی). اما در غیاب رژیم پایدار، سیاست‌گذار باید به جای طرح‌های جامع یک‌باره، مداخلات کوچک، آزمون‌پذیر و قابل اصلاح را در دستور کار قرار دهد. به عنوان مثال، برای اصلاح رژیم شهرفروشی، می‌توان ائتلافی از حامیان اصلاح (شورای شهر، سمن‌ها) تشکیل داد و با مداخلات گام‌به‌گام (نظیر اجرای قانون درآمدهای پایدار) در راستای شکل‌دهی به سیاست ملی شهری حرکت کرد.

۵. بحث

یافته‌های پژوهش حاضر تصویری چندلایه از تحولات پارادایمیک خطمشی‌گذاری شهری تهران ارائه می‌دهد که در پرتو ادبیات نظری موجود قابل تأمل است.

۵-۱. از کالبد تا حکمرانی: مسیری ناتمام

یافته‌ها نشان می‌دهد گذار از پارادایم اول به پارادایم سوم نه خطی بوده و نه بدون بازگشت. این یافته با نظریه هال [۱۱] درباره تغییرات پارادایمیک سیاستی همخوان است؛ بر این اساس، تغییر پارادایم‌ها معمولاً نه از مسیر یادگیری تدریجی، بلکه در پی انباشت بحران‌ها رخ می‌دهد.

در مورد تهران، بحران مالی دهه ۱۳۶۰ نقطه عطفی بود که به جای حرکت به سمت اصلاح ساختاری و شکل‌گیری سازوکارهای پایدار مالی (که می‌توانست ذیل منطق سیاست ملی شهری قرار گیرد)، به ظهور رژیم شهرفروشی به عنوان راه حل فوری انجامید. این راه حل اگرچه در کوتاه‌مدت پاسخ‌گوی بحران مالی بود، اما در بلندمدت زمینه‌ساز شکل‌گیری چرخه‌ای پایدار از وابستگی به درآمدهای ناپایدار و تعارض منافع شد که اکنون بیش از سه دهه است که ادامه دارد.

این یافته همچنین با نظریه بازخورد خطمشی پیرسون^۱ [۴۳] قابل توضیح است؛ بر اساس این دیدگاه، سیاست‌ها خود محیط نهادی و سیاسی را بازتولید می‌کنند. در همین راستا، رژیم شهرفروشی با ایجاد شبکه‌ای از ذی‌نفعان متکثر (از مالکان زمین تا سازندگان و مدیران شهری)، ساختاری ایجاد کرده است که تغییر آن حتی در شرایط اراده سیاسی نیز با مقاومت نهادی مواجه می‌شود.

ماندگاری سده‌های رژیم شهرفروشی را می‌توان از طریق چهار مکانیزم تقویت‌کننده متقابل تبیین کرد:

- وابستگی مالی ساختاری: شهرداری‌ها در غیاب منابع درآمدی پایدار، چاره‌ای جز تداوم تراکم‌فروشی نداشتند.
- اشتراک منافع دولت مرکزی و محلی: آخوندی [۵] تصریح می‌کند: «اشتراک منافع دولت محلی و دولت مرکزی ریشه همین فساد است»؛ دولت مرکزی که باید ناظر رفتار شهرداری باشد، خود ذی‌نفع این رژیم بود.
- شبکه‌های رانت‌محور: ائتلافی از صاحبان مستغلات، سازندگان، نهادهای مالی و مدیران شهری شکل گرفت که از این رژیم بهره می‌بردند و در برابر هرگونه اصلاح مقاومت می‌کردند.
- هزینه بالای خروج: هر مدیر شهری که می‌خواست از این رژیم خارج شود، با کسری بودجه فوری مواجه می‌شد بدون آنکه منبع درآمدی جایگزینی در اختیار داشته باشد همان چیزی که نودزپور [۴۱] از آن به عنوان «کاهش سهم اعتباری دولت بدون کاهش دخالت» یاد می‌کند. این چهار مکانیزم با هم یک تله پایداری ایجاد کرده‌اند که خروج از آن را حتی برای بازیگرانی که اراده اصلاح دارند، بسیار دشوار می‌سازد.

۵-۲. نزاع دو رژیم و معنای آن برای سیاست ملی شهری

نزاع میان رژیم شهرفروشی و رژیم شهرنفروشی که یافته‌ها آن را به عنوان محور اصلی تعارض‌های خط‌مشی‌گذاری شهری تهران در دو دهه اخیر شناسایی کرده، در واقع بازتاب تعارضی عمیق‌تر میان دو منطق متفاوت در حکمرانی شهری است. از منظر نظریه رژیم شهری استون (۱۹۸۹)، رژیم شهرفروشی نمونه‌ای از ماشین رشد است که در آن ائتلافی از صاحبان مستغلات، سازندگان و مدیران شهری حول اقتصاد سیاسی زمین و مستغلات شکل گرفته است. در مقابل، رژیم شهرنفروشی تلاشی است برای گذار به رژیم مرفقی که در آن طبقه متوسط و جامعه مدنی خواهان کنترل رشد، حفاظت از محیط زیست و مدیریت متکثر و چندسطحی هستند.

این تعارض از منظر مفهوم سیاست ملی شهری توروک (۲۰۱۴) نیز قابل تحلیل است. وی استدلال می‌کند که یکی از دلایل ضرورت سیاست ملی شهری، جلوگیری از رفتارهای سوداگرانه شهرداری‌ها در مستغلات است. فقدان سیاست ملی شهری منسجم در ایران زمینه را برای تداوم رژیم شهرفروشی فراهم کرده است؛ چراکه نه چارچوب قانونی پایداری برای درآمدهای شهری وجود دارد و نه سازوکار نظارتی ملی که شهرداری‌ها را از این رویه باز دارد.

۵-۳. مسائل بدخیم و ناکامی مدل‌های خطی

یافته‌ها نشان می‌دهد مسائل شهری تهران واجد ویژگی‌های کامل مسائل بدخیم هستند؛ نه تعریف مشخص دارند، نه راه حل قطعی و نه معیار موفقیت واضح. این ویژگی‌ها توضیح می‌دهد که چرا طرح‌های جامع متعدد در تحقق اهداف خود ناکام مانده‌اند. مدل‌های خطی و جامع برنامه‌ریزی که فرض می‌کنند می‌توان مسائل پیچیده شهری را از طریق طراحی دقیق و اجرای مرحله‌به‌مرحله حل کرد، در مواجهه با واقعیت پیچیده تهران ناکام مانده‌اند. این یافته با نظریه ساباتیه^۱ همخوانی دارد که تأکید می‌کند در شرایط پیچیدگی نهادی، رویکردهای تدریجی و یادگیرنده کارآمدتر از برنامه‌ریزی جامع هستند [۴۴].

۵-۴. نسبت پارادایم‌های خط‌مشی‌گذاری شهری تهران با سیاست ملی شهری

یافته‌ها نشان می‌دهد هر یک از سه پارادایم خط‌مشی‌گذاری شهری تهران رابطه‌ای متفاوت و معنادار با مفهوم سیاست ملی شهری داشته است. فهم این رابطه، کلید اصلی درک چرایی ناکامی‌های مکرر در خط‌مشی‌گذاری شهری تهران است.

پارادایم اول و غیاب سیاست ملی شهری

در دوره حاکمیت پارادایم اول، نه تنها سیاست ملی شهری منسجمی وجود نداشت، بلکه اساساً نیاز به آن احساس نمی‌شد. در این پارادایم، شهر موجودیتی فیزیکی تلقی می‌شد که می‌توان آن را از طریق طرح‌های جامع کالبدی مدیریت کرد. ابعاد سیاسی، نهادی و تعامل میان ذی‌نفعان در این چارچوب جایی نداشت. دولت مرکزی از بالا تصمیم می‌گرفت و شهرداری‌ها اجرا می‌کردند؛ این نوعی سیاست ملی شهری ضمنی بود که در قالب برنامه‌های عمرانی و طرح‌های جامع تجلی می‌یافت، اما فاقد انسجام، مشارکت ذی‌نفعان و سازوکار پایش بود. توروک (۲۰۱۴) تأکید می‌کند که سیاست ملی شهری واقعی نیازمند تعریف روشن نقش‌ها، هماهنگی بین سطوح ملی و محلی و تضمین منابع پایدار است، هیچ‌یک از این عناصر در پارادایم اول وجود نداشت. نتیجه این غیاب، شکل‌گیری ساختاری بود که در آن شهرداری‌ها از ابتدا فاقد استقلال مالی و سیاستی لازم برای اداره مستقل شهر بودند.

پارادایم دوم و جایگزینی شهرفروشی به جای سیاست ملی شهری

مهم‌ترین یافته پژوهش درباره نسبت پارادایم‌ها با سیاست ملی شهری در پارادایم دوم نهفته است. بحران مالی دهه ۱۳۶۰ شهرداری‌ها را در موقعیتی قرار داد که نیازمند یک تصمیم ساختاری اساسی بودند: یا دولت مرکزی منابع پایدار مالی برای شهرداری‌ها تعریف می‌کرد، که این همان کارکرد محوری سیاست ملی شهری است، یا شهرداری‌ها راه دیگری پیدا می‌کردند. در

غیاب سیاست ملی شهری، رژیم شهرفروشی جای آن را پر کرد. به بیان دیگر، شهرفروشی پیش از آنکه یک انتخاب آگاهانه باشد، به احتمال زیاد پیامد ساختاری فقدان سیاست ملی شهری بوده است. البته باید توجه داشت که عوامل دیگری مانند ساختار تمرکزگرایی دولت، اقتصاد زمین، قوانین شهری و رقابت‌های سیاسی نیز در شکل‌گیری این رژیم نقش داشته‌اند و فقدان سیاست ملی شهری را باید به عنوان یکی از عوامل اصلی، نه تنها عامل، در نظر گرفت.

این یافته با نظریه بازخورد خط‌مشی (پیرسون، ۱۹۹۳) قابل توضیح است. رژیم شهرفروشی با ایجاد شبکه‌ای از ذی‌نفعان ذی‌نفع، خود به مانعی در برابر شکل‌گیری سیاست ملی شهری تبدیل شد؛ چراکه هرگونه اصلاح ساختاری در نظام مالی شهری، مستقیم به منافع این شبکه آسیب می‌زد. در این چارچوب، همان‌گونه که آخوندی اشاره می‌کند، هم‌پوشانی منافع میان سطوح مختلف حکمرانی، امکان اصلاح ساختار را پیچیده‌تر کرده است. توروک (۲۰۱۴) نیز تصریح می‌کند که یکی از دلایل ضرورت سیاست ملی شهری، جلوگیری از همین رفتارهای سوداگرانه شهرداری‌ها در مستغلات است، رفتارهایی که نه نتیجه اراده بد، بلکه نتیجه ساختار معیوب مالی شهری بوده‌اند.

پارادایم سوم و ضرورت سیاست ملی شهری

یافته‌ها نشان می‌دهد گذار به پارادایم سوم بدون سیاست ملی شهری بسیار دشوار و کم اثر خواهد بود. این پارادایم سه الزام اساسی دارد که هر سه مستقیم به سیاست ملی شهری وابسته‌اند.

الزام اول، تأمین درآمدهای پایدار است. حکمرانی شبکه‌ای نیازمند شهرداری‌هایی است که از قید وابستگی به درآمدهای ناپایدار آزاد باشند. این آزادی بدون تعریف مالیه محلی پایدار در چارچوب سیاست ملی شهری ممکن نیست. تجربه قانون منابع مالی پایدار شهرداری‌ها نشان می‌دهد اراده سیاسی برای این اصلاح وجود دارد، اما بدون سیاست ملی شهری منسجم، این اصلاحات جزیره‌ای و ناپایدار خواهند بود.

الزام دوم، هماهنگی نهادی است. پارادایم سوم نیازمند تعامل سازنده بین شهرداری، وزارت کشور، وزارت مسکن و شهرسازی، شورای شهر و سایر ذی‌نفعان است. این هماهنگی بدون چارچوب ملی که نقش‌ها، مسئولیت‌ها و سازوکارهای همکاری را تعریف کند، به تعارض‌های مزمن نهادی منجر می‌شود، همان چیزی که یافته‌ها آن را به‌وضوح نشان می‌دهند. الزام سوم، مدیریت مسائل بدخیم است. مسائل بدخیم شهری تهران، از آلودگی هوا تا بافت‌های فرسوده، ماهیتاً فرباختی و فراشه‌ری هستند. مدیریت آن‌ها نیازمند هماهنگی ملی، تخصیص منابع کافی و چارچوب سیاستی پایدار است که تنها سیاست ملی شهری می‌تواند آن را فراهم کند.

در مجموع، رابطه پارادایم‌های خط‌مشی‌گذاری شهری تهران با سیاست ملی شهری را می‌توان چنین خلاصه کرد: پارادایم اول سیاست ملی شهری را غیرضروری می‌داند، پارادایم دوم جای آن را پر کرد با رژیم شهرفروشی، و پارادایم سوم بدون آن با محدودیت‌های جدی مواجه خواهد بود. این تحلیل نشان می‌دهد شکاف اصلی در خط‌مشی‌گذاری شهری تهران نه فقدان طرح و برنامه، بلکه فقدان آن لایه میانی سیاستی است که بتواند اقدامات پراکنده شهری را در یک چارچوب ملی منسجم هماهنگ کند.

۶. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف شناسایی و تبیین پارادایم‌های خط‌مشی‌گذاری شهری تهران در نسبت با مفهوم سیاست ملی شهری، نشان می‌دهد خط‌مشی‌گذاری شهری تهران طی هفت دهه گذشته از پارادایم برنامه‌ریزی کالبدی - فضایی به پارادایم مدیریت رشد شهری و سپس به پارادایم حکمرانی شبکه‌ای گذار کرده است. با این حال، این گذار نه به صورت خطی و کامل، بلکه در بستری از تداوم الگوهای پیشین، تعارض‌های نهادی و منازعات قدرت رخ داده است. یافته‌ها نشان داد مهم‌ترین شکاف ساختاری در تمامی این دوره‌ها، فقدان یک سیاست ملی شهری منسجم بوده است؛ خلأیی که به شکل‌گیری الگوهای واکنشی، ناپیوستگی سیاست‌ها و وابستگی مدیریت شهری به منابع درآمدی ناپایدار منجر شده است.

نتایج پژوهش همچنین بیانگر آن است که نزاع میان دو رژیم شهرفروشی و شهرنفرشی به محور اصلی تحولات معاصر خط‌مشی‌گذاری شهری تهران تبدیل شده است. این تقابل فقط یک اختلاف مدیریتی یا مالی نیست، بلکه بازتاب تعارض دو

منطق متفاوت حکمرانی شهری و دو الگوی متمایز توزیع قدرت و منابع در شهر است. در چنین شرایطی، بسیاری از مسائل شهری تهران در قالب مسائل بدخیم بازتولید شده و در برابر راه‌حل‌های متعارف مقاومت کرده‌اند. از سوی دیگر، شواهد بیانگر آن است که گرچه نشانه‌هایی از حرکت به سوی حکمرانی شبکه‌ای، مشارکت ذی‌نفعان و تقویت رویکردهای چندسطحی در سال‌های اخیر مشاهده می‌شود، اما تحقق این پارادایم بدون ایجاد درآمدهای پایدار شهری، ارتقای هماهنگی نهادی و استقرار سیاست ملی شهری امکان‌پذیر نخواهد بود. بر این اساس، مدل مفهومی ارائه‌شده در این پژوهش نشان می‌دهد پارادایم‌های سیاستی، رژیم‌های شهری، مسائل بدخیم و سیاست ملی شهری در یک رابطه متقابل و پویا قرار دارند و هرگونه اصلاح پایدار در مدیریت شهری مستلزم توجه هم‌زمان به تمامی این ابعاد است. در نهایت، می‌توان بیان داشت که مسئله اصلی خط‌مشی‌گذاری شهری تهران نه کمبود برنامه‌ها و اسناد توسعه‌ای، بلکه فقدان یک چارچوب ملی هماهنگ‌کننده برای هم‌راستاسازی بازیگران، نهادها و سیاست‌هاست. از این‌رو، تدوین و استقرار یک سیاست ملی شهری منسجم می‌تواند به عنوان پیش‌شرط گذار موفق به حکمرانی شهری پایدار و ارتقای ظرفیت مواجهه با چالش‌های پیچیده کلان‌شهر تهران تلقی شود.

۶-۱. پیشنهادهای کاربردی

بر اساس یافته‌های پژوهش و مدل مفهومی ارائه‌شده، پیشنهادهای زیر برای بهبود وضعیت خط‌مشی‌گذاری شهری تهران ارائه می‌شود:

نخست، تدوین سیاست ملی شهری منسجم به عنوان اولویت بنیادین. فقدان این سیاست، ریشه بسیاری از ناکارآمدی‌های موجود است. این سیاست باید چارچوب قانونی روشنی برای درآمدهای پایدار شهری، تقسیم وظایف میان دولت مرکزی و مدیریت شهری و معیارهای ارزیابی عملکرد شهری فراهم کند.

دوم، اصلاح ساختار مالی شهرداری‌ها از طریق کاهش وابستگی به درآمدهای ناپایدار ناشی از فروش تراکم و تغییر کاربری. تجربه قانون منابع مالی پایدار شهرداری‌ها نشان می‌دهد که اراده سیاسی برای این اصلاح وجود دارد، اما اجرای کامل آن نیازمند پشتوانه نهادی و سیاسی قوی‌تر است.

سوم، تقویت نهادهای میانجی میان سطوح ملی و محلی خط‌مشی‌گذاری. نهاد پایش و راهبری طرح‌های توسعه شهری که در سال ۱۳۹۸ احیا شد، نمونه‌ای از این نهادهاست. تجربه تاریخی نشان می‌دهد این نهادها در مواجهه با فشارهای سیاسی و اقتصادی آسیب‌پذیرند و به پشتوانه قانونی محکم‌تری نیاز دارند.

چهارم، پذیرش رویکرد تصمیم‌گیری رویشی در مواجهه با مسائل بدخیم شهری. به جای اصرار بر طرح‌های جامع بلندپروازانه که اغلب در مرحله اجرا شکست می‌خورند، سیاستگذاران باید راهکارهای مقیاس کوچک، آزمون‌پذیر و قابل اصلاح را در دستور کار قرار دهند.

پنجم، نهادینه‌سازی مشارکت شهروندی به عنوان سازوکار واقعی حکمرانی، نه فقط یک الزام شکلی. مشارکت مؤثر می‌تواند به افزایش مشروعیت سیاست‌ها و پایداری اجرای آن‌ها منجر شود؛ همان‌گونه که در ادبیات نیز تأکید شده است که «در هرچه سهیم باشی، در برابر آن مسئول‌تر عمل می‌کنی».

۶-۲. محدودیت‌های پژوهش و پیشنهادهای آینده

این پژوهش با محدودیت‌هایی مواجه است. نخست، تمرکز آن بر کلان‌شهر تهران موجب می‌شود که تعمیم‌پذیری یافته‌ها به سایر کلان‌شهرهای ایران با احتیاط صورت گیرد. دوم، پویایی و تغییرپذیری بالای نظام خط‌مشی‌گذاری شهری به این معناست که یافته‌های پژوهش ماهیتی زمانمند داشته و نیازمند بازنگری در دوره‌های آتی هستند.

پژوهش‌های آینده می‌توانند در چند مسیر این کار را تکمیل کنند: مطالعه تطبیقی پارادایم‌های خط‌مشی‌گذاری شهری در سایر کلان‌شهرهای ایران؛ ارزیابی تجربه‌های موفق بین‌المللی در گذار از رژیم‌های شهرفروشی به رژیم‌های پایدار شهری؛ و تحلیل دقیق‌تر نقش سیاست ملی شهری در کشورهایی با ساختار حکمرانی مشابه ایران.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد مسئله اصلی ختامشی‌گذاری شهری تهران نه فقدان اسناد و طرح‌ها، بلکه نبود یک پارادایم سیاستی منسجم و یکپارچه است که بتواند میان اهداف توسعه‌ای، منافع بازیگران نهادی و الزامات سیاست ملی شهری هماهنگی ایجاد کند. در این چارچوب، گذار به پارادایم حکمرانی شبکه‌ای آغاز شده است، اما تحقق کامل آن مستلزم اصلاحات بنیادین در نظام مالی شهری، ساختار حقوقی مدیریت شهری و الگوی رابطه دولت مرکزی و مدیریت شهری است.

منابع

1. Pacione M. Urban geography: A global perspective. *Taylor & Francis*; 2009.
2. Barakpour N, Asadi I. Urban Management and Governance. *Tehran: University of Art*; 2009.
3. Khaliji MA, Sarvar R, Zarabadi ZSS. Analysis of types of fragmentation and their impact on integrated management of the capital's periphery. *Human Settlements Planning Studies*. 2018;13(2):283–303. [persian]
4. Kazemian G. Urban Policy Making; The neglected layer of urban management in Iran. *Theoretical Foundations in Urban Studies*. 2016;1:121-42. [persian].
5. Akhoundi A. Interview on Urban Management, City-Selling and Municipal Governance [Internet]. 2021. Available from: <https://www.sharghdaily.com/fa/tiny/news-413803>. [persian]
6. Ziayari K, Alihoseini M, Behzadired M. Analysis and identification of key drivers of city development strategy (CDS) in urban planning: a futures studies approach. *Sustainable City*. 2021;5(3):39–60. [persian]
7. Sarvar R, Khaliji MA. Urban policy making in the domain of wicked urban problems. *Urban Environment Policy Quarterly*. 2021;1(1). [persian]
8. Mohammadi G, Gholipor Souteh R, Kazemian G. A meta-theoretical review of public policy process theories: developing an innovative conceptual framework based on the Mintzberg matrix. *Society, Culture and Media Quarterly*. 2025;14(54):39–83. [persian]
9. UN-Habitat. National Urban Policy: A Guiding Framework. *Nairobi: United Nations Human Settlements Programme*; 2015.
10. Mirmosafa M, Habibi S, Basirat M, Aslipour H. Identifying and prioritizing influential thematic areas in developing Iran's national urban policy. *Public Policy Quarterly*. 2022;8(4):9–25. [persian]
11. Hall PA. Policy paradigms, social learning, and the state: The case of economic policymaking in Britain. *Comparative politics*. 1993; 1:275-96.
12. Sewerin S, Cashore B, Howlett M. New pathways to paradigm change in public policy: combining insights from policy design, mix and feedback. *Policy Polit*. 2022;50(3):442–59.
13. Fransen J, van Dijk MP, Edelenbos J. Urban Planning, Management and Governance in Emerging Economies. *Cheltenham: Edward Elgar Publishing*; 2021.
14. Lukes S. Power: A radical view [2005]. *Contemporary sociological theory*. 2012;266(3):1-22.
15. Logan JR, Molotch HL. Urban Fortunes: The Political Economy of Place. Berkeley: University of California Press; 1987.
16. Stone CN. Regime Politics: Governing Atlanta, 1946-1988. *Lawrence: University Press of Kansas*; 1989.
17. Hyra D, Steil J. The New Urban Crisis and Urban Regime Theory. *Urban Affairs Review*. 2021;57(4):1041–57.
18. Dahl RA. Who Governs? Democracy and Power in an American City. *New Haven and London: Yale University Press*; 1961. 355 p. (Yale Studies in Political Science).
19. Rittel HWJ, Webber MM. Dilemmas in a general theory of planning. *Policy Sci*. 1973;4(2):155–69.
20. Termeer CJAM, Dewulf A, Biesbroek R. Governing wicked problems in urban settings: a systematic review. *Urban Studies*. 2021;58(4):777–93.
21. Karimi Molleh A. Wicked policy problems and the necessity of strategic revision in traditional patterns of state-nation relations in Iran. 2018. [persian]
22. Balint PJ, Stewart RE, Desai A, Walters LC. Wicked Environmental Problems: Managing Uncertainty and Conflict. *Washington: Island Press*; 2011.
23. Moroni S, Buitelaar E, Sorel N, Cozzolino S. Simple planning rules for complex urban problems: toward legal certainty for spatial flexibility. *J Plan Educ Res*. 2020;40(3):320–31.
24. OECD, UN-Habitat. Global State of National Urban Policy 2024: Building Resilience and Promoting Adequate, Inclusive and Sustainable Housing. *Nairobi: UN-Habitat*; 2024.
25. OECD, UN-Habitat, Cities Alliance. Global State of National Urban Policy 2021: Achieving the Sustainable Development Goals and Delivering Climate Action. *Nairobi: UN-Habitat*; 2021.

26. Hohmann RP. National Urban Policies: A policy lever to foster a new urban agenda? *RaumPlanung*. 2017;193(5):36-43.
27. Gholipour R. Organizational Decision Making and Public Policy Making. *Tehran: SAMT Publications*; 2017. [persian]
28. Turok I. The Evolution of National Urban Policies: A Global Overview. *Nairobi: UN-Habitat*; 2014.
29. Weible CM, Cairney P. Practical Lessons from Policy Theories. *Bristol: Policy Press*; 2021.
30. Braun V, Clarke V. Using thematic analysis in psychology. *Qual Res Psychol*. 2006;3(2):77–101.
31. Aliakbari K. Interview on Municipal Finance and Urban Development Revenue Sources [Internet]. 2021. Available from: <https://www.sharghdaily.com/fa/tiny/news-413799> [persian]
32. Rafieian M. Interview on Urban Planning Deviation and Master Plan Implementation in Tehran [Internet]. 2021. Available from: <https://www.sharghdaily.com/fa/tiny/news-413786> [persian]
33. Hanachi P. Interview on Urban Governance and City-Preservation Policy in Tehran [Internet]. 2019. Available from: <https://donya-e-eqtesad.com/fa/tiny/news-3629733> [persian]
34. Golpaygani A. Interview on Density Sales, Construction Permits and Urban Inequality in Tehran [Internet]. 2023. Available from: <https://www.sharghdaily.com/fa/tiny/news-884700> [persian]
35. Izadi MS. Interview on Urban Challenges and Master Plan of Tehran [Internet]. 2019. Available from: <https://donya-e-eqtesad.com/fa/tiny/news-3629736> [persian]
36. Lavajoo M, Arghan A, Zand Moghadam MR. Analyzing institutional strategies to achieve the goals of the Tehran urban complex plan. *Urban and Regional Development Planning*. 2023;8(25):119–54. doi:10.22054/URDP.2023.67110.1426 [persian]
37. Gheytsi Vand F, Sharif Zadeh F, Kazemian G, Hossein Pur D. Designing a public policy formulation model with a network governance approach: A case study of Tehran's public transportation. *Public Policy*. 2020;6(1):83–106. doi:10.22059/JPPOLICY.2020.76990 [persian]
38. Hanachi P. Interview on Sustainable Municipal Revenue Law and Urban Financial Reform [Internet]. 2022. Available from: <https://www.sharghdaily.com/fa/tiny/news-851167> [persian]
39. Islamic Consultative Assembly News Agency. *Comprehensive Urban and Rural Management Plan*. 2021. [persian]
40. Ministry of Roads, Development U. News Portal. 2022.
41. Nozarpour A. Interview on Government's Share in Municipal Budget and Urban Finance [Internet]. 2021. Available from: <https://www.sharghdaily.com/fa/tiny/news-413789> [persian]
42. Nasr Isfahani A. Interview on Tehran 1356 Report and Spatial Inequality in Urban Development [Internet]. 2019. Available from: <https://donya-e-eqtesad.com/fa/tiny/news-3629717> [persian]
43. Pierson P. When effect becomes cause: policy feedback and political change. *World Polit*. 1993;45(4):595–628.
44. Sabatier PA. The need for better theories. In: Sabatier PA, editor. *Theories of the Policy Process*. Boulder: Westview Press; 1999. p. 3–17.



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 استانداردها 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 راه‌حل‌هایی به دست آید که در برابر نوسانات و تغییرات داده‌ها نیز قابل قبول و موجه باقی بمانند [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 برآزش 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 برآزش 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 $10 \geq$ 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 $5 \geq$ 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:

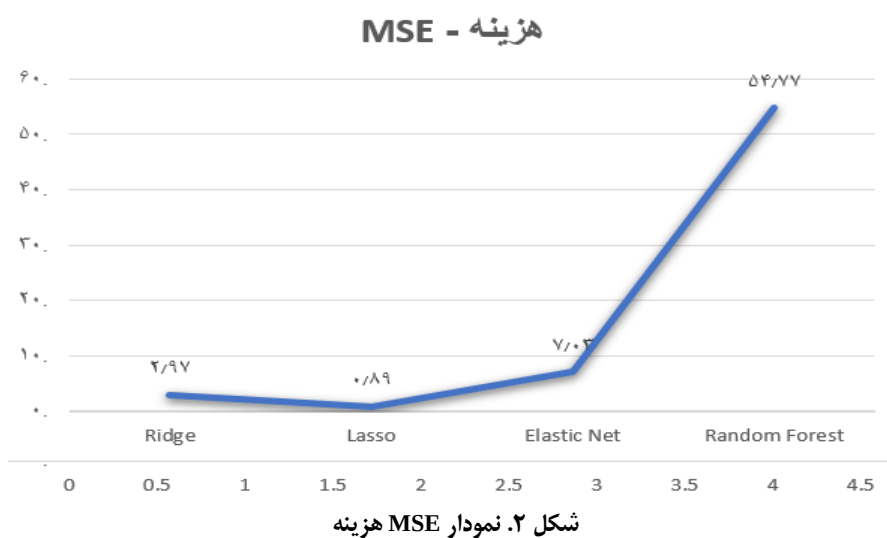
جدول ۶. مدل‌ها و معادلات استفاده‌شده

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



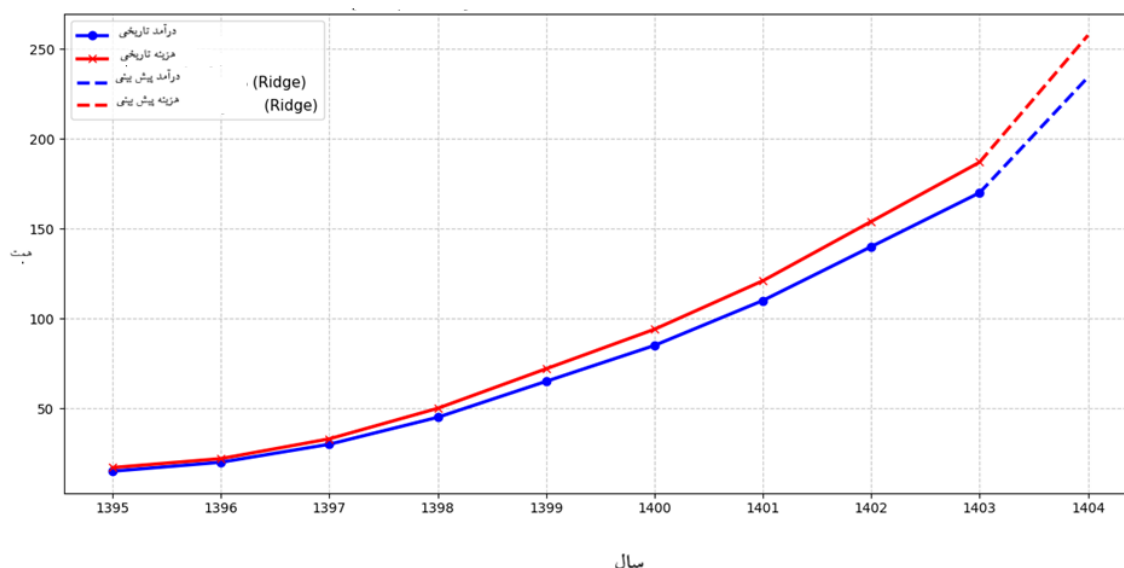
نتایج ارزیابی مدل‌ها با Cross-Validation نشان می‌دهد مدل *Lasso* با کمترین مقدار MSE و سپس *Ridge* بهترین عملکرد را در پیش‌بینی درآمد داشته و عملکرد قابل قبولی ارائه داده است.

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 *Lasso* و *Ridge* 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 ۱ 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.



Biophilic Landscape Design as a Strategy to Cope with the Water Crisis in Urban Spaces (Case Study: Stepped Landscape of Chamran Park, Karaj)

Setayesh Zandi Babaei^{1*}  | Mohammad Mahdi Poorhasan Mehrzanjani² 

1. Corresponding Author, MSc Graduate, Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: setayeshzandi80@ut.ac.ir

2. MSc Graduate, Urban Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: m.poorhasan@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received 28 March 2026

Revised 15 May 2026

Accepted 15 June 2026

Published Online 23 September 2026

Keywords:

Biophilic Design,
Ecological Resilience,
Stepped Landscape,
Water Crisis,
Water Resources Management.

ABSTRACT

This study aims to elucidate biophilic landscape design strategies as resilient ecological infrastructure to address the water crisis in urban spaces, focusing on the stepped landscape of Chamran Park in Karaj. The research is applied in purpose and descriptive-analytical in methodology. Data were collected through documentary studies and field evaluations. An integrated SWOT framework including the Internal Factor Evaluation (IFE) and External Factor Evaluation (EFE) matrices, together with the Quantitative Strategic Planning Matrix (QSPM), was employed for data analysis and strategy formulation. The results indicate that the IFE score of 2.63 and the EFE score of 2.29 place the study area in a “Competitive (ST)” strategic position. Based on the QSPM analysis, the strategy of “developing a gravity-fed water landscape with phytoremediation” achieved the highest Total Attractiveness Score (TAS = 6.28). It was followed by “smart flood management using multi-functional infrastructures” (TAS = 5.09), “evaporation-reducing biophilic microclimate creation” (TAS = 4.98), and “enhancing the sense of belonging through participatory landscape” (TAS = 4.01). The findings suggest that achieving a resilient biophilic landscape requires a transition from purely aesthetic approaches toward pragmatic design that integrates environmental-ecological, physical-spatial, perceptual-psychological, and managerial-policy dimensions. Such an approach can transform urban landscapes into gravity-based, self-sustaining ecological systems that reduce water consumption and enhance ecological resilience.

Cite this article: Zandi Babaei, S. & Poorhasan Mehrzanjani, M. M. (2026). Biophilic Landscape Design as a Strategy to Cope with the Water Crisis in Urban Spaces (Case Study: Stepped Landscape of Chamran Park, Karaj). *Urban Development Policy Making*, 3 (3), 517-540. DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.582643.1107>



© Authors retain the copyright and full publishing rights.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.582643.1107>

Introduction

Rapid urbanization and the ensuing disconnect between humans and nature have exacerbated environmental issues, particularly the severe water crisis in Iranian metropolises. Biophilic design offers a paradigm shift from purely decorative and energy-intensive water features to resilient ecological infrastructures. This study aims to develop operational biophilic design strategies for urban public spaces to sustainably manage the water crisis, focusing on the stepped landscape of Chamran Park in Karaj.

Materials and Methods

This applied, descriptive-analytical research utilized documentary studies and field evaluations for data collection. A conceptual model comprising four core dimensions—physical-spatial, environmental-ecological, perceptual-psychological, and managerial-policy—was developed. Data

analysis and strategy formulation were conducted using an evidence-based integrated SWOT framework to evaluate internal strengths/weaknesses and external opportunities/threats. Subsequently, the Quantitative Strategic Planning Matrix (QSPM) was employed to prioritize and rank the formulated competitive strategies based on their Total Attractiveness Scores (TAS).

Results

The Internal Factor Evaluation (IFE) matrix yielded a score of 2.63, indicating that the area's internal physical-ecological strengths (e.g., steep topography and rocky bedrock) outweigh its weaknesses. Conversely, the External Factor Evaluation (EFE) matrix score of 2.29 highlights a highly turbulent environment dominated by severe threats like groundwater depletion and climate change. The intersection of these scores places the project in the "Competitive (ST)" strategic position, demonstrating that internal strengths can be leveraged to mitigate external macro-climatic threats. Consequently, four competitive strategies were formulated. The QSPM analysis prioritized these strategies as follows: 1) Developing a gravity-fed water landscape with phytoremediation (TAS = 6.28); 2) Smart flood management using multi-functional infrastructures (TAS = 5.09); 3) Evaporation-reducing biophilic microclimate creation (TAS = 4.98); and 4) Enhancing the sense of belonging through participatory landscape (TAS = 4.01).

Discussion and Conclusion

The findings underscore that traditional, purely decorative landscaping is increasingly obsolete in the face of severe water shortages and climate change. Based on the conceptual model developed in this research, achieving a resilient biophilic landscape requires the synergistic integration of four core dimensions: physical-spatial, environmental-ecological, perceptual-psychological, and managerial-policy. The highest attractiveness score assigned to the gravity-fed phytoremediation strategy confirms that biophilic design must function as a living, self-sustaining ecological machine rather than a mere aesthetic addition. By leveraging the site's natural steep topography and incorporating native aquatic plant species (e.g., *Typha* and *Phragmites*) for biological filtration in stepped configurations, urban spaces can eliminate energy-intensive pumping, minimize evaporation, and significantly reduce water waste. Furthermore, the transition from a "consuming landscape" to a "resilient ecological infrastructure" necessitates actionable execution policies across all dimensions. These include replacing high-consumption conventional fountains with natural drainage systems, prioritizing biological shading over open water bodies to create microclimates, and employing smart IoT sensors for real-time flood monitoring and water quality assessment. Concurrently, fostering a participatory landscape through targeted citizen education programs enhances the community's sense of belonging and environmental stewardship. Ultimately, the implementation of these integrated strategies provides a pragmatic, sustainable framework for transforming Chamran Park—and similar urban spaces—into resilient ecological systems capable of mitigating the macro-climatic impacts of the water crisis while actively enhancing urban environmental quality.



طراحی منظر بیوفیلیک به مثابه راهبردی برای مواجهه با بحران آب در فضاهای شهری (نمونه موردی: منظر پلکانی پارک چمران کرج)

ستایش زندی بابائی^{۱*} | محمد مهدی پورحسن مهرزنجانی^۲

۱. نویسنده مسئول، دانش‌آموخته کارشناس ارشد مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: setayeshzandi80@ut.ac.ir
۲. دانش‌آموخته کارشناس ارشد علوم و مهندسی آبخیز - آبخیزداری شهری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: m.poorhasan@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی تاریخ‌های مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۰۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱ کلیدواژه: بحران آب، تاب‌آوری اکولوژیک، طراحی بیوفیلیک، مدیریت منابع آب، منظر پلکانی.	پژوهش حاضر با هدف تبیین راهبردهای طراحی منظر بیوفیلیک به عنوان یک زیرساخت اکولوژیک تاب‌آور برای مواجهه با بحران آب در فضاهای شهری (نمونه موردی: منظر پلکانی پارک چمران کرج) انجام شده است. این تحقیق از نظر هدف، کاربردی و از حیث روش، توصیفی - تحلیلی است. گردآوری داده‌ها از طریق مطالعات اسنادی و برداشتهای میدانی انجام شد و برای تحلیل داده‌ها از تکنیک یکپارچه تحلیل SWOT شامل ماتریس ارزیابی عوامل داخلی (IFE) و خارجی (EFE) و همچنین، ماتریس برنامه‌ریزی راهبردی کمی (QSPM) استفاده شد. نتایج نشان داد امتیاز ماتریس IFE برابر با ۲/۶۳ و امتیاز ماتریس EFE برابر با ۲/۲۹ است که بیانگر قرارگیری محدوده مورد مطالعه در موقعیت راهبردی «رقابتی (ST)» است. بر اساس نتایج ماتریس QSPM، راهبرد «توسعه منظر آب‌محور ثقلی با فیلتراسیون گیاهی» با امتیاز جذابیت کل ۶/۲۸ در رتبه نخست قرار گرفت؛ پس از آن راهبردهای «مدیریت هوشمند سیلاب با زیرساخت‌های چندعملکردی» با امتیاز ۵/۰۹، «میکروکلیماسازی بیوفیلیک کاهنده تبخیر» با امتیاز ۴/۹۸ و «منظر مشارکت‌محور» با امتیاز ۴/۰۱ در اولویت‌های بعدی قرار دارند. نتایج نشان می‌دهد دستیابی به منظر بیوفیلیک تاب‌آور مستلزم گذار از رویکردهای صرفاً زیبایی‌شناختی به سمت طراحی عمل‌گرا و هم‌افزایی چهار بُعد محیط زیستی، کالبدی، ادراکی و مدیریتی است. این رویکرد می‌تواند منظر شهری را به سیستمی پویا مبتنی بر نیروی گرانش و چرخه‌های طبیعی تصفیه تبدیل کند و در نتیجه، مصرف منابع آبی را کاهش داده و تاب‌آوری اکولوژیک فضاهای شهری را ارتقا دهد.

استناد: زندی بابائی، ستایش و پورحسن مهرزنجانی، محمد مهدی (۱۴۰۵). طراحی منظر بیوفیلیک به مثابه راهبردی برای مواجهه با بحران آب در فضاهای شهری (نمونه موردی: منظر پلکانی پارک چمران کرج). *سیاست‌گذاری پیشرفت شهری*، ۳ (۳) ۵۱۷-۵۴۰.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.582643.1107>



مقدمه

توسعه سریع و شتابان شهرنشینی در دهه‌های اخیر موجب شده است که ساختارهای سخت و صنعتی شهرها بر فضاهای طبیعی غلبه کنند و این مسئله موجب ایجاد گسست عمیق بین انسان و طبیعت شده که پیامدهای گسترده‌ای در ابعاد محیط زیستی و اجتماعی شهرها به همراه داشته است [۱ و ۲]. رویکرد بیوفیلیک^۱ که به نوعی زیرمجموعه پایداری به شمار می‌رود، یکی از رویکردهایی است که در حوزه‌های شهرسازی، طراحی شهری، معماری و مطالعات شهری توجه کارشناسان را به خود جلب کرده است [۳]. این رویکرد، که در برخورد با طبیعت نگرشی حداکثری محسوب می‌شود، از دغدغه‌های حداقلی برای حفظ محیط زیست فراتر می‌رود و بر پیوند و همزیستی مردم با طبیعت در قالب فرایند طراحی محیط مصنوع تأکید دارد. این گسست نه تنها پیامدهای روان‌شناختی نامطلوبی مانند افزایش استرس و اختلالات روانی شهروندان را به دنبال داشته، بلکه از نظر محیط زیستی به تخریب اکوسیستم‌های خرد شهری و تشدید پدیده جزایر حرارتی منجر شده است. رویکرد بیوفیلیک عملکرد سیستم‌ها و اجزای شهرها را با اتخاذ راهبردهای سبز برای دستیابی به محیط سالم‌تر و ساختار شهری سازگار و قوی در مواجهه با بلایا افزایش می‌دهد. بیوفیلیا^۲ مبنای نظری بالقوه‌ای برای توضیح و افزایش مزایای سلامت و تندرستی طبیعت شهری فراهم می‌کند و این مزایا می‌توانند به بهبود قابل توجه زیست‌پذیری در مناطق شهری و حتی کاهش هزینه‌های سلامت جسمی و روانی منجر شوند [۴].

در کلان‌شهرهای ایران این اثرات سوء کالبدی با بحرانی جدی شامل «کاهش منابع آب» همراه شده است که فشار مضاعفی بر مدیریت فضاهای شهری وارد می‌کند. مطالعات نشان می‌دهند اگرچه المان‌های آبی در فرهنگ و شهرسازی تاریخی ایرانیان اهمیت ویژه‌ای داشته، اما در سال‌های اخیر این نقش به فرم تزئینی، پرهزینه و غیرسازگار با شرایط اقلیمی کاهش یافته و مصرف منابع آبی را تشدید کرده است [۵ و ۶]. در باغ‌های ایرانی برای ایجاد محیطی آرام، خنک و پرسایه، جوی‌های آب در تقاطع‌ها به حوضچه تبدیل می‌شدند و آب با تکرار آبشارها در مسیر جریان داشت که علاوه بر کارکرد زیبایی‌شناختی، نقش مهمی در تنظیم اقلیم خرد و ایجاد آرامش روانی ایفا می‌کرد [۷]. امروزه نیز این الگوها فراتر از زیبایی‌شناسی می‌توانند با کاهش فشارهای روحی، انسان را به طبیعت نزدیک‌تر کنند [۴ و ۵]. انسان‌ها همواره به زندگی در کنار یا نزدیک آب تمایل داشته‌اند و حضور آب در فضاهای شهری یکی از عوامل مهم در ارتقای کیفیت ادراک محیطی و احساس آرامش محسوب می‌شود [۶]. لذا آب به عنوان یکی از عناصر اساسی منظر شهری شناخته می‌شود که شناخت ویژگی‌های آن به تشخیص معیار مناسب برای ارتقای کیفیت آبنماها منجر خواهد شد [۷]. با این حال، بسیاری از فضاهای آبی شهری با مشکلاتی مانند هدررفت آب در سیستم‌های فرسوده تأسیسات، تبخیر سطحی بالا و فقدان چرخه‌های طبیعی آب مواجه‌اند که با شرایط فعلی بحران آب در تضاد هستند و ضرورت بازنگری در شیوه طراحی این فضاها را آشکار می‌سازد [۵ و ۶]. بر اساس داده‌های آماری سال ۱۴۰۳ در ایستگاه سینوپتیک کرج، این شهر با میانگین بارش سالانه حدود ۱۹۵/۹ میلی‌متر و تبخیر و تعرق سالانه حدود ۱۸۶۵/۲ میلی‌متر با تنش آبی قابل توجهی مواجه است. همچنین، گزارش‌های آب‌شناسی طرح جامع شهر کرج سال ۱۳۹۱ نشان می‌دهد در برخی بخش‌های دشت کرج افت سطح آب زیرزمینی طی یک دوره سه‌ساله به بیش از ۷ متر رسیده که بیانگر فشار فزاینده بر منابع آبخوان است. افزون بر این، بر اساس گزارش فضای سبز طرح جامع شهر کرج سال ۱۳۹۲، بخش قابل توجهی از آب استحصال‌شده از چاه‌های شهری صرف آبیاری فضای سبز، به‌ویژه گونه‌های پرمصرفی مانند چمن، می‌شود که فشار بیشتری بر منابع آب زیرزمینی وارد می‌کند. این شرایط نشان می‌دهد پاسخ به بحران آب در فضاهای شهری مستلزم رویکردی یکپارچه و سازگار با بستر اقلیمی است.

پیرو این چالش‌ها، رویکرد طراحی منظر بیوفیلیک به عنوان راهبردی پارادایمی و نوین برای بهبود کیفیت محیط زیست شهری مطرح شده است. طراحی بیوفیلیک به بیان ساده تلاش می‌کند ارتباط عمیق، پایدار و معنادار انسان با طبیعت را در محیط مصنوع تقویت کند و با بازطراحی خردمنظرها و المان‌های طبیعی مانند آبنما و آبشارهای پلکانی، از رویکردهای صرفاً تزئینی به رویکردهای

1. Biophilic
2. Biophilia

اکولوژیک^۱ و تاب‌آور^۲ تغییر جهت دهد [۳ و ۵]. در کنار عنصر آب، گیاهان به‌ویژه گیاهان آبی در فضای شهری نقش مهمی در نگهداری و حفظ اکوسیستم‌های آبی و آرامش روح و روان انسان دارند. کلان‌شهر کرج، به‌خصوص محدوده پارک چمران، با برخورداری از ظرفیت‌های بالقوه‌ای مانند مجاورت با رودخانه کرج و امکان استفاده از طراحی آبنا و آبشارهای پلکانی، نمونه‌ای ارزشمند برای اجرای ایده‌های بیوفیلیک در شرایط بحران آب به شمار می‌رود و می‌تواند به عنوان یک نمونه موردی برای بررسی راهبردهای طراحی پایدار مورد مطالعه قرار گیرد [۵ و ۷]. با این حال، بررسی‌های میدانی بیانگر آن است که طراحی‌های فعلی فاقد هماهنگی با محدودیت‌های منابع و چرخه‌های طبیعی است و نیازمند بازنگری‌ها و اصلاحات بنیادی است [۶ و ۷].

واژه «بیوفیلیا» که از ترکیب دو جزء «بیو» (زیستی یا زنده) و «فیلیا» (دوستی یا عشق) شکل گرفته است، نخست توسط اریک فروم^۳ برای توصیف گرایش درونی انسان به زندگی و موجودات زنده مطرح شد [۸ و ۹]. این مفهوم بعدها توسط ادوارد ویلسون^۴ در سال ۱۹۸۴ بسط یافت و به عنوان وابستگی عاطفی و تکاملی انسان به طبیعت و سایر گونه‌های زیستی معرفی شد [۱۰]. بر اساس فرضیه بیوفیلیا، انسان‌ها در روند تکامل همواره در تعامل با نظام‌های طبیعی شکل گرفته‌اند و از این‌رو، ارتباط با طبیعت نقش بنیادینی در سلامت جسمی و روانی آن‌ها ایفا می‌کند [۱۱ و ۱۲]. پژوهش‌های بعدی نیز با تأکید بر ابعاد شناختی و ادراکی این ارتباط، نشان داده‌اند که حضور عناصر طبیعی در محیط می‌تواند کیفیت تجربه انسانی را به طور معناداری ارتقا دهد [۱۳ و ۱۴]. در سال‌های اخیر این دیدگاه به حوزه معماری و شهرسازی وارد شده و مبنای شکل‌گیری رویکرد «طراحی بیوفیلیک» به عنوان چارچوبی برای ادغام نظام‌های طبیعی در محیط ساخته‌شده قرار گرفته است [۱۵ و ۱۶]. در همین راستا، مفهوم «شهرهای بیوفیلیک» با تأکید بر تلفیق ساختارهای طبیعی در کالبد شهرها توسعه یافته و به عنوان راهبردی برای ارتقای کیفیت محیط شهری و تاب‌آوری اکولوژیک مطرح شده است [۱۷ و ۱۸]. محیط‌های شهری معاصر به تدریج به فضاهایی «ضد بیوفیلیک» تبدیل شده‌اند که در آن‌ها ارتباط مستقیم انسان با طبیعت کاهش یافته است [۱۹]. طراحی بیوفیلیک با هدف بازپیوند انسان و طبیعت در محیط‌های ساخته‌شده در حوزه‌هایی مانند معماری و شهرسازی توسعه یافته است [۲۰ و ۲۱]. کلرت^۵ نیز با معرفی شش عنصر طراحی بیوفیلیک، چارچوبی کاربردی برای به‌کارگیری این رویکرد در طراحی محیط ارائه کرده است [۲۲ و ۲۳]. مطالعات نشان می‌دهند حضور عناصر طبیعی در فضاهای شهری می‌تواند به کاهش استرس و ارتقای سلامت روانی کاربران کمک کند [۲۴]. افزون بر این، طراحی بیوفیلیک می‌تواند در مواجهه با چالش‌های زیست‌محیطی مانند تغییرات اقلیمی و مدیریت پایدار منابع آب نقش مؤثری ایفا کند [۲۵].

مطالعات داخلی پیرامون طراحی بیوفیلیک شهرها بیشتر در حوزه بهره‌گیری از منابع آبی و اکوسیستم‌های شهری شکل گرفته‌اند. مودت و ولی‌پور [۲۶] با مطالعه اثر استفاده از بستر و شیب رودخانه دز راهبردهایی برای ارتقای سلامت روان و تعاملات اجتماعی شهروندان ارائه داده‌اند. تردست و همکاران [۲۷] با ارائه چارچوب برنامه‌ریزی راهبردی بیوفیلیک در شهر تهران نقش نهادهای مدیریتی و زیرساخت‌های کالبدی را برجسته کردند. ابراهیم‌پور [۲۸] برنامه‌ریزی بیوفیلیک را به عنوان محرک زیست‌پذیری در شهرهای جدید معرفی کرد. شاطرزاده و همکاران [۱] شاخص‌های ارتقای منظر بوم‌شناختی در نزدیکی پهنه‌های آبی را بررسی کردند. همچنین، شکرانی و نورائی [۲۹] چالش‌های زیرساخت بیوفیلیک در اصفهان را تحلیل کردند و تبریزی و جعفرپیشه [۳۰] تأثیر شاخص‌های بیوفیلیک بر ادراک کاربران فضاهای شهری را نشان دادند.

در سطح بین‌الملل، بیتلی و نیومن^۶ [۱۵] نشان دادند شهرهای بیوفیلیک تاب‌آوری بیشتری در مقابله با بحران‌های محیط زیستی دارند. ریو^۷ و همکاران [۴] ادغام زیرساخت‌های سبز با آبراهه‌های طبیعی را عامل مهم ارتقای پایداری شهری معرفی کردند. پانلاسیگی^۸ و همکاران [۱۸] برنامه‌ریزی تنوع زیستی شهری را ابزاری مؤثر برای تقویت ارتباط انسان و طبیعت دانستند و

1. Ecological
2. Resilient
3. Erich Fromm
4. Wilson
5. Kellert
6. Beatley & Newman
7. Reeve
8. Panlasigui

تارک و اوف^۱ [۳۱] تلفیق طبیعت و فناوری هوشمند را عامل افزایش تاب‌آوری شهری معرفی کردند. ردها^۲ [۳۲] نیز نقش حضور آب و محرک‌های حسی را در بهبود سلامت روان کاربران فضاهای شهری نشان داد. آخرین مطالعه برجسته، چارچوب شهرسازی بیوفیلیک چهاربعدی توسط پدرس زری^۳ و همکاران [۸] است که با تمرکز بر محرک‌های حسی و نسبت به ادراک فضایی - زمانی انسان، مدلی نوین برای طراحی منظر ارائه می‌دهد.

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در حوزه شهرهای بیوفیلیک به بررسی نقش طبیعت و زیرساخت‌های سبز در ارتقای سلامت، کیفیت محیط شهری و پایداری پرداخته‌اند [۱۷ و ۲۴]. برخی پژوهش‌ها نیز با رویکرد مرور نظام‌مند به تحلیل روندهای علمی و چارچوب‌های مفهومی شهرسازی بیوفیلیک و توسعه آن در برنامه‌ریزی شهری توجه داشته‌اند [۱۰ و ۲۵]. در ایران نیز پژوهش‌های انجام‌شده عمدتاً بر برنامه‌ریزی مفهومی شهرهای بیوفیلیک، شناسایی ظرفیت‌های طبیعی شهرها و تحلیل ادراک کاربران از فضاهای شهری متمرکز بوده‌اند [۲۶ و ۲۹]. با این حال، در بخش قابل توجهی از این مطالعات، ارتباط عملی میان اصول طراحی بیوفیلیک و بازطراحی عناصر منظر شهری، به‌ویژه عناصر آبی، کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۲۷ و ۳۰]. این در حالی است که بسیاری از فضاهای آبی شهری با چالش‌هایی نظیر هدررفت منابع آب، تأخیر بالا و عدم انطباق با شرایط اقلیمی مواجه هستند که ضرورت بازنگری در شیوه طراحی آن‌ها را آشکار می‌سازد. بنابراین، در ادبیات موجود خلأ یک چارچوب طراحی محور که بتواند اصول طراحی بیوفیلیک را با بازآفرینی عناصر آبی در مقیاس خردمنظر شهری و در راستای مدیریت پایدار منابع آب تلفیق کند، به‌وضوح مشاهده می‌شود.

نوآوری این پژوهش در دو بعد مفهومی و روش‌شناختی قابل بیان است. از نظر مفهومی، نوآوری این پژوهش در بازتعریف نقش طراحی بیوفیلیک در مدیریت پایدار آب شهری است. در حالی که رویکردهایی مانند طراحی شهری حساس به آب، شهر اسفنجی، توسعه کم‌اثر و راهکارهای مبتنی بر طبیعت عمدتاً بر مدیریت رواناب، کنترل سیلاب و بهبود عملکرد هیدرولوژیک شهر تمرکز دارند، در مدل پیشنهادی این پژوهش، طبیعت به عنوان بخشی از زیرساخت اکولوژیک و کارکردی منظر شهری در نظر گرفته می‌شود که علاوه بر مدیریت آب، به تقویت پیوند انسان و طبیعت، ارتقای کیفیت تجربه فضایی و افزایش تاب‌آوری محیط شهری نیز کمک می‌کند. به این ترتیب، رویکرد ارائه‌شده با تلفیق اصول طراحی بیوفیلیک و مدیریت منابع آب، دیدگاهی یکپارچه در طراحی منظر شهری ارائه می‌دهد که فراتر از رویکردهای صرفاً فنی مدیریت آب عمل می‌کند. از نظر روش‌شناختی نیز استخراج راهبردهای پژوهش بر پایه تحلیل اسناد و منابع علمی و ارزیابی شرایط محیطی محدوده مطالعه انجام شده و فقط متکی بر نظرسنجی از خبرگان نیست. بر این اساس، هدف کلان پژوهش تبیین و تدوین سیاست‌ها و راهبردهای عملیاتی طراحی منظر بیوفیلیک در فضاهای عمومی شهری به عنوان الگویی کارآمد برای ارتقای کیفیت محیطی و مواجهه پایدار با بحران آب با تأکید بر بازطراحی منظر پلکانی پارک چمران کرج است.

مواد و روش‌ها

چارچوب مفهومی و مدل تحلیلی پژوهش: درنهایت با توجه به مطالعات پیشین و تحلیل مدل‌های برنامه‌ریزی شهری، طراحی بیوفیلیک در یک نظام سلسله‌مراتبی دوگانه تعریف می‌شود که تعامل میان «ابعاد تجربه طبیعت» و «مقیاس‌های مداخله شهری» را تبیین می‌کند. این چارچوب بر سه بعد بنیادین استوار است: تجربه مستقیم از طبیعت (شامل نور، هوا، آب، گیاهان و اکوسیستم‌ها)، تجربه غیرمستقیم از طبیعت (مبتنی بر استفاده از مواد طبیعی، هندسه‌های زیستی و زیست‌تقلید) و تجربه فضا و مکان (شامل مؤلفه‌هایی نظیر چشم‌انداز، پیچیدگی سازمان‌دهی شده و دلبستگی‌های محیط زیستی). به منظور عملیاتی‌سازی این ابعاد در محیط مصنوع، برنامه‌ریزی بیوفیلیک در یک مقیاس شش‌گانه (شامل ساختمان، بلوک، خیابان، همسایگی، محله و منطقه) پیاده‌سازی می‌شود. این مدل نشان می‌دهد چگونه اقدامات خرد و کلان شهری، از ایجاد بام‌های سبز و دیوارهای گیاهی در مقیاس ساختمان تا توسعه شبکه‌های سبز و سیستم‌های رودخانه‌ای در مقیاس منطقه‌ای، می‌تواند به بازآفرینی پیوند گسسته

1. Tarek & Ouf

2. Radha

3. Pedersen zari

انسان و طبیعت منجر شده و تاب‌آوری اکولوژیک شهرها را ارتقا بخشد [۲۵]. بنابراین، بر پایه مبانی نظری و پیشینه تحقیق، مدل مفهومی این پژوهش بر تعامل سیستماتیک چهار بُعد اساسی در طراحی منظر استوار است:

۱. بُعد محیط زیستی - اکولوژیک (با محوریت بحران آب): شامل شاخص‌های بازچرخانی طبیعی آب، استفاده از سیستم‌های فیلتراسیون گیاهی (تصفیه بیولوژیک توسط گیاهان آبی)، کاهش تبخیر سطحی و حفظ و ارتقای تنوع زیستی در مقیاس خرد.

۲. بُعد کالبدی - فضایی: شامل بهره‌گیری از پتانسیل‌های توپوگرافیک منطقه (طراحی پلکانی)، استفاده از مصالح بوم‌آورد، همگونی با بستر صخره‌ای و استفاده از فرم‌های ارگانیک در طراحی.

۳. بُعد ادراکی - روان‌شناختی: تأکید بر تحریک مثبت حواس پنج‌گانه (صدای جریان آب، بوی گیاهان)، کاهش استرس محیطی شهروندان و ارتقای حس تعلق به طبیعت.

۴. بُعد مدیریتی - سیاستگذاری: شامل تدوین دستورالعمل‌های نگهداری سازگار با اقلیم، تخصیص بهینه منابع و مدیریت هوشمند زیرساخت‌های آبی پارک.

از طریق تلفیق این چهار بعد و توسعه برنامه‌ریزی استراتژیک، مدل به خلق «منظر بیوفیلیک تاب‌آور و سازگار با بحران آب» در سطح مقیاس خیابان و همسایگی (پارک شهری) می‌انجامد. این منظر، هم به پایداری اکولوژیک و صرفه‌جویی در مصرف آب کمک می‌کند و هم فضای شهری را برای ارتقای سلامت روانی کاربران بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، مدیریت تخصصی و هوشمندانه، دوام و کارآمدی طراحی را در شرایط محدودیت منابع تضمین خواهد کرد. در ادامه، چگونگی تأثیرگذاری متقابل هر یک از ابعاد بر سایر ابعاد نشان داده شده است (جدول ۱).

جدول ۱. ماتریس تعاملات ابعاد مدل مفهومی پژوهش

بعد / عامل	مدیریتی - سیاستگذاری	ادراکی - روان‌شناختی	محیط زیستی - اکولوژیک	کالبدی - فضایی
کالبدی - فضایی	تعیین‌کننده نیازهای نگهداری	ارتقای تجربه حسی کاربر	تسهیل سیستم‌های پالایش	-
محیط زیستی - اکولوژیک	نیازمند تخصیص منابع	بهبود سلامت روان	-	فراهم‌کننده بستر سازه‌ای
ادراکی - روان‌شناختی	اثرگذار بر اولویت‌گذاری سیاست‌ها	-	افزایش توجه به محیط	شکل‌دهنده درک فضایی
مدیریتی - سیاستگذاری	-	حمایت از طراحی سلامت‌محور	تضمین پایداری منابع	هدایت نگهداری بلندمدت

همان‌گونه که در جدول ۱ نشان داده شده است، ابعاد چهارگانه مدل مفهومی پژوهش وابستگی‌های سیستمی و متقابل دارند. در این میان، تعامل میان بُعد کالبدی - فضایی و بُعد محیط زیستی - اکولوژیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ به گونه‌ای که طراحی‌های مبتنی بر توپوگرافی (مانند منظر پلکانی) می‌توانند زمینه استقرار سامانه‌های تصفیه زیستی و مدیریت طبیعی آب را فراهم کنند. افزون بر این، بُعد مدیریتی - سیاستگذاری به عنوان چارچوبی راهبردی عمل کرده و تداوم کارآمدی دستاوردهای محیط زیستی و ادراکی را در شرایط محدودیت منابع و بحران آب تضمین می‌کند. این هم‌افزایی نشان می‌دهد دستیابی به منظر بیوفیلیک تاب‌آور مستلزم رویکردی یکپارچه به تمامی این مؤلفه‌ها است.

این ابعاد و متغیرها از طریق فرایند برنامه‌ریزی راهبردی یکپارچه شده و در نهایت، به تحقق متغیر وابسته پژوهش، یعنی «منظر بیوفیلیک تاب‌آور و سازگار با بحران آب» منجر می‌شوند. بر این اساس، پژوهش حاضر در پی پاسخ به سؤال زیر است:

۱. چه مؤلفه‌ها و شاخص‌های سنجش‌پذیر طراحی منظر بیوفیلیک می‌توانند در بازطراحی منظر پلکانی پارک چمران کرج به بهبود نفوذپذیری سطح، کاهش مصرف آب، افزایش بازچرخانی طبیعی، ارتقای تنوع زیستی و تقویت تاب‌آوری اکولوژیک منجر شوند و راهبردهای عملیاتی تحقق آن‌ها کدام‌اند؟

هدف کلان این پژوهش، تبیین و تدوین سیاست‌ها و راهبردهای عملیاتی طراحی منظر بیوفیلیک در فضاهای عمومی شهری، به عنوان الگویی برای ارتقای کیفیت محیطی و مواجهه پایدار با بحران آب (با تمرکز بر مطالعه موردی پارک چمران کرج) است.

روش انجام پژوهش: پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از حیث ماهیت و روش، توصیفی - تحلیلی است. روند انجام پژوهش در دو گام اساسی «مطالعات اسنادی - کتابخانه‌ای» و «برداشت و ارزیابی میدانی» صورت گرفته است. در گام نخست، مبانی نظری و پیشینه پژوهش و شاخص‌های مدل مفهومی از طریق بررسی دقیق متون علمی معتبر، مقالات خارجی و داخلی استخراج شد. در گام دوم، داده‌های مربوط به شرایط کالبدی، اکولوژیک و زیرساختی منطقه مورد مطالعه از طریق مشاهده مستقیم، تصویربرداری و تکمیل چک‌لیست‌های ارزیابی میدانی توسط پژوهشگران جمع‌آوری شد.

به منظور تکمیل تحلیل اسنادی، برداشت میدانی در چند مرحله شامل سه بازدید در پاییز ۱۴۰۲، یک بازدید در زمستان ۱۴۰۳ و یک بازدید در بهار ۱۴۰۵ انجام شد. در این بازدیدها، وضعیت پوشش گیاهی، عناصر آبی، میزان سایه‌اندازی، کیفیت مسیرهای پیاده، وضعیت مبلمان شهری، زیرساخت‌های آبیاری و فضاهای مکث مورد مشاهده و ثبت تصویری قرار گرفت. چک‌لیست ارزیابی میدانی بر اساس شاخص‌های استخراج‌شده از ادبیات طراحی منظر بیوفیلیک تنظیم شد و داده‌های حاصل به صورت کیفی در فرایند امتیازدهی ماتریس‌های داخلی و خارجی مورد استفاده قرار گرفت. بخشی از مستندات تصویری در شکل ۲ ارائه شده است.

به منظور تحلیل داده‌ها و تدوین راهبردهای طراحی، از چارچوب تحلیل استراتژیک شامل ماتریس ارزیابی عوامل داخلی (IFE)^۱، ماتریس ارزیابی عوامل خارجی (EFE)^۲، ماتریس داخلی - خارجی (IE)^۳، تحلیل (SWOT)^۴ و ماتریس برنامه‌ریزی استراتژیک کمی (QSPM)^۵ استفاده شده است. انتخاب این چارچوب مرحله‌ای مبتنی بر ماهیت چندبعدی مسئله پژوهش است؛ زیرا مدیریت و بازطراحی منظر بیوفیلیک در شرایط بحران آب مستلزم ارزیابی هم‌زمان ظرفیت‌های درونی محیط (ویژگی‌های کالبدی، اکولوژیک و زیرساختی) و فشارهای بیرونی (محدودیت‌های اقلیمی، سیاست‌های مدیریتی و تهدیدهای محیطی) است. در گام نخست، با استفاده از ماتریس‌های IFE و EFE اهمیت نسبی عوامل داخلی و خارجی کمی‌سازی شد. سپس، نتایج حاصل در ماتریس داخلی - خارجی تلفیق شد تا موقعیت راهبردی محدوده مورد مطالعه تعیین شود. در ادامه، تحلیل SWOT برای استخراج گزینه‌های راهبردی متناسب با این موقعیت به کار رفت و درنهایت، ماتریس QSPM به منظور ارزیابی میزان جذابیت نسبی هر راهبرد و اولویت‌بندی کمی گزینه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این رویکرد مرحله‌ای امکان گذار نظام‌مند از شناسایی عوامل محیطی به تعیین موقعیت راهبردی و انتخاب راهبردهای بهینه مداخله در منظر شهری را فراهم می‌سازد. با توجه به رویکرد عینی پژوهش، وزن‌دهی و امتیازدهی به عوامل داخلی (قوت‌ها و ضعف‌ها) و خارجی (فرصت‌ها و تهدیدها) مبتنی بر روش «ارزیابی اسنادی - میدانی»^۶ انجام شده است. در این پژوهش از پرسشنامه عمومی استفاده نشده است. فرایند وزن‌دهی مبتنی بر تحلیل محتوای منابع علمی معتبر و اسناد بالادستی مدیریت بحران آب و نیز تطبیق آن‌ها با شرایط واقعی محدوده مورد مطالعه انجام شده است. امتیازدهی نیز بر اساس ارزیابی میدانی پژوهشگران و میزان انطباق وضعیت موجود با شاخص‌های مدل مفهومی پژوهش صورت گرفته است. به منظور کاهش سوگیری، تخصیص اوزان و امتیازها به صورت مقایسه‌ای و بر پایه شاخص‌های استخراج‌شده از ادبیات نظری انجام شده است.

در این رویکرد برای تعیین ضریب اهمیت، وزن هر عامل (عددی بین ۰ تا ۱) بر اساس میزان تکرار و تأکید آن مؤلفه در متون علمی معتبر پیشینه و همچنین، میزان انطباق آن با سیاست‌های کلان مدیریت بحران آب در اسناد بالادستی تعیین شده است. مجموع اوزان در هر ماتریس برابر ۱ خواهد بود. برای تعیین نمره، امتیاز هر عامل (اعداد ۱ تا ۴) بر مبنای تطبیق وضعیت

1. IFE: Internal Factor Evaluation

2. EFE: External Factor Evaluation

3. IE: Internal-External Matrix

4. SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats)

5. QSPM (Quantitative Strategic Planning Matrix)

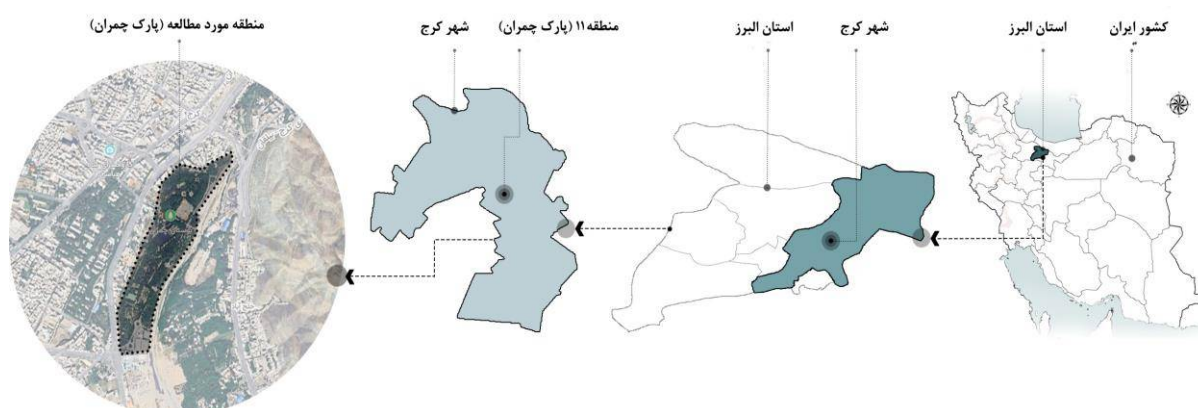
6. Evidence-based Assessment

فعلی منطقه با استانداردهای استخراج شده از مدل مفهومی پژوهش و شدت تأثیر آن بر هدررفت یا حفظ منابع آبی اختصاص یافته است. (در عوامل داخلی: ۱: ضعف اساسی، ۴: قوت بسیار بالا / در عوامل خارجی: ۱: تهدید جدی، ۴: فرصت طلایی). پس از تشکیل ماتریس ارزیابی عوامل داخلی (IFE) و ماتریس ارزیابی عوامل خارجی (EFE) و ضرب اوزان در نمرات، نمره نهایی هر ماتریس محاسبه می‌شود. قرارگیری نمرات به دست آمده در ماتریس داخلی - خارجی (IE)، نوع راهبرد کلان (تهاجمی، محافظه کارانه، تدافعی یا رقابتی) را جهت بازطراحی منظر بیوفیلیک و پلکانی پارک چمران در راستای سازگاری با بحران آب مشخص می‌سازد. در نهایت، راهکارهای عملیاتی (WT, ST, WO, SO) متناسب با رویکرد تاب‌آوری اکولوژیک تدوین می‌شوند. به منظور افزایش شفافیت فرایند وزن دهی در ماتریس‌های IFE و EFE، تعیین وزن عوامل داخلی و خارجی بر اساس ترکیبی از سه منبع شامل اسناد بالادستی و مطالعات شناخت محدوده شامل طرح جامع شهر کرج در سال ۱۳۹۱ - ۱۳۹۳ و داده‌های اقلیمی ایستگاه سینوپتیک کرج آمار سالانه سال ۱۴۰۳؛ تحلیل QSPM-SWOT انجام شده در پژوهش پیراسته و همکاران در سال ۱۴۰۴ حول محور گردشگری بیوفیلیک در محدوده بلوار چمران که مبنای شناسایی اولیه بسیاری از عوامل کالبدی، زیست محیطی و مدیریتی بوده است [۳۳ - ۳۵]؛ و بررسی نمونه موفق بین‌المللی پروژه بازاستفاده آب در پارک سیدنی استرالیا^۱ به عنوان الگوی مدیریت یکپارچه آب و زیرساخت سبز در پارک‌های شهری انجام شد. در ادامه در ارتباط با تطبیق نمونه موفق پارک سیدنی با پارک چمران در بخش یافته‌ها توضیح داده شده است. در مرحله نهایی، به منظور اولویت‌بندی راهبردهای استخراج شده، از ماتریس برنامه‌ریزی راهبردی کمی استفاده شد. در این ماتریس، عوامل کلیدی داخلی و خارجی با اوزان پیشنهادی وارد شده و برای هر راهبرد، نمره جذابیت^۲ در مقیاس ۱ تا ۴ بر اساس میزان اثربخشی آن راهبرد در پاسخ‌گویی به هر عامل تعیین شد. حاصل ضرب وزن هر عامل در نمره جذابیت، امتیاز جذابیت کل (TAS) را تشکیل داده و مجموع این مقادیر، نمره نهایی هر راهبرد را مشخص می‌کند. مقادیر ارائه شده در جدول ۵ بیانگر مجموع امتیاز جذابیت کل برای هر گزینه راهبردی است. در نهایت، وزن هر عامل بر اساس میزان تأکید و تکرار آن در منابع علمی و اسناد برنامه‌ریزی شهری و همچنین، اهمیت آن در تحقق اهداف طراحی منظر بیوفیلیک تعیین شد. به این ترتیب عواملی که در اسناد بالادستی و مطالعات مرجع نقش کلیدی‌تری در مدیریت بحران آب و ارتقای کیفیت اکولوژیک داشتند، وزن بالاتری دریافت کردند. امتیازدهی (۱ تا ۴) نیز بر اساس میزان انطباق وضعیت موجود پارک چمران با شاخص‌های استخراج شده از مدل مفهومی پژوهش انجام شد؛ به گونه‌ای که امتیاز ۱ نشان‌دهنده وضعیت نامطلوب یا عدم انطباق، امتیاز ۲ بیانگر انطباق ضعیف، امتیاز ۳ نشان‌دهنده انطباق متوسط و امتیاز ۴ بیانگر انطباق مطلوب با معیارهای طراحی بیوفیلیک بوده است.

شناخت محدوده مورد مطالعه: شهرستان کرج به عنوان مرکز استان البرز، در سال‌های اخیر تحت تأثیر توسعه سریع شهری و افزایش بارگذاری جمعیتی با چالش‌های اکولوژیک متعددی به‌ویژه افت سطح آب‌های زیرزمینی مواجه شده است. در این میان، بلوار چمران به عنوان یکی از محورهای سبز مهم شهر، یادگاری از هویت باغ‌شهر کرج محسوب می‌شود. در ضلع شرقی این محور، پارک چمران با مساحتی حدود ۴۰ هکتار و مجاورت مستقیم با رودخانه کرج، یکی از کانون‌های مهم تعاملات اجتماعی و فضاهای سبز شهری به شمار می‌آید. محدوده مورد مطالعه از شمال به محورهای بهشتی و قدس، از جنوب به بلوار هفتم تیر، از غرب به بلوار چمران و بستر رودخانه کرج و از شرق به جاده چالوس محدود می‌شود. همچنین، دسترسی مناسب به شبکه حمل‌ونقل شهری و مجاورت با کاربری‌های مهم شهری نظیر دانشکدگان کشاورزی دانشگاه تهران، این محدوده را به نمونه‌ای مناسب برای بررسی امکان بازطراحی منظر شهری با رویکرد بیوفیلیک تبدیل کرده است (شکل ۱).

شرایط اقلیمی: بر اساس گزارش ایستگاه سینوپتیک هواشناسی کرج دوره آماری سال ۱۴۰۳، اقلیم منطقه در گروه اقلیم نیمه‌خشک سرد قرار می‌گیرد و میانگین بارش سالانه حدود ۱۹۵/۹ میلی‌متر گزارش شده است، در حالی که میزان تبخیر و تعرق سالانه حدود ۱۸۶۵/۲ میلی‌متر است که نشان‌دهنده تنش آبی قابل توجه در منطقه است. بر اساس داده‌های دمایی این ایستگاه، دامنه تغییرات دما از حداقل ۸/۴- درجه سانتی‌گراد در زمستان تا حداکثر ۴۱/۷ درجه سانتی‌گراد در تابستان متغیر بوده و حدود

۶۳ روز یخبندان در سال ثبت شده است. همچنین، بادهای غالب منطقه عمدتاً از جهات غربی (۲۷۰ تا ۲۸۰ درجه) می‌وزند و گاه سرعت آن‌ها به حدود ۲۴ متر بر ثانیه می‌رسد [۳۴].



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی پارک چمران کرج

ساختار زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی: بر اساس گزارش آب‌شناسی طرح جامع شهر کرج در سال ۱۳۹۱، این شهر در دامنه جنوبی البرز مرکزی و روی یک دشت آبرفتی جوان شکل گرفته است که از رسوبات رودخانه کرج تشکیل شده و ساختاری ناودیس‌مانند دارد. ضخامت رسوبات آبرفتی در این دشت بین حدود ۱۰۰ تا بیش از ۳۰۰ متر متغیر بوده و ترکیب آن عمدتاً شامل شن، ماسه و قلوه‌سنگ است که نفوذپذیری بالایی دارند. در محدوده شرقی دشت کرج، شامل محلات حصار، خلیج‌آباد، کلاک و همت‌آباد، ضخامت آبرفت در برخی نقاط به حدود ۲۰۰ متر می‌رسد. مقاومت ویژه رسوبات در حالت خشک حدود ۳۰۰ اهم‌متر و در حالت اشباع حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ اهم‌متر گزارش شده است که بیانگر غالب بودن رسوبات دانه‌درشت در منطقه است [۳۵].

وضعیت هیدروژئولوژی و منابع آب زیرزمینی: بر اساس گزارش آب‌شناسی طرح جامع شهر کرج در سال ۱۳۹۱، آبخوان دشت کرج یکی از منابع اصلی تأمین آب شرب، کشاورزی و فضای سبز شهری است. بررسی داده‌های چاه‌های پی‌زومتری نشان می‌دهد در سال‌های اخیر به دلیل افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی، سطح آبخوان دچار افت قابل توجهی شده است. بر اساس تحلیل هیدروگراف پی‌زومترها، در برخی بخش‌های دشت کرج به‌ویژه مناطق جنوبی و جنوب‌شرقی، افت سطح آب زیرزمینی در برخی دوره‌ها به بیش از ۷ متر طی سه سال رسیده که نشان‌دهنده فشار فزاینده بر منابع آب زیرزمینی و افزایش خطر فرونشست زمین در بخش‌هایی از دشت کرج است. در محدوده شرقی دشت کرج شامل خلیج‌آباد و کلاک که پارک چمران در مجاورت آن قرار دارد، سطح آب زیرزمینی در عمق حدود ۸۵ تا ۹۰ متر قرار گرفته و ضخامت لایه اشباع آبخوان حدود ۱۰۰ متر برآورد شده است [۳۵]. همچنین، مطالعات انجام‌شده در بازه پایین‌دست سد امیرکبیر نشان می‌دهد رودخانه کرج به دلیل شیب توپوگرافی، تغییرات دبی و تمرکز جمعیت در حریم رودخانه، در برخی دوره‌های بارشی مستعد بروز سیلاب‌های ناگهانی است و سکونتگاه‌های مجاور رودخانه در معرض خطر سیلاب قرار دارند [۳۶].

وضعیت فضای سبز و منابع آب و نیاز آبی منطقه: پارک چمران در محدوده منطقه ۱۱ شهرداری کرج (ناحیه کلاک) قرار دارد. این منطقه با مساحت حدود ۱۵/۶۴ کیلومتر مربع دارای جمعیتی حدود ۷۰۶۵۷ نفر بوده و مجموع فضای سبز آن حدود ۴۹۷۰۹ هکتار برآورد شده است. آبیاری این فضاها عمدتاً از طریق سه حلقه چاه شامل چاه چمران (۲۵ لیتر بر ثانیه)، چاه کلهر (۲۰ لیتر بر ثانیه) و چاه بیلقان (۸ لیتر بر ثانیه) انجام می‌شود که مجموع آب استحصال‌شده از آن‌ها حدود ۱۶۳۰/۸ مترمکعب در شبانه‌روز است. در این منطقه حدود ۸/۳ هکتار چمن‌کاری، ۱/۴ هکتار بوته‌کاری و ۹/۹ هکتار درختکاری وجود دارد. بر اساس برآوردهای انجام‌شده، مجموع نیاز آبی پوشش گیاهی حدود ۱۰۳۸ مترمکعب در روز است که سهم عمده آن مربوط به چمن‌کاری‌ها با مصرف حدود ۸۳۹ مترمکعب در روز است. این الگوی مصرف نشان می‌دهد استفاده گسترده از گونه‌های پرمصرف، فشار قابل توجهی بر منابع آب زیرزمینی وارد کرده و ضرورت اصلاح الگوی کاشت با گونه‌های مقاوم به خشکی را

نشان می‌دهد [۳۷]. بر اساس گزارش پوشش گیاهی طرح جامع شهر کرج در سال ۱۳۹۳، پوشش گیاهی محدوده مورد مطالعه شامل گونه‌های درختی، درختچه‌ای و گیاهان پوششی است که حدود ۵۴ درصد آن را درختان و درختچه‌ها تشکیل می‌دهند. در باغ گل‌های کرج که در سال ۱۳۸۴ در پارک چمران احداث شده، گونه‌های متنوعی از گیاهان مشاهده می‌شود که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به چنار، افاقیا، گز و سیدالاشجار اشاره کرد. در میان گیاهان پوششی نیز گونه‌هایی مانند فرانکنیا، لیزیماکیا و انواع سدوم وجود دارند که به دلیل مقاومت بالا در برابر خشکی با شرایط اقلیمی منطقه سازگاری مناسبی دارند. بر اساس ارزیابی سلامت پوشش گیاهی، حدود ۴۲/۵ درصد گونه‌ها در وضعیت پایدار، ۳۳ درصد نسبتاً پایدار و حدود ۱۹/۸۵ درصد در وضعیت ضعیف قرار دارند و بخشی از گونه‌ها نیازمند بازکاشت یا جایگزینی هستند [۳۸].

در راستای تحلیل وضعیت منابع آب، شاخص‌های کمی مرتبط با اقلیم و مصرف آب شامل میزان بارش سالانه، متوسط تبخیر و تعرق، نیاز آبی پوشش گیاهی غالب منطقه و وابستگی فضای سبز به منابع آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های یادشده بر اساس اطلاعات ایستگاه سینوپتیک کرج و گزارش‌های رسمی مدیریت منابع آب منطقه استخراج شده‌اند. این شاخص‌ها مبنای تشخیص شدت تنش آبی و ضرورت گذار به راهبردهای طراحی سازگار با کم‌آبی در چارچوب منظر بیوفیلیک بوده‌اند.

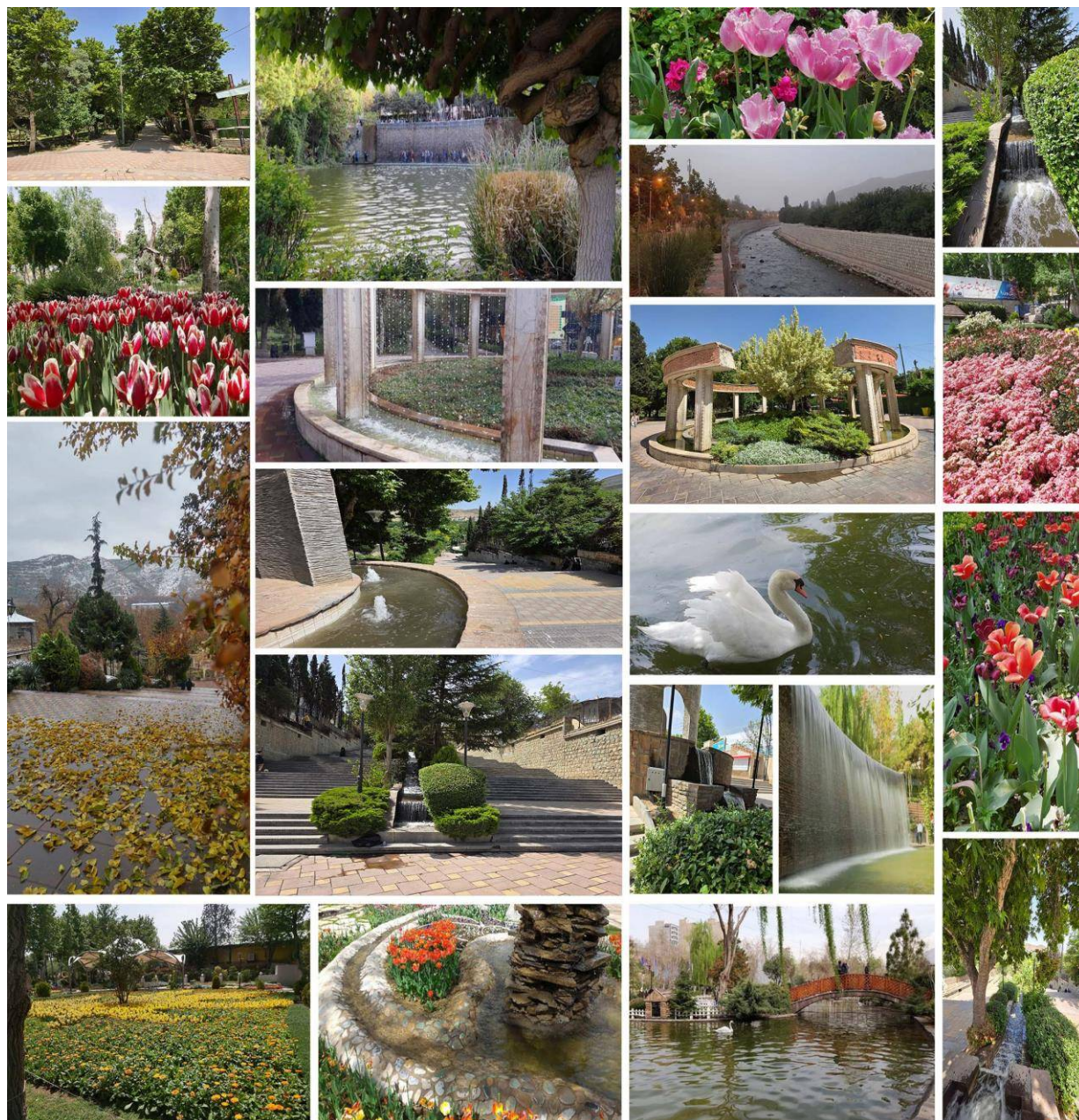
امکان‌سنجی طراحی منظر بیوفیلیک در محدوده مورد مطالعه: ارزیابی قابلیت‌های محدوده مورد مطالعه برای گذار از وضعیت موجود به منظر بیوفیلیک مستلزم بررسی هم‌زمان شرایط اقلیمی، هیدرولوژیک و کالبدی منطقه است. نخست، شرایط اقلیمی نیمه‌خشک و میزان بالای تبخیر و تعرق در مقایسه با بارش سالانه، نشان می‌دهد تداوم الگوهای سنتی طراحی منظر مبتنی بر مصرف بالای آب پایدار نیست. از سوی دیگر، ساختار خاک آبرفتی منطقه با بافت شنی - ماسه‌ای اگرچه زهکشی مناسبی فراهم می‌کند، اما در صورت نبود مدیریت مناسب می‌تواند به هدررفت آب‌های سطحی منجر شود. دوم، بررسی ساختار آبی موجود در پارک نشان می‌دهد بسیاری از عناصر آبی فعلی مانند آبشارهای مصنوعی و آبنماها بیشتر دارای کارکرد تزئینی بوده و وابسته به جریان‌های پرمصرف آب هستند که با شرایط بحران آب منطقه سازگاری ندارند. با این حال، توپوگرافی طبیعی و بستر نسبتاً شیب‌دار محدوده، ظرفیت مناسبی برای طراحی سامانه‌های آبی با چرخه بسته و مصرف بهینه آب فراهم می‌کند. بر این اساس، امکان‌سنجی انجام‌شده نشان می‌دهد این محدوده ظرفیت بالایی برای به‌کارگیری راهبردهای طراحی بیوفیلیک دارد. استفاده از گیاهان آبی پالاینده می‌تواند علاوه بر کمک به تصفیه بیولوژیک آب، بخشی از چرخه طبیعی اکوسیستم را در منظر شهری بازآفرینی کند. ایجاد نواحی انتقالی میان خشکی و آب (اکوتون آبی - خشکی) نیز می‌تواند به افزایش تنوع زیستی، کاهش تبخیر سطحی و بهبود کارایی سیستم‌های آبی کمک کند. در این راستا، انتخاب گونه‌های گیاهی سازگار با اقلیم منطقه و نیاز آبی پایین که مشخصات آن‌ها در جدول پیشنهادهای پایانی مقاله ارائه شده است، می‌تواند گذار از یک «منظر تزئینی پرمصرف» به یک منظر عملکردی و تاب‌آور را در چارچوب اصول توسعه پایدار و مدیریت منابع آب شهری امکان‌پذیر سازد (شکل ۲).

یافته‌ها

به منظور دستیابی به راهبردهای بهینه جهت بازطراحی منظر پلکانی پارک چمران با رویکرد بیوفیلیک و سازگاری با بحران آب، پیش از تشکیل ماتریس‌های کمی (IFE، EFE و QSPM)، گزاره‌های استخراج‌شده از مطالعات اسنادی، تحلیل پیشینه پژوهش و برداشت‌های میدانی، در چارچوب یک فرایند کدگذاری مفهومی سامان‌دهی شدند. در این مرحله، داده‌های کیفی گردآوری‌شده بر اساس چهار بُعد اصلی مدل مفهومی پژوهش شامل: (۱) بُعد محیط زیستی - اکولوژیک، (۲) بُعد کالبدی - فضایی، (۳) بُعد ادراکی - روان‌شناختی و (۴) بُعد مدیریتی - سیاستگذاری تفکیک و طبقه‌بندی شدند.

در بُعد محیط زیستی - اکولوژیک، عواملی نظیر وضعیت پوشش گیاهی، وابستگی فضای سبز به منابع آب زیرزمینی، الگوی مصرف آب، ظرفیت بازچرخانی و مدیریت رواناب سطحی مورد توجه قرار گرفت. بُعد کالبدی - فضایی بر شاخص‌هایی همچون سازمان فضایی تراس‌ها، پیوستگی حرکتی، کیفیت مسیرهای دسترسی، توزیع سایه و عناصر آبی متمرکز بود. در بُعد ادراکی - روان‌شناختی، مؤلفه‌هایی نظیر حس تعلق، تجربه طبیعت، کیفیت بصری، خوانایی فضا و میزان تعامل کاربر با عناصر طبیعی

تحلیل شد. در نهایت، در بُعد مدیریتی - سیاستگذاری، موضوعاتی همچون هماهنگی با اسناد بالادستی، ظرفیت اجرایی شهرداری، نظام نگهداری و امکان مشارکت ذی‌نفعان بررسی شد. این فرایند طبقه‌بندی چندبُعدی، امکان برقراری پیوندی نظام‌مند میان داده‌های کیفی حاصل از شناخت سایت و چارچوب کمی تحلیل راهبردی را فراهم ساخت (جدول ۲).



شکل ۲. تصاویر پارک چمران برای امکان‌سنجی بازطراحی منظر بیوفیلیک (برداشت‌های میدانی نگارندگان)

جدول ۲. دسته‌بندی عوامل داخلی (قوت و ضعف) و خارجی (فرصت و تهدید) بر اساس ابعاد مدل مفهومی

ابعاد مدل مفهومی	تهدیدها (Threats)	فرصت‌ها (Opportunities)	ضعف‌ها (Weaknesses)	قوت‌ها (Strengths)
کالبدی - فضایی	(T1). بحران جدی افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت کرج و کاهش پایداری منابع تأمین آب فضای سبز.	(O1). رژیم بارش فصلی منطقه که امکان استحصال و ذخیره‌سازی نزولات جوی را فراهم می‌کند.	(W1). فقدان سیستم‌های بازچرخانی اکولوژیک و تصفیه گیاهی (فیلتراسیون بیولوژیک) (W2). نفوذپذیری بالای خاک بستر و تخییر شدید سطحی به دلیل عدم سایه‌اندازی گیاهی.	(S1). هم‌جواری با اکوسیستم رودخانه کرج و تنوع پوشش گیاهی بومی.
	(T2). خشکی هوا، تخییر بسیار شدید در تابستان و وقوع یخبندان‌های آسیب‌زننده در زمستان.	(T3). قرارگیری محدوده در مجاورت رودخانه کرج و قرارگیری بخشی از اراضی در معرض سیلاب‌های فصلی و نوسانات دبی رودخانه.		(S2). بهره‌گیری مناسب منطقه از نور طبیعی و جریان هوای مطلوب.
محیط زیستی - اکولوژیک	(T4). آلودگی‌های محیطی (هوا و صوت) و ورزش بادهای حامل گردوغبار که موجب کاهش کیفیت آب و محیط زیستی محدوده می‌شود.	(O2). امکان اتصال کالبدی - اکولوژیک آبشار و آبمای پلکانی با پارک چمران و ارتقای سرزندگی شبانه‌روزی.	(W3). طراحی کاملاً تزئینی آبشار فعلی، متکی بر تأسیسات مکانیکی با هدررفت بالای آب.	(S3). توپوگرافی شیب‌دار منطقه، مناسب برای جریان ثقلی آب و کاهش مصرف انرژی.
		(W4). ضعف در پیوستگی مسیرهای پیاده و دوچرخه در مجاورت آبشار و آبما و بلوار چمران.	(S4). وجود زیرساخت‌های اولیه آبما و آبشار پلکانی با قابلیت تغییر به ساختار بیوفیلیک.	
ادراکی - روان‌شناختی	(T5). تخریب و آسیب به پوشش گیاهی و تأسیسات توسط کاربران به دلیل ضعف فرهنگ‌سازی.	(O3). امکان بهره‌گیری از نیروی کار جوان و متخصص بومی در اجرای پروژه‌های فضای سبز.	(W5). اغتشاشات بصری، کمبود مبلمان شهری سازگار با طبیعت و ضعف روشنایی در شب.	(S5). علاقه‌مندی ساکنان محلی به مشارکت در پروژه‌های زیست‌محیطی شهری.
	(T6). عدم تخصیص بودجه مستمر توسط نهادهای دولتی برای نگهداری پروژه‌های بیوفیلیک.	(O4). هم‌جواری با دانشکدگان کشاورزی دانشگاه تهران جهت مشاوره در فیلتراسیون گیاهی.	(W6). فقدان نظام مدیریت مشارکتی و عدم آگاهی شهروندان از مفاهیم طراحی بیوفیلیک.	(S6). موقعیت استراتژیک شهری، دسترسی‌پذیری بالا و نزدیکی به ایستگاه مترو.
مدیریتی - سیاستگذاری	(T7). محدودیت‌های قانونی و مقرراتی در تخصیص آب برای آبیاری فضای سبز شهری.	(O5). تأکید اسناد بالادستی مدیریت شهری بر گذار به منظر تاب‌آور و کاهش مصرف آب.	(W7). کمبود بودجه متناسب و عدم تمایل سرمایه‌گذاران به پروژه‌های صرفاً اکولوژیک.	
		(O6). پتانسیل جذب منابع مالی ملی و بین‌المللی در حوزه سازگاری با تغییرات اقلیمی.		

پس از شناسایی و دسته‌بندی عوامل استراتژیک در چهار بُعد مدل مفهومی، ماتریس‌های ارزیابی عوامل داخلی و خارجی تشکیل شد. در این مرحله، بر اساس رویکرد «ارزیابی مبتنی بر شواهد»، وزن هر متغیر (بین ۰ تا ۱) بر مبنای تواتر و اهمیت آن در ادبیات منظر بیوفیلیک و اسناد بالادستی بحران آب تعیین شد. همچنین، نمره‌دهی (از ۱ تا ۴) با تطبیق دقیق کالبد و شرایط فعلی پارک چمران با زیرساخت‌های اکولوژیک انجام گرفت. نمره ۴ در ماتریس داخلی نشان‌دهنده قوت بسیار بالا (تطابق کامل کالبدی) و نمره ۱ نشان‌دهنده ضعف اساسی است. در ماتریس خارجی نیز نمره ۴ نشان‌دهنده واکنش و پتانسیل عالی منطقه در برابر فرصت، و نمره ۱ نشان‌دهنده آسیب‌پذیری شدید وضع موجود در برابر تهدیدها است (جدول ۳).

جدول ۳. ماتریس ارزیابی عوامل داخلی (IFE) و خارجی (EFE)

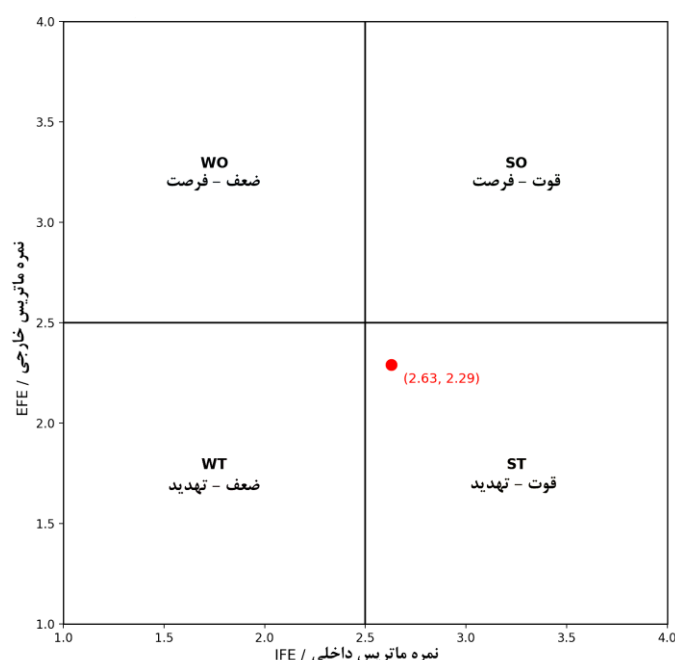
عوامل داخلی (IFE)	وزن	نمره	امتیاز	عوامل خارجی (EFE)	وزن	نمره	امتیاز
S1	۰/۱۰	۴	۰/۴۰	O1	۰/۰۸	۳	۰/۲۴
S2	۰/۰۵	۳	۰/۱۵	O2	۰/۰۵	۳	۰/۱۵
S3	۰/۱۵	۴	۰/۶۰	O3	۰/۰۵	۳	۰/۱۵
S4	۰/۱۰	۳	۰/۳۰	O4	۰/۰۸	۴	۰/۳۲
S5	۰/۰۵	۳	۰/۱۵	O5	۰/۱۰	۴	۰/۴۰
S6	۰/۰۵	۴	۰/۲۰	O6	۰/۰۵	۳	۰/۱۵
W1	۰/۱۲	۱	۰/۱۲	T1	۰/۱۸	۱	۰/۱۸
W2	۰/۰۸	۲	۰/۰۸	T2	۰/۱۲	۲	۰/۲۴
W3	۰/۱۰	۲	۰/۱۰	T3	۰/۱۰	۲	۰/۲۰
W4	۰/۰۵	۲	۰/۰۵	T4	۰/۰۷	۲	۰/۱۴
W5	۰/۰۵	۲	۰/۰۵	T5	۰/۰۵	۱	۰/۰۵
W6	۰/۰۵	۱	۰/۰۵	T6	۰/۰۷	۱	۰/۰۷
W7	۰/۰۵	۲	۰/۰۵				
مجموع	۱/۰۰	-	۲/۶۳	مجموع	۱/۰۰	-	۲/۲۹

به منظور عینیت بخشی به فرایند امتیازدهی و پرهیز از سوگیری های کیفی، تجارب جهانی موفق در زمینه تبدیل بسترهای صنعتی به زیرساخت های سبز بیوفیلیک، به عنوان «مبنای تطبیقی» مورد استناد قرار گرفته است. شاخص ترین نمونه در این راستا، پروژه بازاستفاده آب در پارک سیدنی استرالیا است. این پروژه با بهره گیری از توپوگرافی ناشی از استخراج سنگ و ایجاد سیستمی از تالاب های مصنوعی، سالانه ۸۴۰ میلیون لیتر آب باران را بازچرخانی کرده و تقاضای آب شرب شهری را ۱۰ درصد کاهش داده است [۳۹]. تطبیق ویژگی های این پروژه (نظیر استفاده از دیوارهای گابیونی برای کنترل جریان، سیستم های زیست پالایی با ۱۵۰ گونه گیاهی بومی و ایجاد آبشارهای هوادهی) با وضعیت موجود پارک چمران، مبنای تخصیص امتیازها قرار گرفت. برای مثال، نمره ۱ (ضعف اساسی) برای عامل W1 (فقدان بازچرخانی) به این دلیل اختصاص یافت که در مقایسه با استاندارد عملیاتی پارک سیدنی، محدوده مورد مطالعه علی رغم پتانسیل توپوگرافی مشابه، فاقد هرگونه زیرساخت برای جذب و بازچرخانی رواناب هاست.

در تحلیل ماتریس داخلی، نمره نهایی ماتریس داخلی برابر با ۲/۶۳ است. از آنجا که این عدد از حد متوسط (۲/۵) بیشتر است، نشان می دهد در محیط داخلی پارک چمران، کفه ترازوی ارزیابی به نفع قوت ها (به ویژه توپوگرافی و زیرساخت های طبیعی) سنگین تر از ضعف ها است. همچنین، در تحلیل ماتریس خارجی، کسب نمره ۲/۲۹ کمتر از حد متوسط (۲/۵) گویای آن است که محیط پیرامونی منطقه به شدت متلاطم و تهدیدآمیز است و ساختار فعلی پارک واکنش ضعیفی در برابر این تهدیدها، به ویژه بحران افت آب های زیرزمینی (T1) و مخاطرات هیدرولوژیک رودخانه ای نظیر سیلاب های فصلی (T3) نشان می دهد.

در نهایت، برای تعیین استراتژی نهایی بازطراحی منظر بیوفیلیک، از تکنیک تقاطع مختصات در ماتریس داخلی - خارجی (IE / SWOT Matrix) استفاده می شود. در این روش، نمره ماتریس داخلی (IFE) روی محور افقی (X) و نمره ماتریس خارجی (EFE) روی محور عمودی (Y) قرار می گیرد. بر اساس محاسبات پژوهش حاضر، نمره محور افقی ($X = 2/63$) (نشان دهنده قدرت داخلی منطقه) و نمره محور عمودی ($Y = 2/29$) (نشان دهنده غلبه تهدیدهای خارجی) است. با ترسیم تقاطع این دو نقطه ($2/29, 2/63$)، موقعیت پروژه در منطقه «رقابتی / اقتضایی» (ST - Max-Min) قرار می گیرد (شکل ۳).

این نتیجه نشان دهنده یک نوآوری کلیدی در پژوهش است؛ به این معنا که با وجود تهدیدهای ویرانگر محیطی مانند خشکسالی، پتانسیل های کالبدی - اکولوژیک منطقه درونی (مانند شیب طبیعی و بستر صخره ای) به اندازه ای قدرتمند است که می توان با اتکا بر آن ها و اعمال تغییرات هوشمندانه، تهدیدها را مهار کرد. بر این اساس، راهبردهای رقابتی (ST) پژوهش با رویکرد استفاده از قدرت داخلی برای خنثی سازی تهدیدهای خارجی در ادامه تدوین شد (جدول ۴).



شکل ۳. موقعیت راهبردها در ماتریس SWOT

جدول ۴. راهبردهای رقابتی (ST) جهت بازطراحی منظر بیوفیلیک سازگار با بحران آب

کد	عنوان راهبرد رقابتی (ST) بر اساس ابعاد مدل مفهومی	تعامل عوامل داخلی و خارجی
ST1	توسعه منظر آب محور ثقلی با فیلتراسیون گیاهی: بهره‌گیری از شیب و بستر صخره‌ای منطقه جهت به جریان انداختن آب بدون نیاز به پمپاژ پرمصرف و ترکیب آن با گیاهان آبی بومی رودخانه کرج جهت تصفیه بیولوژیک آب در مقابله با بحران افت آب‌های زیرزمینی.	T1, T4 در مقابله با S3, S1
ST2	میکروکلیماسازی بیوفیلیک کاهنده تبخیر: استفاده از تنوع گونه‌های گیاهی سایه‌انداز و ایجاد فرم‌های ارگانیک و صخره‌ای روی مسیر آبشار جهت کنترل تابش مستقیم و مهار تبخیر شدید ناشی از تغییرات اقلیمی.	T2 در مقابله با S1, S2
ST3	مدیریت هوشمند سیلاب با زیرساخت‌های چندعملکردی: تبدیل زیرساخت‌های خطی موجود به حوضچه‌های پلکانی تأخیری و نوارهای سیلاب‌پذیر جهت جذب، ذخیره موقت و کندسازی رواناب‌ها و سیلاب‌های فصلی رودخانه کرج.	T3 در مقابله با S4, S3
ST4	ارتقای حس تعلق از طریق منظر مشارکت محور: ایجاد فضاهای مکث، تحریک حواس با صدای آب و استفاده از نیروی اجتماعی داوطلب برای مدیریت و نگهداری منطقه برای مقابله با آسیب‌های وندالیسمی و کمبود بودجه.	T5, T6 در مقابله با S5, S6

پس از تعیین موقعیت راهبردی منطقه (رقابتی/اقتضایی - ST) و تدوین راهبردهای چهارگانه مبتنی بر تقاطع قوت‌های داخلی و تهدیدهای خارجی، مرحله نهایی در فرایند تحلیل استراتژیک، اولویت‌بندی این راهبردها جهت اجراست. به منظور ارزیابی عینی و رتبه‌بندی میزان اثربخشی هر راهبرد، از ماتریس برنامه‌ریزی استراتژیک کمی (QSPM) استفاده شد. در این ماتریس، تأثیر هر یک از عوامل کلیدی داخلی و خارجی بر راهبردهای تدوین شده بررسی شده و نمره جذابیت (Attractiveness Score - AS) از بازه ۱: (بدون جذابیت و بی‌تأثیر) تا ۴: (بسیار جذاب و کاملاً مرتبط) به آن‌ها اختصاص یافت. سپس از حاصل ضرب وزن هر عامل در نمره جذابیت آن، مجموع نمرات جذابیت (Total Attractiveness Score - TAS) برای هر راهبرد محاسبه شد تا مسیر بهینه برای مداخله در منطقه مورد مطالعه مشخص شود (جدول ۵).

جدول ۵. ماتریس برنامه‌ریزی استراتژیک کمی (QSPM) برای رتبه‌بندی راهبردهای رقابتی

عوامل کلیدی (داخلی و خارجی)	وزن	راهبرد ST4 (منظر مشارکت محور)	راهبرد ST3 (مدیریت سیلاب)	راهبرد ST2 (میکروکلیماسازی)	راهبرد ST1 (منظر آب محور)
قوت‌ها (Strengths)	AS TAS	AS TAS	AS TAS	AS TAS	AS TAS
(S1). هم‌جواری با رودخانه و پوشش گیاهی	۰/۱۰	۲ ۰/۲۰	۲ ۰/۲۰	۴ ۰/۴۰	۴ ۰/۴۰
(S2). بهره‌گیری از نور و جریان هوا	۰/۰۵	۳ ۰/۱۵	۱ ۰/۰۵	۴ ۰/۲۰	۲ ۰/۱۰
(S3). توپوگرافی شیب‌دار	۰/۱۵	۱ ۰/۱۵	۴ ۰/۶۰	۲ ۰/۳۰	۴ ۰/۶۰
(S4). زیرساخت‌های اولیه آبنا	۰/۱۰	۱ ۰/۱۰	۴ ۰/۴۰	۲ ۰/۲۰	۴ ۰/۴۰
(S5). علاقه‌مندی ساکنان محلی	۰/۰۵	۴ ۰/۲۰	۱ ۰/۰۵	۱ ۰/۰۵	۱ ۰/۰۵
(S6). موقعیت استراتژیک و دسترسی	۰/۰۵	۴ ۰/۲۰	۱ ۰/۰۵	۲ ۰/۱۰	۲ ۰/۱۰
ضعف‌ها (Weaknesses)	AS TAS	AS TAS	AS TAS	AS TAS	AS TAS
(W1). فقدان سیستم‌های بازچرخانی	۰/۱۲	۱ ۰/۱۲	۳ ۰/۳۶	۲ ۰/۲۴	۴ ۰/۴۸
(W2). نفوذپذیری خاک و تبخیر	۰/۰۸	۱ ۰/۰۸	۲ ۰/۱۶	۴ ۰/۳۲	۳ ۰/۲۴
(W3). طراحی تزیینی و هدررفت آب	۰/۱۰	۱ ۰/۱۰	۳ ۰/۳۰	۲ ۰/۲۰	۴ ۰/۴۰
(W4). ضعف پیوستگی مسیرها	۰/۰۵	۳ ۰/۱۵	۱ ۰/۰۵	۲ ۰/۱۰	۲ ۰/۱۰
(W5). اغتشاشات بصری و کمبود مبلمان	۰/۰۵	۴ ۰/۲۰	۱ ۰/۰۵	۳ ۰/۱۵	۲ ۰/۱۰
(W6). فقدان مدیریت مشارکتی	۰/۰۵	۴ ۰/۲۰	۱ ۰/۰۵	۱ ۰/۰۵	۱ ۰/۰۵
(W7). کمبود بودجه متناسب	۰/۰۵	۴ ۰/۲۰	۲ ۰/۱۰	۲ ۰/۱۰	۳ ۰/۱۵
فرصت‌ها (Opportunities)	AS TAS	AS TAS	AS TAS	AS TAS	AS TAS
(O1). رژیم بارش فصلی	۰/۰۸	۱ ۰/۰۸	۴ ۰/۳۲	۲ ۰/۱۶	۳ ۰/۲۴
(O2). اتصال با پارک چمران	۰/۰۵	۴ ۰/۲۰	۲ ۰/۱۰	۲ ۰/۱۰	۳ ۰/۱۵
(O3). نیروی کار جوان و متخصص	۰/۰۵	۴ ۰/۲۰	۲ ۰/۱۰	۲ ۰/۱۰	۲ ۰/۱۰
(O4). هم‌جواری با دانشکدگان کشاورزی	۰/۰۸	۲ ۰/۱۶	۲ ۰/۱۶	۳ ۰/۲۴	۴ ۰/۳۲
(O5). تأکید اسناد بالادستی بر منظر تاب‌آور	۰/۱۰	۲ ۰/۲۰	۴ ۰/۴۰	۳ ۰/۳۰	۴ ۰/۴۰
(O6). جذب منابع مالی تغییرات اقلیمی	۰/۰۵	۲ ۰/۱۰	۳ ۰/۰۵	۳ ۰/۱۵	۳ ۰/۱۵
تهدیدها (Threats)	AS TAS	AS TAS	AS TAS	AS TAS	AS TAS
(T1). بحران افت آب‌های زیرزمینی	۰/۱۸	۱ ۰/۱۸	۳ ۰/۵۴	۳ ۰/۵۴	۴ ۰/۷۲
(T2). خشکی هوا و تبخیر شدید	۰/۱۲	۱ ۰/۱۲	۲ ۰/۲۴	۴ ۰/۴۸	۳ ۰/۳۶
(T3). خطر وقوع سیلاب‌های فصلی	۰/۱۰	۱ ۰/۱۰	۴ ۰/۴۰	۱ ۰/۱۰	۲ ۰/۲۰
(T4). آلودگی‌های محیطی	۰/۰۷	۲ ۰/۱۴	۱ ۰/۰۷	۳ ۰/۲۱	۴ ۰/۲۸
(T5). تخریب توسط کاربران (وندالیسم)	۰/۰۵	۴ ۰/۲۰	۱ ۰/۰۵	۱ ۰/۰۵	۱ ۰/۰۵
(T6). عدم تخصیص بودجه مستمر	۰/۰۷	۴ ۰/۲۸	۲ ۰/۱۴	۲ ۰/۱۴	۲ ۰/۱۴
مجموع نمرات جذابیت (Sum of TAS)	۱/۰۰	۴/۰۱	۵/۰۹	۴/۹۸	۶/۲۸

بر اساس خروجی ماتریس برنامه‌ریزی استراتژیک کمی (QSPM)، راهبردهای رقابتی تدوین‌شده به ترتیب اولویت و جذابیت به شرح زیر رتبه‌بندی می‌شوند:

۱. راهبرد اول (ST1 - نمره ۶/۲۸): «توسعه منظر آب‌محور ثقلی با فیلتراسیون گیاهی» به دلیل هم‌راستایی کامل با مهم‌ترین تهدید (بحران آب) و مهم‌ترین قوت (توپوگرافی)، به عنوان حیاتی‌ترین و مؤثرترین راهبرد انتخاب شد.
۲. راهبرد سوم (ST3 - نمره ۵/۰۹): «مدیریت هوشمند سیلاب با زیرساخت‌های چندعملکردی» در رتبه دوم قرار گرفت که نشان‌دهنده اهمیت تاب‌آوری منطقه در برابر مخاطرات فصلی است.
۳. راهبرد دوم (ST2 - نمره ۴/۹۸): «میکروکلیماسازی بیوفیلیک کاهنده تبخیر» به عنوان راهبرد مکمل برای حفظ رطوبت و سازگاری اقلیمی در رتبه سوم جای گرفت.

۴. راهبرد چهارم (ST4 - نمره ۴/۰۱): «ارتقای حس تعلق از طریق منظر مشارکت‌محور» در اولویت بعدی برای تضمین پایداری اجتماعی و نگهداری بلندمدت پروژه قرار دارد.

برآیند یافته‌های حاصل از ماتریس‌های ارزیابی عوامل داخلی (IFE)، خارجی (EFE) و برنامه‌ریزی استراتژیک کمی (QSPM) نشان می‌دهد منطقه پارک چمران کرج، علی‌رغم برخورداری از پتانسیل‌های کالبدی - اکولوژیک بی‌نظیر توپوگرافی شیب‌دار، بستر صخره‌ای و هم‌جواری با رودخانه، به‌شدت تحت فشارهای ناشی از تهدیدهای کلان اقلیمی (به‌ویژه بحران افت آب‌های زیرزمینی و خشکسالی) قرار دارد. قرارگیری پروژه در موقعیت راهبردی «رقابتی (ST)» اثبات می‌کند که رویکردهای سنتی و تزئینی در طراحی منظر این منطقه دیگر پاسخگو نبوده و نیازمند یک تغییر پارادایم اساسی است. بالاترین نمره جذابیت (TAS = ۶/۲۸) که به راهبرد «توسعه منظر آب‌محور ثقیلی با فیلتراسیون گیاهی» اختصاص یافت، به‌روشنی تأیید می‌کند که «طراحی بیوفیلیک» در این بستر نباید به عنوان یک رویکرد صرفاً زیبایی‌شناختی تقلیل یابد؛ بلکه باید به مثابه یک «زیرساخت اکولوژیک تاب‌آور» عمل کند که با بهره‌گیری از نیروی گرانش (توپوگرافی منطقه) و چرخه‌های طبیعی، به مدیریت بحران آب، تصفیه رواناب‌ها و کاهش تبخیر بپردازد. این یافته‌ها، مسیر روشنی را برای گذار از یک منظر مصرف‌کننده و ناپایدار به یک منظر تولیدکننده و خودکفا ترسیم می‌کنند.

بحث

پژوهش حاضر با هدف گذار از رویکردهای صرفاً زیبایی‌شناختی و تزئینی به سمت بهره‌گیری از «طراحی بیوفیلیک به مثابه زیرساخت اکولوژیک و تاب‌آور» در مدیریت بحران آب تدوین شد. نتایج حاصل از تحلیل موقعیت راهبردی منطقه نشان داد پارک چمران کرج در موقعیت «رقابتی (ST)» قرار دارد؛ به این معنا که پتانسیل‌های درونی منطقه توانمندی لازم برای مهار تهدیدهای کلان اقلیمی را دارند. این یافته‌ها همسو با دیدگاه بیتلی و نیومن [۱۵] است که شهرهای بیوفیلیک را دارای انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری بالاتری در مقابله با بحران‌های محیط زیستی می‌دانند. مهم‌ترین یافته این پژوهش، کسب بالاترین نمره جذابیت برای راهبرد «توسعه منظر آب‌محور ثقیلی با فیلتراسیون گیاهی» است. این استراتژی بر بهره‌گیری از شیب طبیعی (توپوگرافی) منطقه تأکید دارد که همسو با مطالعات مودت و ولی‌پور [۲۶] در خصوص استفاده از بستر و شیب رودخانه است. همچنین، این راهبرد مستقیم‌الاً شناسایی‌شده در مطالعات پیشین را پوشش می‌دهد. مطالعات شاطرزاده و همکاران [۱] و ریو و همکاران [۴] بر اهمیت ادغام زیرساخت‌های سبز با آبراهه‌های طبیعی تأکید داشته‌اند؛ اما نوآوری پژوهش حاضر، کاربردی کردن این مفهوم از طریق «فیلتراسیون بیولوژیک با استفاده از نیروی گرانش» است. راهبرد «میکروکلیماسازی بیوفیلیک کاهنده تبخیر» نیز نشان می‌دهد ابعاد کالبدی چگونه در خدمت کاهش تبخیر قرار می‌گیرد که در راستای چارچوب شهرسازی بیوفیلیک پدرسز زری و همکاران [۸] قابل تبیین است. راهبرد «ارتقای حس تعلق از طریق منظر مشارکت‌محور» با تأکید بر تحریک حواس نشان‌دهنده اهمیت بُعد ادراکی است. همان‌طور که کلرت [۲۲] و تبریزی و جعفرپیشه [۳۰] بیان کرده‌اند، عناصر بیوفیلیک تأثیر بسزایی در تصویر ادراکی کاربران دارند. با این حال، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد در شرایط بحران آب، آرامش روانی شهروندان نباید به قیمت هدررفت منابع آبی در فرم‌های تزئینی و پرهزینه تأمین شود؛ بلکه این نیاز باید از طریق اکوسیستم‌های خودپالاینده و جریان‌های طبیعی آب برطرف شود؛ رویکردی که ردها [۳۲] نیز بر نقش مستقیم آن در بهبود سلامت روان از طریق حضور اصولی آب تأکید کرده است. قرارگیری راهبرد «مدیریت هوشمند سیلاب با زیرساخت‌های چندعملکردی» در رتبه دوم جذابیت، برجستگی بُعد مدیریتی را نشان می‌دهد. این یافته با پژوهش تردست و همکاران [۲۷] که نقش نهادهای مدیریتی را در برنامه‌ریزی راهبردی بیوفیلیک کلیدی می‌دانند، همخوانی دارد. تبدیل زیرساخت‌های خطی به حوضچه‌های تأخیری برای مدیریت سیلاب، نیازمند تغییر نگرش در سیاستگذاری‌های کلان است. همچنین ضعف منطقه در برخورداری از نظام مدیریت مشارکتی، لزوم تغییر رویکرد از مدیریت متمرکز به مدیریت جامعه‌محور را اثبات می‌کند. در یک جمع‌بندی تحلیلی می‌توان بیان کرد که رویکرد «طراحی منظر بیوفیلیک» در شرایط بحران آب نمی‌تواند به ابعاد صرفاً زیبایی‌شناختی محدود بماند. تقاطع ابعاد چهارگانه در این پژوهش نشان می‌دهد برای گذار از یک «منظر مصرف‌کننده» به یک «زیرساخت اکولوژیک تاب‌آور»، لازم است هندسه طبیعی منطقه، چرخه‌های تصفیه زیستی،

ارتقای سلامت جامعه و حکمروایی هوشمند منابع به صورت یکپارچه مورد توجه قرار گیرد؛ رویکردی که می‌تواند منظر پلکانی پارک چمران را به یک سیستم پویا در مدیریت پایدار منابع آب تبدیل کند.

محدودیت‌های پژوهش

این پژوهش با دو محدودیت اصلی همراه بوده است: نخست، فرایند امتیازدهی در تحلیل SWOT و ماتریس QSPM که مبتنی بر تحلیل کیفی منابع داخلی و خارجی، نمونه موفق جهانی، اسناد فرادست و ارزیابی کارشناسی بوده و بنابراین می‌تواند با درجه‌ای از عدم قطعیت همراه باشد. تغییرات احتمالی در دامنه ± 10 تا ± 20 درصد برای عوامل کلیدی ممکن است به جابه‌جایی جزئی در مقادیر جذابیت کل راهبردها منجر شود، با این حال با توجه به فاصله نسبی امتیاز نهایی راهبرد برتر با سایر گزینه‌ها در ماتریس QSPM، انتظار نمی‌رود که اولویت کلی راهبرد منتخب دچار تغییر اساسی شود. بررسی کمی دقیق‌تر این موضوع می‌تواند در پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرد. دوم، محدودیت دسترسی به داده‌های هیدرولوژیک دقیق در مقیاس محلی که امکان انجام مدل‌سازی کمی جریان آب و تحلیل دقیق رواناب را محدود ساخته است. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده با بهره‌گیری از مدل‌های هیدرولوژیک و تحلیل حساسیت کمی، چارچوب راهبردی ارائه‌شده را تکمیل کنند.

مطالعات آینده و پیشنهادها

مطالعات آینده در حوزه طراحی منظر بیوفیلیک و مدیریت پایدار آب شهری می‌توانند بر بهره‌گیری از فناوری‌های نوین تأمین آب و انرژی در فضاهای سبز شهری تمرکز داشته باشند. یکی از رویکردهای نوظهور در این زمینه، «استحصال آب از مه»^۱ است که به عنوان روشی کم‌انرژی برای تأمین آب در مناطق نیمه‌خشک مورد توجه قرار گرفته است. این فناوری با استفاده از سازه‌های توری شکل قادر است رطوبت موجود در مه را به قطرات آب تبدیل کرده و آن را برای مصارف محیطی و آبیاری فضای سبز ذخیره کند. مطالعات نشان می‌دهد سامانه‌های غیرفعال جمع‌آوری مه می‌توانند به طور متوسط روزانه بین ۱/۵ تا بیش از ۱۰ لیتر آب در هر متر مربع تولید کنند و به عنوان منبع مکمل در تأمین آب شهری مورد استفاده قرار گیرند [۴۰]. علاوه بر این، در رویکردهای نوین مدیریت محیط شهری، استفاده از مصالح پایدار و ارزیابی چرخه حیات^۲ به عنوان ابزاری برای کاهش اثرات جزیره حرارتی شهری و بهبود عملکرد زیست‌محیطی فضاهای شهری مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد انتخاب مصالح با ظرفیت حرارتی مناسب و بازتابندگی بالا می‌تواند نقش مهمی در کاهش دمای سطحی و ارتقای پایداری محیط شهری ایفا کند [۴۱]. از سوی دیگر، بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر نیز می‌تواند به عنوان بخشی از رویکرد یکپارچه آب - انرژی در فضاهای سبز شهری مورد توجه قرار گیرد. استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک شناور روی پهنه‌های آبی علاوه بر تولید انرژی پاک، می‌تواند موجب کاهش تبخیر آب و بهبود بهره‌وری منابع آبی شود [۴۲]. همچنین، توسعه فناوری‌های نوین فتوولتائیک مانند پنل‌های دوطرفه همراه با ردیاب خورشیدی می‌تواند کارایی تولید انرژی را به طور قابل توجهی افزایش داده و زمینه استفاده از انرژی خورشیدی در زیرساخت‌های شهری پایدار را فراهم کند [۴۳]. در مجموع، ترکیب راهکارهای نوین تأمین آب، مصالح پایدار و انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند چشم‌اندازهای جدیدی برای طراحی فضاهای سبز شهری مقاوم در برابر بحران آب فراهم کند و مسیرهای پژوهشی آینده در حوزه طراحی منظر پایدار را گسترش دهد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تدوین رویکردی نوین در مواجهه با بحران آب، به بازتعریف نقش فضاهای سبز شهری از رویکردهای تزئینی به زیرساخت‌های اکولوژیک پرداخته است. در پاسخ به سؤال اصلی پژوهش مبنی بر اینکه «مؤلفه‌ها، شاخص‌ها و راهبردهای عملیاتی طراحی منظر بیوفیلیک با رویکرد ارتقای تاب‌آوری اکولوژیک در پارک چمران کرج کدام‌اند؟»، نتایج نشان

می‌دهد این منظر تاب‌آور از تقاطع سیستماتیک چهار بُعد اساسی شکل می‌گیرد. در بُعد «محیط زیستی - اکولوژیک»، شاخص‌های بازچرخانی و فیلتراسیون گیاهی به عنوان موتور محرک تصفیه بیولوژیک عمل می‌کنند. در بُعد «کالبدی - فضایی»، بهره‌گیری از شیب طبیعی منطقه (طراحی پلکانی) و مصالح بوم‌آورد، بستر کالبدی لازم را برای جریان ثقیل آب فراهم می‌سازد. در بُعد «ادراکی - روان‌شناختی»، طراحی با هدف کاهش استرس شهروندان و ارتقای تعلق خاطر به طبیعت (بدون هدررفت منابع) مدنظر قرار گرفته و در نهایت، بُعد «مدیریتی - سیاست‌گذاری» با ارائه دستورالعمل‌های نگهداری سازگار با اقلیم، پایداری این سیستم را تضمین می‌کند.

نتایج تحلیل عوامل داخلی و خارجی نشان داد امتیاز ماتریس ارزیابی عوامل داخلی (IFE) برابر با ۲/۶۳ و امتیاز ماتریس ارزیابی عوامل خارجی (EFE) برابر با ۲/۲۹ است که بیانگر قرارگیری محدوده مورد مطالعه در موقعیت راهبردی «رقابتی (ST)» است. این وضعیت نشان می‌دهد توانمندی‌های درونی پارک چمران قابلیت بهره‌برداری برای کاهش اثر تهدیدهای اقلیمی و بحران آب را دارند. نتایج ماتریس برنامه‌ریزی راهبردی کمی (QSPM) نشان داد راهبرد «توسعه منظر آب‌محور ثقیل با فیلتراسیون گیاهی» با امتیاز جذابیت کل (TAS) برابر با ۶/۲۸ در اولویت نخست قرار دارد؛ پس از آن راهبرد «مدیریت هوشمند سیلاب با زیرساخت‌های چندعملکردی» با امتیاز ۵/۰۹، «میکروکلیماسازی بیوفیلیک کاهنده تبخیر» با امتیاز ۴/۹۸ و «منظر مشارکت‌محور» با امتیاز ۴/۰۱ در رتبه‌های بعدی جای گرفته‌اند. بنابراین، راهبردهای عملیاتی استخراج‌شده از این مؤلفه‌ها (نظیر توسعه منظر آب‌محور ثقیل، میکروکلیماسازی کاهنده تبخیر، ایجاد منظر مشارکت‌محور و مدیریت هوشمند سیلاب) نشان می‌دهند منظر پلکانی پارک چمران پتانسیل تبدیل شدن به یک سیستم یکپارچه و خودکار را دارد. در این مدل، فرم کالبدی در خدمت عملکرد اکولوژیک قرار می‌گیرد و آب محدود به جای آنکه عنصری تزئینی و پرمصرف باشد، به عنوان شریان حیاتی در چرخه‌های تصفیه طبیعی و تاب‌آوری منظر عمل می‌کند.

به منظور امکان ارزیابی عینی میزان موفقیت راهبردهای پیشنهادی در شرایط واقعی، مجموعه‌ای از اهداف عملکردی کمی به عنوان شاخص‌های پایش در دو افق زمانی کوتاه‌مدت (۳ تا ۵ سال) و بلندمدت (۱۰ تا ۱۵ سال) پیشنهاد می‌شود. بر این اساس، انتظار می‌رود اجرای نظام منظر آب‌محور ثقیل و جایگزینی تدریجی گونه‌های پرمصرف با گونه‌های بومی کم‌آب‌بر، به کاهش حدود ۲۰ تا ۳۰ درصدی مصرف آب آبیاری در کوتاه‌مدت و دستیابی به کاهش حدود ۳۵ تا ۴۰ درصدی در افق بلندمدت منجر شود. همچنین، از طریق افزایش پوشش سایه‌انداز گیاهی، اصلاح هندسه آبیگرها و تقویت خرداقلیم‌های مرطوب، کاهش نرخ تبخیر سطوح آبی در محدوده ۱۰ تا ۱۵ درصد در کوتاه‌مدت و تا حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد در بلندمدت قابل تحقق است. در حوزه مدیریت رواناب و سیلاب، تبدیل سطوح سخت به بسترهای نفوذپذیر و ایجاد حوضچه‌های تأخیری می‌تواند ظرفیت نگهداشت و نفوذپذیری رواناب را حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد بهبود بخشد. این مقادیر به عنوان اهداف عملکردی پیشنهادی برای پایش دوره‌ای و ارزیابی تطبیقی عملکرد منظر بیوفیلیک در مدیریت بحران آب در نظر گرفته می‌شوند.

در راستای تحقق مدل مفهومی و دستیابی به اهداف پژوهش، سیاست‌های کلان زیر پیشنهاد می‌شود:

۱) راهبرد اول: توسعه منظر آب‌محور ثقیل با فیلتراسیون گیاهی (بُعد کالبدی - فضایی)

- سیاست ۱: ممنوعیت استفاده از پمپ‌های مکانیکی با مصرف انرژی بالا در طرح‌های توسعه پارک و الزام به طراحی شیب‌بندی‌ها بر اساس نیروی گرانش^۱.
- سیاست ۲: اختصاص الزامی حاشیه‌های جریان آب به حوضچه‌های گیاه‌پالایی^۲ با استفاده انحصاری از فلور بومی رودخانه کرج (مانند لویی و نی) جهت تغذیه و تصفیه سفره‌های زیرزمینی.
- سیاست ۳: تدوین دستورالعمل احداث بسترهای سنگی - صخره‌ای متخلخل در مسیر آبراه‌ها جهت افزایش اکسیژن‌رسانی طبیعی به آب و بهبود کیفیت تصفیه بیولوژیک.

(۲) راهبرد دوم: میکروکلیماسازی بیوفیلیک کاهنده تبخیر (بعد محیط زیستی - اکولوژیک)

- سیاست ۱: الزام طراحان به تأمین حداقل ۶۰ درصد پوشش سایه‌انداز تاج درختان (کنوپی) روی سطوح آب‌های روباز و مسیرهای آبنما از طریق کاشت متراکم گونه‌های پهن‌برگ بومی در حریم بلافاصله آن‌ها، به منظور کاهش تابش مستقیم خورشید و کاهش تبخیر سطحی آب. آستانه ۶۰ درصد پوشش سایه‌انداز بر اساس مطالعات طراحی خرداقلیم در فضاهای سبز شهری تعیین شده است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد ایجاد پوشش تاجی درختان در بازه ۵۰ تا ۷۰ درصد می‌تواند با کاهش تابش مستقیم خورشید، دمای سطحی و نرخ تبخیر از سطوح آبی را به طور معناداری کاهش دهد؛ از این رو مقدار ۶۰ درصد به عنوان یک آستانه میانی و قابل تحقق در طراحی منظر انتخاب شده است [۴۴].
- سیاست ۲: جایگزینی هندسه خطی و سطوح صاف بتنی با فرم‌های ارگانیک، صخره‌ای و ناهموار در لبه‌های آبگیرها جهت کاهش سرعت باد سطحی و تقلیل نرخ تبخیر.
- سیاست ۳: ممنوعیت استفاده از پوشش‌های گیاهی با نیاز آبی بالا در نواحی آفتاب‌گیر پارک و جایگزینی آن‌ها با گونه‌های مقاوم به خشکی و ایجاد خرداقلیم‌های مرطوب در سایه‌سارها.

(۳) راهبرد سوم: مدیریت هوشمند سیلاب با زیرساخت‌های چندعملکردی (بعد مدیریتی - سیاستگذاری)

- سیاست ۱: بازطراحی و تغییر کاربری کانال‌های بتنی و خطی هدایت آب موجود به سیستم یکپارچه حوضچه‌های پلکانی، نوارهای سیلاب‌پذیر و سطوح اسفنجی جهت کندسازی، ذخیره موقت و نفوذ رواناب‌ها و سیلاب‌های فصلی.
- سیاست ۲: پیاده‌سازی سیستم‌های پایش هوشمند (سنسورهای سطح‌سنج و هشداردهنده سیلاب) در مسیرهای متصل به رودخانه کرج برای مدیریت لحظه‌ای ظرفیت حوضچه‌های تأخیری.
- سیاست ۳: الزام به استفاده از کفسازی‌های کاملاً نفوذپذیر در شعاع ۵۰ متری حوضچه‌های جاذب، جهت هدایت حداکثری رواناب‌های سطحی به سیستم مدیریت سیلاب پارک.

(۴) راهبرد چهارم: ارتقای حس تعلق از طریق منظر مشارکت‌محور (بعد ادراکی - روان‌شناختی)

- سیاست ۱: طراحی و احداث «ایستگاه‌های درک منظر» (نواحی مکث با مبلمان بوم‌آورد) در نقاطی با بالاترین کیفیت اکوستیک (صدای ریزش آب) جهت کاهش استرس و ارتقای سلامت روان شهروندان.
- سیاست ۲: تأسیس «انجمن دوستداران پارک چمران» و واگذاری رسمی بخش‌هایی از امور کاشت، نگهداری گیاهان آبی و پاکسازی برکه‌ها به گروه‌های داوطلب مردمی.^۱
- سیاست ۳: اجرای برنامه‌های آموزش شهروندی در بستر پارک با نصب تابلوهای تفسیرگر تعاملی، با هدف آگاهی‌بخشی درباره ارزش اکولوژیک منظر و تبدیل شهروندان به حافظان فعال در برابر رفتارهای وندالیستی.

در انتها بر اساس مطالعات انجام‌شده، الزامات اجرایی کالبدی و گونه‌های گیاهی مناسب برای طراحی منظر بیوفیلیک آب‌محور (برکه‌ها، آبنما و آبشارهای مصنوعی) در جدول ۶ تدوین و خلاصه‌سازی شده است. بر این اساس، برای عملیاتی‌سازی مؤلفه‌های طراحی منظر بیوفیلیک، مجموعه‌ای از شاخص‌های ارزیابی عملکرد شامل «درصد سطح نفوذپذیر»، «میزان پوشش سایه‌انداز گیاهی»، «تنوع گونه‌ای گیاهان بومی»، «ظرفیت فیلتراسیون زیستی آب» و «نیاز آبی گونه‌های گیاهی» به عنوان معیارهای سنجش‌پذیر در فرایند طراحی و انتخاب پوشش گیاهی در نظر گرفته شد. این شاخص‌ها مبنای تدوین ضوابط اجرایی و انتخاب گونه‌های گیاهی در جدول ۶ قرار گرفته‌اند.

جدول ۶. ضوابط اجرایی منظر بیوفیلیک و تحلیل اکولوژیک گونه‌های گیاهی پیشنهادی

بُعد در مدل مفهومی	رویکرد بازطراحی بیوفیلیک	ضوابط اجرایی و کالبدی	نقش در کاهش گردوغبار	کارایی تصفیهٔ زیستی	ظرفیت جذب آلاینده‌ها	مقاومت اقلیمی	نیاز آبی	گونه‌های گیاهی پیشنهادی	گروه عملکردی
کالبدی-فضایی	توسعهٔ منظر آب‌محور ثقلی	استفاده از توپوگرافی و بستر صخره‌ای برای هدایت ثقلی جریان آب؛ اجرای دیوارهای خشکه‌چین نفوذپذیر، دیوارهای گابیونی؛ کاشت گونه‌های ریشه‌عمیق برای تثبیت شیب و کاهش فرسایش؛ ایجاد سایه جهت کاهش تبخیر	متوسط تا بالا	کم	جذب ذرات معلق و بهبود کیفیت هوا	بالا	کم تا متوسط	بید مجنون، چنار، زبان‌گنجشک، سیدالاشجار، سنجد، صنوبر،	گیاهان تثبیت‌کننده بستر و سایه‌انداز
محیط زیست-اکولوژیک	فیلتراسیون گیاهی و میکروکلیماسازی	احداث حوضچه‌های تصفیه بیولوژیک چندمرحله‌ای و سلول بیوریتشن؛ کاشت گیاهان در زون‌های عمقی مختلف؛ افزایش زمان ماند آب؛ ایجاد سایه طبیعی بر سطح آب برای کاهش تبخیر	ناچیز	بسیار بالا	جذب نیتрат، فسفات و برخی فلزات سنگین	متوسط	متوسط تا زیاد	نی، لویی، جگن، پونه اسبی، عدسک آبی، نیلوفر آبی، زنبق آبی، نخل مرداب، تیزک آبی، آلاله باتلاقی، لیزیماکیا	گیاهان آبی پالایشگر آب
مدیریتی-سیاستگذاری	زیرساخت‌های سبزچندعملکردی و مدیریت سیلاب	تبدیل کانال‌های خطی به حوضچه‌های تأخیری و نوارهای سیلاب‌پذیر؛ استفاده از مصالح متخلخل؛ استقرار پوشش گیاهی مقاوم به غرقاب موقت؛ پایش سطح آب	متوسط تا بالا	متوسط	تثبیت خاک و جذب املاح	بسیار بالا	کم تا متوسط	گز، بیدمشک، گرامینه‌های مقاوم، فرانکنیا	گونه‌های مقاوم به نوسانات رطوبتی (حاشیهٔ سیلابی)
ادراکی-روان‌شناختی	منظر مشارکت‌محور و تحریک حواس	کاشت متراکم در مسیر بادهای غالب برای تله‌اندازی ذرات گردوغبار؛ طراحی فضاهای مکث در مجاورت صدای آب؛ استفاده از مصالح بوم‌آورد و طبیعی؛ ایجاد دسترسی ایمن به حاشیه آب	بالا	کم	جذب ذرات معلق هوا	بالا تا بسیار بالا	کم	اسطوخودوس، رزماری، بومادران، گل‌حسرت، درمنه، تاغ، سنجد، سرو نقره‌ای، ارس خزنده	گیاهان معطر و کاهنده گردوغبار

منابع

1. Shaterzadeh A, Khatibi SMR, Elahi M. Developing quality-based promotion indicators for Maharlu Lake tourism based on the biophilic model; adapted to the city structure. *Culture of Tourism*. 2023;3(11):30-39. doi: 10.22034/toc.2023.367779.1097 [Persian]
2. Beatley T. *Biophilic cities: integrating nature into urban design and planning*. Washington, DC: Island Press; 2011. Available from: https://www.researchgate.net/publication/262090770_Biophilic_Cities_Integrating_Nature_into_Urban_Design_and_Planning_by_Timothy_Beatley
3. Xue F, Lau SS, Gou Z, Song Y, Jiang B. Incorporating biophilia into green building rating tools for promoting health and wellbeing. *Environ Impact Assess Rev*. 2019;76:98-112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.02.004>
4. Reeve AC, Desha C, Hargreaves D, Hargroves K. Biophilic urbanism: contributions to holistic urban greening for urban renewal. *Smart Sustain Built Environ*. 2015;4(2):215-233. doi: <https://doi.org/10.1108/SASBE-11-2014-0057>
5. Ata N, Didehban M. The element of water and the status of water in Iranian architecture. *Proceedings of the 1st International Conference on Natural Hazards and Environmental Crises of Iran, Solutions and Challenges*; 2016; Ardabil, Iran. Available from: <https://civilica.com/doc/549318> [Persian]
6. Adibi AA, Monam A, Ghazizadeh SN. The role of water and fountains in urban parks. *Honar-ha-ye Ziba*. 2005;22:73-82. Available from: https://journals.ut.ac.ir/article_10740.html [Persian]
7. Astani S, Hazratzadeh A. Investigating the diversity of aquatic plants in Iran and their distribution in the country. *Proceedings of the National Conference on Biodiversity Conservation and Indigenous Knowledge*; 2010; Kerman, Iran. Available from: <https://civilica.com/doc/103141> [Persian]
8. Pedersen Zari M. Understanding and designing nature experiences in cities: A framework for biophilic urbanism. *Cities Health*. 2023;7(2):201-212. doi: <https://doi.org/10.1080/23748834.2019.1695511>
9. Ziari K, Pourahmad A, Fotouhi Mehrabani B, Hosseini A. Environmental sustainability in cities by biophilic city approach: a case study of Tehran. *Int J Urban Sci*. 2018;22(4):486-516. doi: <https://doi.org/10.1080/12265934.2018.1425153>
10. Lefosse D, van Timmeren A, Ratti C. Biophilia upscaling: a systematic literature review based on a three-metric approach. *Sustainability*. 2023;15(22):15702. doi: <https://doi.org/10.3390/su152215702>
11. Samalavičius A. Biophilic architecture: possibilities and grinders. *Logos (Lithuania)*. 2020;105:109-118. doi: <https://doi.org/10.24101/LOGOS.2020.79>
12. Browning W, Ryan C, Clancy J. 14 patterns of biophilic design. New York: Terrapin Bright Green, LLC; 2014. p. 1-60.
13. Ode Å, Tveit M, Fry G. Capturing landscape visual character using indicators: touching base with landscape aesthetic theory. *Landsc Res*. 2008;33(1):89-117. doi: <https://doi.org/10.1080/01426390701773854>
14. Totaforti S. Emerging biophilic urbanism: the value of the human–nature relationship in the urban space. *Sustainability*. 2020;12(13):5487. doi: <https://doi.org/10.3390/su12135487>
15. Beatley T, Newman P. Biophilic cities are sustainable, resilient cities. In: *Sustainable cities: urban planning challenges and policy*. Boca Raton: CRC Press; 2016. p. 3-28. doi: <https://doi.org/10.1201/b19796-3>
16. Arof KZM, Ismail S, Najib NH, Amat RC, Ahmad NHB. Exploring opportunities of adopting biophilic cities concept into mixed-use development project in Malaysia. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol 409. Bristol: IOP Publishing; 2020. p. 012054. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/409/1/012054>
17. Milliken S, Kotzen B, Walimbe S, Coutts C, Beatley T. Biophilic cities and health. *Cities Health*. 2023;7(2):175-188. doi: <https://doi.org/10.1080/23748834.2023.2176200>

18. Panlasigui S, Spotswood E, Beller E, Grossinger R. Biophilia beyond the building: applying the tools of urban biodiversity planning to create biophilic cities. *Sustainability*. 2021;13(5):2450. doi: <https://doi.org/10.3390/su13052450>
19. Salingaros NA. The biophilic healing index predicts effects of the built environment on our wellbeing. *Biourbanism*. 2019;8(1):13-34.
20. Wolfs ELM. Biophilic design and bio-collaboration: applications and implications in the field of industrial design. *Arch Des Res*. 2015;113(1):71-89.
21. Marte E, Calumpit A, de Sá Bessa B, Toledo A, Fadda R, Skoler T. Testing reliability of biophilic design matrix within urban residential playrooms. *Front Psychol*. 2020;11:570099. doi: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.570099>
22. Kellert S. The theory of biophilic design. In: Kellert SR, Heerwagen J, Mador M, editors. *Biophilic design: the theory, science and practice of bringing buildings to life*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2008. p. 1-20.
23. Kellert SR. *Nature by design: the practice of biophilic design*. New York: W. W. Norton & Company; 2018. p. 1-214.
24. Thomson G, Newman P. Green infrastructure and biophilic urbanism as tools for integrating resource efficient and ecological cities. *Urban Plan*. 2021;6(1):75-88. doi: <https://doi.org/10.17645/up.v6i1.3633>
25. Badamchizadeh P, Pourmohammadi MR, Oskouee Aras A. Exploring urban biophilic research: an in-depth analysis into the structure and content from global and local perspectives. *Geographical Urban Planning Research Quarterly*. 2024;12(4):135-155. doi: <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2025.382769.1994> [Persian]
26. Movadat E, Valipour M. Review and design the biophilic city inspired by the urban river (case study of the city of Dezful). *Journal of Geography and Environmental Studies*. 2020;9(34):23-42. Available from: <https://sanad.iau.ir/Journal/ges/Article/978933/FullText> [Persian]
27. Tardast Z, Meshkini A, Rajabi A. Explain the strategic planning model of biophilic tourism case study: Tehran metropolis. *Urban Tourism*. 2021;8(2):65-79. doi: <https://doi.org/10.22059/jut.2021.299414.782> [Persian]
28. Ebrahimpour M. Biophilic planning: a new approach in achieving viability in new towns of Iran (a case study of Hashtgerd new town). *Environmental Studies Quarterly*. 2020;13(50):39-59. [Persian]
29. Shokrani M, Nooraie H. Analysis and ranking of fifteen regions of Isfahan metropolis based on biophilic urban planning approach using Swara method. *Human Geography Research*. 2022;54(3):1107-1124. doi: <https://doi.org/10.22059/jhgr.2021.320908.1008275> [Persian]
30. Tabrizi N, Jafarpishe M. Biophilic approach in urban tourism (case study: Isfahan city). *Journal of Tourism Planning and Development*. 2022;11(41):123-147. doi: <https://doi.org/10.22080/jtpd.2022.23285.3673> [Persian]
31. Tarek S, Ouf ASE D. Biophilic smart cities: the role of nature and technology in enhancing urban resilience. *J Eng Appl Sci*. 2021;68:1-22. doi: <https://doi.org/10.1186/s44147-021-00042-8>
32. Radha CH. Biophilic design approach for improving human health in the built environment. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*. 2022;13(9):1-12. doi: <https://doi.org/10.14456/ITJEMAST.2022.188>
33. Pirasteh A, Babakhani M, Yazdanpanah Shahabadi MR. Strategic planning of biophilic tourism (case study: Chamran Boulevard, Karaj). *Tourism and Leisure*. 2025;10(20):41-69. doi:10.22133/tlj.2025.464242.1187. [Persian]
34. Alborz Province Meteorological Department. Comparative statistics of meteorological stations in Alborz Province, year 1403. Karaj: Iran Meteorological Organization; 2025. [Persian]
35. Salajegheh A, Sanjari M. Hydrological report of the Karaj comprehensive urban plan. Tehran: Office of Planning and Research Supervision, University of Tehran; Parks and Green Space Organization of Karaj Municipality; 2012. Available from: <https://park.karaj.ir/portal/home/> [Persian]
36. Zarghami, F, Jozi, S A, Zaeimdar, M and Hejazi, R. Assessment of Social and Structural Vulnerability of Human Settlements Exposed to Flood Risk Case Study: A Six-Kilometer River

- Reach between Amir Kabir Dam and Karaj City. Urban Economics and Planning, 6(2), 52-69. 2025; doi: 10.22034/uep.2025.510211.1607 [Persian]
37. Feghihi J, Kabir A, Azad Z, Rajabi R, Jalilian MA, Soltani S, et al. Base maps and analysis of green spaces in Karaj city. Tehran: Office of Planning and Research Supervision, University of Tehran; Parks and Green Space Organization of Karaj Municipality; 2013. Available from: <https://park.karaj.ir/portal/home/> [Persian]
38. Naderi R, Etemad V, Azarnivand H, Arzani H, Moeini M, Taheri Sorkhsheni F, et al. Vegetation survey of green spaces in Karaj city. Tehran: Office of Planning and Research Supervision, University of Tehran; Parks and Green Space Organization of Karaj Municipality; 2014. Available from: <https://park.karaj.ir/portal/home/> [Persian]
39. Landscape Performance Series. Sydney Park Water Re-use Project. [Internet]. 2016; Available from: <https://www.landscapeperformance.org/case-study-briefs/sydney-park>
40. Allahrabbi Shirazi MA, Yousefi H, Fathi A, Baneshi M. Urban water sustainability through energy-free fog water harvesting: a review of fog-collecting systems. Urban Development Policy Making. 2027;3(1):69-94. doi:10.22034/judpm.2025.558718.1073. [Persian]
41. Moaven M, Allahrabbi Shirazi MA, Ghodusinejad MH. Systematic analysis of the impact of life cycle assessment of materials on urban heat island mitigation: a path toward sustainable urban policy using the PRISMA method. Urban Development Policy Making. 2025;2(1):95-110. doi:10.22034/judpm.2025.512352.1019. [Persian]
42. Allahrabbi Shirazi MA. Idea generation and examination of environmental challenges of floating solar photovoltaic power plants on wetlands and its economic advantage for local communities. Journal of Sustainable Energy Systems. 2024;3(1):39-51. doi:10.22059/ses.2024.377595.1070. [Persian]
43. Allahrabbi Shirazi MA, Goldoust A, Khatami M, Abedi E, Janfeshan MH. Modeling and simulation of a solar tracker with bifacial panel: a case study of Tehran city. Journal of Sustainable Energy Systems. 2024;3(3):271-287. doi:10.22059/ses.2024.379035.1078. [Persian]
44. Brown RD, Gillespie TJ. Microclimatic landscape design: creating thermal comfort and energy efficiency. New York: John Wiley & Sons; 1995; 17(2): 225-226. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199702\)17:2%3C225::AID-JOC102%3E3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199702)17:2%3C225::AID-JOC102%3E3.0.CO;2-4)



Designing a Native Model of an Empowering Entrepreneurial Ecosystem for Female-Headed Households in Tehran Metropolis

Mohammad Javad Lashkari¹  | Mehran Maghsoudi^{2*}  | Shadi Shahverdiani³ 

1. Department of Entrepreneurship, K.I.C., Islamic Azad University, Kish, Iran. Email: lashkari.nut@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Entrepreneurship, K.I.C., Islamic Azad University, Kish, Iran. Email: r_n_maghsoudi@gmail.com

3. Department of Entrepreneurship, K.I.C., Islamic Azad University, Kish, Iran. Email: shadishahverdiani@iaau.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received 20 May 2026

Revised 20 June 2026

Accepted 06 July 2026

Published Online 23 September 2026

Keywords:

Entrepreneurial Ecosystem,
Model Design,
Empowerment,
Female-Headed Households,
Tehran Municipality Districts.

ABSTRACT

This study aimed to design and validate a native model of an empowering entrepreneurial ecosystem for female-headed households in the 22 districts of Tehran metropolis. The research adopted a developmental-applied purpose with a sequential exploratory mixed-method design. In the qualitative phase, semi-structured interviews were conducted with 30 experts, including entrepreneurship management professors, Tehran municipality managers, activists from non-governmental organizations, and successful female entrepreneurs. In the quantitative phase, 380 female-headed households and female entrepreneurs residing in Tehran were selected through multi-stage cluster sampling from five selected districts (3, 6, 12, 15, and 22) and completed a researcher-developed questionnaire. Reliability was confirmed with Cronbach's alpha (0.86) and composite reliability (0.94). Data analysis was performed using Structural Equation Modeling with Partial Least Squares approach (PLS-SEM). The final model was organized into three levels: foundational/supportive (individual factors, social support, access to resources, institutional factors, market and opportunities), performance pathway (entrepreneurial intention, business creation, business performance), and empowerment outcomes (economic, psychological, and social empowerment). Findings revealed that institutional factors ($\beta=0.74$) were the strongest predictor of entrepreneurial intention, and market and opportunities ($\beta=0.66$) had the strongest impact on business performance. Model fit indices indicated good quality (SRMR=0.042, NFI=0.91, GoF=0.54). This model is the first localized entrepreneurial ecosystem model for empowering female-headed households at the urban district level in Tehran.

Cite this article: Lashkari, M. J.; Maghsoudi, M. & Shahverdiani, Sh. (2026). Designing a Native Model of an Empowering Entrepreneurial Ecosystem for Female-Headed Households in Tehran Metropolis. *Urban Development Policy Making*, 3 (3), 541-556. DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.584861.1112>



© Authors retain the copyright and full publishing rights.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.584861.1112>

Introduction

Female-headed households are among the most vulnerable social groups in metropolitan areas due to their simultaneous role as breadwinner and caregiver. Entrepreneurship has been proposed as a flexible and sustainable solution for empowering this group. However, the success of entrepreneurship depends on the existence of a supportive and integrated entrepreneurial ecosystem. Review of the literature reveals three major gaps: theoretical-thematic (lack of integration between entrepreneurial ecosystem and empowerment literature), spatial-scalar (lack of district-level models for Tehran's 22 diverse districts), and practical-executive (lack of operational frameworks for urban policymakers). This study aimed to design and validate a native model of an empowering entrepreneurial ecosystem for female-headed households in the 22 districts of Tehran metropolis.

Methodology

The research adopted a developmental-applied purpose with a sequential exploratory mixed-method design. In the qualitative phase, semi-structured interviews were conducted with 30 experts selected through purposive and snowball sampling. In the quantitative phase, 380 female-headed households and female entrepreneurs residing in Tehran were selected through multi-stage cluster sampling from five selected districts (3, 6, 12, 15, and 22) representing privileged, semi-privileged, and less-privileged areas. A researcher-developed 46-item questionnaire was completed by participants. Reliability was confirmed with Cronbach's alpha (0.86) and composite reliability (0.94). Content and construct validity were established through expert panel and confirmatory factor analysis. Data analysis was performed using Structural Equation Modeling with Partial Least Squares approach (PLS-SEM) using SmartPLS version 4 and SPSS version 26.

Results

The final model was organized into three levels. The first level (foundational/supportive) includes five components: individual factors ($\beta=0.53$ on entrepreneurial intention, $\beta=0.62$ on business performance), social support ($\beta=0.53$ on entrepreneurial intention, $\beta=0.56$ on social empowerment), access to resources ($\beta=0.59$ on entrepreneurial intention, $\beta=0.55$ on business creation), institutional factors ($\beta=0.74$ on entrepreneurial intention), and market and opportunities ($\beta=0.56$ on entrepreneurial intention, $\beta=0.66$ on business performance). The second level (performance pathway) includes entrepreneurial intention, business creation, and business performance with path coefficients of 0.52 and 0.61 respectively. The third level (empowerment outcomes) includes economic ($\beta=0.58$), social ($\beta=0.51$), and psychological ($\beta=0.47$) empowerment. Model fit indices indicated good quality: SRMR=0.042, NFI=0.91, RMS_Theta=0.118, and GoF=0.54. The R^2 values for endogenous variables were above 0.79, demonstrating high predictive power.

Conclusion

This model is the first comprehensive and localized entrepreneurial ecosystem model specifically designed for empowering female-headed households at the urban district level in Tehran. It provides an operational tool for place-based policymaking by Tehran Municipality and supporting institutions. The key policy implication is that institutional restructuring (laws, regulations, and support processes) is the first priority, while economic empowerment (income and financial security) is the immediate priority in Tehran's current context. The study recommends that in less-privileged districts (e.g., districts 15 and 22), priority should be given to strengthening institutional factors and improving access to resources, while in more privileged districts (e.g., districts 3 and 6), attention should focus on market development and opportunity enhancement. The model has potential for generalization to other Iranian metropolitan areas; however, the weight and priority of each component require contextual adaptation.



طراحی الگوی بومی اکوسیستم کارآفرینی توانمندساز زنان سرپرست خانوار در کلان‌شهر تهران

محمدجواد لشکری^۱ | مهران مقصودی^{۲*} | شادی شاهوردیانی^۳

۱. گروه کارآفرینی، واحد بین‌المللی کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، کیش، ایران. رایانامه: lashkari.nut@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه کارآفرینی، واحد بین‌المللی کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، کیش، ایران. رایانامه: dr_n_maghsoudi@gmail.com

۳. گروه کارآفرینی، واحد بین‌المللی کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، کیش، ایران. رایانامه: shadishahverdiani@iau.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

کلیدواژه:

اکوسیستم کارآفرینی،

طراحی الگو،

توانمندسازی،

زنان سرپرست خانوار،

مناطق ۳۲گانه تهران.

کارآفرینی می‌تواند یکی از سازوکارهای مؤثر برای افزایش استقلال اقتصادی، تقویت عاملیت و ارتقای کیفیت زندگی زنان سرپرست خانوار باشد؛ با این حال، تحقق پایدار پیامدهای کارآفرینانه فقط به ویژگی‌های فردی وابسته نیست و به کیفیت محیط نهادی، اجتماعی، منابعی و بازاری پیرامون افراد نیز بستگی دارد. با وجود اهمیت این موضوع، مطالعات موجود در ایران کمتر به تلفیق هم‌زمان اکوسیستم کارآفرینی، فرایند کارآفرینانه و پیامدهای چندبعدی توانمندسازی زنان سرپرست خانوار در بستر شهری پرداخته‌اند. پژوهش حاضر با هدف طراحی و اعتبارسنجی الگوی بومی اکوسیستم کارآفرینی توانمندساز زنان سرپرست خانوار در کلان‌شهر تهران انجام شد. اگرچه قلمرو مفهومی پژوهش کلانشهر تهران و مناطق ۳۲گانه آن است، اعتبارسنجی تجربی الگو در پنج منطقه منتخب تهران انجام گرفت. رویکرد پژوهش آمیخته اکتشافی متوالی و از نوع توسعه‌ای - کاربردی است. در فاز کیفی، اساتید مدیریت کارآفرینی، مدیران شهرداری تهران، فعالان سازمان‌های مردم‌نهاد و کارآفرینان موفق زن، مصاحبه نیمه‌ساختاریافته به عمل آمد. تحلیل داده‌ها با مدل‌سازی معادلات ساختاری به روش حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM) انجام گرفت. الگوی نهایی در سه سطح سازماندهی شد: سطح اول (پایه/حمایتی)؛ سطح دوم (میانی/عملکردی)؛ سطح سوم (توانایی/تأثیرگذاری). یافته‌ها نشان داد قوی‌ترین پیش‌بینی‌کننده قصد کارآفرینانه، عوامل نهادی و بیشترین تأثیرپذیرفته‌شده از عملکرد کسب‌وکار، توانمندسازی اقتصادی است. شاخص اندازه‌گیری کیفیت مدل بیانگر کیفیت مطلوب الگو بود. این الگو مدل بومی و منطقه‌محور ویژه زنان سرپرست خانوار در سطح مناطق منتخب شهری تهران است و پیشنهاد می‌شود در برخی مناطق، تقویت عوامل نهادی و دسترسی به منابع و در مناطق دیگر، تمرکز بر بازار و فرصت‌ها در اولویت قرار گیرد.

استناد: لشکری، محمدجواد؛ مقصودی، مهران و شاهوردیانی، شادی (۱۴۰۵). طراحی الگوی بومی اکوسیستم کارآفرینی توانمندساز زنان سرپرست خانوار در کلان‌شهر تهران. *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۳ (۳) ۵۴۱-۵۵۶.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.584861.1112>

© نویسندگان

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.584861.1112>



مقدمه

امروزه، کارآفرینی به عنوان موتور محرک توسعه اقتصادی و اجتماعی در بسیاری از کشورهای جهان شناخته می‌شود. کارآفرینان نه تنها عامل ایجاد اشتغال و تولید ثروت، بلکه نیروی پیشران نوآوری و تحول در ساختارهای اقتصادی محسوب می‌شوند [۱]. در این میان، کارآفرینی زنان به دلیل نقش مضاعف آنان در عرصه‌های اقتصادی و خانوادگی، همواره مورد توجه ویژه پژوهشگران و سیاستگذاران بوده است [۲]. مطالعات نشان می‌دهد اشتغال و فعالیت‌های کارآفرینانه برای زنان، به‌ویژه آنان که سرپرستی خانوار را به عهده دارند، با پیامدهای مثبتی همچون افزایش عزت نفس، استقلال مالی، ارتقای جایگاه اجتماعی و بهبود کیفیت زندگی همراه است [۳].

زنان سرپرست خانوار به دلیل ایفای هم‌زمان نقش «نان‌آور» و «مراقب»، در زمره آسیب‌پذیرترین گروه‌های اجتماعی کلان‌شهرها محسوب می‌شوند [۴]. این زنان نه تنها مسئولیت کامل تأمین اقتصادی خانواده را به عهده دارند، بلکه بار اصلی مراقبت از کودکان، سالمندان و مدیریت امور خانوار نیز بر دوش آنان است [۵]. بر اساس آخرین سرشماری مرکز آمار ایران، حدود ۵/۱۲ درصد از خانوارهای کشور تحت سرپرستی زنان اداره می‌شوند که این رقم در کلان‌شهری مانند تهران به بیش از ۱۵ درصد می‌رسد [۶]. ولر و لوگان^۱ [۷] در مرور نظام‌مند خود نشان دادند خانوارهای زن‌سرپرست در معرض خطر فقر مزمن قرار دارند. این واقعیت آماری، نشان‌دهنده اهمیت مضاعف توجه به وضعیت معیشتی و اشتغال این قشر در پایتخت کشور است. در مقابل، نبود شغل پایدار و درآمد کافی برای زنان سرپرست خانوار، پیامدهای چندبعدی گسترده‌ای از جمله فقر مزمن، محرومیت از خدمات اساسی، کاهش سلامت روانی و انزوای اجتماعی را به دنبال دارد [۸]. گزارش‌های تحلیلی معاونت برنامه‌ریزی و توسعه شهرداری تهران بیانگر آن است که بخش قابل توجهی از این زنان یا در بخش غیررسمی اقتصاد با درآمدی ناپایدار مشغول به کار هستند یا به طور کامل خارج از چرخه اشتغال رسمی قرار دارند [۹]. این وضعیت، آسیب‌پذیری اقتصادی آنان را در کلان‌شهری با هزینه‌های زندگی بالا تشدید می‌کند.

کارآفرینی و راه‌اندازی کسب‌وکارهای خرد و کوچک، به عنوان راه‌حلی انعطاف‌پذیر و پایدار برای توانمندسازی این قشر مطرح شده است [۱۰]. این راه‌حل بالقوه می‌تواند با شرایط زندگی زنان سرپرست خانوار سازگار شود و احساس مالکیت، استقلال و خودکارآمدی را در آنان تقویت کند. با این حال، تجربه جهانی نشان می‌دهد موفقیت پایدار کارآفرینی در خلأ اتفاق نمی‌افتد و وجود یک «اکوسیستم کارآفرینی» حمایت‌گر، یکپارچه و پاسخگو، شرط لازم برای تحقق آن است [۱۱].

مفهوم «اکوسیستم کارآفرینی» در دو دهه اخیر به پارادایمی مسلط در مطالعات کارآفرینی و توسعه منطقه‌ای تبدیل شده است. این مفهوم بر تعامل پیچیده، پویا و وابسته به زمینه مجموعه‌ای از بازیگران (کارآفرینان، سرمایه‌گذاران، مربیان)، نهادها (دانشگاه‌ها، مؤسسه‌های مالی، دولت‌ها)، شبکه‌ها، فرهنگ، زیرساخت‌ها و سیاست‌های عمومی تأکید می‌ورزد که در یک محدوده جغرافیایی مشخص فعالیت می‌کنند [۱۲]. عملکرد جمعی این عناصر است که میزان و کیفیت کارآفرینی را در آن منطقه تعیین می‌کند [۱۳]. در سطح شهری، اکوسیستم‌های کارآفرینی به دلیل تراکم جمعیت، ایده‌ها، سرمایه و زیرساخت، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند [۱۴]. نویمایر و همکاران^۲ [۱۵] ویژگی‌های اکوسیستم کارآفرینی فراگیر را شامل دسترسی عادلانه به منابع، شبکه‌های حمایتی متنوع و سیاست‌های آگاه به تفاوت‌ها معرفی کردند.

کلان‌شهر تهران به عنوان پایتخت ایران، با جمعیتی نزدیک به ۹ میلیون نفر و میزبانی از اقشار اجتماعی - اقتصادی بسیار متنوع، بستر پیچیده‌ای برای بررسی این مسئله است. این کلان‌شهر از ۲۲ منطقه کاملاً متمایز تشکیل شده که هر یک نشان‌دهنده ترکیب خاصی از شاخص‌های توسعه هستند. از یک سو، مناطقی با تراکم بالای فعالیت‌های اقتصادی، دسترسی مناسب به زیرساخت‌های مالی، آموزشی و حمایتی وجود دارند و از سوی دیگر، مناطقی با چالش‌های عمیق‌تری مانند محرومیت نسبی، نرخ بیکاری بالاتر و دسترسی محدود به خدمات شهری پایه مواجه‌اند [۹]. این ناهمگونی درون‌شهری، لزوم اتخاذ رویکردی منطقه‌محور و اقتضایی را در طراحی هرگونه مداخله سیاستی آشکار می‌سازد.

1. Weller&Logan

2. Neumeyer et al

پتانسیل بالقوه بالایی برای شکل‌دهی به یک اکوسیستم کارآفرینی پویا در تهران وجود دارد. با این حال، شواهد نشان می‌دهد این پتانسیل به طور نابرابر بین مناطق و گروه‌های اجتماعی توزیع شده و زنان سرپرست خانوار کمترین بهره را از آن برده‌اند [۶ و ۱۶]. آمارهای موجود نشان می‌دهد سهم خانوارهای زن سرپرست در تهران روندی افزایشی داشته و بخش قابل توجهی از این زنان یا در بخش غیررسمی با درآمد ناپایدار مشغول به کارند یا به طور کامل بیکار هستند.

با توجه به شکاف‌های نظری، مکانی و کاربردی شناسایی‌شده، پژوهش حاضر در پی آن است که الگویی بومی برای تبیین اکوسیستم کارآفرینی توانمندساز زنان سرپرست خانوار در بستر کلانشهر تهران ارائه کند. در این پژوهش، کلانشهر تهران به عنوان زمینه اصلی مطالعه در نظر گرفته شده و تنوع فضایی مناطق ۲۲گانه به عنوان مبنای توجه به رویکرد منطقه محور لحاظ شده است. با این حال به دلیل محدودیت‌های اجرایی و پراکندگی جامعه آماری، اعتبارسنجی کمی الگو در پنج منطقه منتخب تهران انجام شده است. این پنج منطقه با هدف پوشش طیفی از شرایط متفاوت فضایی و اجتماعی - اقتصادی انتخاب شدند و بنابراین، یافته‌های کمی پژوهش مستقیم بیانگر وضعیت همان پنج منطقه است و تعمیم آماری به سایر مناطق نیازمند آزمون مستقل خواهد بود.

بر این اساس، سؤال اصلی پژوهش حاضر به این صورت تدوین می‌شود: الگوی بومی اکوسیستم کارآفرینی توانمندساز زنان سرپرست خانوار در کلانشهر تهران از چه مؤلفه‌ها، روابط و ساختار سلسله‌مراتبی برخوردار است و الگوی حاصل در نمونه تجربی منتخب از چه میزان و پایایی برخوردار است؟

پیشینه پژوهش

مفهوم «اکوسیستم کارآفرینی» در دو دهه اخیر به پارادایمی مسلط در مطالعات کارآفرینی و توسعه منطقه‌ای تبدیل شده است. فریرا و همکاران [۱] با مرور نظام‌مند مطالعات اکوسیستم کارآفرینی نشان دادند که این مفهوم از یک استعاره زیستی به یک چارچوب سیاستی بالغ تبدیل شده است. ایزنبرگ [۱۲] مدل شش‌ستونی خود را ارائه کرد که در آن شش حوزه سیاستی بازارها، سرمایه انسانی، فرهنگ، حمایت‌های مالی، چارچوب‌های قانونی/دولتی و نهادهای حمایتی را به عنوان ارکان اکوسیستم معرفی می‌کند. استام و ون دِ ون [۱۱] با رویکرد سیستمی، خروجی‌های اکوسیستم را مورد توجه قرار دادند و سه دسته شرایط مؤسسی، مربوط به بازار و حمایتی را شناسایی کردند. آدرچ و همکاران [۱۳] در سطح شهری نشان دادند نهادهای محلی نقش کلیدی در شکل‌دهی به جهت‌گیری رشد اکوسیستم کارآفرینی ایفا می‌کنند. در سطح بین‌المللی، براش و همکاران [۲] با رویکردی جهانی به بررسی حمایت اکوسیستمی از کارآفرینی زنان پرداختند و استدلال کردند که اکوسیستم‌های سنتی اغلب به طور ناخواسته بر اساس الگوهای مردانه طراحی شده‌اند. آنان ویژگی‌های یک اکوسیستم فراگیر را شامل شبکه‌های حامی، برنامه‌های آموزشی و مالی متناسب با نیازهای خاص و سیاست‌های آگاهانه‌جنسیت معرفی کردند. ولتر و همکاران [۳] با تأکید بر مفهوم بافت‌محوری در کارآفرینی نشان دادند رفتار کارآفرینانه زنان پاسخ عقلایی به محدودیت‌های ساختاری است، نه کمبودهای فردی. راوندی [۱۷] بر این نکته تأکید دارد که اکوسیستم‌های کارآفرینی منطقه‌ای باید متناسب با شرایط بومی هر منطقه طراحی شوند.

در حوزه توانمندسازی زنان، کابیر [۵] با ارائه مدل تأثیرگذار خود، توانمندسازی زنان را متشکل از سه بعد به هم پیوسته «منابع»، «عاملیت» و «دستاوردها» معرفی کرد. مالوترا و شولر [۱۸] چارچوبی برای سنجش توانمندسازی زنان در چهار عرصه اقتصادی، اجتماعی، روان‌شناختی و سیاسی ارائه دادند. آل - دجانی و مارلو [۱۰] رابطه بین توانمندسازی و کارآفرینی را بازتعریف کرده و بر این نکته تأکید کردند که دسترسی به منابع بدون عاملیت، لزوماً به توانمندسازی منجر نمی‌شود. چانت و سویتمن [۴] با معرفی چارچوب «آسیب‌پذیری چندلایه»، وضعیت زنان سرپرست خانوار را در سه سطح خرد (محدودیت در سرمایه انسانی، بار مضاعف کاری)، میانی (گسست شبکه‌های حمایتی) و کلان (هنجارهای جنسیتی، سیاست‌های نابینا به جنسیت) تحلیل کردند. احمدی و رضوان‌فر [۱۹] چالش‌های توانمندسازی اقتصادی زنان سرپرست خانوار را در پنج دسته حقوقی - قانونی، فرهنگی - اجتماعی، آموزشی - مهارتی، مالی - اعتباری و اجرایی - نهادی طبقه‌بندی کردند. بروتون و همکاران [۲۰] تأکید کردند که کارآفرینی می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر برای توانمندسازی اقتصادی زنان در کشورهای در حال توسعه عمل کند. هنری و

همکاران [۲۱] در مرور خود نشان دادند پژوهش‌های کارآفرینی زنان به تدریج از رویکرد کمبودمحور به رویکرد توانمندساز تغییر پارادایم داده است.

در ایران، پژوهش‌های داخلی نیز به تدریج به این حوزه وارد شده‌اند. رحیمی‌پور و سجادی [۲۲] با رویکرد آمیخته به شناسایی موانع کارآفرینی زنان در ایران پرداختند و نشان دادند موانع در سه لایه اصلی فردی - روان‌شناختی، ساختاری - نهادی و فرهنگی - اجتماعی قابل طبقه‌بندی است. صفری شالی و همکاران [۲۳] با تحلیل چندسطحی فقر خانوارهای زن سرپرست در مناطق شهری تهران نشان دادند فقر این زنان عمدتاً ماهیتی چندبعدی دارد و صرف مداخلات اقتصادی بدون توجه به ابعاد اجتماعی و روان‌شناختی، ناکارآمد است. ابوالفضلی و همکاران [۲۴] با رویکرد کارآفرینی اجتماعی به طراحی الگوی توانمندسازی زنان سرپرست خانوار پرداختند که شامل سه مؤلفه اصلی «ظرفیت‌سازی فردی»، «توسعه سرمایه اجتماعی» و «دسترسی به منابع مالی» بود. غفاری و موسوی [۲۵] با سنجش توانمندسازی اقتصادی زنان سرپرست خانوار تحت پوشش نهادهای حمایتی نشان دادند کمک‌های نقدی به‌تنهایی تأثیر محدودی بر «عاملیت» و «مشارکت اجتماعی» این زنان دارد. براتی و یآوری [۲۶] به بررسی مفهوم اکوسیستم کارآفرینی در ایران پرداختند و به این نتیجه رسیدند که اکوسیستم کارآفرینی ایران فاقد رویکرد منطقه‌محور است و بیشتر مطالعات در سطح کلان ملی انجام شده‌اند. رفیع‌پور و همکاران [۲۷] نیز به شکاف میان تعریف آماری و واقعیت اجتماعی زنان سرپرست خانوار در ایران اشاره کرده و بر لزوم بازتعریف این مفهوم برای سیاستگذاری مؤثرتر تأکید کردند. موسوی و غفاری [۱۶] طی پژوهشی نشان دادند زنان سرپرست خانوار در ایران علی‌رغم آسیب‌پذیری بالا، به طور نظام‌مند در سیاست‌های توسعه کارآفرینی نادیده گرفته شده‌اند.

مروری بر تجربیات داخلی و خارجی

تجربیات بین‌المللی در حوزه اکوسیستم کارآفرینی زنان نشان می‌دهد کشورهای موفق، رویکردی منطقه‌محور و اقتضایی را در پیش گرفته‌اند. در کشورهای اسکاندیناوی، شبکه‌های حمایتی گسترده با تمرکز بر ارائه خدمات مراقبت از کودک در کنار برنامه‌های آموزشی کارآفرینی، به افزایش چشمگیر مشارکت اقتصادی زنان منجر شده است [۲]. در کشورهای جنوب شرق آسیا مانند ویتنام و اندونزی، مدل‌های اعتبارات خرد گروهی با رویکرد همیاری و تضمین اجتماعی جایگزین، توانسته است موانع دسترسی زنان سرپرست خانوار به منابع مالی را کاهش دهد [۲۰]. در کشورهای آمریکای لاتین مانند برزیل و کلمبیا، سیاست‌های تدارکات دولتی که سهمی از قراردادهای عمومی را به کسب‌وکارهای زنان اختصاص می‌دهد، به عنوان ابزاری مؤثر برای دسترسی به بازار عمل کرده است [۱۵]. در سطح اروپا، برنامه‌های شتابدهی ویژه زنان کارآفرین با رویکرد منتورینگ و شبکه‌سازی، توانسته است نرخ بقای کسب‌وکارهای زنان را به طور قابل توجهی افزایش دهد [۲۱].

در ایران، تجربیات پراکنده‌ای در حوزه توانمندسازی زنان سرپرست خانوار وجود دارد که عمدتاً توسط نهادهای حمایتی مانند کمیته امداد امام خمینی^(۳) و سازمان بهزیستی اجرا شده است. این تجربیات غالباً بر ارائه تسهیلات مالی خرد و آموزش‌های مهارتی پایه متمرکز بوده و کمتر به ابعاد سیستمی و اکوسیستمی توجه داشته‌اند [۲۴]. ارزیابی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد رویکردهای نقطه‌ای و غیرهماهنگ، نتوانسته است توانمندسازی پایدار را برای این گروه به ارمغان آورد [۲۵]. شهرداری تهران در سال‌های اخیر اقدام به راه‌اندازی دفاتر کارآفرینی و توسعه مشاغل خرد در برخی مناطق کرده است، اما این اقدامات فاقد چارچوب نظری منسجم و رویکرد منطقه‌محور مبتنی بر تفاوت‌های درون‌شهری بوده است [۹]. فقدان اطلس اکوسیستم کارآفرینی مناطق ۲۲گانه و نبود سیستم پایش و ارزشیابی یکپارچه، از مهم‌ترین موانع اجرایی در این حوزه شناسایی شده است [۲۶ و ۲۳].

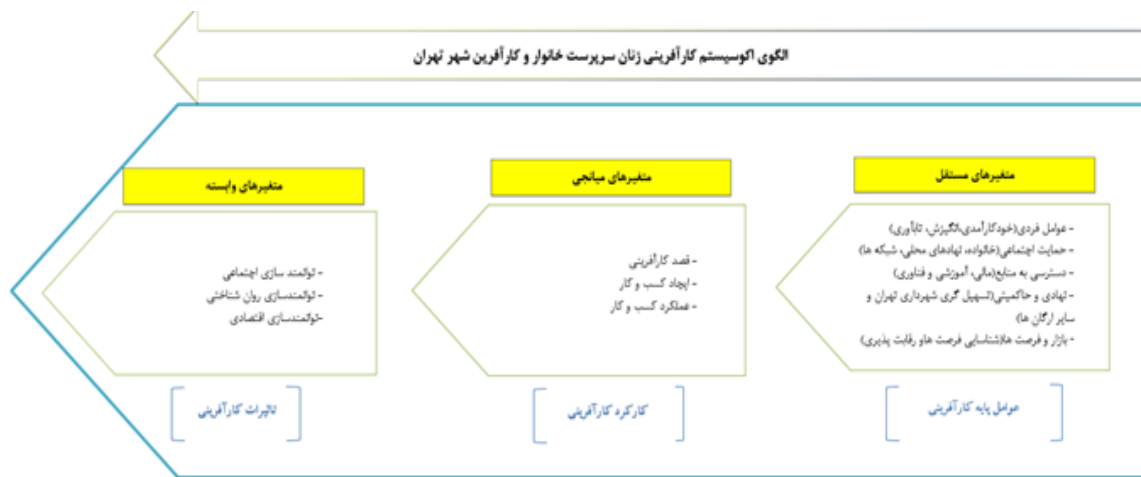
چارچوب تحلیلی پژوهش حاضر بر تلفیق نظری چند رویکرد مکمل، نه ادغام ساده یا هم‌عرض آن‌ها، استوار است. در این چارچوب، نظریه اکوسیستم کارآفرینی برای تبیین شرایط زمینه‌ای و تسهیل‌کننده فعالیت کارآفرینانه، رویکرد توانمندسازی برای تبیین پیامدهای نهایی فعالیت کارآفرینانه و دیدگاه زمینه‌محور کارآفرینی برای توضیح نقش شرایط مکانی و نهادی در شکل‌گیری رفتار کارآفرینانه به کار گرفته شده است.

بر این اساس، پنج مؤلفه «عوامل فردی»، «حمایت اجتماعی»، «دسترسی به منابع»، «عوامل نهادی و تسهیل‌گری» و «بازار و فرصت‌ها» به عنوان اجزای زمینه‌ای اکوسیستم در نظر گرفته شدند. این مؤلفه‌ها از نظر نظری نقش شرایط و پیشایندهای

فعالیت کارآفرینانه را ایفا می‌کنند. در مرحله بعد، «قصد کارآفرینانه»، «ایجاد کسب‌وکار» و «عملکرد کسب‌وکار» به عنوان مسیر فرایندی و عملکردی میان شرایط اکوسیستم و پیامدهای توانمندسازی قرار گرفتند. در نهایت، «توانمندسازی اقتصادی»، «توانمندسازی اجتماعی» و «توانمندسازی روان‌شناختی» به عنوان پیامدهای نهایی مدل در نظر گرفته شدند. بنابراین، این سه بخش به صورت سه مجموعه مستقل از پاسخ‌دهندگان یا سه تحلیل جداگانه در نظر گرفته نشده‌اند، بلکه سه لایه مفهومی یک مدل ساختاری واحد را تشکیل می‌دهند. داده‌های کیفی برای شناسایی و پالایش مؤلفه‌ها و شاخص‌ها و داده‌های کمی برای آزمون روابط ساختاری میان آن‌ها استفاده شدند. منطق کلی مدل به این صورت است:

شرایط اکوسیستم ← فرایند کارآفرینانه ← عملکرد کسب‌وکار ← توانمندسازی

البته با توجه به یافته‌های تجربی، برخی روابط مستقیم میان اجزای اکوسیستم و متغیرهای فرآیندی و پیامدهای توانمندسازی نیز در مدل نهایی حفظ شدند. بنابراین، مدل حاضر یک مدل خطی ساده نیست، بلکه ساختاری چندمسیره است که در آن محیط کارآفرینانه، فرایند کارآفرینی و پیامدهای توانمندسازی به یکدیگر مرتبط هستند.



شکل ۱. الگوی سه‌سطحی کارآفرینی زنان سرپرست خانوار

مواد و روش کار

پژوهش حاضر از نظر هدف، توسعه‌ای - کاربردی و از نظر ماهیت داده‌ها، آمیخته از نوع اکتشافی متوالی است [۲۸]. در این طرح، پژوهش در دو فاز مجزا اما به هم پیوسته اجرا شد: فاز اول (کیفی) با هدف اکتشاف عمیق عوامل، شاخص‌ها و روابط مؤثر بر توسعه اکوسیستم کارآفرینی توانمندساز برای زنان سرپرست خانوار، و فاز دوم (کمی) با هدف اعتباریابی الگوی طراحی شده و کمی‌سازی روابط بین مؤلفه‌ها. تلفیق دو فاز به صورت «تقدم کیفی» انجام شد، به این معنا که یافته‌های مرحله کیفی مستقیم مبنای ساخت ابزار کمی قرار گرفت.

جامعه آماری در فاز کیفی را خبرگان تشکیل دادند. برای افزایش تنوع دیدگاه‌ها، ترکیب خبرگان به گونه‌ای طراحی شد که علاوه بر دانش نظری، تجربه اجرایی و سیاستی نیز در نمونه وجود داشته باشد. مصاحبه‌ها تا زمانی ادامه یافت که مضامین جدید به حداقل رسیده و اشباع نظری حاصل شود. در مجموع، ۳۰ خبره در فاز کیفی مشارکت کردند. نمونه‌گیری در این فاز به روش هدفمند و گلوله‌برفی انجام گرفت.

جامعه آماری فاز کمی شامل زنان سرپرست خانوار ساکن در مناطق ۲۲گانه تهران و زنان کارآفرین فعال در این مناطق بود. منظور از زن کارآفرین در این پژوهش، زنی بود که در زمان اجرای پژوهش دارای کسب‌وکار ثبت‌شده یا غیررسمی با حداقل شش ماه سابقه فعالیت بود. با توجه به هدف پژوهش و ضرورت لحاظ کردن ناهمگونی فضایی تهران، اعتبارسنجی تجربی مدل در پنج منطقه منتخب انجام شد. انتخاب پنج منطقه با هدف ایجاد تنوع در وضعیت توسعه و شرایط اجتماعی - اقتصادی مناطق

صورت گرفت. مناطق ۳ و ۶ از طبقه برخوردار، مناطق ۱۲ و ۱۵ از طبقه میانی و منطقه ۲۲ از طبقه کم‌برخوردار در چارچوب شاخص ترکیبی مورد استفاده پژوهش انتخاب شدند. لازم به تأکید است که این طبقه‌بندی فقط مبنای طراحی نمونه پژوهش بوده و به معنای نسبت دادن یک ویژگی ثابت و مطلق به کل جمعیت هر منطقه نیست.

فرایند نمونه‌گیری در سه مرحله انجام شد:

مرحله اول: مناطق مورد مطالعه با رویکرد طبقه‌ای انتخاب شدند تا سه سطح متفاوت شرایط فضایی و اجتماعی - اقتصادی در نمونه حضور داشته باشد.

مرحله دوم: از هر یک از پنج منطقه منتخب، چهار ناحیه به صورت تصادفی انتخاب شد و در مجموع، ۲۰ ناحیه مورد مطالعه قرار گرفت.

مرحله سوم: در نواحی منتخب، زنان واجد شرایط از طریق مراکز خدمات اجتماعی شهرداری و سازمان‌های مردم‌نهاد شناسایی و پس از غربالگری اولیه وارد نمونه شدند. در این مرحله، با توجه به محدودیت دسترسی به جامعه آماری و حساسیت موضوع، از نمونه‌گیری در دسترس غربال شده استفاده شد.

بنابراین، روش نمونه‌گیری پژوهش را باید نمونه‌گیری چندمرحله‌ای با ترکیب انتخاب طبقه‌ای مناطق، انتخاب تصادفی نواحی و نمونه‌گیری در دسترس غربال شده در مرحله نهایی دانست، نه نمونه‌گیری کاملاً تصادفی.

حجم نمونه بر اساس فرمول کوکران برای جامعه نامحدود با سطح اطمینان ۹۵ درصد و خطای ۵ درصد، حدود ۳۸۴ نفر به دست آمد. با توجه به احتمال عدم بازگشت یا ناقص بودن پرسشنامه‌ها، ۴۸۰ پرسشنامه توزیع شد که در نهایت ۳۸۰ پرسشنامه کامل و قابل استفاده دریافت شد. بنابراین، نرخ بازگشت مؤثر پرسشنامه‌ها حدود ۷۹/۲ درصد بود.

جدول ۱. توزیع نمونه

منطقه	طبقه مورد استفاده در نمونه‌گیری	تعداد	درصد
۳	برخوردار	۷۸	۲۰،۵
۶	برخوردار	۸۲	۲۱،۶
۱۲	میانی	۷۵	۱۹،۷
۱۵	میانی	۷۳	۱۹،۲
۲۲	کم‌برخوردار	۷۲	۱۸،۹
مجموع	-	۳۸۰	۱۰۰

ابزار گردآوری داده‌ها در فاز کیفی، مصاحبه نیمه‌ساختاریافته با راهنمای مصاحبه‌ای بود که بر اساس مبانی نظری طراحی شده بود. در فاز کمی، پرسشنامه محقق‌ساخته بر اساس مؤلفه‌ها و شاخص‌های نهایی استخراج‌شده از فاز کیفی و نتایج دلفی فازی طراحی گردید. گویه‌های پرسشنامه از دو منبع اصلی شکل گرفتند. بخش نخست گویه‌ها بر اساس مؤلفه‌ها و شاخص‌های استخراج‌شده از ادبیات نظری و پیشینه پژوهش اولیه تدوین شد و بخش دوم بر اساس مضامین و شاخص‌های حاصل از مصاحبه‌های کیفی تکمیل گردید. پس از ادغام اولیه، گویه‌های هم‌پوشان حذف و گویه‌های دارای ابهام بازنویسی شدند. سپس، نسخه اولیه ابزار در اختیار خبرگان قرار گرفت و از طریق دو دور دلفی فازی پالایش شد. بنابراین، پرسشنامه نهایی فقط ترجمه یا اقتباس مستقیم از یک ابزار خارجی نبود، بلکه یک ابزار محقق‌ساخته با پشتوانه نظری و اعتبار محتوایی حاصل از خبرگان بود.

تحلیل داده‌های کیفی با استفاده از تحلیل تماتیک و نرم‌افزار MAXQDA انجام شد. فرایند تحلیل در سه مرحله اصلی صورت گرفت. در مرحله نخست، مصاحبه‌ها به صورت خطبه‌خط بررسی و ۲۴۷ کد اولیه استخراج شد. در مرحله دوم، کدهای مشابه در قالب ۳۸ مقوله فرعی سازماندهی شدند و در مرحله سوم، مقوله‌های فرعی در قالب پنج مؤلفه اصلی اکوسیستم کارآفرینی و ابعاد پیامدهای توانمندسازی ساماندهی شدند.

برای بررسی قابلیت اعتماد کدگذاری، ۲۰ درصد از مصاحبه‌ها توسط دو کدگذار مستقل کدگذاری شد. میزان توافق بین کدگذاران ۰/۸۵ به دست آمد که نشان‌دهنده توافق مناسب در فرایند کدگذاری بود.

پس از استخراج مؤلفه‌ها و شاخص‌ها، برای بررسی میزان توافق خبرگان از روش دلفی فازی استفاده شد. در هر دو دور، پرسشنامه دلفی در اختیار ۲۵ نفر از خبرگان قرار گرفت. در دور اول، ۴۲ گویه به معیار اجماع ۸۰ درصد دست یافتند و ۶ گویه به دلیل دریافت پیشنهادهای اصلاحی برای بررسی مجدد به دور دوم منتقل شدند. در دور دوم، هر ۴۸ گویه به اجماع نهایی رسیدند و میانگین توافق خبرگان ۸۷ درصد به دست آمد.

به این ترتیب، فرایند کیفی پژوهش از سه مرحله اکتشاف، پالایش و اجماع تشکیل شد و خروجی آن مبنای طراحی ابزار کمی قرار گرفت. داده‌های کمی با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری مبتنی بر حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM) در نرم‌افزار SmartPLS تحلیل شدند. تحلیل در دو سطح انجام شد.

در سطح نخست، مدل اندازه‌گیری از نظر پایایی و روایی بررسی شد. پایایی درونی سازه‌ها با استفاده از آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی بررسی شد و روایی همگرا با استفاده از میانگین واریانس استخراج‌شده (AVE) ارزیابی شد. برای بررسی روایی واگرا، علاوه بر معیار فورنل - لارکر، معیار HTMT نیز مورد توجه قرار گرفت.

در سطح دوم، مدل ساختاری از طریق بررسی ضرایب مسیر، معناداری روابط، ضریب تعیین، هم‌خطی بین سازه‌های پیش‌بین و شاخص‌های برازش تقریبی مدل ارزیابی شد. معناداری ضرایب مسیر با روش بوت‌استرپینگ بررسی شد.

در ارزیابی مدل، مقادیر VIF کمتر از ۳ به عنوان نشانه‌ای از نبود هم‌خطی قابل توجه در نظر گرفته شد. همچنین، SRMR و NFI برای ارزیابی کیفیت کلی مدل گزارش شدند. در ادبیات جدید PLS-SEM، گزارش SRMR و NFI متداول است، در حالی که استفاده از GoF به عنوان شاخص برازش کلی توصیه نمی‌شود.

یافته‌ها

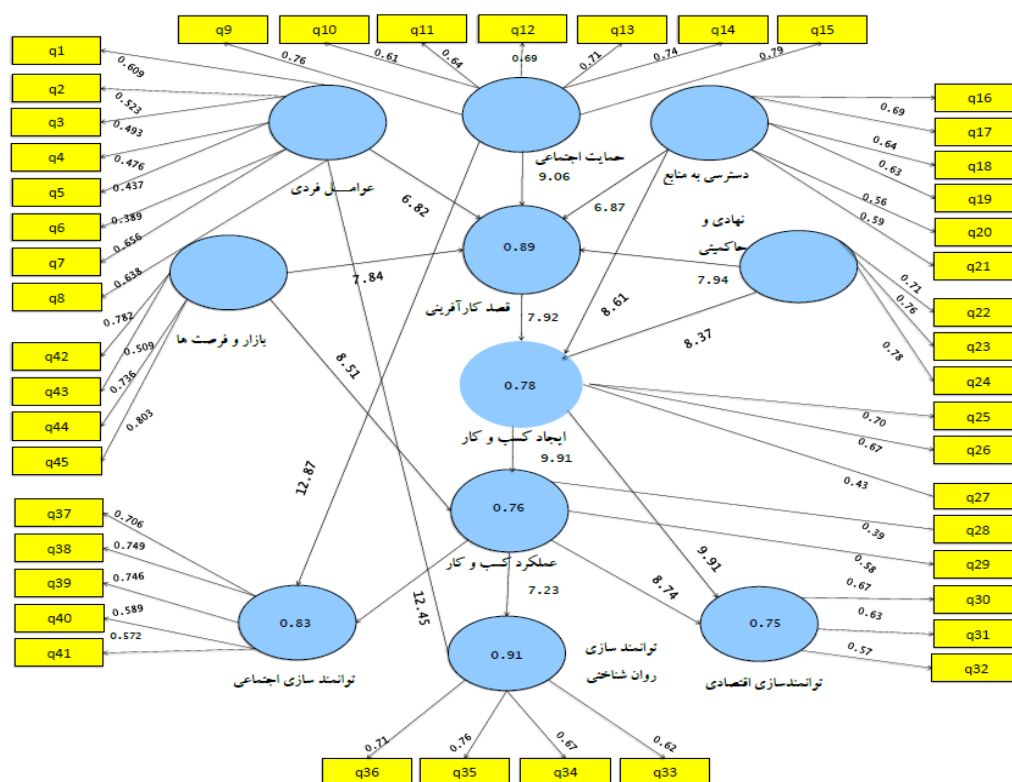
از میان ۳۸۰ پاسخ‌دهنده، ۶۲ درصد در گروه سنی ۳۵ تا ۵۰ سال قرار داشتند، ۷۱ درصد حداقل یک فرزند تحت تکفل داشتند و ۴۵ درصد نمونه را زنان دارای سابقه فعالیت کارآفرینانه بیش از یک سال تشکیل می‌دادند.

نتایج ارزیابی مدل اندازه‌گیری نشان داد تمامی گویه‌ها دارای بار عاملی بالاتر از ۰/۷ بودند و شاخص‌های برازش مدل اندازه‌گیری در محدوده قابل قبول قرار داشتند. الگوی نهایی پژوهش در قالب یک ساختار سه‌سطحی شامل سطح پایه/حمایتی (عوامل فردی، حمایت اجتماعی، دسترسی به منابع، عوامل نهادی، بازار و فرصت‌ها)، سطح میانی/عملکردی (قصد کارآفرینانه، ایجاد کسب‌وکار و عملکرد کسب‌وکار)، و سطح توانایی/تأثیرگذاری (توانمندسازی اقتصادی، روان‌شناختی و اجتماعی) تأیید شد. بر اساس ورود متغیرها حاصل از فرایند تحقیق در نرم‌افزار تأیید در فاز کمی (مدل‌سازی معادلات ساختاری)، الگوی نهایی پژوهش در قالب یک ساختار سه‌سطحی همانند شکل ۲ محاسبه و ترسیم شد.

یافته‌های حاصل از فاز کیفی پژوهش، شامل استخراج مؤلفه‌ها و شاخص‌های اولیه اکوسیستم کارآفرینی توانمندساز زنان سرپرست خانوار بود که بر اساس تحلیل مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با ۳۰ خبره، پنج مؤلفه اصلی به دست آمد: عوامل فردی، حمایت اجتماعی، دسترسی به منابع، عوامل نهادی و تسهیل‌گری، و بازار و فرصت‌ها. این مؤلفه‌ها به همراه سه بعد توانمندسازی (اقتصادی، روان‌شناختی و اجتماعی) مبنای ساخت پرسشنامه فاز کمی قرار گرفتند.

نتایج مدل ساختاری نشان داد مقادیر ضریب تعیین (R^2) برای متغیرهای درون‌زا عبارت بودند از: قصد کارآفرینانه (۰/۸۹)، ایجاد کسب‌وکار (۰/۸۵)، عملکرد کسب‌وکار (۰/۸۷)، توانمندسازی اقتصادی (۰/۸۳)، توانمندسازی روان‌شناختی (۰/۸۱) و توانمندسازی اجتماعی (۰/۷۹). این مقادیر که همگی بالاتر از ۰/۵ هستند، نشان‌دهنده قدرت پیش‌بینی بالای مدل است.

مقادیر R^2 نشان می‌دهند مدل توانسته است بخش قابل توجهی از واریانس سازه‌های درون‌زا را توضیح دهد. به‌ویژه، مقادیر ۰/۸۹ برای قصد کارآفرینانه، ۰/۸۵ برای ایجاد کسب‌وکار و ۰/۸۷ برای عملکرد کسب‌وکار نشان‌دهنده قدرت توضیحی بالای مدل در نمونه مورد مطالعه است. با این حال، این مقادیر به معنای اثبات علیت یا قابلیت تعمیم مستقیم نتایج به تمام مناطق تهران نیستند و باید در چارچوب نمونه پنج منطقه منتخب تفسیر شوند. همچنین، این مقادیر می‌تواند ناشی از تعداد و همپوشانی مفهومی پیش‌بینی‌ها، انتخاب سازه‌ها بر اساس فاز کیفی، همبستگی بین سازه‌های مرتبط و استفاده از داده‌های خودگزارشی مقطعی باشد؛ اما نباید فقط به این عوامل نسبت داده شود.



شکل ۲. مدل کمی کارآفرینی زنان سرپرست خانوار

ضرایب مسیر و سطوح معناداری جدول ۱ مدل ساختاری نهایی پژوهش را با ضرایب مسیر استاندارد (β)، مقادیر آماره‌های t -value و p -Value نشان از معنادار بودن روابط خطی و تعیین مسیر متغیرها می‌دهد.

جدول ۲. ضرایب مسیر (β) و سطوح معناداری

نتیجه	t-value	ضرایب (β)	مسیر
معنادار	۶٫۸۷	۰٫۵۹	قصد کارآفرینانه → دسترسی به منابع
معنادار	۸٫۶۱	۰٫۵۵	ایجاد کسب و کار → دسترسی به منابع
معنادار	۶٫۸۲	۰٫۵۳	قصد کارآفرینانه → عوامل فردی
معنادار	۸٫۱۶	۰٫۶۲	عملکرد کسب و کار → عوامل فردی
معنادار	۷٫۹۴	۰٫۷۴	قصد کارآفرینانه → نهادی
معنادار	۸٫۳۷	۰٫۶۲	ایجاد کسب و کار → نهادی
معنادار	۷٫۸۴	۰٫۵۶	قصد کارآفرینانه → بازار و فرصت‌ها
معنادار	۸٫۵۱	۰٫۶۶	عملکرد کسب و کار → بازار و فرصت‌ها
معنادار	۹٫۰۶	۰٫۵۳	قصد کارآفرینانه → حمایت اجتماعی
معنادار	۷٫۹۲	۰٫۵۲	ایجاد کسب و کار → قصد کارآفرینانه
معنادار	۹٫۹۱	۰٫۶۱	عملکرد کسب و کار → ایجاد کسب و کار
معنادار	۸٫۷۴	۰٫۵۸	توانمندسازی اقتصادی → عملکرد کسب و کار
معنادار	۷٫۲۳	۰٫۵۱	توانمندسازی روان‌شناختی → عملکرد کسب و کار
معنادار	۶٫۸۵	۰٫۴۷	توانمندسازی اجتماعی → عملکرد کسب و کار
معنادار	۱۲٫۴۵	۰٫۱۸	توانمندسازی روان‌شناختی → عوامل فردی
معنادار	۱۴٫۸۷	۰٫۵۶	توانمندسازی اجتماعی → حمایت اجتماعی

نتایج نشان داد عوامل نهادی و تسهیل‌گری با ضریب مسیر 0.74 ، قوی‌ترین رابطه را با قصد کارآفرینانه دارند. در مقابل، بازار و فرصت‌ها با ضریب 0.66 قوی‌ترین رابطه را با عملکرد کسب‌وکار نشان دادند. این یافته به معنای آن نیست که عوامل نهادی در کل مدل مهم‌ترین عامل محسوب می‌شوند یا بازار و فرصت‌ها در همه مناطق اولویت نخست هستند؛ بلکه هر یک از این دو مؤلفه در رابطه با یک پیامد مشخص بیشترین ضریب مسیر را نشان داده‌اند. بنابراین، تفسیر یافته‌ها باید بر اساس نوع پیامد انجام شود. در مسیرهای میانی مدل، «قصد کارآفرینانه» با ضریب 0.52 بر «ایجاد کسب‌وکار» و «ایجاد کسب‌وکار» با ضریب 0.61 بر «عملکرد کسب‌وکار» تأثیر معنادار داشت. همچنین، «عملکرد کسب‌وکار» به ترتیب با ضرایب 0.58 ، 0.51 و 0.47 بر توانمندسازی اقتصادی، اجتماعی و روان‌شناختی اثرگذار بود. نکته قابل توجه، تأثیر مستقیم «عوامل فردی» بر توانمندسازی روان‌شناختی با ضریب 0.18 و تأثیر «حمایت اجتماعی» بر توانمندسازی اجتماعی با ضریب 0.56 بود.

جدول ۳. شاخص‌های کیفیت مدل

شاخص	مقدار	تفسیر
SRMR	0.042	مطلوب
NFI	0.91	قابل قبول
Theta RMS	0.118	در محدوده قابل قبول/مرزی
VIFs	کمتر از ۳	نبود هم‌خطی قابل توجه

جدول ۲ نتایج ارزیابی کیفیت مدل نشان داد مقدار SRMR برابر 0.042 و NFI برابر 0.91 است. این مقادیر در کنار نبود هم‌خطی قابل توجه میان سازه‌های پیش‌بین، کیفیت مناسب مدل برآورده را در نمونه مورد مطالعه نشان می‌دهد. مقدار RMS_Theta برابر 0.118 نیز در محدوده مرزی قابل قبول قرار داشت. در تفسیر این شاخص‌ها، از GoF به عنوان معیار برازش کلی استفاده نشد، زیرا در رویکردهای جدید PLS-SEM این شاخص برای ارزیابی برازش کلی مدل توصیه نمی‌شود.

نتیجه‌گیری

یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد اکوسیستم کارآفرینی توانمندساز زنان سرپرست خانوار را می‌توان در قالب سه لایه به هم‌پیوسته شامل شرایط اکوسیستم، فرایند کارآفرینانه و پیامدهای توانمندسازی تبیین کرد. اهمیت این ساختار در آن است که نشان می‌دهد توانمندسازی اقتصادی و اجتماعی زنان فقط نتیجه برخورداری از منابع مالی یا ویژگی‌های فردی نیست، بلکه از مسیر تعامل میان محیط نهادی، حمایت اجتماعی، منابع، فرصت‌های بازار و فرایند ایجاد و عملکرد کسب‌وکار شکل می‌گیرد. عوامل نهادی و تسهیل‌گری با ضریب 0.74 قوی‌ترین رابطه را با قصد کارآفرینانه نشان دادند. این یافته نشان می‌دهد در نمونه مورد مطالعه، کیفیت محیط نهادی از جمله سهولت دسترسی به خدمات، کاهش پیچیدگی‌های اداری، هماهنگی سازمانی و حمایت‌های رسمی، نقش مهمی در تبدیل ظرفیت بالقوه زنان به قصد کارآفرینانه دارد.

با این حال، این نتیجه نباید به این معنا تفسیر شود که عوامل نهادی در تمام مناطق تهران الزاماً مهم‌ترین عامل هستند. بلکه نتیجه حاضر بیانگر آن است که در نمونه پنج منطقه منتخب، عوامل نهادی بیشترین ضریب مسیر را برای پیش‌بینی قصد کارآفرینانه داشته‌اند.

بازار و فرصت‌ها با ضریب 0.66 قوی‌ترین رابطه را با عملکرد کسب‌وکار نشان دادند. این یافته در کنار ضریب 0.56 برای قصد کارآفرینانه، یک نکته مهم را نشان می‌دهد: دسترسی به فرصت‌های بازار نه تنها در شکل‌گیری قصد ورود به فعالیت کارآفرینانه مؤثر است، بلکه اهمیت آن در مرحله عملکرد کسب‌وکار حتی بیشتر می‌شود.

از این رو، سیاست‌های حمایتی نباید فقط بر ایجاد کسب‌وکار متمرکز شوند؛ بلکه باید از مرحله پیش از راه‌اندازی تا مرحله ورود به بازار، بازاریابی، فروش، شبکه‌سازی و حفظ مشتری ادامه یابند.

دسترسی به منابع با قصد کارآفرینانه و ایجاد کسب‌وکار رابطه مثبت نشان داد. این یافته بیانگر آن است که دسترسی به منابع مالی، آموزشی، اطلاعاتی و فضای کاری می‌تواند فاصله میان تمایل به کارآفرینی و اقدام واقعی را کاهش دهد.

حمایت اجتماعی هم با قصد کارآفرینانه و هم با توانمندسازی اجتماعی رابطه معنادار داشت. این یافته نشان می‌دهد شبکه‌های حمایتی را نباید فقط به عنوان یک عامل جانبی در نظر گرفت. برای زنان سرپرست خانوار، شبکه‌های خانوادگی، همتایان، نهادهای محلی و سازمان‌های مردم‌نهاد می‌توانند بخشی از زیرساخت اجتماعی اکوسیستم محسوب شوند. رابطه ۰/۵۲ میان قصد کارآفرینانه و ایجاد کسب‌وکار و رابطه ۰/۶۱ میان ایجاد کسب‌وکار و عملکرد کسب‌وکار نشان می‌دهد مدل پیشنهادی دارای یک مسیر فرایندی مشخص است:

قصد کارآفرینانه → ایجاد کسب‌وکار → عملکرد کسب‌وکار

این یافته دلالت مهمی برای سیاست‌گذاری دارد؛ زیرا حمایت از زنان نباید فقط به ایجاد انگیزه یا اعطای تسهیلات اولیه محدود شود. کیفیت مرحله ایجاد کسب‌وکار، از جمله انتخاب فرصت، برنامه‌ریزی، آموزش، مشاوره و اتصال به بازار، می‌تواند بر عملکرد بعدی کسب‌وکار اثرگذار باشد.

عملکرد کسب‌وکار با توانمندسازی اقتصادی، اجتماعی و روان‌شناختی رابطه مثبت و معنادار داشت. قوی‌ترین رابطه مربوط به توانمندسازی اقتصادی بود. این یافته نشان می‌دهد موفقیت کسب‌وکار می‌تواند ابتدا از طریق بهبود درآمد و امنیت اقتصادی به توانمندسازی کمک کند و سپس پیامدهای اجتماعی و روان‌شناختی نیز تقویت شوند.

جدول ۴. مقایسه تطبیقی با مطالعات پیشین

مدل/مطالعه	کانون اصلی	تفاوت با پژوهش حاضر	دلالت
اینزبرگ	حوزه‌های سیاستی اکوسیستم	تمرکز عمومی‌تر و غیرتخصصی	پایه نظری عوامل نهادی و بازار
استام	شرایط مؤسسی، بازار و حمایتی	تمرکز بر اکوسیستم عمومی	تقویت نگاه سیستمی
کابیر	منابع، عاملیت و دستاوردها	تمرکز بر توانمندسازی زنان	توجیه ابعاد پیامدی توانمندسازی
نومایر و همکاران	اکوسیستم فراگیر	تمرکز بر شمول و تفاوت گروه‌ها	اهمیت دسترسی عادلانه
الگوی حاضر	اکوسیستم + مسیر کارآفرینانه + توانمندسازی	تخصصی برای زنان سرپرست خانوار و زمینه شهری تهران	چارچوب سیاستی منطقه‌محور با اعتبارسنجی در پنج منطقه

پژوهش حاضر با هدف طراحی و اعتبارسنجی الگوی بومی اکوسیستم کارآفرینی توانمندساز زنان سرپرست خانوار در کلانشهر تهران انجام شد. یافته‌ها نشان دادند الگوی پیشنهادی از سه لایه اصلی تشکیل می‌شود: شرایط اکوسیستم، فرایند کارآفرینانه و پیامدهای توانمندسازی.

در لایه اکوسیستم، پنج مؤلفه عوامل فردی، حمایت اجتماعی، دسترسی به منابع، عوامل نهادی و تسهیل‌گری و بازار و فرصت‌ها شناسایی شد. در لایه فرایندی، قصد کارآفرینانه، ایجاد کسب‌وکار و عملکرد کسب‌وکار قرار گرفتند و در لایه پیامدی، توانمندسازی اقتصادی، اجتماعی و روان‌شناختی قرار گرفت.

بنابراین، نتایج پژوهش از این دیدگاه حمایت می‌کند که توانمندسازی زنان سرپرست خانوار مستلزم حرکت از سیاست‌های تک‌بعدی به سمت مداخلات اکوسیستمی و چندسطحی است؛ مداخلاتی که به طور هم‌زمان محیط نهادی، منابع، شبکه‌های اجتماعی، بازار، فرایند ایجاد کسب‌وکار و پیامدهای توانمندسازی را مورد توجه قرار دهند.

با این حال، باید تأکید کرد که اعتبارسنجی کمی الگو در پنج منطقه منتخب تهران انجام شده است. بنابراین، یافته‌های کمی پژوهش را نمی‌توان بدون آزمون تجربی مستقل به تمام ۲۲ منطقه تعمیم داد. در عین حال، انتخاب مناطق مختلف از نظر شرایط فضایی و اجتماعی - اقتصادی، امکان بررسی الگو در زمینه‌های متفاوت شهری را فراهم کرده است و چارچوب پیشنهادی می‌تواند مبنایی برای آزمون‌های بعدی در سایر مناطق قرار گیرد.

نوآوری نظری پژوهش حاضر در تلفیق سه سطح تحلیل شامل شرایط اکوسیستم کارآفرینی، فرایند کارآفرینانه و پیامدهای توانمندسازی زنان سرپرست خانوار است. در این چارچوب، اکوسیستم به عنوان زمینه، فرایند کارآفرینی به عنوان سازوکار انتقالی و توانمندسازی به عنوان پیامد در نظر گرفته شده است.

نوآوری روش‌شناختی پژوهش نیز در استفاده از طرح آمیخته اکتشافی متوالی و پیوند دادن تحلیل کیفی، دلفی فازی و-PLS SEM برای توسعه و اعتبارسنجی مدل است.

از نظر کاربردی، مدل ارائه‌شده امکان آن را فراهم می‌کند که سیاست‌گذاران شهری به جای ارائه حمایت‌های یکسان، عوامل مختلف اکوسیستم را به صورت تفکیک‌شده مورد ارزیابی قرار دهند.

بنابراین، سهم اصلی پژوهش حاضر نه ادعای «اولین مدل موجود»، بلکه ارائه و آزمون یک چارچوب یکپارچه و بومی‌شده برای پیوند دادن اکوسیستم کارآفرینی، فرایند ایجاد و عملکرد کسب‌وکار و توانمندسازی زنان سرپرست خانوار در زمینه شهری تهران است.

در نهایت، پژوهش حاضر نشان داد الگوی توسعه اکوسیستم کارآفرینی توانمندساز زنان سرپرست خانوار در شهر تهران، یک ساختار سه سطحی پیچیده اما قابل اندازه‌گیری دارد. مهم‌ترین درس سیاستی این پژوهش آن است که در شرایط فعلی تهران، «بازنگری نهادی» (قوانین، مقررات و فرایندهای حمایتی) اولویت اول و «توانمندسازی اقتصادی» (درآمد و امنیت مالی) اولویت فوری است. در عین حال، دستیابی به توانمندسازی پایدار (به ویژه در ابعاد روان‌شناختی و اجتماعی) نیازمند مداخلات مکمل و بلندمدت است که فراتر از تسهیلات مالی صرف عمل می‌کند.

پیشنهادهای

۱. تسهیل فرایندهای اداری، کاهش بروکراسی، ایجاد مسیرهای یکپارچه دریافت خدمات و بهبود هماهنگی میان نهادهای حمایتی باید در اولویت سیاستی قرار گیرد.
۲. با توجه به اثر دسترسی به منابع بر قصد و ایجاد کسب‌وکار، حمایت مالی باید همراه با آموزش، مشاوره، اطلاعات بازار و دسترسی به زیرساخت باشد.
۳. پیشنهاد می‌شود که حمایت از زنان نباید به مرحله تأسیس کسب‌وکار محدود شود. ایجاد بازارچه‌های دائمی، فروش دیجیتال، شبکه‌سازی با خریداران و آموزش بازاریابی باید مورد توجه قرار گیرد.
۴. با توجه به نقش حمایت اجتماعی، شبکه‌های همیار زنان، مربی‌گری، منتورینگ و سازمان‌های مردم‌نهاد می‌توانند به عنوان اجزای اکوسیستم محلی تقویت شوند.
۵. پیشنهاد می‌شود شهرداری تهران بر اساس پنج مؤلفه مدل، اطلس اکوسیستم کارآفرینی زنان سرپرست خانوار را طراحی کند. این اطلس باید در مرحله نخست در پنج منطقه مطالعه‌شده آزمون شود و پس از اعتبارسنجی، در صورت تأیید، به سایر مناطق گسترش یابد.
۶. اگرچه عنوان و چارچوب مفهومی پژوهش بر کلانشهر تهران متمرکز است و تنوع مناطق ۲۲گانه در طراحی مدل مورد توجه قرار گرفته، اعتبارسنجی تجربی مدل در پنج منطقه منتخب شامل مناطق ۳، ۶، ۱۲، ۱۵ و ۲۲ انجام شده است. بنابراین، کاربرد مدل در سایر مناطق تهران در این مرحله به عنوان چارچوب پیشنهادی برای ارزیابی و سیاست‌گذاری مطرح می‌شود و نه به عنوان نتیجه آماری آزمون‌شده.
۷. برای استفاده از مدل در هر یک از ۲۲ منطقه، پیشنهاد می‌شود ابتدا پنج مؤلفه اصلی مدل در آن منطقه اندازه‌گیری شود و سپس بر اساس شدت ضعف یا قوت هر مؤلفه، اولویت مداخله تعیین شود. به این ترتیب، مدل حاضر قابلیت تبدیل شدن به یک چارچوب منطقه‌محور را دارد، اما وزن‌ها و ضرایب مسیر آن باید در مطالعات آتی با پوشش کامل مناطق یا نمونه‌های مستقل مورد آزمون قرار گیرد.

محدودیت‌های پژوهش

۱. پژوهش حاضر ماهیت مقطعی دارد؛ بنابراین روابط ساختاری مشاهده‌شده را نمی‌توان به عنوان علیت قطعی و بلندمدت تفسیر کرد.

۲. اعتبارسنجی کمی الگو در پنج منطقه منتخب تهران انجام شد؛ بنابراین تعمیم آماری نتایج به تمام ۲۲ منطقه نیازمند احتیاط و مطالعات تکمیلی است.
۳. اگرچه انتخاب پنج منطقه با هدف ایجاد تنوع فضایی و اجتماعی-اقتصادی انجام شد، تعداد مناطق مورد بررسی برای تحلیل تفاوت‌های آماری میان تمام ۲۲ منطقه کافی نیست.
۴. در مرحله نهایی نمونه‌گیری، به دلیل دشواری دسترسی به جامعه هدف، از نمونه‌گیری در دسترس غربال شده استفاده شد که می‌تواند احتمال سوگیری انتخاب نمونه را افزایش دهد.
۵. بخشی از داده‌ها بر اساس خودگزارشی پاسخ‌دهندگان گردآوری شد و احتمال سوگیری ادراکی یا پاسخ اجتماعی مطلوب وجود دارد.
۶. به دلیل حساسیت موضوع زنان سرپرست خانوار، دسترسی به برخی افراد جامعه آماری با محدودیت همراه بود.

منابع

1. Ferreira JJ, Fernandes CI, Kraus S. Entrepreneurial ecosystems: A systematic review. *J Bus Res.* 2024;175:114132. DOI: 10.1016/j.jbusres.2024.114132
2. Brush CG, Edelman LF, Manolova T. Women's entrepreneurship and ecosystem support: A global perspective. *Entrep Theory Pract.* 2023;47(2):289-315. DOI: 10.1177/10422587221145623
3. Welter F, Baker T, Audretsch DB. Contextualizing entrepreneurship. *J Manag Stud.* 2024;61(1):1-28. DOI: 10.1111/joms.12900
4. Chant S, Sweetman C. Fixing women or fixing the world? *Gend Dev.* 2023;31(2):271-295. DOI: 10.1080/13552074.2023.2228156
5. Kabeer N. Women's empowerment and economic development: A critical reassessment. Oxford: Oxford University Press; 2023. DOI: 10.1093/oso/9780198878274.001.0001
6. Statistics Center of Iran. General Population and Housing Census 2021: Detailed Results of Tehran Province. Tehran: Statistics Center of Iran; 2025. (in Persian).
7. Weller CE, Logan AM. Female-headed households and poverty: A systematic review. *J Poverty Soc Justice.* 2024;32(1):45-67. DOI: 10.1332/17598273Y2024D000000012
8. Chant S. The international handbook of gender and poverty. 2nd ed. Cheltenham: Edward Elgar; 2022. DOI: 10.4337/9781788975931
9. Deputy of Planning and Development of Tehran Municipality. Study of Social Deprivation Indicators in 22 Regions. Tehran: Tehran Municipality; 2025. (in Persian).
10. Al-Dajani H, Marlow S. Empowerment and entrepreneurship: A theoretical framework revisited. *Int J Entrep Behav Res.* 2022;28(5):1123-1145. DOI: 10.1108/IJEBr-03-2021-0187
11. Stam E, van de Ven A. Entrepreneurial ecosystems: A systems perspective. *Strateg Entrep J.* 2023;17(2):245-273. DOI: 10.1002/sej.1450
12. Isenberg DJ. The entrepreneurship ecosystem strategy. In: Fetters ML, Greene PG, editors. *Entrepreneurship ecosystems*. Cheltenham: Edward Elgar; 2023. p. 45-68. DOI: 10.4337/9781788975924.00008
13. Audretsch DB, Belitski M, Eichler GM, Schwarz E. City-level institutions and perceived entrepreneurial ecosystem's growth orientation. *Reg Stud.* 2025;2478066. DOI: 10.1080/00343404.2025.2478066.
14. Autio E, Mudambi R, Yoo Y. Digital affordances and entrepreneurial ecosystems. *Acad Manag Perspect.* 2023;37(2):145-172. DOI: 10.5465/amp.2022.0064
15. Neumeyer X, Santos SC, Morris MH. Inclusive entrepreneurial ecosystems. *Entrep Reg Dev.* 2024;36(3-4):289-312. DOI: 10.1080/08985626.2024.2315412
16. Mousavi M, Ghaffari G. Demographic and Economic Characteristics of Female Heads of Households in Iran. *Iran Demogr Assoc Lett.* 2023;18(35):157-182. (in Persian).
17. Roundy PT. Regional entrepreneurial ecosystems. *Econ Dev Q.* 2023;37(2):112-128. DOI: 10.1177/08912424231167890
18. Malhotra A, Schuler SR. Measuring women's empowerment: New directions. *World Dev.* 2022;150:105-123. DOI: 10.1016/j.worlddev.2021.105123
19. Ahmadi H, Rezvanfar A. Economic empowerment of women heads of households: Challenges and solutions. *Q J Soc Welf.* 2025;23(88):115-145. (in Persian).
20. Bruton GD, Sutter C, Lenz AK. Economic empowerment of women through entrepreneurship. *J Bus Ventur.* 2023;38(4):106-125. DOI: 10.1016/j.jbusvent.2023.106125
21. Henry C, Foss L, Ahl H. Gender and entrepreneurship research: A review. *Int J Entrep Behav Res.* 2024;30(1):1-24. DOI: 10.1108/IJEBr-05-2023-0521
22. Rahimpour M, Sajjadi S. Identifying barriers to women entrepreneurship in Iran with a hybrid approach. *Women Dev Polit.* 2024;21(4):589-612. Persian. DOI: 10.22059/jwdp.2024.345678.5678 .
23. Safari Shali R, Karami M, Ghasemi V. Multilevel analysis of poverty of female-headed households in urban areas of Tehran. *Iran Econ Res.* 2024;28(94):145-176. Persian. DOI: 10.22059/ier.2024.67890.1234

24. Abolfathi M, Hosseini SM, Ghasemi V. Designing a model for empowering female heads of households with a social entrepreneurship approach. Q J Soc Welf Res. 2025;21(82):201-238. Persian. DOI: 10.22054/qjsd.2025.78901.1234.
25. Ghaffari G, Mousavi M. Measuring the economic empowerment of female-headed households under the coverage of support institutions. Q J Soc Welf Res. 2023;23(89):235-266. (in Persian).
26. Barati N, Yavari Z. Entrepreneurial ecosystem in Iran: Concepts, models and indicators. Entrep Dev. 2024;16(3):461-482. Persian. DOI: 10.22059/jed.2024.123456.7890 .
27. Rafipour F, Ghaffari G, Mousavi M. The gap between statistical definition and social reality of women heads of households in Iran. Demogr Stud. 2024;8(2):93-118. (in Persian).
28. Hair JF, Hult GTM, Ringle CM, Sarstedt M. A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM). 3rd ed. Thousand Oaks: SAGE Publications; 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-80519 7

Urban Development Policy Making

Vol. 3, No. 3, Autumn 2026

Contents

- **Presenting a Model of Financial Challenges for Public Sector Participation in the Process of Urban Fabric Reconstruction using A Grounded Theory Approach.....359**
Peyman Akbari, Reza Rostami
- **Examining the Consequences of Moving the Capital to Makran with Hydropolitical Approaches and Hydro-Hegemonic Structures381**
Ramtin Tavoosi Rad, Mohammad Ansari Ghojghar, Arash Malekian
- **Property Valuation and Urban Revenue Collection within a Participatory Governance Framework: The Case of Isfahan393**
Reza Nasr Esfahani, Mostafa Nabati Nejad, Elham Agharian
- **Intelligent Detection and Separation of Recyclable Urban Waste Using a Deep Learning-Based Computer Vision Model.....411**
Ali Jelokhani
- **Forecasting Residential Electricity Demand under Climate Change Scenarios: A Python-based Model Incorporating Cooling and Heating Degree Days) 433**
Mona Mirrazavi, Younes Noorollahi, Saba Amouzadeh, Mohanna Baba Hoseinpour, Hosein Yousefi
- **The Application of Artificial Intelligence in Developing a Local Climate Change Adaptation Strategy for Qanats: Evaluating the Performance of XGBoost in Estimating the Discharge of Qaen Qanats455**
Mohamad Fouladi Nasrabad, Mohammad Reza Farzaneh, Sepideh Zeraati Neyshabouri
- **Analysis of Urban Policy-Making Paradigms in Tehran in the Context of National Urban Policy.....471**
Gholamhossin Mohammadi, Rahmatollah Gholipor Souteh
- **Forecasting the budgeting system in Tehran Municipality based on designing a robust mathematical model under conditions of uncertainty with a multiple regression approach.....495**
Azam Gholami Zarezadeh, Sevan Sohraiee, Maryam Khademi, Ehsan Sadeh
- **Biophilic Landscape Design as a Strategy to Cope with the Water Crisis in Urban Spaces (Case Study: Stepped Landscape of Chamran Park, Karaj)517**
Setayesh Zandi Babaei, Mohammad Mahdi Poorhasan Mehrzanjani
- **Designing a Native Model of an Empowering Entrepreneurial Ecosystem for Female-Headed Households in Tehran Metropolis.....541**
Mohammad Javad Lashkari, Mehran Maghsoudi, Shadi Shahverdiani



Director-in-Charge

Dr. Mohammad Hossein Boochani

Editor-in-Chief

Dr. Hossein Yousefi

Deputy Director & Editor

Masoud Naddafan

Director-in-Chief

Zahra Golsa Rasaei

Executive Manager

Dr. Hosseinali Mehrnia

Executive Director

Marziyeh Razeghi

Graphist

Vida Mohammadzadeh Azani

Technical Editor

Fatemeh Rashvand

English Editor

Dr. Farhad Mohabbati

Page Designer

Zahra Ostovari

Frequency: Quarterly

Print ISSN: 3092-653X

Online ISSN: 3092-6564

Peer Review: Double-blind

Publication Policy: Open Access

Ministry of Culture and Guidance License ID: 97426

License Dat: 14 April 2025

Address: Tehran, Karim Khan Zand Street, next to Behjat Abad Park, No. 195, opposite the Municipal Renovation Organization, Tehran Municipality Institute of Applied Scientific Higher Education

P.O. Box: 1594645119

Tel: +98-21-88924873, 88924876, 88898944

Email: amozesh.moasese@gmail.com

Website: <https://judpm.ir>

International Editorial Board

Dr. Behnam Mohammadi-ivatloo

Professor in Sector Coupling in Energy Systems, LUT University, Finland

Prof. Kourosh Behzadian

Smart Infrastructure and Civil Engineering, University of West London

Dr. Saeid Mohammadzaeh Bina

Graduate School of International Resource Sciences Department of Earth Resource Engineering and Environmental Science, Akita University, Japan

Editorial Board

Dr. Younes Noorollahi

Professor, Energy System Engineering, University of Tehran

Dr. Hossein Yousefi

Professor, Environmental Engineering, University of Tehran

Dr. Bizhan Abbasi

Professor, Faculty of Law and Political Science of University of Tehran

Dr. Mohammad Aliakbari

Professor, Department of English Language Teaching, Ilam University

Dr. Seyed Abolfazl Zakerian

Professor, Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health Tehran University of Medical Sciences

Dr. Yousef Hojjat

Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbat Modarres University, Tehran

Dr. Kianoosh Zakerhaghighi

Professor, South Tehran Campus, Islamic Azad University

Dr. Lotfollah. Forouzandeh

Professor, Department of Management, Tarbiat Modarres University, Tehran

Dr. Arastoo Yari Hesar

Professor, Urban and Rural Planning, University of Mohaghegh Ardabili

Dr. Soheila Parvin

Professor, Faculty of Economics, Allameh Tabatabaei University, Tehran, Iran

Dr. Moein Moeini-Aghaie

Associate Professor, Energy Engineering, Sharif University of Technology

Dr. Reza Nasr Esfahani

Associate Professor of Urban Economic, Faculty of Entrepreneurship and Economics, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran

Dr. Seyed Davood Aghaee

Professor, Faculty of Law and Political Science of University of Tehran

Dr. Sahar Nedae Tousi

Associate Professor, Department of Urban and Regional Planning and Design, Faculty of Architecture and Planning, Shahid Beheshti University



Urban Development Policy Making

Autumn 2026. Vol 03. Issue 03. Serial No. 08

- **Presenting a Model of Financial Challenges for Public Sector Participation in the Process of Urban Fabric Reconstruction using A Grounded Theory Approach**
◦ Peyman Akbari, Reza Rostami
- **Examining the Consequences of Moving the Capital to Makran with Hydropolitical Approaches and Hydro-Hegemonic Structures**
◦ Ramtin Tavvoosi Rad, Mohammad Ansari Ghojghar, Arash Malekian
- **Property Valuation and Urban Revenue Collection within a Participatory Governance Framework: The Case of**
◦ Reza Nasr Esfahani, Mostafa Nabati Nejad, Elham Agharian
- **Intelligent Detection and Separation of Recyclable Urban Waste Using a Deep Learning-Based Computer Vision Model**
◦ Ali Jelokhani
- **Forecasting Residential Electricity Demand under Climate Change Scenarios: A Python-based Model Incorporating Cooling and Heating Degree Days)**
◦ Mona Mirrazavi, Younes Noorollahi, Saba Amouzadeh, Mohanna Baba Hoseinpour, Hosein Yousefi
- **The Application of Artificial Intelligence in Developing a Local Climate Change Adaptation Strategy for Qanats: Evaluating the Performance of XGBoost in Estimating the Discharge of Qaen Qanats**
◦ Mohamad Fouladi Nasrabad, Mohammad Reza Farzaneh, Sepideh Zeraati Neyshabouri
- **Analysis of Urban Policy-Making Paradigms in Tehran in the Context of National Urban Policy**
◦ Gholamhossin Mohammadi, Rahmatollah Gholipor Souteh
- **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 Zarezadeh, Sevan Sohraiee, Maryam Khademi, Ehsan Sadeh
- **Biophilic Landscape Design as a Strategy to Cope with the Water Crisis in Urban Spaces (Case Study: Stepped Landscape of Chamran Park, Karaj)**
◦ Setayesh Zandi Babael, Mohammad Mahdi Poorhasan Mehrzanjani
- **Designing a Native Model of an Empowering Entrepreneurial Ecosystem for Female-Headed Households in Tehran Metropolis**
◦ Mohammad Javad Lashkari, Mehran Maghsoudi, Shadi Shahverdiani

