فصلنامه
موسسه آموزش عالی علمی-کاربردی شهرداری تهران
۰۲

# سیاستگذاری پیشرفت شهری

بهار ۱۴۰۴. دوره دوم. شماره ۰۱. شماره پیاپی: ۰۲

**شناسایی و رتبه‌بندی مؤلفه‌های مؤثر در برندینگ شهری با تأکید بر بعد اقتصادی (مطالعهٔ موردی: محلهٔ تجریش شهر تهران)**
حسین یوسفی، نیلوفر ضخیمی، سیده مهسا موسوی رینه، محمود عبدوس، مرضیه رازقی

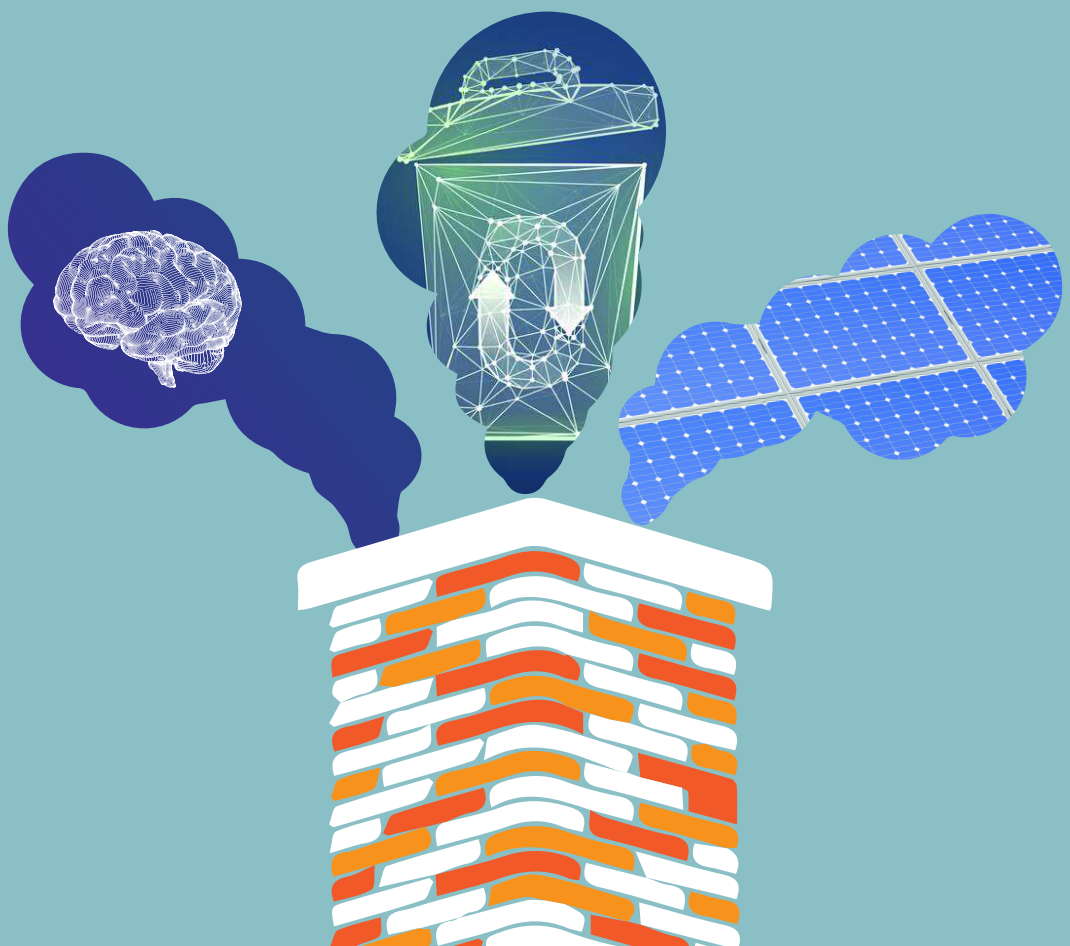
**بهینه‌سازی زمان‌بندی سیستم متروی شهری برای کاهش زمان سفر و ارتقای کارایی سامانهٔ حمل‌ونقل**
محمدمهدی مبارکی، علی روغنی عراقی، یونس نوراللهی

**ارزیابی نقش زیرساخت‌های برق و چارچوب‌های مقرراتی در توسعهٔ حمل‌ونقل عمومی برقی: تحلیل تطبیقی و ارائهٔ توصیه‌های سیاستی و چالش های موجود**
معین معینی اقطاعی، حسن بازوبندی، علی پاسبان

**ارزیابی و امکان‌سنجی تبدیل پسماند به انرژی در کلان‌شهرهای کشور درحال‌توسعه (مطالعهٔ موردی: ایران)**
حلیا سادات حسینی شکرابی، شهلا رزاقی، محمود عبدوس

**هوش مصنوعی و کاربردهای آن در مدیریت شهری**
هادی ویسی، سید ابراهیم برآهنگ

**تحلیل سیستماتیک تأثیر ارزیابی چرخهٔ حیات مصالح بر کاهش جزیرهٔ گرمایی شهری: رهیافتی به سوی سیاستگذاری پایدار شهری با استفاده از روش PRISMA**
مرتضی معاون، محمدعلی الهربی شیرازی، محمدحسن قدوسی نژاد



# فصلنامهٔ سیاستگذاری
## پیشرفت شهری

بهار ۱۴۰۴، دورهٔ دوم، شمارهٔ ۱، شمارهٔ پیاپی ۲



**صاحب امتیاز:**
**مؤسسهٔ آموزش عالی علمی کاربردی شهرداری تهران**

**مدیر مسئول**
**دکتر محمدحسین بوچانی**
مدرس دانشگاه، دکتری برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه شهید بهشتی

**سردبیر**
**دکتر حسین یوسفی**
استاد دانشکدهٔ انرژی و منابع پایدار، دانشگاه تهران

**جانشین مدیر مسئول و سردبیر**
**مسعود ندافان**

**مدیر نشریه**
زهراگلسا رسائی

**مدیر اجرایی**
دکتر حسینعلی مهرنیا

**کارشناس نشریه**
مرضیه رازقی

**گرافیست**
شاهده محمدعلیخانی

**ویراستار علمی- ادبی**
فاطمه رشوند

**ویراستار انگلیسی**
دکتر فرهاد محبتی

**صفحه‌آرا**
زهرا استواری دیلمانی



**ترتیب انتشار:** فصلنامه
**شاپای چاپی:** ۳۰۹۲-۶۵۳X
**شاپای الکترونیکی:** ۳۰۹۲-۶۵۶۴
**سیاست انتشار:** دسترسی آزاد
**فرآیند داوری:** دوسوکور

**شناسه مجوز وزارت فرهنگ و ارشاد:** ۹۷۴۲۶
**تاریخ مجوز : ۲۵ فروردین ۱۴۰۴**

**نشانی:** تهران، خیابان کریم‌خان زند، جنب پارک بهجت آباد، پلاک ۱۹۵، روبروی سازمان نوسازی شهرداری، مؤسسهٔ آموزش عالی علمی کاربردی شهرداری تهران
**کد پستی:** ۱۵۹۴۶۴۵۱۱۹
**تلفن:** ۸۸۹۲۴۸۷۳-۰۲۱، ۸۸۹۲۴۸۷۶-۰۲۱، ۸۸۸۹۸۹۴۴-۰۲۱
**پست الکترونیکی:** amozesh.moasese@gmail.com
**وب‌سایت نشریه:** https://judpm.ir



**اعضای هیئت تحریریهٔ بین‌المللی**

**پروفسور بهنام محمدی ایواتلو**
استاد دانشکدهٔ مهندسی انرژی، دانشگاه ال یو تی فنلاند

**پروفسور کوروش بهزادیان**
استاد زیرساخت‌های هوشمند، دانشگاه وست لندن، انگلستان

**اعضای هیئت تحریریه**

**دکتر یونس نوراللهی**
استاد گروه سیستم‌های انرژی، دانشگاه تهران

**دکتر بیژن عباسی**
استاد دانشکدهٔ 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 دانشکدهٔ اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبایی

**دکتر معین معینی اقطاعی**
دانشیار دانشکدهٔ مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

**دکتر رضا نصر اصفهانی**
دانشیار اقتصاد شهری گروه کارآفرینی و اقتصاد، دانشگاه هنر اصفهان

**دکتر سید داود آقائی**
استاد دانشکدهٔ حقوق و علوم سیاسی، دانشگاه تهران

سیاستگذاری پیشرفت شهری

دورهٔ دوم، شمارهٔ اول، بهار ۱۴۰۴

## فهرست مقالات


- **شناسایی و رتبه‌بندی مؤلفه‌های مؤثر در برندینگ شهری با تأکید بر بعد اقتصادی (مطالعهٔ موردی: محلهٔ تجریش شهر تهران)..... ۱**

حسین یوسفی، نیلوفر ضخیمی، سیده مهسا موسوی رینه، محمود عبدوس، مرضیه رازقی

- **بهینه‌سازی زمان‌بندی سیستم متروی شهری برای کاهش زمان سفر و ارتقای کارایی سامانهٔ حمل‌ونقل.....۱۷**

محمدمهدی مبارکی، علی روغنی عراقی، یونس نوراللهی

- **ارزیابی نقش زیرساخت‌های برق و چارچوب‌های مقرراتی در توسعهٔ حمل‌ونقل عمومی برقی: تحلیل تطبیقی و ارائهٔ توصیه‌های سیاستی و چالش‌های موجود.....۳۱**

معین معینی اقطاعی، حسن بازوبندی، علی پاسبان

- **ارزیابی و امکان‌سنجی تبدیل پسماند به انرژی در کلان‌شهرهای کشور درحال‌توسعه (مطالعهٔ موردی: ایران) ..۵۷**

حلیا سادات حسینی شکرابی، شهلا رزاقی، محمود عبدوس

- **هوش مصنوعی و کاربردهای آن در مدیریت شهری.....۷۳**

هادی ویسی، سید ابراهیم برآهنگ

- **تحلیل سیستماتیک تأثیر ارزیابی چرخهٔ حیات مصالح بر کاهش جزیرهٔ گرمایی شهری: رهیافتی به سوی سیاست‌گذاری پایدار شهری با استفاده از روش PRISMA ..... ۹۵**

مرتضی معاون، محمدعلی الهربی شیرازی، محمدحسن قدوسی‌نژاد

# باسمه‌تعالی

## سخن مدیرمسئول

به نظر می‌رسد، مدیریت و سیاستگذاریِ شهرهای آینده با مدل ها و فرآیندهای کنونی دیگر میسر نیست. چالش‌های نوظهور در شهرها از یک سو و تحولات سریع در حوزه‌های علمی، فنآوری و نوآوری از سوی دیگر سبب شده است هم ماهیت چالش‌های شهری و منطقه‌ای تغییر یابد و هم چاره‌جویی‌های کنترل و حل چالش‌ها ماهیتی متفاوت یافته است. مدیریت سنتی و کم اتکاء به نوآوری، فنآوری و علم؛ دیگر توان راهبری و کنترل مسائل پیچیده شهرها و پاسخگویی شایسته به نیازهای واقعی شهروندان را نخواهد داشت، از این حیث مجهز شدن مدیریت شهری به مقوله‌های نوین مدیریت و ابزارهایِ دانشی آن الزامی گریزناپذیر شده است. توسعه مهارت و دانش تخصصی در اداره شهرها و تکیه بر روش‌های خردمندانه مدیریت شهری در همه حوزه‌های اجرایی، سیاستگذاری، نظارتی و حتی مقررات‌گزاری، (برای همه کارکنان، مدیران و حتی کارگران) ضمن آنکه سبب سوق یافتن شهر به سوی پایداری و شکوفایی می شود، از سوی دیگر رضایتمندی و بهبود سرمایه اجتماعی را به بار خواهد آورد. واقعیت این است تجارب و مطالعات نشان می‌دهد، بخشی از راه حل‌های پیشین حل نارسایی‌های شهری، در سایه فنآوری و نوآوری خود تبدیل به چالش شده است(خودرو سواری و شهر خودرو محور که روزی دستاورد بزرگ تلقی می‌شود) و از سوی دیگر به مدد تکنولوژی و رشد بهره‌وری از منابع، برخی از چالش‌ها خود را به عنوان راه حل نمایان کرده است (اسکان غیر رسمی که اکنون خود بخشی از راه‌حل دسترسی به حق مسکن است).

موسسه آموزش عالی علمی کاربردی شهرداری تهران که بر اساس ضوابط و مقررات موضوعه؛ ماموریت توانمندسازی دانشی و مهارتی مدیران، کارکنان و کارگران شهرداری را بر عهد دارد در همین راستا تلاش دارد، از روش‌های مختلف برای دگردیسی اداره شهرها بویژه تهران و بهگشت مهارت، دانش فنی و سیاستگذاری مدیران، متخصصان و کارکنان خدمات رسان شهری استفاده کند. لذا انتشار فصلنامه سیاستگذاری پیشرفت شهری که به همت اعضای هیئت علمی و تیم اجرایی نشریه انتشار می‌یابد، تلاشی آگاهانه برای اتصال حوزه علم، نوآوری و دانش فنی با عمل و اجرا است.

**محمد حسین بوچانی**

**Urban Development Policy Making**

Home Page: https://judpm.ir

Online ISSN: 3092-6564

# Identifying and Ranking the Effective Components in City Branding Emphasizing on the Economic (Case study: Tajrish Neighborhood of Tehran)

**Hossein Yousefi[1*] | Niloufar Zakhimi[2] | Seyedeh Mahsa Mousavi Reineh[3] | Mahmood Abdoos[4] | Marziyeh Razeghi[5]**

1. Corresponding Author, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: hosseinyousefi@ut.ac.ir
2. Master of Urban Management, Allameh Tabatabai University, Tehran, Iran. Email: Niloofar.zakhimi@yahoo.com
3. PhD student of Water Engineering, Department of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mahsa.moosavi.rei@ut.ac.ir
4. School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mahmood.abdoos@ut.ac.ir
5. School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: razeghi.marziyeh@ut.ac.ir

**ARTICLE INFO**

**Article type:**
Research Paper

**Article History:**
Received 16 October 2024
Revised 15 November 2024
Accepted 30 January 2025
Published Online 04 April 2025

**Keywords:**
Urban Branding,
Components of Urban Branding,
Sustainable urban,
City economy.

**ABSTRACT**

In recent years, the subject of Urban Branding has been one of the notable topic to urban planners and specialists. On the other hand, with the rapid progress of globalization, cities are increasingly seeking to compete with each other in order to attract more tourists, investors, financial resources, etc. In the same vein, due to the numerous capacities of the Tajrish neighborhood in Tehran, this study was conducted to identify and ranking the effective components in Urban Branding with an emphasis on the economic dimension in that neighborhood. First, by reviewing and studying the context of relevant researches, six components were extracted to achieve Urban Branding which directly and indirectly can affect the economy. Then, considering the experts' opinions and using the Fuzzy Delphi technique, we have ranked these six components. According to the obtained results, Impact order of the effective components in Urban Branding in the Tajrish neighborhood is as follows: 1. Characteristics and Unique assets, 2. Service and tourism facilities, 3. Investment and business, 4. International position of the city, 5. Satisfaction of services and Urban infrastructure and 6. Transportation services and appropriate access. Therefore, considering this ranking, we can provide more appropriate approaches and more efficient planning to turn this neighborhood into an Urban Brand.

**Cite this article:** Yousefi, H.; Zakhimi, N.; Mousavi Reineh, M.; Abdoos, M. & Razeghi, M. (2025). Identifying and Ranking the Effective Components in City Branding Emphasizing on the Economic (Case study: Tajrish Neighborhood of Tehran). *Urban Development Policy Making*, 2 (1), 1-15. DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.496969.1000

© Hossein Yousefi, Niloufar Zakhimi, Seyedeh Mahsa Mousavi Reineh, Mahmood Abdoos, Marzieh Razeghi
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.496969.1000

## Introduction

One of the most significant concepts in urban management and planning today is urban branding. A city brand serves as a tool for differentiation, enhancing the city's position, and is considered a valuable asset for sustainable urban development. Urban branding is a crucial asset for sustainable urban development

and distinguishes cities from one another. City branding is a phenomenon that cities need to achieve sustainable competitive advantages in the era of globalization and to create a foundation for development. In recent years, many cities have invested in urban branding with the aim of gaining economic, political, cultural, and social benefits. However, it is important to note that the extent of each city's utilization of urban branding varies depending on its structure and nature, with historical, cultural, artistic, political, economic, natural resource, and environmental factors influencing this process.

The Tajrish neighborhood, given its numerous potentials in this area, is a suitable candidate for establishing a strong urban brand. This research aims to identify and rank the components of urban branding with an emphasis on the economic aspect in this neighborhood. Planning based on these findings can lead to sustainable urban development. With the concentration of industries, rural migration, and population density, fundamental changes have occurred in the structure and fabric of cities, leading to increased competition among cities for achieving sustainable development in recent decades. Today, urban branding is utilized as a strategic tool to enhance cities' competitiveness, credibility, power, and influence.

To realize urban branding, it is necessary for the city to leverage the high capacity of various managing institutions. In other words, urban branding encompasses a series of actions aimed at achieving competitive advantages among cities, attracting investment, developing tourism, strengthening local identity, and ultimately improving the city’s image in both domestic and international communities. Urban branding is the most important tool in the urban marketing process that can lead to increased resource attraction and assist cities in successfully attracting foreign direct investment while achieving sustainable economic development.

This section briefly discusses some studies related to this research topic. The study of place and city branding began in 2005; despite numerous research efforts both domestically and internationally, urban branding remains in its early stages, indicating that this field still requires further investigation. Researchers have recognized an urgent need for a robust analysis of cities as brands that encompasses a wide range of stakeholders. Rainisto (2003) noted that place brands can benefit from the value associated with a location's image; however, an important question arises: Can a city be perceived as a brand? A product or service brand is created through positioning relative to competition and its distinct personality and includes a unique combination of functional features and symbolic value. In fact, the key to successful branding lies in establishing a connection between the brand and the community.

In recent decades, cities' need for sustainable revenue has been the subject of numerous studies. One aspect that can directly influence cities' competitiveness and economic growth is urban branding. Additionally, alongside the development of globalization processes and increased competition among cities, there has been heightened attention on recognizing unique city characteristics and attracting financial resources to improve the city's position towards achieving sustainable development.

This research focuses on identifying and ranking components of urban branding with an emphasis on economic aspects. Based on the results obtained, practical solutions will be proposed to realize urban branding and facilitate more precise and effective planning. Given that one of the significant challenges faced by management systems in Tehran over the past decade has been the need for sustainable urban revenue—and that failure to secure these revenue sources has caused substantial damage to urban infrastructure—this research emphasizes the necessity of identifying and ranking economic components of urban branding aimed at achieving practical solutions. For this purpose, Tajrish neighborhood in Tehran was selected as it holds significant importance both geographically and culturally-historically-touristically. The objective of this research was to identify and rank effective components in urban branding with an emphasis on economic aspects within Tajrish neighborhood in Tehran.

## Methodology

This research is applied in nature and was conducted using a descriptive-analytical method. Initially, data collection was carried out through a library method and document study. For this purpose, relevant projects related to urban branding and reputable databases were consulted to obtain the necessary data for the research. Subsequently, the components influencing urban branding on the economy were identified, and the fuzzy Delphi technique was employed to validate and rank them. The Delphi technique is a robust structured method developed based on the opinions and consensus of

experts; its application is particularly useful when insufficient and uncertain information is available. The Delphi method relies on the consensus of a group of experts, meaning it is conducted with the assistance of specialists knowledgeable in the selected topic.

The Delphi method can be categorized into two forms: classical Delphi and fuzzy Delphi. In classical Delphi, expert opinions are expressed in definitive numbers, while in fuzzy Delphi, the uncertainty inherent in opinions is acknowledged. This uncertainty can be addressed through fuzzification (Azar & Faraji, 2010). Therefore, fuzzy theory is incorporated within the framework of the fuzzy Delphi technique. In this technique, a concept known as membership function is used to represent expert opinions [3]. The steps involved in this method are quite similar to those of classical Delphi; however, the key difference lies in fuzzifying the respondents' answers. To fuzzify expert opinions (these qualitative variables), triangular or trapezoidal fuzzy numbers are utilized. Fuzzy numbers are generalized forms of real numbers that encompass a range of possible values instead of pointing to a specific value. In this study, triangular fuzzy numbers were considered due to their high efficiency and ease of computation.

## Conclusion

The objective of this research was to identify and rank the components influencing urban branding with an emphasis on the economic aspect. To achieve this, we extracted economic components from various documents and projects related to urban branding. Subsequently, we employed the fuzzy Delphi method to validate and rank these components. The findings revealed the following order of effective components in urban branding from an economic perspective:

1. Unique Features and Assets (including religious and historical sites such as the Imamzadeh Saleh shrine, Saadabad Palace, and a favorable geographical location)
2. Service and Tourism Facilities (accommodation options and recreational services)
3. Investment and Trade (presence of markets and malls in the neighborhood)
4. Satisfaction with Urban Services and Infrastructure (infrastructure and superstructure facilities)
5. International Standing of the City (the city's prominence in international communities)
6. Transportation Services and Accessibility (related to the quality and quantity of transportation means, traffic, etc.)

Considering these priorities, it is essential to undertake actions aimed at achieving optimal economic growth while recognizing that urban branding can be examined from both community-centered and market-centered approaches.

پیشرفت شهری
سیاستگذاری
سایت نشریه: https://judpmi.ir
شاپا الکترونیکی: ۶۵۶۴-۳۰۹۲

# شناسایی و رتبه‌بندی مؤلفه‌های مؤثر در برندینگ شهری با تأکید بر بعد اقتصادی (مطالعهٔ موردی: محلهٔ تجریش شهر تهران)

حسین یوسفی[۱*] | نیلوفر ضخیمی[۲] | سیده مهسا موسوی رینه[۳] | محمود عبدوس[۴] | مرضیه رازقی[۵]

۱. نویسندهٔ مسئول، استاد دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار دانشگاه تهران. رایانامه: hosseinyousefi@ut.ac.ir
۲. کارشناس ارشد مدیریت شهری، دانشگاه علامه طباطبایی تهران. رایانامه: Niloofar.zakhimi@yahoo.com
۳. دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران. رایانامه: mahsa.moosavi.rei@ut.ac.ir
۴. دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار دانشگاه تهران. رایانامه: mahmood.abdoos@ut.ac.ir
۵. دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار دانشگاه تهران. رایانامه: razeghi.marziyeh@ut.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:**
پژوهشی

**تاریخ‌های مقاله:**
**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۳/۰۷/۲۵
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۳/۰۸/۲۵
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۳/۱۱/۱۱
**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۴/۰۱/۱۵

**کلیدواژه:**
اقتصاد شهری،
برندینگ شهری،
شهر پایدار،
مؤلفه‌های برندینگ شهری.

**چکیده**

در سالیان اخیر موضوع برندینگ شهری از موضوعات مورد توجه متخصصان و برنامه‌ریزان شهری بوده است. از طرف دیگر، با پیشرفت سریع جهانی شدن، شهرها به دنبال رقابت با یکدیگر با هدف جذب بیشتر گردشگران، سرمایه‌گذاران، منابع مالی و... نیز هستند. به همین منظور، با توجه به ظرفیت‌های متعدد محلهٔ تجریش شهر تهران، در این پژوهش شناسایی و رتبه‌بندی مؤلفه‌های مؤثر در برندینگ شهری با تأکید بر بعد اقتصادی در آن محله صورت گرفت. ابتدا با بررسی و مطالعهٔ متن پژوهش‌های مرتبط، شش مؤلفه برای دستیابی به برندینگ شهری استخراج شد که به صورت مستقیم و غیرمستقیم می‌توانند بر اقتصاد مؤثر باشند. سپس از نظر خبرگان و استفاده از تکنیک دلفی فازی به رتبه‌بندی این شش مؤلفه پرداختیم. طبق نتایج به‌دست‌آمده ترتیب تأثیرگذاری مؤلفه‌های مؤثر در برندینگ شهری در محلهٔ تجریش به شرح زیر است: ۱. ویژگی‌ها و دارایی‌های منحصربه‌فرد؛ ۲. تسهیلات خدماتی و گردشگری؛ ۳. سرمایه‌گذاری و تجارت؛ ۴. جایگاه بین‌المللی شهر؛ ۵. رضایت از خدمات و زیرساخت‌های شهری و ۶. خدمات حمل‌ونقل و دسترسی مناسب. لذا با در نظر گرفتن این رتبه‌بندی می‌توان به ارائهٔ راهکارهای مناسب‌تر و برنامه‌ریزی کارآمدتری به منظور تبدیل این محله به یک برند شهری پرداخت.

**استناد:** یوسفی، حسین؛ ضخیمی، نیلوفر؛ موسوی رینه، سیده مهسا؛ عبدوس، محمود و رازقی، مرضیه (۱۴۰۴). شناسایی و رتبه‌بندی مؤلفه‌های مؤثر در برندینگ شهری با تأکید بر بعد اقتصادی (مطالعهٔ موردی: محلهٔ تجریش شهر تهران). *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۲ (۱) ۱-۱۵.
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.496969.1000

© حسین یوسفی، نیلوفر ضخیمی، سیده مهسا موسوی رینه، محمود عبدوس، مرضیه رازقی
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.496969.1000

## ۱. مقدمه

امروزه، یکی از مفاهیم مهم مطرح‌شده در مدیریت و برنامه‌ریزی شهری، مقولهٔ برندینگ شهری است. برند شهری ابزاری برای تمایز، بهبود جایگاه شهر و به طور کلی یک دارایی ارزشمند در راستای توسعهٔ پایدار شهر تلقی می‌شود. برند شهری، دارایی مهمی برای توسعهٔ پایدار شهری بوده و وجه تمایز بین شهرهاست. برندسازی شهر، پدیده‌ای است که شهرها برای نیل به مزیت رقابتی پایدار در عصر جهانی شدن و بسترسازی برای توسعه، به آن نیاز دارند [۱]. در سال‌های اخیر شهرهای بسیاری با هدف کسب منافع اقتصادی، سیاسی، فرهنگی و اجتماعی سرمایه‌گذاری کرده‌اند. اگرچه درخور یادآوری است بسته به نوع ساختار و ماهیت، میزان بهره‌برداری هر شهر از برندینگ شهری متفاوت است و شاخص‌های تاریخی، فرهنگی، هنری، سیاسی، اقتصادی، منابع طبیعی و محیط زیستی و... بر تحقق این مقوله تأثیر می‌گذارند [۲]. محلهٔ تجریش با توجه به پتانسیل‌های زیادی که در این زمینه دارد، گزینه‌های مناسبی برای برخورداری از یک برند شهری قوی دارد. پژوهش حاضر نیز به دنبال شناسایی و رتبه‌بندی مؤلفه‌های برندینگ شهری با تأکید بر بعد اقتصادی در محلهٔ یادشده بوده که برنامه‌ریزی براساس این یافته‌ها می‌تواند دستیابی به توسعهٔ پایدار شهری را در پی داشته باشد. با گسترش تمرکز صنایع، مهاجرت‌های روستایی و تراکم جمعیت، دگرگونی‌های اساسی در ساختار و بافت شهرها به وجود آمد، به گونه‌ای که این تحولات سبب شده است تا در دهه‌های اخیر رقابتی در جهت دستیابی به توسعهٔ پایدار میان شهرها شکل بگیرد. امروزه، برندینگ شهری به عنوان ابزاری راهبردی برای افزایش رقابت‌پذیری، اعتبار، قدرت و نفوذ شهرها استفاده می‌شود. در این راستا به منظور تحقق برندینگ شهری، لازم است که شهر از ظرفیت بالای برنامه‌ریزی و ساماندهی نهادهای مختلف اداره‌کنندهٔ شهر بهره‌مند باشد. به بیان دیگر، برندینگ شهری مجموعه اقداماتی است که با ابزارهای مختلف و با هدف دستیابی به مزیت‌های رقابتی میان شهرها، جذب سرمایه، توسعهٔ گردشگری، تقویت هویت محلی و درنهایت بهبود تصویر شهر در مجامع داخلی و خارجی، انجام می‌گیرد. برندینگ شهری مهم‌ترین ابزار فرایند بازاریابی شهری است که می‌تواند به جذب منابع بیشتر منجر شود و از این طریق به شهرها کمک می‌کند که در جذب سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی، موفق‌تر عمل کنند [۳ و ۴] و توسعهٔ پایدار اقتصادی برای شهر را در پی داشته باشند [۴ و ۵].

در این بخش از مقاله، به شکل اجمالی به برخی از مطالعاتی که در ارتباط با موضوع این پژوهش صورت گرفته‌اند، پرداخته شده است. به طور کلی، مطالعهٔ برندسازی مکان‌ها و شهرها در سال ۲۰۰۵ آغاز شد، با وجود تحقیقات متعدد در داخل و خارج از کشور، برندسازی شهری در مراحل ابتدایی خود باقی مانده و این نشان می‌دهد این حوزه همچنان نیازمند تحقیق و بررسی بیشتر است [۲].

محققان به نیاز فوری برای تجزیه‌وتحلیل قوی شهر به عنوان یک نام تجاری، که طیف وسیعی از ذی‌نفعان را در بر می‌گیرد، پی بردند. همچنین راینیستو (۲۰۰۳) بیان کرد که در برندهای مکانی، امکان بهره‌مندی از ارزش تصویر یک مکان وجود دارد، اما سؤال مهم اینجاست آیا یک شهر می‌تواند به عنوان یک نام تجاری دیده شود؟ نام تجاری یک محصول و یا یک خدمت به وسیلهٔ موقعیت‌یابی نسبت به رقابت و شخصیت خود به طور متمایز، ایجاد شده و شامل یک ترکیب منحصربه‌فرد از ویژگی‌های کارکردی و ارزش نمادین است. در واقع، کلید موفقیت برندسازی، ایجاد ارتباط بین نام تجاری و اجتماع است [۶].

در دهه‌های اخیر نیاز شهرها به درآمد پایدار، موضوع بررسی‌ها و مطالعات متعددی در این زمینه بوده است. یکی از مقولاتی که می‌تواند در ارتقای رقابت‌پذیری و رشد اقتصادی شهرها تأثیر مستقیمی داشته باشد، برندینگ شهری است [۷]. علاوه بر این هم‌زمان با توسعهٔ فرایند جهانی شدن و افزایش رقابت میان شهرها، نیاز به شناخت شهر و ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن و جذب منابع مالی و بهبود جایگاه شهر در جهت دستیابی به توسعهٔ پایدار بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است [۸].

برندینگ شهری به عنوان یک ابزار استراتژیک برای جذب سرمایه‌گذاری، گردشگری و استعدادها شناخته می‌شود. در این راستا، شناسایی و رتبه‌بندی مؤلفه‌های مؤثر در برندینگ شهری، به‌ویژه در محله‌های خاص مانند تجریش تهران، اهمیت ویژه‌ای دارد.

هویت برند شامل ویژگی‌ها و ارزش‌هایی است که یک شهر یا محله را متمایز می‌کند. مطالعات نشان می‌دهند مؤلفه‌هایی مانند شهرت برند، ارتباط برند و عملکرد برند تأثیر زیادی بر تصویر برند دارند [۹].

یکی از اهداف اصلی برندینگ شهری، جذب سرمایه‌گذاری است. شهرها باید تصویر مثبتی از خود ارائه دهند تا بتوانند سرمایه‌گذاران را جذب کنند. این امر به‌ویژه در محله‌های تاریخی و فرهنگی مانند تجریش که دارای جاذبه‌های گردشگری هستند، اهمیت دارد [۱۰].

با توجه به چالش‌های تغییرات اقلیمی، برندینگ شهری باید به سمت توسعهٔ پایدار حرکت کند. شهرها باید استراتژی‌هایی برای کاهش کربن و بهبود کیفیت زندگی شهروندان اتخاذ کنند تا بتوانند تصویر مثبتی از خود ارائه دهند.

همکاری و هماهنگی میان ذی‌نفعان مختلف از جمله دولت، بخش خصوصی و جامعهٔ محلی برای موفقیت برنامه‌های برندینگ شهری ضروری است. این همکاری می‌تواند به بهبود زیرساخت‌ها و خدمات عمومی کمک کند و تصویر مثبت‌تری از محله ایجاد کند.

برندینگ مؤثر می‌تواند تأثیرات اقتصادی قابل توجهی روی محله‌ها داشته باشد:

با ایجاد یک تصویر جذاب و مثبت از محلهٔ تجریش، می‌توان تعداد گردشگران را افزایش داد که این امر به رشد اقتصادی محله کمک می‌کند. جذب سرمایه‌گذاری و گردشگری می‌تواند به ایجاد فرصت‌های شغلی جدید در محله منجر شود. سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها بهبود کیفیت زندگی ساکنان را به همراه دارد و بر جذابیت محله می‌افزاید [۱۱].

در نهایت، برای موفقیت برندینگ شهری در محلهٔ تجریش تهران، لازم است که مؤلفه‌های هویت برند، جذب سرمایه‌گذاری، توسعهٔ پایدار و مدیریت ذی‌نفعان مورد توجه قرار گیرند. این عوامل نه تنها به تقویت تصویر برند کمک می‌کنند، بلکه تأثیرات اقتصادی مثبتی نیز روی محله خواهند داشت [۱۲].

با توجه به اینکه یکی از چالش‌های مهم نظام مدیریتی در یک دههٔ گذشته در شهر تهران، نیاز به درآمد پایدار شهری است و عدم تأمین این منابع درآمدی تا کنون خسارت‌های زیادی را به زیرساخت‌های شهری وارد کرده، لذا در این پژوهش ضرورت شناسایی و رتبه‌بندی مؤلفه‌های اقتصادی برندینگ شهری با هدف دستیابی به راهکارهای عملی و مناسب احساس شد و به همین‌منظور محلهٔ تجریش شهر تهران که هم از لحاظ موقعیت جغرافیایی و هم از لحاظ فرهنگی، تاریخی و گردشگری حائز اهمیت است، مورد مطالعه قرار گرفت. هدف از انجام این پژوهش، شناسایی و رتبه‌بندی مؤلفه‌های مؤثر در برندینگ شهری با تأکید بر بعد اقتصادی در محلهٔ تجریش شهر تهران بوده است.

## ۱ـ ۱. برندینگ شهری

با توجه به جدول ۱ بیان می‌شود که امروزه با پیشرفت تکنولوژی، شاهد افزایش رقابت در اغلب شهرهای جهان به منظور دستیابی به برندینگ شهری هستیم. این رقابت با هدف جذب منابع مالی و سرمایه‌گذاری، توسعهٔ گردشگری، رونق کسب‌وکار، بهبود منزلت و کسب اعتبار بیشتر برای شهر است [۱۳]. در ادامه، به برخی از نظریات دانشگاهی در خصوص برندینگ شهری می‌پردازیم:

**جدول ۱.** نظریات برندینگ شهری

| شرح نظریه | منبع |
|---|---|
| برندسازی شهرها بر رضایت شهروندان و کیفیت زندگی تأثیرگذار است. | [14] |
| انتخاب ترکیبی از عوامل برند است که با ایجاد تصویر ذهنی مثبت از شهر منجر به شناخت و تمایز شهر مورد نظر از سایرین می‌شود. | [15] |
| جایگاه شهر، مکان، ظرفیت، نبض، جنب‌وجوش، مردم و پیش‌نیازها از جمله متغیرهای تأثیرگذار برند شهری هستند. | [13] |
| برندینگ شهری هویت رقابتی شهرها است. | [16] |
| خلق تصاویر شهری جذاب و غنی و فرایندی در جهت بهبود سازوکارهای برندسازی مقصد. | [3] |
| برندینگ شهری، شهر را با یک هویت فراموش‌نشدنی نشان می‌دهد و ابزاری است که ارزش‌های اصلی شهر را با زیرکی خاص منتقل می‌کند. امروزه ایجاد برند برای شهرها به شکل روزافزونی به عنوان دارایی مهم در راستای توسعهٔ شهر و همچنین بهبود جایگاه شهر و سایر منابع داخلی، تلقی می‌شود. | [17, 18] |
| شهرها می‌توانند در رفع نیازهای عاطفی و عملکردی نقش به سزایی ایفا کنند. | [19] |
| برند شهری مترادف با بازاریابی مکان است که با رقابت برای جذب گردشگران، بازدیدکنندگان، سرمایه‌گذاران، شهروندان و سایر منابع داخلی همراه است. | [20] |
| در حالی که برندسازی شهر یک جریان قرن است، دانشمندان فقط در سه دههٔ گذشته به بررسی پدیده و مدیریت برندهای شهر از منظر بازاریابی پرداخته‌اند. با این‌حال، طی این مدت نسبتاً کوتاه، تحقیقات در مورد برندسازی شهر به طرز چشم‌گیری تحول یافته است. | [21, 22] |
| نقش‌های اساسی یک برند قوی عبارت‌اند از: توسعهٔ گردشگری، جذب سرمایه‌گذار، جذب مهارت، فروش محصولات بومی و... از تأثیرات مهم یک برند شهری قوی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: مانند: ایجاد هویت متمایز، ایجاد نظم و افزایش همبستگی اجتماعی. این موارد تأثیرات کلان اجتماعی نیز دارند. | [23] |
| برندسازی شهر کوششی است برای ایجاد و غنی‌سازی کیفیت زندگی شهری | [24] |
| با ساماندهی یک برند شهری با مفهوم و ویژگی‌های شهر، شهر با ایجاد سیستم ارتباط متقابل بین ترکیبی از عوامل در یک شهر به عنوان یک برند قدرتمند، برای مشخص نمودن ویژگی‌های آن از سایر شهرها ساخته می‌شود. | [25] |
| برندسازی شهر در واقع چیزی بیش از تبلیغ صرف مکان است، زیرا در برخی شهرها برای بازسازی و بازتعریف تصویر آن‌ها استفاده می‌شود. | [26] |

تا امروز مطالعات گوناگونی در حوزهٔ برندینگ شهری صورت گرفته است. برندینگ شهری یک نظریهٔ نوظهور است که تمرکز آن بر شناسایی مزیت‌های رقابتی پایدار یک شهر و تبدیل آن به یک هویت رقابتی شاخص است. برند شهری، باعث تمایز یک شهر از سایر شهرها در سطوح ملی و بین‌المللی می‌شود. مقبولیت و مشروعیت برند یک شهر در نظر مخاطبان، دستیابی به منافع اقتصادی، سیاسی، اجتماعی و فرهنگی را به دنبال دارد [۲۷ و ۲۸].

علاوه بر این، از دیگر دلایلی که برای توسعهٔ استراتژی برند شهری وجود دارد، می‌توان به تعریف مجدد و تقویت هویت رقابتی یک شهر، رونق تصویر ذهنی جامع‌تر، صحیح‌تر و مثبت‌تر از شهر، ایجاد چارچوب متمرکز، منسجم و استراتژیک برای تصمیم‌گیری در مورد اینکه یک شهر خود را چگونه معرفی کند و برانگیختن حس غرور شهری و شکوفایی حس هدفمندی اشاره کرد [۲۹].

بنابراین اکنون زمان آن است که برای بهبود تصویر شهر با هدف جذب گردشگر، در جست‌وجوی راه‌های جدید باشیم. در همین راستا، کوتلر و همکاران اعتقاد دارند که بسیاری از شهرها در حال مرگ هستند و یا دچار افسردگی مزمن می‌شوند [۳۰ و ۳۱].

## ۱ـ ۲. مؤلفه‌های برندینگ شهری

پس از بررسی‌های صورت‌گرفته و مطالعهٔ متن پژوهش‌های مرتبط توسط محققان، درنهایت شش مؤلفه برای دستیابی به برندینگ شهری استخراج شد که به صورت مستقیم و غیرمستقیم می‌توانند بر اقتصاد مؤثر باشند. هر یک از این مؤلفه‌ها شاخص‌هایی دارند که به همراه نوع تأثیرگذاری آن‌ها بر اقتصاد، در جدول ۲ آورده شده است.

**جدول ۲.** مؤلفه‌ها و شاخص‌های برندینگ شهری

| مؤلفه | شاخص‌ها | تأثیرگذاری بر اقتصاد | منبع |
|---|---|---|---|
| ویژگی‌ها و دارایی‌های منحصربه‌فرد | انجام مراسم خاص<br>برگزاری رویدادهای مهم ارزش‌های اجتماعی خاص<br>قدرت سیاسی (پایتخت بودن و...)<br>آثار و بناهای منحصربه‌فرد | غیرمستقیم | [16, 32] |
| جایگاه بین‌المللی شهر | مطرح بودن شهر در سطح بین‌المللی<br>قدرت جذب گردشگر داخلی و خارجی<br>آمادگی ذهنی شهروندان در مورد توسعهٔ گردشگری | غیرمستقیم | [16, 33] |
| سرمایه‌گذاری و تجارت | میزان سرمایه‌گذاری خارجی و منابع مرتبط<br>وضعیت بازارها و مراکز فروش<br>وضعیت مبادلات ارزی | مستقیم | [16, 32] |
| رضایت از خدمات و زیرساخت‌های شهری | رضایت شهروندان از زندگی در شهر<br>تمایل به زندگی در شهر<br>وضعیت تأسیسات شهری | غیرمستقیم | [13, 32] |
| تسهیلات خدماتی و گردشگری | وجود مراکز تفریحی و سرگرمی<br>وجود مراکز بهداشتی و درمانی<br>وضعیت هتل‌ها و مسافرخانه‌ها<br>وضعیت کمپ‌های مسافر | مستقیم | [13, 34] |
| خدمات حمل‌ونقل و دسترسی مناسب | وضعیت ترافیک در سطح شهر<br>خدمات حمل‌ونقل عمومی مناسب<br>وضعیت پارکینگ‌های عمومی<br>کیفیت خیابان‌های سطح شهر<br>تعداد بزرگراه‌های موجود در سطح شهر | مستقیم | [13, 35] |

مؤلفه‌های برندینگ شهری در تهران به شرح زیر خلاصه شده است:

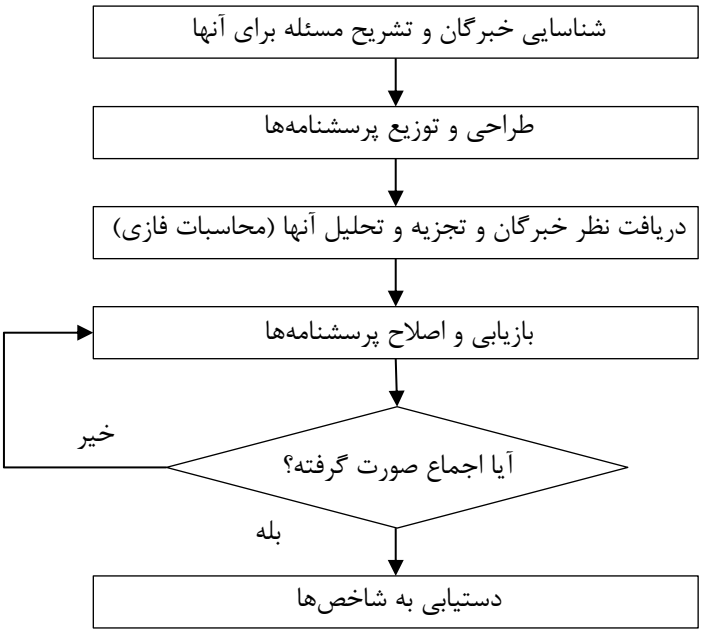
۱. **عوامل فرهنگی:** فرهنگ و تاریخ غنی تهران به عنوان یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر برندینگ شهری محسوب می‌شود. این عوامل شامل جاذبه‌های تاریخی، هنری و فرهنگی هستند که می‌توانند به جذب گردشگران و سرمایه‌گذاران کمک کنند.
۲. **عوامل اقتصادی:** وضعیت اقتصادی و فرصت‌های سرمایه‌گذاری در تهران از دیگر مؤلفه‌های کلیدی است. این عوامل شامل زیرساخت‌های اقتصادی، بازار کار و فرصت‌های تجاری می‌شوند که می‌توانند به تقویت برند شهری کمک کنند.
۳. **عوامل اجتماعی:** تعاملات اجتماعی و کیفیت زندگی در شهر نیز بر برندینگ تأثیرگذار است. این شامل امنیت اجتماعی، سطح خدمات عمومی و مشارکت شهروندان در فعالیت‌های اجتماعی است.
۴. **عوامل زیست‌محیطی:** کیفیت محیط زیست، فضای سبز و مدیریت منابع طبیعی از جمله عواملی هستند که می‌توانند بر تصویر شهر تأثیر بگذارند. بهبود شرایط زیست‌محیطی می‌تواند جذابیت تهران را افزایش دهد.
۵. **عوامل سیاسی:** ثبات سیاسی و حکمرانی خوب نیز از دیگر مؤلفه‌های تأثیرگذار بر برندینگ شهری هستند. این عوامل شامل شفافیت در مدیریت شهری و تعاملات مثبت با شهروندان می‌شوند.

## ۲. روش تحقیق

این پژوهش از نظر هدف کاربردی است و به روش توصیفی ـ تحلیلی انجام گرفته است. ابتدا جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از روشی کتابخانه‌ای و مطالعهٔ اسنادی انجام شده است. به همین‌منظور، برای دستیابی به داده‌های مورد نیاز پژوهش، به پروژه‌های مرتبط با برندینگ شهری و پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر مراجعه شد. سپس، مؤلفه‌های مؤثر برندینگ شهری بر اقتصاد شناسایی شد و در ادامه با هدف تأیید و رتبه‌بندی آن‌ها، از تکنیک دلفی فازی استفاده شد. تکنیک دلفی یک روش قوی ساختارمند است و با تکیه بر نظر و هم‌اندیشی خبرگان ابداع شده است. کاربرد این روش در مواقعی است که اطلاعات ناکافی و نامطمئن در دسترس باشد [۳۵]. روش دلفی بر اساس اجماع گروهی افراد خبره استوار است، به بیان دیگر این روش با کمک افراد متخصص و دارای دانش در موضوع انتخابی انجام می‌گیرد [۳۶]. روش دلفی به دو صورت دلفی کلاسیک و دلفی فازی تقسیم می‌شود. در دلفی کلاسیک، نظرات افراد خبره در قالب اعداد قطعی بیان می‌شود، در حالی که نظر افراد قطعی نبوده و عدم قطعیت حاکم بر شرایط است. این احتمالی بودن و عدم‌قطعیت را می‌توان با فازی سازی مرتفع کرد. بنابراین، تئوری فازی در قالب تکنیک دلفی فازی ارائه شد. در این تکنیک برای نشان دادن نظر افراد خبره از مفهومی به نام تابع عضویت استفاده می‌شود [۳۷]. مراحل انجام این روش بسیار شبیه به روش دلفی کلاسیک است تفاوت آن در فازی‌سازی جواب پاسخ‌گویان است. به منظور فازی‌سازی نظرات خبرگان (این متغیرهای کیفی) از اعداد فازی مثلثی یا ذوزنقه‌ای استفاده می‌شود. اعداد فازی شکل تعمیم‌یافتهٔ اعداد واقعی و معمولی هستند که به جای اشاره به یک ارزش خاص، شامل بازه‌ای از ارزش‌های ممکن هستند. در این مطالعه اعداد فازی مثلثی مد نظر قرار گرفت. این نوع از اعداد فازی به دلیل کارایی بالا و سهولت محاسبات بسیار مورد استفاده‌اند. هر عدد فازی مثلثی به سه مقدار تقسیم شده است و با ($M = (l,m,u)$) نمایش داده می‌شود. u کران بالاست و بیشینهٔ مقادیری است که عدد فازی M می‌تواند اختیار کند، از طرفی l کران پایین کمینهٔ مقداری است که عدد فازی M می‌تواند به خود اختصاص دهد و در نهایت m محتمل‌ترین مقدار یک عدد فازی است. تابع عضویت یک عدد فازی مثلثی به صورت رابطهٔ ۱ است:

$$u_M = \begin{cases} \dfrac{x-l}{m-l} & l \le x \le m \\ \dfrac{u-x}{u-m} & m \le x \le u \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \qquad (۱)$$

فلوچارت مربوط به شکل ۱ مراحل اجرایی روش دلفی فازی را نشان می‌دهد [۳۸]. همان‌گونه که در شکل ۱ مشخص است، در گام نخست پرسشنامه‌ای بر مبنای نتایج مرحلهٔ اول پژوهش طراحی شد. سپس خبرگان شناسایی‌شده باید میزان اهمیت هر یک از مراحل شناسایی شده را با استفاده از متغیرهای کیفی از جمله خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تعیین کنند.




**شکل ۱.** مراحل اجرای روش دلفی فازی [۳۵]

در گام دوم و پس از دریافت نظرات خبرگان و تجزیه‌وتحلیل آن‌ها محاسبات فازی‌سازی صورت گرفت، به این‌صورت که متغیرهای کلامی به اعداد فازی مثلثی بدل شدند. نتیجهٔ این اقدامات در جدول ۳ آورده شده است.

**جدول ۳.** اعداد فازی مثلثی متناظر با متغیرهای کلامی

| متغیرهای کلامی | عدد فازی مثلثی (l,m,u) |
|---|---|
| خیلی زیاد | (۰/۷۵ ،۱ ،۱) |
| زیاد | (۰/۵ ،۰/۷۵ ،۱) |
| متوسط | (۰/۲۵ ،۰/۵ ،۰/۷۵) |
| کم | (۰ ،۰/۲۵ ،۰/۵) |
| خیلی کم | (۰ ،۰ ،۰/۲۵) |

به این‌صورت که اعداد فازی مثلثی به نظر هر یک از خبرگان داده شد و مجموعه اعداد فازی مثلثی برای هر خبره با استفاده از رابطهٔ ۲ به دست آمد.

$$\tilde{A}^{(i)} = \left(a_1^{(i)}, a_2^{(i)}, a_3^{(i)}\right) \; i = 1,2,3,\ldots,n \qquad (۲)$$

گام سوم: در این مرحله میانگین مجموعه‌ها $\left(\tilde{A}_m^{(i)}\right)$ از تمامی مجموعه‌ها $\left(\tilde{A}^{(i)}\right)$ از طریق رابطهٔ ۳ محاسبه شد.

$$\tilde{A}_m = \left(a_{m1}, a_{m2}, a_{m3}\right) = \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_1^i, \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_2^i, \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_3^i\right) \qquad (۳)$$

سپس برای هر خبره، مقدار اختلاف از میانگین با استفاده از رابطهٔ ۴ محاسبه شد.

$$\left(a_{m1}-a_1^{(i)}, a_{m2}-a_2^{(i)}, a_{m3}-a_3^{(i)}\right) = \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_1^{(i)} - a_1^{(i)}, \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_2^{(i)} - a_2^{(i)}, \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_3^{(i)} - a_3^{(i)}\right) \qquad (۴)$$

به منظور بررسی میزان توافق بین خبرگان به مرور پاسخ‌ها و تجدید نظر در قضاوت‌ها و نظرات نیاز است، لذا پرسشنامه مرحلهٔ اول به همراه میانگین نظرات خبرگان و اختلاف نظر قبلی هر یک از آن‌ها با میانگین دوباره برای اعضا پانل خبرگان ارسال می‌شود.

گام چهارم: بعد از ارسال بازخورد اولیه به خبرگان و انجام مرحلهٔ دوم دلفی، نظرات اصلاح‌شده خبرگان در قالب اعداد فازی مثلثی به صورت رابطهٔ ۵ درآمد.

$$\tilde{B}^{(i)} = \left(b_1^{(i)}, b_2^{(i)}, b_3^{(i)}\right) \quad i = 1,2,3,\ldots,n \tag{۵}$$

در این مرحله نیز همانند گام دوم، میانگین نظرات اصلاح‌شده خبرگان $\left(\tilde{B}_m^{(i)}\right)$ در مرحلهٔ دوم دلفی از طریق رابطهٔ ۶ محاسبه شد.

$$\tilde{B}_m = (b_{m1}, b_{m2}, b_{m3}) = \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} b_1^i, \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} b_2^i, \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} b_3^i\right) \tag{۶}$$

گام پنجم در واقع همان دیفازی یا فازی‌زدایی است؛ روش‌های مختلفی برای فازی زدایی مقادیر نهایی موجود است. روش‌هایی از جمله روش مرکز ثقل، روش مرکز سطح، روش مینکوفسکی، الگوریتم CFCS و... برای فازی‌زدایی مرسوم است که در این مطالعه از روش ساده مرکز ثقل که در (رابطهٔ ۷) آورده شده است، استفاده شد [۳۸].

$$S_j = \frac{u_j + m_j + l_j}{3} \tag{۷}$$

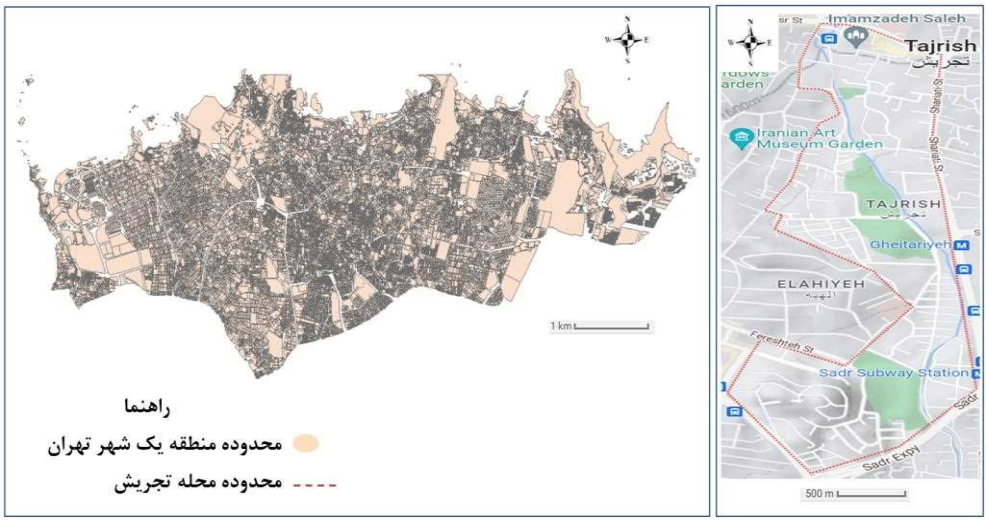
گام ششم محاسبهٔ میزان اختلاف نظر خبرگان در دو مرحله است؛ میزان اختلاف نظر خبرگان در دو مرحلهٔ دلفی از طریق رابطهٔ ۸ محاسبه شد. تکرار مراحل دلفی تا جایی پیش رفت که اختلاف نظر خبرگان بین دو مرحله نظرسنجی به کمتر از حد آستانهٔ خیلی کم (۰/۲) برسد و در این صورت فرایند نظرسنجی متوقف می‌شود [۳۹].

$$S\left(\tilde{B}_m, \tilde{A}_m\right) = \left|\frac{1}{3}\left[(b_{m1}, b_{m2}, b_{m3}) - (a_{m1}, a_{m2}, a_{m3})\right]\right| \tag{۸}$$

در ارتباط با اندازهٔ پانل خبرگان در روش دلفی نظر واحد و مشترکی وجود ندارد [۴۰] اما اندازهٔ معمول پانل خبرگان بین ۸ تا ۱۲ یا بین ۱۰ تا ۱۸ نفر است [۴۱].

## ۲ـ۱. محدودهٔ مورد مطالعه

محدودهٔ شمال شهر تهران از حدود دههٔ ۱۳۵۰ تا کنون یکی از بخش‌های مهم شهر تهران به حساب می‌آید. وجود باغ‌ها، دره‌ها و نزدیکی به کوهپایه باعث شد که این منطقه از دیرباز به عنوان ییلاق‌های تهران مطرح شود. تجریش از ۹۵۰ سال پیش طجرشت خوانده می‌شد [۴۲]. شکل ۲ موقعیت جغرافیایی و محدودهٔ محلهٔ تجریش را نشان می‌دهد.




**شکل ۲.** محدودهٔ منطقهٔ ۱ شهر تهران و محلهٔ تجریش

ارتفاع میدان تجریش از سطح دریا ۱۶۰۰ متر است. به همین‌دلیل، آب‌وهوای تجریش معتدل متمایل به سرد است. در تابستان‌ها دمای تجریش تا ۳۶ درجه افزایش دارد و در زمستان‌ها به زیر صفر می‌رسد. میزان بارش سالانه تقریباً ۴۳۵ میلی‌متر است. در گذشته، قنات‌های زیادی در تجریش وجود داشته‌اند؛ قنات امامزاده صالح، قنات محمدیه، قنات کهریز و... از جمله قنات‌های محله تجریش هستند که برخی از آن‌ها هنوز هم آبدهی دارند. رودخانهٔ مقصودبیک در ضلع جنوبی میدان تجریش را نیز می‌توان یکی از نقاط مثبت این محله برشمرد. اماکن شاخص محلهٔ تجریش را می‌توان امامزاده صالح، کاخ سعد آباد، مراکز خرید تجریش، بیمارستان شهدای تجریش و سینما آستارا اشاره کرد.

## ۳. نتایج

پس از بررسی شناسایی مؤلفه‌های مؤثر برندینگ شهری در اقتصاد (۶ مؤلفهٔ موجود در جدول ۲)، با استفاده از تکنیک دلفی فازی به رتبه‌بندی آن‌ها می‌پردازیم. در این تحقیق اعضا پانل خبرگان گروهی از محققان، مدیران و کارشناسان حوزهٔ برندیگ شهری بودند که براساس ویژگی‌هایی همچون دانش، مهارت، تمایل و زمان کافی برای شرکت در مراحل دلفی با استفاده از روش نمونه‌گیری هدفمند شناسایی شدند. پس از انتخاب اعضا، پرسشنامه‌های هر دور به صورت حضوری و الکترونیکی توزیع تکمیل و جمع‌آوری شد.

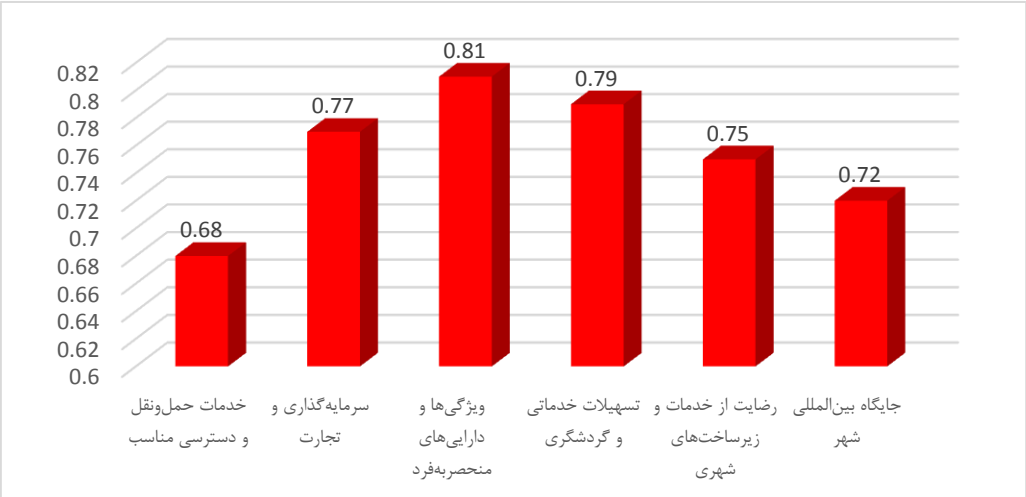
### ۳ـ۱. مرحلهٔ اول دلفی فازی

پس از شناسایی مؤلفه‌های مؤثر برندینگ شهری در اقتصاد، برای دستیابی به اجماع نظر خبرگان در مورد صحت مراحل شناسایی شده، نتایج تحلیل محتوا با به‌کارگیری طیف لیکرت تدوین شد و با هدف تعیین میزان اهمیت هر یک از مراحل در اختیار خبرگان قرار گرفت. پس از جمع‌آوری پرسشنامه‌ها با استفاده از روابط ۲ و ۶ میانگین فازی مثلثی و مقدار فازی‌زدایی هر یک از مراحل به دست آمد و نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. میانگین قطعی به‌دست‌آمده نشان‌دهندهٔ شدت موافقت خبرگان با هر یک از عوامل شناسایی شده است.

**جدول ۴.** دیدگاه خبرگان در خصوص مؤلفه‌های مؤثر برندینگ شهری در اقتصاد (نظرسنجی مرحلهٔ اول)

| عوامل | (I,m,u) | $S_1$ |
|---|---|---|
| جایگاه بین‌المللی شهر | (۰,۴۸ ،۰,۷۳ ،۰,۹۴) | ۰,۷۲ |
| ویژگی‌ها و دارایی‌های منحصربه‌فرد | (۰,۶۱ ،۰,۸۶ ،۰,۹۵) | ۰,۸۱ |
| خدمات حمل‌ونقل و دسترسی مناسب | (۰,۴۷ ،۰,۷۰ ،۰,۸۸) | ۰,۶۸ |
| تسهیلات خدماتی و گردشگری | (۰,۵۹ ،۰,۸۴ ،۰,۹۴) | ۰,۷۹ |
| رضایت از خدمات و زیرساخت‌های شهری | (۰,۵۳ ،۰,۷۸ ،۰,۹۵) | ۰,۷۵ |
| سرمایه‌گذاری و تجارت | (۰,۵۵ ،۰,۸۰ ،۰,۹۵) | ۰,۷۷ |

با توجه به شکل ۳ بیان می‌شود که براساس نتایج به‌دست‌آمده در بین عوامل شناسایی شده، بیشترین میزان توافق خبرگان مربوط به عامل ویژگی‌ها و دارایی‌های منحصربه‌فرد ($s = 0.81$)، و کمترین میزان توافق خبرگان مربوط به خدمات حمل‌ونقل و دسترسی مناسب ($s = 0.68$) بود. رتبه‌بندی این عوامل بر اساس نظر خبرگان به صورت نمودار شکل ۳ است.




**شکل ۳.** رتبه‌بندی عوامل شناسایی‌شدهٔ مرتبط مؤلفه‌های مؤثر در برندینگ شهری با تأکید بر بعد اقتصادی

### ۳ـ ۲. مرحلهٔ دوم دلفی فازی

در این مرحله، میزان اختلاف نظر هر خبره با میانگین نظرات اعضا پانل خبرگان با استفاده از رابطهٔ ۳ محاسبه شد. سپس، پرسشنامهٔ دیگری به همراه نظر قبلی هر خبره و میزان اختلاف نظر وی با میانیگن نظرات اعضا پانل در اختیار آن‌ها قرار گرفت. با توجه به نظرات ارائه‌شده در مرحلهٔ اول و مقایسهٔ آن با نتایج مرحلهٔ دوم با استفاده از رابطهٔ ۷ چنانچه اختلاف نظر خبرگان در دو مرحله از حد آستانهٔ ۰/۲ کمتر باشد، فرایند نظرسنجی متوقف می‌شود. با توجه به اینکه میزان اختلاف نظر خبرگان بین دو مرحلهٔ اول و دوم اجرای دلفی کمتر از حد آستانهٔ خیلی کم ۰/۲ به دست آمد، نظرسنجی در مرحلهٔ دوم متوقف شد. نتایج مرحلهٔ دوم دلفی فازی در جدول ۵ آورده شده است.

**جدول ۵.** دیدگاه خبرگان درخصوص مؤلفه‌های مؤثر در برندینگ شهری با تأکید بر بعد اقتصادی (نظرسنجی مرحلهٔ دوم)

| عوامل | (I,m,u) | $S_2$ | $[S_1 - S_2]$ |
|---|---|---|---|
| جایگاه بین‌المللی شهر | (۰,۴۸ ،۰,۷۳ ،۰,۹۴) | ۰,۷۲ | ۰ |
| ویژگی‌ها و دارایی‌های منحصربه‌فرد | (۰,۶۱ ،۰,۸۶ ،۰,۹۵) | ۰,۸۱ | ۰ |
| خدمات حمل‌ونقل و دسترسی مناسب | (۰,۵۰ ،۰,۷۵ ،۰,۹۴) | ۰,۷۳ | ۰,۰۵ |
| تسهیلات خدماتی و گردشگری | (۰,۵۵ ،۰,۸۰ ،۰,۹۸) | ۰,۷۸ | ۰,۰۱ |
| سرمایه‌گذاری و تجارت | (۰,۵۳ ،۰۷۸ ،۰,۹۷) | ۰,۷۶ | ۰,۰۱ |
| رضایت از خدمات و زیرساخت‌های شهری | (۰,۵۰،۰,۷۵،۰,۹۴) | ۰,۷۳ | ۰,۰۲ |

بنابراین، بهبود هرچه بیشتر این عوامل و برنامه‌ریزی براساس اولویت و اهمیت آن‌ها به شهرها برای دستیابی به برندینگ شهری کمک می‌کند و از مسائل مهمی در تحقق توسعهٔ اقتصادی پایدار خواهد بود.

### ۳ـ ۳. چالش‌های برندینگ شهری

۱. **مهاجرت و تنوع فرهنگی**: مهاجرت به تهران می‌تواند به عنوان یک فرصت برای غنی‌سازی فرهنگ شهری و ایجاد تنوع اجتماعی دیده شود. این تنوع می‌تواند به تقویت هویت برند شهری و جذب گردشگران کمک کند.
۲. **توسعهٔ حمل‌ونقل عمومی**: چالش زیرساخت‌های حمل‌ونقل عمومی می‌تواند به عنوان یک محرک برای نوآوری و سرمایه‌گذاری در پروژه‌های جدید حمل‌ونقل، از جمله سیستم‌های هوشمند و پایدار، تلقی شود.
۳. **پتانسیل اجتماعی**: مسائل اجتماعی موجود می‌توانند انگیزه‌ای برای شهروندان و نهادهای دولتی برای همکاری در جهت بهبود شرایط زندگی باشند. این همکاری می‌تواند به پروژه‌های اجتماعی مؤثر و تقویت حس تعلق به شهر منجر شود.

## ۴. نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش، شناسایی و رتبه‌بندی مؤلفه‌های مؤثر در برندینگ شهری با تأکید بر بعد اقتصادی بود. به این‌منظور با بررسی اسناد و مدارک مختلف و پروژه‌های مرتبط با برندینگ شهری به استخراج مؤلفه‌های اقتصادی آن پرداختیم و در ادامه، به منظور تأیید و رتبه‌بندی آن‌ها از روش دلفی فازی استفاده شد. بررسی‌های صورت‌گرفته نشان داد ترتیب قرارگیری مؤلفه‌های مؤثر در برندینگ شهری با توجه به رویکرد اقتصادی به شرح زیر است:

۱. ویژگی‌ها و دارایی‌های منحصربه‌فرد (اماکن مذهبی و تاریخی از جمله حرم امامزاده صالح، کاخ سعدآباد و... موقعیت جغرافیایی مطلوب)
۲. تسهیلات خدماتی و گردشگری (امکانات اقامتی و خدمات تفریحی)
۳. سرمایه‌گذاری و تجارت (وجود بازارها و مال‌ها در محله)
۴. رضایت از خدمات و زیرساخت‌های شهری (تأسیسات و تجهیزات زیربنایی و روبنایی)
۵. جایگاه بین المللی شهر (مطرح بودن شهر در جوامع بین‌المللی)

۶. خدمات حمل‌ونقل و دسترسی مناسب (موارد مربوط به کیفیت و کمیت وسایل نقلیه، ترافیک و...)

بنابراین، با توجه به اولویت‌های به‌دست‌آمده و با هدف رشد اقتصادی مطلوب و در نظر گرفتن این نکته که برندینگ شهری، با دو رویکرد اجتماع‌محور و بازارمحور قابل بررسی است، ضروری است که به منظور دستیابی و تحقق هرچه بیشتر این مقوله اقداماتی صورت گیرد.

همچنین، پیشنهادهایی را می‌توان برای مطالعات آتی داشت، ازجمله این پیشنهادها که می‌تواند در برندسازی محلهٔ تجریش مؤثر واقع شود، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- حفظ هویت مسکونی منطقه ضمن تأمین خدمات مورد نیاز ساکنان
- ساماندهی عناصر تاریخی و حفظ ادراک تاریخی و ذهنی منطقه
- توسعهٔ فضاهای سبز و گردشگری
- برگزاری فستیوال‌های بین‌المللی در جهت معرفی بیشتر محله
- ساماندهی بیشتر اماکن گردشگری و تفریحی منطقه
- هدایت سرمایه‌گذاری از مسکن به گردشگری
- توسعهٔ حمل‌ونقل عمومی
- ساماندهی وضعیت حمل‌و نقل و ترافیک در این منطقه

## منابع


1. Bahari, N., et al., Designing a city branding pattern for entrepreneurship development (studied case: Germi city). Journal of Entrepreneurship Development, 2017. 10(2): p. 221-240.
2. Kasapi, I. and A. Cela, Destination branding: A review of the city branding literature. Mediterranean Journal of Social Sciences, 2017. 8(4).
3. Kavaratzis, M., What can we learn from city marketing practice? European spatial research and policy, 2009. 16(1): p. 41-58.
4. Gibson, T.A., Selling city living: Urban branding campaigns, class power and the civic good. International Journal of Cultural Studies, 2005. 8(3): p. 259-280.
5. Fardnia, K., H. Yousefi, and M. Abdoos, A bibliometric analysis of carbon and water footprints in renewable energy: The post-COVID-19 landscape. Green Technologies and Sustainability, 2024: p. 100162.
6. Rainisto, S.K., Success factors of place marketing: A study of place marketing practices in Northern Europe and the United States. 2003: Helsinki University of Technology.
7. Tayefeh, A., et al., Advanced bibliometric analysis on water, energy, food, and environmental nexus (WEFEN). Environmental Science and Pollution Research, 2023. 30(47): p. 103556-103575.
8. Abdoos, M., et al., Forecasting Solar Energy generation in the Mediterranean Region up to 2030-2050 Using Convolutional Neural Networks (CNN). Cleaner Energy Systems, 2024: p. 100167.
9. Lestari, F., M.M. Dali, and N. Che-Ha, Branding the Capital City Through Multi-Perspective Approach: The Case of 'Enjoy Jakarta'Campaign. International Journal of Real Estate Studies, 2022. 16(2): p. 54-67.
10. Lai, W., The Impact of the Carbon Neutral Era on City Branding and Response Strategies. Business and Economic Research, 2024. 14(3): p. 27-36.
11. Vaculčíková, Z., Z. Tučková, and A.S. Jomardyan, Destination Branding as an Effective Economic Tool for Increasing Awareness: Czech Republic Case Study. International Advances in Economic Research, 2020. 26: p. 453-455.
12. Tran, A.H. and T.T. Duc, Impact of brand identity components on university brand Image in Ho Chi Minh city. Journal of Positive School Psychology, 2022. 6(2): p. 5903-5915.
13. Adelakun, O., Place Identity as Competitive Advantage: Exploring Economic Development Strategies in NOMA and Capital Riverfront Neighborhoods in Washington, DC. 2017.
14. Zenker, S. and N. Rütter, Is satisfaction the key? The role of citizen satisfaction, place attachment and place brand attitude on positive citizenship behavior. Cities, 2014. 38: p. 11-17.
15. Khan, F., Dynamic Relationship Between Pakistan Equity Market and Emerging Equity Markets of Asia and Developed World. Multi-Disciplinary Foundations and Intellectual Perspectives, 2012. 22: p. 123-130.
16. Levent, D., The competitive identity of Istanbul: a city brand management model. 2010.
17. Ashworth, G. and M. Kavaratzis, Beyond the logo: Brand management for cities. Journal of Brand management, 2009. 16: p. 520-531.
18. Aboutorabi, R.S.S., H. Yousefi, and M. Abdoos, A comparative analysis of the carbon footprint in green building materials: a case study of Norway. Environmental Science and Pollution Research, 2024: p. 1-22.
19. Knaggs, M., SOUTH HEAD SYDNEY HARBOUR NATIONAL PARK. 2008.
20. Skinner, H., The emergence and development of place marketing's confused identity. Journal of marketing management, 2008. 24(9-10): p. 915-928.
21. Jamison, A., 13 Greening the City: Urban Environmentalism from Mumford to Malmö. Urban machinery: inside modern European cities, 2008: p. 281.
22. Zahedi, R., et al., Technical, economic and environmental assessment of carbon capture from thermal power plants and convert it into value added concrete material. Emergent Materials, 2024: p. 1-12.
23. Hankinson, G., Rethinking the place branding construct, in Rethinking place branding: Comprehensive brand development for cities and regions. 2014, Springer. p. 13-31.
24. Julier, G., Urban designscapes and the production of aesthetic consent. Urban studies, 2005. 42(5-6): p. 869-887.

25. Mommaas, H., Cultural clusters and the post-industrial city: Towards the remapping of urban cultural policy. Urban studies, 2004. 41(3): p. 507-532.
26. De Carlo, M., et al., Moving Milan towards Expo 2015: designing culture into a city brand. Journal of Place Management and Development, 2009. 2(1): p. 8-22.
27. Aaker, D., Aaker on branding: 20 principles that drive success. 2014: Morgan James Publishing.
28. Abdoos, M., et al., Evaluating zero-energy strategies in mixed-use buildings: a case study. Future Energy, 2025: p. 8-18.
29. Chakrabarty, B.K., Urban management: Concepts, principles, techniques and education. Cities, 2001. 18(5): p. 331-345.
30. Cavalli-Sforza, V. and L. Ortolano, Delphi forecasts of land use: Transportation interactions. Journal of transportation engineering, 1984. 110(3): p. 324-339.
31. Ahmadi, S., et al., Reducing the share of electricity generation from fossil fuels by replacing renewable energies in rainy areas. 2023.
32. Häder, M., Zur Evaluation der Delphi-Technik: eine Ergebnisübersicht. 1996.
33. Shahee, A., et al., Reducing the energy consumption of buildings by implementing insulation scenarios and using renewable energies. Energy Informatics, 2024. 7(1): p. 18.
34. Abdous, M., et al., Design and analysis of zero-energy and carbon buildings with renewable energy supply and recycled materials. Energy and Buildings, 2024. 324: p. 114922.
35. Hsueh, S.-L., A fuzzy logic enhanced environmental protection education model for policies decision support in green community development. The Scientific World Journal, 2013. 2013(1): p. 250374.
36. Keeney, S., F. Hasson, and H.P. McKenna, A critical review of the Delphi technique as a research methodology for nursing. International journal of nursing studies, 2001. 38(2): p. 195-200.
37. Kardaras, D.K., B. Karakostas, and X.J. Mamakou, Content presentation personalisation and media adaptation in tourism web sites using Fuzzy Delphi Method and Fuzzy Cognitive Maps. Expert Systems with Applications, 2013. 40(6): p. 2331-2342.
38. Cheng, C.-H. and Y. Lin, Evaluating the best main battle tank using fuzzy decision theory with linguistic criteria evaluation. European journal of operational research, 2002. 142(1): p. 174-186.
39. Cheng, J.-H., C.-M. Lee, and C.-H. Tang, An application of fuzzy Delphi and fuzzy AHP on evaluating wafer supplier in semiconductor industry. Wseas transactions on information science and applications, 2009. 6(5): p. 756-767.
40. Mullen, P.M., Delphi: myths and reality. Journal of health organization and management, 2003. 17(1): p. 37-52.
41. Okoli, C. and S.D. Pawlowski, The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications. Information & management, 2004. 42(1): p. 15-29.
42. Ahmadi, A. and E. Jahangard, Ranking of the neighborhoods of Tehran metropolis in terms of development and quality of life: a fuzzy TOPSIS approach. Urban Economics, 2020. 5(1): p. 127-148.

**Urban Development Policy Making**

Home Page: https://judpm.ir

Online ISSN: 3092-6564

# Optimization of Urban Metro Scheduling for Reducing Travel Time and Enhancing Transportation System Efficiency

**Mohammad Mahdi Mobaraki[1] | Ali Roghani Araghi[2*] | Younes Noorollahi[3]**

1. M.Sc. Student, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran . Email: m.mahdimobaraki@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Assistant Professor, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: ali.roghani@ut.ac.ir
3. Professor, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: noorollahi@ut.ac.ir

## ARTICLE INFO

**Article type:**
Research Paper

**Article History:**
Received 15 December 2024
Revised 14 January 2025
Accepted 13 February 2025
Published Online 04 April 2025

**Keywords:**
Optimization,
Waiting Time,
Travel Time,
Metro,
Grey Wolf Algorithm.

## ABSTRACT

In this study, the Grey Wolf Optimizer (GWO) algorithm is effectively employed to optimally schedule an urban metro system. The primary objective of this research is to significantly minimize the total passenger travel time, including waiting time at stations and in-train travel time. The proposed model considers parameters such as passenger arrival rates, stop durations, and the optimization variable h to simultaneously optimize departure and stop times. The implementation results on real-world data indicate that the cost function is significantly reduced from 23,500.75 seconds to 16,939.12 seconds using this approach. Additionally, the reduction in waiting time at high-traffic stations leads to a substantial improvement in system efficiency and passenger satisfaction. This innovative approach can pave the way for developing intelligent solutions in public transportation systems, reducing operational costs, and enhancing metro system performance. The results obtained open new avenues for future research aimed at further improving metro scheduling and management.

**Cite this article:** Mobaraki, M. M.; Roghani Araghi, A. & Noorollahi, Y. (2025). Optimization of Urban Metro Scheduling for Reducing Travel Time and Enhancing Transportation System Efficiency. *Urban Development Policy Making*, 2 (1), 17-30. DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.504991.1008

© Mohammad Mahdi Mobaraki, Ali Roghani Araghi, Younes Noorollahi
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.504991.1008

## Introduction

Metro scheduling represents a critical and complex aspect of public transportation planning. Traditionally, the process is divided into several components—network design, line planning, timetable creation, vehicle assignment, and staff scheduling—with most efforts focusing on the operator's perspective. Such an emphasis may neglect the overall passenger journey, which includes both waiting at stations and riding the train. The current paper proposes a novel, passenger-centered approach to metro scheduling intending to minimize total travel time by addressing both waiting times at stations and in-train travel durations. Metro timetables may be periodic, offering ease of memorization, or non-periodic, which can better accommodate variable demand. Although numerous models have been developed to tackle scheduling challenges, few directly target the reduction of overall travel time under dynamic conditions. To bridge this gap, the Grey Wolf Optimizer (GWO) algorithm is utilized. By incorporating realistic factors such as passenger arrival rates and station dwell

times, the proposed timetable is designed to better meet the needs of urban commuters. Simulation studies based on actual metro data reveal that this approach produces a balanced schedule that significantly reduces overall travel time, thereby paving the way for more efficient and user-friendly public transportation systems.

## Methodology

In the proposed model, using recursive functions such as R, theta, and Q, and considering the passenger entry rate and parameters related to the stations, waiting and travel times are accurately calculated. Then, the GWO algorithm with a population of 50 wolves and over 5 iterations were executed.

## Results

The best optimal value found for the variable h was 0.580231, which led to the minimization of the cost function to a value of 16939.12. The optimization results show that waiting and travel times in different metro stations are adjusted differently and in proportion to the conditions of each station. For example, station 1 has a waiting time of 18.18 seconds and a travel time of 4320 seconds, and other stations also provide different patterns of these two indicators.

## Conclusion

This achievement can pave the way for improving the performance of public transportation systems, increasing passenger satisfaction, and reducing operating costs. In addition, the use of real data and the development of multivariate models in future studies can increase the accuracy and efficiency of this optimization model. In summary, this research shows that the use of intelligent algorithms such as GWO is a new approach to improving the scheduling and management of metro systems and can be a guide for future research and development in the field of public transportation.

پیشرفت شهری
سیاستگذاری
سایت نشریه: https://judpmi.ir
شاپا الکترونیکی: ۶۵۶۴-۳۰۹۲

# بهینه‌سازی زمان‌بندی سیستم متروی شهری برای کاهش زمان سفر و ارتقای کارایی سامانهٔ حمل‌ونقل

**محمدمهدی مبارکی[۱] | علی روغنی عراقی[۲*] | یونس نوراللهی[۳]**

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: m.mahdimobaraki@ut.ac.ir

۲. نویسندهٔ مسئول، استادیار گروه مهندسی سیستم‌های انرژی پایدار، دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: ali.roghani@ut.ac.ir

۳. استاد گروه مهندسی سیستم‌های انرژی پایدار، دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: noorollahi@ut.ac.ir

## اطلاعات مقاله

**نوع مقاله:**
پژوهشی

**تاریخ‌های مقاله:**
**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۳/۰۹/۲۵
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۳/۱۰/۲۵
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۳/۱۱/۲۵
**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۴/۰۱/۱۵

**کلیدواژه:**
بهینه‌سازی،
زمان انتظار،
زمان سفر،
مترو،
الگوریتم گرگ خاکستری.

## چکیده

در این پژوهش، از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO) برای تنظیم بهینهٔ جدول زمانی سیستم متروی شهری استفاده شده است. هدف اصلی این مطالعه، به حداقل رساندن زمان کلی سفر مسافران شامل زمان انتظار در ایستگاه‌ها و زمان سواری در قطارها است. در مدل پیشنهادی، پارامترهایی نظیر نرخ ورود مسافران، زمان‌های توقف و متغیر بهینه‌سازی h مد نظر قرار گرفته‌اند تا زمان‌های حرکت و توقف به صورت هم‌زمان بهینه شوند. نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم روی داده‌های واقعی نشان می‌دهد با استفاده از این روش، تابع هدف به طور قابل توجهی کاهش یافته و مقدار آن از ۲۳۵۰۰/۷۵ ثانیه به ۱۶۹۳۹/۱۲ ثانیه رسیده است. همچنین، کاهش زمان انتظار در ایستگاه‌های پرتردد به بهبود قابل توجه کارایی سیستم و افزایش رضایت مسافران منجر شده است. این رویکرد نوین می‌تواند زمینه‌ساز توسعهٔ راهکارهای هوشمند در سامانه‌های حمل‌ونقل عمومی، کاهش هزینه‌های عملیاتی و ارتقای عملکرد سیستم مترو شود. نتایج به‌دست‌آمده، افق‌های جدیدی را برای تحقیقات آتی در جهت بهبود بیشتر زمان‌بندی و مدیریت سامانه‌های مترو فراهم می‌آورد.

**استناد:** مبارکی، محمدمهدی؛ روغنی عراقی، علی و نوراللهی، یونس (۱۴۰۴). بهینه‌سازی زمان‌بندی سیستم متروی شهری برای کاهش زمان سفر و ارتقای کارایی سامانهٔ حمل‌ونقل. *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۲ (۱) ۱۷-۳۰.

DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.504991.1008

© محمدمهدی مبارکی، علی روغنی عراقی، یونس نوراللهی
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.504991.1008

## ۱. مقدمه

برنامه‌ریزی سیستم متروی شهری یکی از جنبه‌های فرعی برنامه‌ریزی سیستم حمل‌ونقل عمومی پیچیده است و معمولاً به چندین مرحله از جمله طراحی شبکه، طراحی خط، جدول زمانی، وسایل حمل‌ونقل و کارمندان تجزیه می‌شود [1]. این مشکلات به طور سنتی از دیدگاه اپراتور بهینه شده‌اند. این مقاله رویکردی را ارائه می‌کند که محدودیت‌های اپراتور را در نظر می‌گیرد و کل زمان سفر مسافران را به حداقل می‌رساند، که به عنوان مجموع میانگین زمان انتظار مسافر در ایستگاه‌ها و میانگین زمان سواری در قطار اندازه‌گیری می‌شود. هدف این مطالعه، حل مشکل جدول زمانی متروی تک‌خط شهری است که شامل تعیین زمان حرکت در هر ایستگاه می‌شود. علاوه بر این، سرعت بهینه بین هر بخش از هر سرویس قطار و از هر ایستگاه در امتداد یک متروی تک‌خط شهری در یک افق برنامه‌ریزی، که توسط تقاضای مبدأ ـ مقصد مسافری پویا تعیین می‌شود، نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. مسئلهٔ جدول زمانی متروی شهری را می‌توان به دو صورت تقسیم کرد: جدول زمانی دوره‌ای و غیر ادواری [۲]. یک مدل ریاضی برای مسئلهٔ زمان‌بندی دوره‌ای پیشنهاد کرد که گسترش پدیده‌های دوره‌ای زمان‌بندی معمولی را با محدودیت‌های تقدم در نظر گرفت. مزیت جدول‌های زمانی دوره‌ای این است که مسافران به‌راحتی می‌توانند آن‌ها را به خاطر بسپارند و بتوانند با شبکه‌های ریلی در مقیاس بزرگ مقابله کنند [۳]. جایگزینی که شامل ایجاد یک جدول زمانی غیر دوره‌ای است، زمانی مناسب است که نتوان تقاضا را طی زمان ثابت فرض کرد. مدل‌های برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح مختلفی برای مسئلهٔ جدول زمانی غیر تناوبی پیشنهاد شده است. کَری نوعی مدل و همچنین الگوریتم‌ها و استراتژی‌هایی برای اعزام قطارها با سرعت‌ها و الگوهای توقف متفاوت برای یک خط ریلی دومسیره که به قطارها در یک جهت اختصاص داده شده است، ارائه کرد. آن‌ها بیشتر آن را به شبکه‌های ریلی عمومی و پیچیده، با انتخاب خطوط و سکوهای ایستگاه، گسترش دادند [۴]. کاپرارا و همکاران مدلی را به منظور تعیین جدول زمانی دوره‌ای برای مجموعه‌ای از قطارها پیشنهاد کردند که قادر به نقض ظرفیت‌های مسیر نیست و برخی محدودیت‌های عملیاتی را برطرف می‌کند. آن‌ها نوعی مدل مبتنی بر نظریهٔ گراف را برای مدل‌سازی مسئله با استفاده از یک گراف چندگانهٔ جهت‌داده‌شده پیشنهاد کردند که در آن گره‌ها با خروج/رسیدن به ایستگاه‌های خاص و لحظه‌های زمانی داده‌شده مطابقت دارند [۵]. اودهاوزدن[1] و فان‌استین‌وگن[2] با در نظر گرفتن زمان انتظار و تأخیرها با بهبود خدمات مسافری در بخش کوچکی از شبکهٔ راه آهن بلژیک سروکار داشتند. آن‌ها یک مدل دوفازی ایجاد کردند. اول، زمان‌های بافر ایده‌آل بر اساس توزیع تأخیر قطارهای ورودی و وزن زمان‌های مختلف انتظار برای محافظت از اتصالات زمانی که قطار ورودی دیر است، محاسبه می‌شود. و دوم، برنامه‌ریزی خطی استاندارد برای ایجاد یک جدول زمانی بهبودیافته با اتصالات برنامه‌ریزی‌شده و زمان‌های بافر ایده‌آل در صورت امکان استفاده می‌شود [۶]. توت[3] و کاکیانی[4] مطالعات موجود را بررسی کردند که عمدتاً با مشکل جدول زمانی قطار در نسخه‌های اسمی و قوی آن سروکار داشتند، که محدودیت‌های ظرفیت مسیر را برآورده می‌کرد. هدف از پژوهش آن‌ها، بهینه‌سازی یک تابع هدف با معانی مختلف بود که با درخواست‌های شرکت راه آهن مطابقت داشت. اکثر مقالات یادشده یک تابع هدف مربوط به اپراتور خدمات را بهینه کردند. از دیدگاه اپراتور زیرساخت، یک هدف مشترک به حداقل رساندن انحراف از یک برنامهٔ جدول زمانی پیشنهادی توسط اپراتور است که اغلب در موارد دوره‌ای استفاده می‌شود. از دیدگاه کاربران، هدف به حداقل رساندن زمان انتظار تحت تقاضای مسافر پویا در نظر گرفته شده است [۷]. با این‌حال، این مشارکت‌ها به‌صراحت کل زمان سفر تحت تقاضای مسافر پویا در نظر گرفته نشده است. مشارکت‌های زیر بر ساختار پویای رفتار تقاضا متمرکز شده است [۸]. هنزلر[5] روش‌های محاسبهٔ ماتریس‌های OD پویا برای ایستگاه‌های قطار را بررسی کرد. یانو و نیومن نوعی الگوریتم برنامه‌نویسی پویا برای جدول زمانی قطارهای مورد استفاده به منظور حمل کانتینرهایی که به صورت پویا به مبدأ می‌رسند پیشنهاد کردند [۹].کوردونه[6] و ردائلی[7] تأثیر متقابل بین کیفیت جدول زمانی و مقدار تقاضای

1. Oudheusden
2. Vansteenwegen
3. Toth
4. Cacchiani
5. Hänseler
6. Cordone
7. Redaelli

حمل‌ونقل که توسط راه آهن جذب می‌شود را در نظر گرفتند. آن‌ها یک مدل غیرخطی عدد صحیح مختلط با آرامش پیوسته غیر محدب پیشنهاد کردند [۱۰]. نیو[1] و ژو[2] بر بهینه‌سازی جدول زمانی قطارهای مسافربری در یک راهروی ریلی شهری به‌شدت شلوغ تحت یک سناریوی تقاضای پویا تمرکز کردند. محققان یادشده به رفتار سیستم در شرایط تراکم زمانی که تقاضا از ظرفیت فراتر رفت علاقه‌مند بودند [۱۱]. با توجه به مطالب یادشده و محدودیت‌های موجود در مدل‌های پیشین، ضرورت بررسی و بهبود زمان‌بندی مترو با در نظر گرفتن کل زمان سفر مسافران، به‌ویژه در شرایط تقاضای پویا، بیش از پیش احساس می‌شود. در این مطالعه، با تکیه بر رویکردهای نوین و استفاده از الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی همچون الگوریتم گرگ خاکستری، سعی بر آن شده است تا یک مدل جامع و چندوجهی ارائه شود که نه تنها زمان انتظار در ایستگاه‌ها، بلکه زمان سواری در قطارها را به طور هم‌زمان بهینه کند. هدف اصلی این پژوهش، ارائهٔ راهکاری کارآمد برای کاهش زمان کلی سفر و بهبود عملکرد سیستم حمل‌ونقل عمومی از منظر مسافران است. به این‌ترتیب، در بخش‌های بعدی مقاله به تشریح روش‌شناسی، نتایج حاصل از بهینه‌سازی و تحلیل دقیق عملکرد مدل پیشنهادی پرداخته خواهد شد.

## ۲. روش‌شناسی

با توجه به ویژگی‌های عملیات واقعی سیستم‌های مترو، مدل را بر اساس مفروضات زیر فرموله می‌کنیم:

*i.* جدول زمانی مترو چرخه‌ای است. سفرهای قطار در چرخه‌های مختلف با زمان اقامت یکسان در ایستگاه‌ها و استراتژی رانندگی در بخش‌ها توزیع می‌شود. قطارهای مختلف با یک مسیر ثابت به دنبال یکدیگر می‌آیند.

*ii.* در ساعت‌های اوج بار، نرخ ورود مسافران به هر ایستگاه ثابت در نظر گرفته می‌شود، اما مقادیر هر ایستگاه متفاوت است.

**زمان مسافر:** برای توصیف کامل‌تر تأثیر جدول زمانی بر تقاضای مسافر، این مطالعه از زمان مسافر برای انعکاس رضایت مسافر استفاده می‌کند که شامل زمان انتظار مسافر و زمان سفر مسافر است. در یک بازهٔ زمانی مشخص، ورود مسافران به مترو پویا و تصادفی است، اما تعداد مسافران ورودی به طور کلی در ساعت‌های اوج مصرف ثابت نگه داشته می‌شود. از زمانی که قطار $i$ به ایستگاه $n$ می‌رسد تا زمانی که قطار $i+1$ به ایستگاه $n$ می‌رسد. هنگامی که اولین قطار به ایستگاه می‌رسد، تعداد مسافران منتظر در ایستگاه را می‌توان به عنوان تعداد مسافرانی که در یک دورهٔ زمانی به ایستگاه می‌رسند، تقریب زد به عنوان مثال $Q_n = \tau_n H$. وقتی قطار $i$ به ایستگاه n می‌رسد، تعداد مسافران منتظر در ایستگاه است:

$$Q_n^i = \tau_n\ \mathrm{h} - \mathrm{x_n} + Q_n^i - 1 + \tau_n\ \mathrm{x_n} - \theta_n^i - 1 \qquad (۱)$$

با توجه به ظرفیت قطار، وقتی قطار $i$ به ایستگاه شمارهٔ $n$ می‌رسد روابط ۲ و ۳:

$$\theta_n^i = min\{Q_n^i + \tau_n\ \mathrm{x_n}, C - R_n^i + \varphi_n^i\} \qquad (۲)$$

$$R_n^i = \sum_{j}^{n-1}(\theta_j^i - \varphi_j^i) \qquad (۳)$$

کل زمان انتظار مسافر از قطار $i$ تا قطار است $i+1$ به ایستگاه $n$ می‌رسد (رابطهٔ ۴):

$$w_n^i(h, \mathrm{x_n}) = Q_n^i h + \frac{\tau_n h^2}{2} + \theta_n^i \frac{\mathrm{x_n}}{2} - \theta_n^i \mathrm{p_n} \frac{\mathrm{x_n}}{2} - \theta_n^i h \qquad (۴)$$

بر اساس توضیحات بالا در مورد زمان انتظار مسافر، زمان سفر مسافر در ساعت‌های اوج مصرف (یعنی از زمانی که قطار $i$ به ایستگاه $n$ می‌رسد تا زمانی که قطار $i$ به ایستگاه $n+1$ می‌رسد) کل زمان سفر مسافر قطار i در بخش (n + 1،n) به شکل رابطهٔ ۵ است:

$$T_n^i = \left(2R_n^i - \varphi_n^i\right)\mathrm{p_n} \frac{\mathrm{x_n}}{2} + \tau_n R_{n+1}^i + \frac{\left(R_n^i - \varphi_n^i + R_{n+1}^i\right)\left(\mathrm{x_n} - \mathrm{p_n x_n}\right)}{2} \qquad (۵)$$

بر اساس محاسبات زمان انتظار مسافر و زمان سفر مسافر، کل زمان مسافر است (رابطهٔ ۶):

1. Niu
2. Zhou

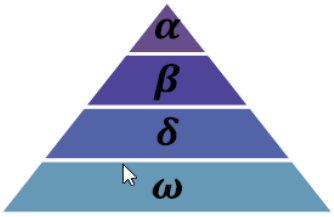
$$PT(h,x) = \sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N-1} w_n^i + T_n^i \quad (۶)$$

## ۳. الگوریتم گرگ خاکستری

گرگ خاکستری (Canis lupus) از خانوادهٔ Canidae است. گرگ‌های خاکستری به عنوان شکارچیان رأس در نظر گرفته می‌شوند؛ به این معنا که در بالای زنجیرهٔ غذایی قرار دارند. گرگ‌های خاکستری بیشتر ترجیح می‌دهند در یک گله زندگی کنند. اندازهٔ گروه به طور متوسط ۵ تا ۱۲ است. جالب توجه این است که آن‌ها یک سلسله‌مراتب غالب اجتماعی بسیار دقیق دارند، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است. رهبران یک مرد و یک زن هستند که آلفا نامیده می‌شوند. آلفا بیشتر مسئول تصمیم‌گیری در مورد شکار، محل خواب، زمان بیدار شدن و غیره است. تصمیمات آلفا به گروه دیکته می‌شود. با این‌حال، نوعی رفتار دموکراتیک نیز مشاهده شده است که در آن یک آلفا از دیگر گرگ‌های گروه پیروی می‌کند. در گردهمایی‌ها، کل بسته با پایین نگه داشتن دم، آلفا را تصدیق می‌کنند. گرگ آلفا گرگ غالب نیز نامیده می‌شود، زیرا دستورات او باید توسط گله انجام شود. گرگ‌های آلفا فقط مجاز به جفت‌گیری در گله هستند. جالب اینجاست که آلفا لزوماً قوی‌ترین عضو بسته نیست، بلکه از نظر مدیریت بسته بهترین است. این موضوع نشان می‌دهد سازماندهی و نظم و انضباط یک بسته بسیار مهم‌تر از قدرت آن است. دومین سطح در سلسله‌مراتب گرگ‌های خاکستری بتا است. بتاها گرگ‌های زیردستی هستند که به آلفا در تصمیم‌گیری یا سایر فعالیت‌های دسته کمک می‌کنند. گرگ بتا می‌تواند نر یا ماده باشد و در صورتی که یکی از گرگ‌های آلفا از دنیا برود یا بسیار پیر شود، احتمالاً بهترین نامزد برای آلفا شدن است. گرگ بتا باید به آلفا احترام بگذارد، اما به سایر گرگ‌های سطح پایین نیز فرمان می‌دهد. این نقش یک مشاور آلفا و نظم‌دهنده برای بسته بازی می‌کند. بتا دستورات آلفا را در سراسر بسته تقویت می‌کند و به آلفا بازخورد می‌دهد. پایین‌ترین رتبهٔ گرگ خاکستری امگا است. امگا نقش بزغاله را بازی می‌کند. گرگ‌های امگا همیشه باید تسلیم همهٔ گرگ‌های غالب باشند. آن‌ها آخرین گرگ‌هایی هستند که اجازهٔ خوردن دارند. ممکن است به نظر برسد که امگا یک فرد مهم در بسته نیست، اما مشاهده شده است که در صورت از دست دادن امگا، کل بسته با درگیری و مشکلات داخلی مواجه می‌شود. این به دلیل تخلیهٔ خشونت و ناامیدی همهٔ گرگ‌ها توسط امگا (ها) است. این موضوع به رضایت کل بسته و حفظ ساختار تسلط کمک می‌کند. در برخی موارد امگا نیز پرستار بچه در بسته است. اگر یک گرگ آلفا، بتا یا امگا نباشد، او را تابع (یا دلتا در برخی منابع) می‌نامند. گرگ‌های دلتا باید به آلفا و بتا تسلیم شوند، اما آن‌ها بر امگا تسلط دارند. پیشاهنگان، نگهبانان، بزرگان، شکارچیان و مراقبان از این دسته هستند. پیشاهنگان وظیفهٔ نظارت بر مرزهای قلمرو را به عهده دارند و در صورت بروز هرگونه خطر به گروه هشدار می‌دهند. Sentinels از ایمنی بسته محافظت و تضمین می‌کند. بزرگان گرگ‌های باتجربه‌ای هستند که قبلاً آلفا یا بتا بودند. شکارچیان هنگام شکار طعمه و تهیهٔ غذا برای گله به آلفاها و بتاها کمک می‌کنند. در نهایت، مراقبان وظیفهٔ مراقبت از گرگ‌های ضعیف، بیمار و زخمی گله را به عهده دارند. علاوه بر سلسله‌مراتب اجتماعی گرگ‌ها، شکار گروهی یکی دیگر از رفتارهای اجتماعی جالب گرگ‌های خاکستری است. مراحل اصلی شکار گرگ خاکستری به شرح زیر است [۱۲]:

۱. ردیابی، تعقیب و نزدیک شدن به طعمه.
۲. تعقیب، محاصره و آزار شکار تا زمانی که از حرکت باز بماند.
۳. حمله به سمت طعمه.

این مراحل در شکل ۲ نشان داده شده است. در این کار این تکنیک شکار و سلسله‌مراتب اجتماعی گرگ‌های خاکستری به منظور طراحی GWO و انجام بهینه‌سازی به صورت ریاضی مدل شده است.




**شکل ۱.** سلسله‌مراتب گرگ خاکستری (تسلط از بالا به پایین کاهش می‌یابد)

**شکل ۲.** رفتار شکار گرگ‌های خاکستری: (A) تعقیب، نزدیک شدن و ردیابی طعمه (B-D) تعقیب، آزار و اذیت و احاطه کردن (E) موقعیت ثابت و حمله

در این بخش مدل‌های ریاضی سلسله‌مراتب اجتماعی، ردیابی، محاصره کردن و حمله به طعمه ارائه شده است. سپس الگوریتم GWO مشخص می‌شود.

### ۳-۱. سلسله‌مراتب اجتماعی

به منظور مدل‌سازی ریاضی سلسله‌مراتب اجتماعی گرگ‌ها هنگام طراحی GWO، مناسب‌ترین راه حل را به عنوان آلفا (a) در نظر می‌گیریم. در نتیجه دومین و سومین راه حل برتر به‌ترتیب بتا (b) و دلتا (d) نام دارند. بقیهٔ محلول‌های کاندید امگا (x) فرض می‌شوند. در الگوریتم GWO شکار (بهینه‌سازی) توسط a، b و d هدایت می‌شود. گرگ‌های x به دنبال این سه گرگ می‌آیند.

### ۳-۲. احاطه کردن طعمه

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، گرگ‌های خاکستری طعمه را طی شکار محاصره می‌کنند. به منظور مدل‌سازی ریاضی رفتار محاصره‌ای معادلات ۷ تا ۱۰ پیشنهاد شده است:

$$\vec{D} = \left|\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)\right| \quad (۷)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (۸)$$

$$\vec{D} = \left|\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)\right| \quad (۹)$$

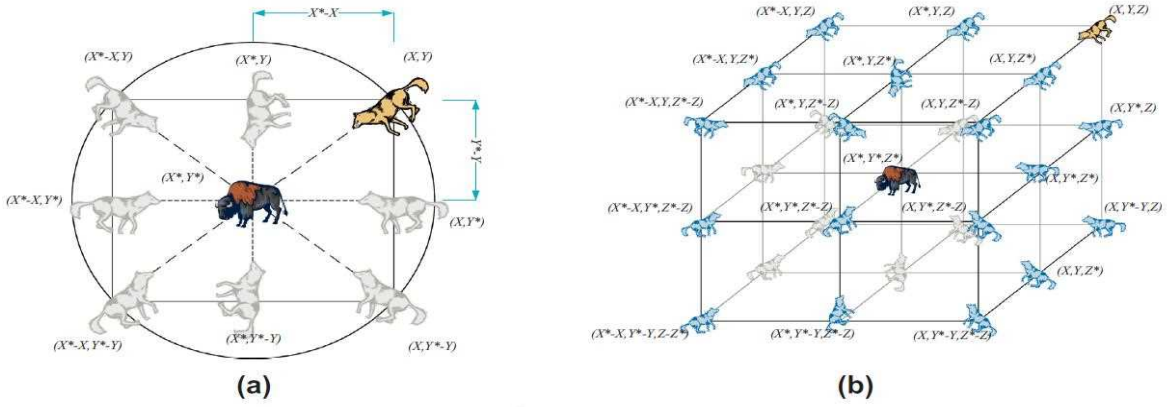
$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (۱۰)$$

که در آن t تکرار فعلی را نشان می‌دهد، A و C بردارهای ضریب هستند، $X_p$ بردار موقعیت طعمه است و X نشان‌دهندهٔ بردار موقعیت یک گرگ خاکستری است. بردارهای A و C به صورت روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌شوند:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (۱۱)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (۱۲)$$

که در آن مؤلفه‌های a به طور خطی از ۲ به ۰ طی تکرارها کاهش می‌یابند و $r_1$، $r_2$ بردارهای تصادفی در [ ۰، ۱] هستند. برای دیدن اثرات معادله. (۳,۱) و (۳,۲)، یک بردار موقعیت دوبعدی و برخی از همسایگان ممکن در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، یک گرگ خاکستری در موقعیت (X, Y) می‌تواند موقعیت خود را با توجه به موقعیت طعمه (X , Y) به روز کند. با تنظیم مقدار بردارهای A و C می‌توان با توجه به موقعیت فعلی به مکان‌های مختلف در اطراف بهترین عامل رسید. توجه داشته باشید که بردارهای تصادفی $r_1$ و $r_2$ به گرگ‌ها اجازه می‌دهند تا به هر موقعیتی بین نقاط نشان‌داده‌شده در شکل ۳ برسند. بنابراین یک گرگ خاکستری می‌تواند با استفاده از معادله‌ها موقعیت خود را در داخل فضای اطراف طعمه در هر مکان تصادفی به‌روز کند. (۳,۱) و (۳,۲). همین مفهوم را می‌توان به فضای جست‌وجو با n بعد تعمیم داد و گرگ‌های خاکستری در ابرمکعب‌ها (یا ابرکره‌ها) در اطراف بهترین راه حل به‌دست‌آمده تا کنون حرکت خواهند کرد.




**شکل ۳.** بردارهای موقعیت دوبعدی و سه‌بعدی و مکان‌های بعدی احتمالی آن‌ها

## ۳-۳. شکار

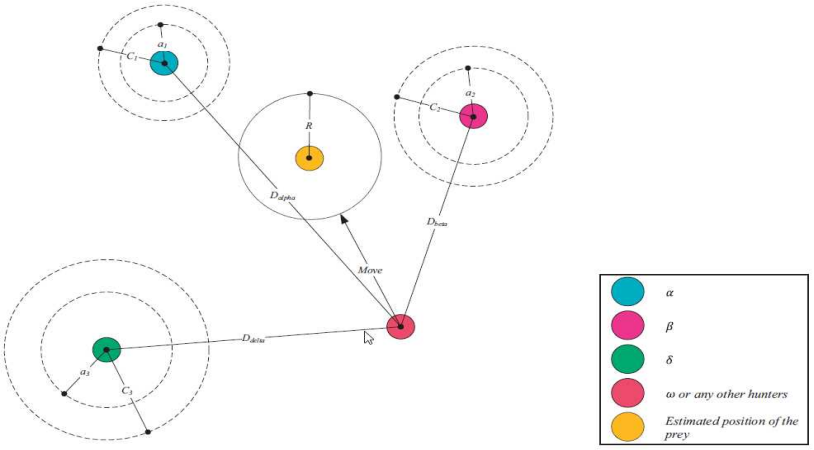
گرگ‌های خاکستری این توانایی را دارند که محل شکار را تشخیص دهند و آن‌ها را محاصره کنند. شکار معمولاً توسط آلفا هدایت می‌شود. بتا و دلتا نیز ممکن است گهگاه در شکار شرکت کنند. با این‌حال، در یک فضای جست‌وجوی انتزاعی، ما هیچ ایده‌ای در مورد مکان بهینه (شکار) نداریم. به منظور شبیه‌سازی ریاضی رفتار شکار گرگ‌های خاکستری، فرض می‌کنیم که آلفا (بهترین راه‌حل کاندید) بتا و دلتا اطلاعات بهتری در مورد موقعیت بالقوهٔ طعمه دارند. بنابراین، ما سه راه‌حل اول بهترین راه‌حل به‌دست‌آمده را ذخیره می‌کنیم و سایر عوامل جست‌وجو (از جمله امگا) را موظف می‌کنیم تا موقعیت‌های خود را مطابق با موقعیت بهترین عوامل جست‌وجو به‌روزرسانی کنند. فرمول‌های ۱۳ تا ۱۵ در این رابطه پیشنهاد می‌شود.

$$\vec{D}_\alpha = \left|\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}\right|, \vec{D}_\beta = \left|\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}\right|, \vec{D}_\delta = \left|\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}\right| \quad (۱۳)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \left(\vec{D}_\alpha\right), \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot \left(\vec{D}_\beta\right), \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot \left(\vec{D}_\delta\right) \quad (۱۴)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (۱۵)$$

شکل ۴ نشان می‌دهد چگونه یک عامل جست‌وجو موقعیت خود را بر اساس آلفا، بتا و دلتا در یک فضای جست‌وجوی دوبعدی به‌روز می‌کند. می‌توان مشاهده کرد که موقعیت نهایی در یک مکان تصادفی در یک دایره است که با موقعیت‌های آلفا، بتا و دلتا در فضای جست‌وجو تعریف می‌شود. به بیان دیگر آلفا، بتا و دلتا موقعیت طعمه را تخمین می‌زنند و سایر گرگ‌ها موقعیت خود را به طور تصادفی در اطراف طعمه به‌روز می‌کنند.




**شکل ۴. به‌روزرسانی موقعیت در GWO**

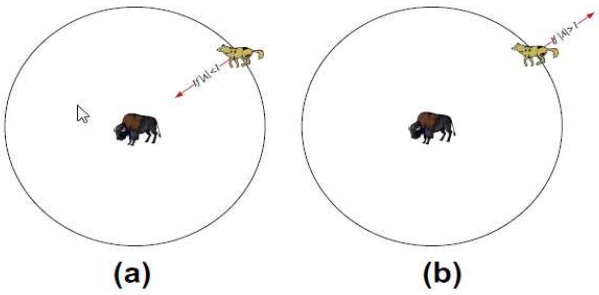
### ۳-۴. حمله به طعمه

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، گرگ‌های خاکستری شکار را با حمله به طعمه پس از توقف حرکت به پایان می‌برند. برای مدل‌سازی ریاضی نزدیک شدن به طعمه، مقدار a را کاهش می‌دهیم. توجه داشته باشید که دامنهٔ نوسان A نیز با a کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، A یک مقدار تصادفی در بازهٔ [-2a,2a] است که در آن a طی تکرارها از ۲ به ۰ کاهش می‌یابد. وقتی مقادیر تصادفی A در [−۱، ۱] باشد، موقعیت بعدی یک عامل جست‌وجو می‌تواند در هر موقعیتی باشد.

هنگامی که مقادیر تصادفی A در [۱، ۱−] باشد، موقعیت بعدی یک عامل جست‌وجو می‌تواند در هر موقعیتی بین موقعیت فعلی آن و موقعیت طعمه باشد. شکل ۵ (a) نشان می‌دهد ۱ >|A|گرگ‌ها را مجبور می‌کند به سمت طعمه حمله کنند. با عملگرهایی که تا کنون پیشنهاد شده است، الگوریتم GWO به عوامل جست‌وجوی خود اجازه می‌دهد تا موقعیت خود را بر اساس مکان آلفا، بتا و دلتا به‌روز کنند و به سمت طعمه حمله کند. با این‌حال، الگوریتم GWO مستعد رکود در راه حل‌های محلی با این اپراتورها است. درست است که مکانیسم احاطه‌ای پیشنهادی تا حدودی اکتشاف را نشان می‌دهد، اما GWO به اپراتورهای بیشتری برای تأکید بر اکتشاف ارسیف نیاز دارد.

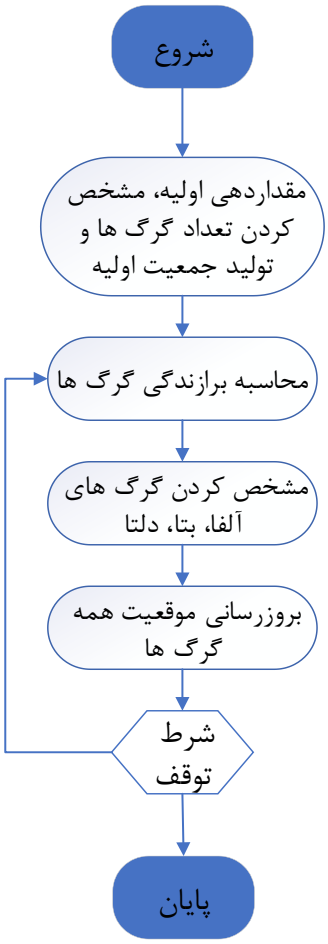
### ۳-۵. جست‌وجوی طعمه

گرگ‌های خاکستری بیشتر بر اساس موقعیت آلفا، بتا و دلتا جست‌وجو می‌کنند. آن‌ها برای جست‌وجوی طعمه از یکدیگر جدا می‌شوند و برای حمله به طعمه همگرا می‌شوند. به منظور مدل‌سازی ریاضی واگرایی، از A با مقادیر تصادفی بزرگ‌تر از ۱ یا کمتر از −۱ استفاده می‌کنیم تا عامل جست‌وجو را به واگرایی از طعمه وادار کنیم. این موضوع بر کاوش تأکید می‌کند و به الگوریتم GWO اجازه می‌دهد تا در سطح جهانی جست‌وجو کند. شکل ۵ (b) همچنین نشان می‌دهد ۱ < |A| گرگ‌های خاکستری را مجبور می‌کند تا از طعمه جدا شوند به امید اینکه طعمهٔ مناسب‌تری پیدا کنند.




**شکل ۵.** حمله به طعمه در مقابل جست‌وجوی طعمه

یکی دیگر از اجزای GWO که به اکتشاف کمک می‌کند C است. همان‌طور که در معادله دیده می‌شود. (۳,۴)، بردار C حاوی مقادیر تصادفی در [ ۰، ۲] است. این مؤلفه وزن‌های تصادفی را برای طعمه به منظور تأکید تصادفی ۱< C یا تأکید نکردن C <۱) تأثیر طعمه در تعریف فاصله در معادله فراهم می‌کند. این موضوع به GWO کمک می‌کند تا رفتار تصادفی‌تری را طی بهینه‌سازی نشان دهد و از اکتشاف و اجتناب از بهینه محلی حمایت کند. در اینجا شایان یادآوری است که C به خلاف A به صورت خطی کاهش نمی‌یابد. ما عمداً از C می‌خواهیم مقادیر تصادفی را در همهٔ زمان‌ها ارائه کند تا بر کاوش نه تنها طی تکرارهای اولیه، بلکه در تکرارهای نهایی تأکید شود. این جزء در صورت رکود بهینهٔ موضعی، به‌ویژه در تکرارهای نهایی بسیار مفید است. بردار C را می‌توان به عنوان اثر موانع نزدیک شدن به طعمه در طبیعت نیز در نظر گرفت. به طور کلی، موانع موجود در طبیعت در مسیرهای شکار گرگ‌ها ظاهر می‌شود و در واقع مانع از نزدیک شدن سریع و راحت آن‌ها به طعمه می‌شود. این دقیقاً همان کاری است که بردار C انجام می‌دهد. بسته به موقعیت گرگ، می‌تواند به طور تصادفی به طعمه وزن دهد و دسترسی به گرگ‌ها را سخت‌تر و دورتر کند یا برعکس. به طور خلاصه، فرایند جست‌وجو با ایجاد یک جمعیت تصادفی از گرگ‌های خاکستری (راه حل‌های نامزد) در الگوریتم GWO شروع می‌شود. طی تکرارها، گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا موقعیت احتمالی طعمه را تخمین می‌زنند. هر راه حل نامزد فاصلهٔ خود را از طعمه به‌روز می‌کند. پارامتر a به‌ترتیب از ۲ به ۰ کاهش می‌یابد تا بر اکتشاف و بهره‌برداری تأکید شود. زمانی که $A_j > 1$،j راه‌حل‌های کاندیدا از طعمه منحرف می‌شوند و زمانی که Aj <1،j به سمت طعمه همگرا می‌شوند، در نهایت، الگوریتم GWO با ارضای یک معیار پایانی خاتمه می‌یابد [۱۳].




**شکل ۶.** فلوچارت الگوریتم گرگ خاکستری

## ۴. نتایج

در این بخش، GWO به زبان برنامه‌نویسی پایتون کدگذاری می‌شود تا اعتبار مدل را بر اساس داده‌های عملیات و مسافران خط Yizhuang متروی پکن در ساعت‌های اولیهٔ اوج مصرف تأیید کند. کل زمان حرکت تمام قطارها در یک جهت یک چرخه است. خط Yizhuang به حومهٔ شهری متصل است که عمدتاً مسافران را جابه‌جا می‌کند. این کار فقط یک جهت را از ایستگاه راه‌آهن Yizhuang به ایستگاه Songjiazhuang مطالعه می‌کند. جدول زمانی استفاده‌شده در حال حاضر، زمان حرکت، زمان کشش و زمان ترمز بخش‌ها، نرخ ورود و نسبت پیاده شدن از قطار و برخی پارامترها در جدول‌های ۱ تا 3 نشان داده شده است. جدول ۱ جدول زمانی مورد استفادهٔ امروزی ایستگاه راه آهن مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

**جدول ۱.** جدول زمانی مورد استفاده

| ایستگاه | Yizhuang | Ciqu | Ciqunan | Jinghai | Tongjinan | Rongchang | Rongjingn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| مدت‌زمان توقف | – | ۴۵ | ۳۵ | ۳۰ | ۳۰ | ۳۰ | ۳۰ |
| زمان رسیدن | ۰ | ۱۱۵ | ۲۶۲ | ۴۳۷ | ۶۱۷ | ۸۱۱ | ۹۴۵ |
| **ایستگاه** | **Wanyuan** | **Wenhuayuan** | **Yizhuangqiao** | **Jiugong** | **Xiaohongmen** | **Xiaocun** | **Songjiazhuang** |
| مدت‌زمان توقف | ۳۰ | ۳۰ | ۳۵ | ۳۰ | ۳۰ | ۳۰ | ۳۰ |
| زمان رسیدن | ۱۰۷۸ | ۱۲۲۲ | ۱۳۴۲ | ۱۵۱۲ | ۱۶۹۹ | ۱۸۳۷ | ۲۰۵۷ |

**جدول ۲.** نرخ ورود مسافر و نسبت پیاده شدن از قطار در ساعت‌های اوج مصرف

| ایستگاه | Yizhuang | Ciqu | Ciqunan | Jinghai | Tongjinan | Rongchang | Rongjingn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\tau_n$ | – | ۰/۳۹ | ۰/۰۹ | ۰/۳۸ | ۰/۹۶ | ۰/۵۲ | ۰/۲۰ |
| $\rho_n$ | – | ۰ | ۱/۰ | ۲/۰ | ۲/۳ | ۳/۹ | ۳/۵ |
| **ایستگاه** | **Wanyuan** | **Wenhuayuan** | **Yizhuangqiao** | **Jiugong** | **Xiaohongmen** | **Xiaocun** | **Songjiazhuang** |
| $\tau_n$ | ۰/۲۱ | ۰/۳۲ | ۰/۷۲ | ۱/۰۶ | ۰/۵۸ | ۰/۳۰ | ۰/۱۸ |
| $\rho_n$ | ۳/۶ | ۰/۵ | ۰/۸ | ۱/۱ | ۰/۲ | ۱/۰ | ۱۰۰ |

: $\overline{\tau_n}$نرخ ورود مسافران (persons/s); $\rho_n$: درصد مسافرانی است که از یک قطار در یک ایستگاه خاص پیاده می‌شوند.

جدول ۲ نشان‌دهندهٔ نرخ ورود مسافر و نسبت پیاده شدن مسافران از قطار در حالت اوج بار است. این داده‌ها به صورت داده‌های ورودی در کدنویسی آورده شده است. در این پژوهش، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO)، فرایند زمان‌بندی قطارها مورد تحلیل و بهینه‌سازی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهد به‌کارگیری روش‌های هوشمند در تنظیم زمان‌بندی قطارها به بهبود قابل توجهی در کارایی سیستم حمل‌ونقل عمومی منجر می‌شود و می‌تواند میزان زمان انتظار و سفر مسافران را کاهش دهد.

مقدار اولیه تابع هزینه قبل از اعمال بهینه‌سازی برابر با ۲۳۵۰۰/۷۵ ثانیه بوده است. پس از اجرای الگوریتم گرگ خاکستری، این مقدار به ۱۶۹۳۹/۱۲ ثانیه کاهش یافته که نشان‌دهندهٔ بهبود قابل توجه ۲۷/۹ درصدی در کارایی سیستم مترو است. بررسی داده‌های خروجی نشان داد استفاده از الگوریتم GWO توانسته است زمان انتظار مسافران را در ایستگاه‌های مختلف بهینه کند و توزیع زمان سفر را بهبود بخشد. جدول ۳ به طور خلاصه نتایج حاصل از بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

در جدول ۳ زمان‌های انتظار و سفر در هر ایستگاه به واحد ثانیه نمایش داده شده‌اند که حاصل بهینه‌سازی با الگوریتم گرگ خاکستری هستند. به عنوان مثال، ایستگاه ۱ با زمان انتظار ۱۸/۱۸ ثانیه و زمان سفر ۴۳۲۰ ثانیه، نشان‌دهندهٔ اختلاف قابل توجه بین مدت توقف و حرکت است؛ این موضوع ممکن است به دلیل موقعیت جغرافیایی یا شرایط ترافیکی مسیر باشد. ایستگاه ۲ با زمان انتظار ۲۱۴/۶۷ ثانیه و زمان سفر ۲۳۹۲/۵۰ ثانیه، نسبت به ایستگاه ۱ الگوی متفاوتی را ارائه می‌دهد که در آن زمان انتظار بیشتر بوده اما زمان سفر کمی کمتر است. در ایستگاه‌های ۳ تا ۷، زمان‌های انتظار بین ۲۸۲/۷۶ تا ۳۳۶/۲۲ ثانیه و زمان‌های

سفر بین ۷۲۰ تا ۱۲۰۰ ثانیه گزارش شده است که الگوی بهینه‌ای را برای جابه‌جایی مسافران نشان می‌دهد. ایستگاه‌های ۸ تا ۱۲ نیز با زمان‌های انتظار کمتر از ۶۰ ثانیه و زمان‌های سفر کمتر از ۱۲۰۰ ثانیه، شرایط مطلوب‌تری را به نمایش می‌گذارند. تحلیل این داده‌ها حاکی از آن است که بهینه‌سازی انجام‌شده موجب کاهش قابل توجه زمان‌های سفر و انتظار شده و می‌تواند بهبود کارایی سیستم مترو را به همراه داشته باشد. این نتایج می‌تواند مبنایی برای اتخاذ تصمیمات دقیق‌تر در مدیریت زمان‌بندی و ارتقای رضایت مسافران در سامانه‌های حمل‌ونقل عمومی محسوب شود.

**جدول ۳.** زمان انتظار و مسافرت هر مسافر در ایستگاه‌های مختلف

| ایستگاه | زمان انتظار (ثانیه) | زمان سفر (ثانیه) |
|---|---|---|
| ۱ | ۱۸,۱۸ | ۴۳۲۰,۰۰ |
| ۲ | ۲۱۴,۶۷ | ۲۳۹۲,۵۰ |
| ۳ | ۳۳۴,۸۴ | ۱۲۰۰,۰۰ |
| ۴ | ۳۳۶,۲۲ | ۱۰۸۰,۰۰ |
| ۵ | ۴۷۰,۸۴ | ۹۶۰,۰۰ |
| ۶ | ۳۵۷,۵۸ | ۸۴۰,۰۰ |
| ۷ | ۲۸۲,۷۶ | ۷۲۰,۰۰ |
| ۸ | ۳۶,۷۲ | ۱۱۲۵,۰۰ |
| ۹ | ۵۳,۷۵ | ۸۷۶,۰۰ |
| ۱۰ | ۴۹,۸۶ | ۵۶۲,۵۰ |
| ۱۱ | ۸,۶۷ | ۵۰۱,۰۰ |
| ۱۲ | ۱۳,۰۵ | ۱۸۵,۰۰ |

زمان انتظار در ایستگاه‌های پرتردد به میزان قابل توجهی کاهش یافته و به صورت بهینه توزیع شده است. این موضوع بیانگر آن است که تنظیم مناسب فواصل زمانی حرکت قطارها، تأثیر مستقیمی بر بهبود سطح خدمات‌رسانی دارد. یکی از مزایای مهم استفاده از روش پیشنهادی، انعطاف‌پذیری آن در تنظیم زمان‌بندی قطارها متناسب با شرایط مختلف تقاضای سفر است. در ساعت‌های اوج مصرف، زمان‌بندی به نحوی تنظیم شده است که با افزایش ظرفیت جابه‌جایی مسافران، ازدحام کاهش یابد. همچنین، در ساعت‌های کم‌بار، فاصلهٔ بین حرکت قطارها به گونه‌ای تعیین شده که ضمن کاهش هزینه‌های عملیاتی، رضایت مسافران حفظ شود. این نتایج نشان می‌دهد بهینه‌سازی زمان‌بندی نه‌تنها موجب کاهش زمان انتظار می‌شود، بلکه به افزایش بهره‌وری کلی سیستم نیز منجر خواهد شد.

## ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد به‌کارگیری الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) در بهینه‌سازی زمان‌بندی مترو به کاهش قابل توجه زمان انتظار و سفر مسافران منجر شده است. مقدار تابع هزینه از ۲۳۵۰۰/۷۵ ثانیه به ۱۶۹۳۹/۱۲ ثانیه کاهش یافت که نشان‌دهندهٔ بهبود ۲۷/۹ درصدی کارایی سیستم حمل‌ونقل عمومی است. این بهبود ناشی از تنظیم بهینهٔ فواصل حرکت قطارها متناسب با شرایط هر ایستگاه و تقاضای پویا بوده است. کاهش زمان انتظار در ایستگاه‌های پرتردد و توزیع متعادل‌تر زمان‌های سفر، افزایش بهره‌وری و کاهش ازدحام در شبکهٔ مترو را به دنبال داشته است. علاوه بر این، کاهش هزینه‌های عملیاتی و مصرف انرژی و همچنین بهبود تجربهٔ مسافران از دیگر نتایج مثبت این پژوهش به شمار می‌رود.

به منظور توسعه و ارتقای مدل‌های بهینه‌سازی، چندین مسیر پژوهشی برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود. نخست، تعمیم مدل فعلی به یک مدل چندمتغیره که متغیرهایی همچون تعداد واگن‌ها، نرخ ورود مسافر، شرایط ترافیکی، ویژگی‌های ساختاری ایستگاه‌ها و تغییرات فصلی را نیز در نظر بگیرد، می‌تواند دقت بهینه‌سازی را افزایش داده و هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد. همچنین، استفاده از داده‌های واقعی و به‌روز از طریق جمع‌آوری داده‌های بلندمدت از ایستگاه‌های مترو و بهره‌گیری از

فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا و سنسورهای هوشمند می‌تواند دقت مدل‌های پیشنهادی را افزایش دهد. این داده‌ها امکان تنظیمات بلادرنگ و تطبیقی در زمان‌بندی حرکت قطارها را فراهم می‌آورند.

یکی دیگر از پیشنهادها، ترکیب الگوریتم GWO با سایر روش‌های بهینه‌سازی هوشمند نظیر الگوریتم ژنتیک (GA)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و الگوریتم‌های یادگیری عمیق است. این ترکیب می‌تواند قوت‌های هر روش را به کار بگیرد و ضعف‌های احتمالی را جبران کند. برای مثال، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری عمیق جهت پیش‌بینی روندهای ترافیکی و تقاضای سفر می‌تواند دقت تصمیمات زمان‌بندی را افزایش دهد. همچنین، پیشنهاد می‌شود که مدل‌های دینامیک و تطبیقی توسعه یابند، به گونه‌ای که بتوانند در شرایط اضطراری یا تغییرات ناگهانی، تنظیمات زمان‌بندی را به‌روزرسانی کنند و از ایجاد اختلالات جلوگیری کنند. این موضوع در سامانه‌های حمل‌ونقل عمومی که تحت تأثیر عوامل متغیر زیادی هستند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در کنار این موارد، ارزیابی جامع اثرات اقتصادی و اجتماعی بهینه‌سازی‌های انجام‌شده می‌تواند دیدگاه دقیق‌تری دربارهٔ افزایش رضایت مسافران، کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهبود بهره‌وری سیستم ارائه دهد. بررسی این اثرات در بلندمدت می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های استراتژیک در مدیریت سامانه‌های مترو کمک کند.

در نهایت، توسعهٔ نرم‌افزارهای کاربردی و داشبوردهای مدیریتی برای مانیتورینگ و تحلیل داده‌های بهینه‌سازی توصیه می‌شود. این داشبوردها می‌توانند شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPI) مانند زمان‌های انتظار و سفر را به صورت بلادرنگ نمایش دهند و به مدیران امکان اتخاذ تصمیمات سریع و مؤثر را بدهند. به طور کلی، ترکیب داده‌های واقعی، استفاده از روش‌های ترکیبی بهینه‌سازی، توسعهٔ مدل‌های دینامیک و ایجاد داشبوردهای مدیریتی پیشرفته می‌تواند به بهبود کیفیت خدمات مترو، کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش رضایت مسافران منجر شود و گامی مؤثر در جهت تحقق سامانه‌های حمل‌ونقل عمومی کارآمدتر و پایدارتر باشد.

## منابع


1. Adjiman, C.S., et al., A global optimization method, αBB, for general twice-differentiable constrained NLPs—I. Theoretical advances. Computers & Chemical Engineering, 1998. **22**(9): p. 1137-1158.
2. Serafini, P. and W. Ukovich, A mathematical model for periodic scheduling problems. SIAM Journal on Discrete Mathematics, 1989. **2**(4): p. 550-581.
3. Kroon, L., et al., The new Dutch timetable: The OR revolution. Interfaces, 2009. **39**(1): p. 6-17.
4. Carey, M., A model and strategy for train pathing with choice of lines, platforms, and routes. Transportation Research Part B: Methodological, 1994. **28**(5): p. 333-353.
5. Caprara, A., M. Fischetti, and P. Toth, Modeling and solving the train timetabling problem. Operations research, 2002. **50**(5): p. 851-861.
6. Vansteenwegen, P. and D. Van Oudheusden, Developing railway timetables which guarantee a better service. European Journal of Operational Research, 2006. **173**(1): p. 337-350.
7. Hänseler, F., B. Farooq, and M. Bierlaire. Preliminary ideas for dynamic estimation of pedestrian origin-destination demand within train stations. in Swiss Transport Research Conference. 2012.
8. Cacchiani, V. and P. Toth, Nominal and robust train timetabling problems. European Journal of Operational Research, 2012. **219**(3): p. 727-737.
9. Barrena, E., et al., Single-line rail rapid transit timetabling under dynamic passenger demand. Transportation Research Part B: Methodological, 2014. **70**: p. 134-150.
10. Cordone, R. and F. Redaelli, Optimizing the demand captured by a railway system with a regular timetable. Transportation Research Part B: Methodological, 2011. **45**(2): p. 430-446.
11. Niu, H. and X. Zhou, Optimizing urban rail timetable under time-dependent demand and oversaturated conditions. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013. **36**: p. 212-230.
12. Muro, C., et al., Wolf-pack (Canis lupus) hunting strategies emerge from simple rules in computational simulations. Behavioural processes, 2011. **88**(3): p. 192-197.
13. Mirjalili, S., S.M. Mirjalili, and A. Lewis, Grey wolf optimizer. Advances in engineering software, 2014. **69**: p. 46-61.

**Urban Development Policy Making**

Home Page: https://judpm.ir

Online ISSN: 3092-6564

# Assessing the role of electricity infrastructure and regulatory frameworks in the development of electric public transportation: Comparative analysis and policy recommendations

**Moein Moeini-Aghtaie[1*] | Hassan Bazoubandi[2] | Ali Pasban[3]**

1. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Energy Systems Engineering, School of Energy Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. Email: moeini@sharif.edu
2. Ph.D. Candidate, Department of Energy Systems Engineering, School of Energy Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. Email: hassan.bazoubandi@energy.sharif.edu
3. Energy Innovation Center, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. Email: Alipasban.ap@gmail.com

**ARTICLE INFO**

**Article type:**
Research Paper

**Article History:**
Received 15 December 2024
Revised 14 January 2025
Accepted 13 February 2025
Published Online 05 April 2025

**Keywords:**
Electric public transportation,
electrification infrastructure,
regulatory frameworks,
power grid integration,
charging policy.

**ABSTRACT**

The transition toward electric public transportation marks a vital step in reducing environmental pollutants and enhancing energy efficiency. However, without robust electricity infrastructure and well-adapted regulatory frameworks, this transition is unlikely to meet its full potential. This study investigates the interrelationship between power grid capacity and electricity sector regulations in supporting the development of electric public transit systems, with a specific focus on developing countries. By analyzing technical and economic aspects—such as time-of-use electricity tariffs, grid connection protocols, and standards for high-capacity charging stations—the paper draws on international experiences from China, Europe, and the United States. Findings highlight that successful electrification relies on three essential pillars: tariff reform, regulatory standardization, and enabling private investment. According to projections by the International Energy Agency, electric vehicle electricity demand could exceed 1,155 TWh by 2040, nearly double Brazil's current total annual electricity consumption. Without strategic interventions—such as smart charging management and grid upgrades—this demand may overwhelm existing infrastructure. Furthermore, in countries like Iran, the lack of a dedicated electricity tariff for charging stations remains a key obstacle to growth. The paper concludes by proposing a set of actionable policy recommendations aimed at supporting the widespread adoption of electric public transportation and addressing core challenges related to regulation, infrastructure readiness, and investment.

**Cite this article:** Moeini-Aghtaie, M.; Bazoubandi, H. & Pasban, A. (2025). Assessing the role of electricity infrastructure and regulatory frameworks in the development of electric public transportation: Comparative analysis and policy recommendations. *Urban Development Policy Making*, 2 (1), 31-47. DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.510165.1013

© Moein Moeini-Aghtaie, Hassan Bazoubandi, Ali Pasban
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.510165.1013

## Introduction

The electrification of public transportation has emerged as a strategic response to global environmental concerns and energy efficiency goals. Unlike conventional transport planning that mainly emphasizes vehicle operation or fleet logistics, the current study adopts a comprehensive, system-level perspective focused on the enabling role of electricity infrastructure and regulatory frameworks. With rising urban demand and increasing electric vehicle (EV) adoption, electric public transportation introduces new complexities for power systems, including increased peak loads and

infrastructure stress. To address these challenges, the paper highlights the importance of adapting electricity tariffs, ensuring grid compatibility, and implementing robust technical standards for EV charging infrastructure. Drawing from successful global case studies—including China, the U.S., and the EU—the paper offers a policy-driven analysis grounded in real-world implementation.

## Methodology

This research follows a qualitative policy review and technical narrative approach, synthesizing secondary data from academic articles, international energy reports, and regulatory documents. The study categorizes insights across two main axes: (1) technical challenges and capacities of electricity grids in the face of increasing EV charging demand, and (2) the regulatory and policy mechanisms required to facilitate large-scale electric public transit deployment. Countries with leading EV infrastructure were selected as benchmarks for comparative analysis.

## Results

The findings reveal that successful public transportation electrification hinges on three foundational pillars: (1) deployment of time-based electricity tariffs to manage load curves; (2) clear and standardized grid-connection protocols for charging stations; and (3) financial incentives to attract private sector investment. In countries like Iran, the current classification of charging stations under general-use tariffs poses a significant barrier to infrastructure expansion. Moreover, unmanaged EV charging could lead to grid instability, especially during peak demand hours. The study also provides a breakdown of technical impacts across generation, transmission, distribution, and tariff structures—especially in developing country contexts.

## Conclusion

The transition to electric public transportation demands an integrated approach encompassing infrastructure readiness, regulatory flexibility, and market-driven investment. Without these elements, grid congestion, voltage drops, and economic inefficiencies may arise. The research concludes that customized regulatory reform—including the establishment of EV-specific electricity tariffs, targeted subsidies, and smart grid investments—is vital to achieving sustainable electrification goals. By learning from international best practices and adapting them to local contexts, developing countries can accelerate their transition toward cleaner, more efficient transport systems.

پیشرفت شهری
سیاستگذاری
سایت نشریه: https://judpmi.ir
شاپا الکترونیکی: ۶۵۶۴-۳۰۹۲

# ارزیابی نقش زیرساخت‌های برق و چارچوب‌های مقرراتی در توسعهٔ حمل‌ونقل عمومی برقی: تحلیل تطبیقی و ارائهٔ توصیه‌های سیاستی و چالش‌های موجود

معین معینی اقطاعی[1*] | حسن بازوبندی[2] | علی پاسبان[3]

۱. نویسندهٔ مسئول، دانشیار گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکدهٔ مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. رایانامه: moeini@sharif.edu
۲. دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکدهٔ مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. رایانامه: hassan.bazoubandi@energy.sharif.edu
۳. مرکز نوآوری انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. رایانامه: Alipasban.ap@gmail.com

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:**
پژوهشی

**تاریخ‌های مقاله:**
**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۳/۰۹/۲۵
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۳/۱۰/۲۵
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۳/۱۱/۲۵
**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۴/۰۱/۱۵

**کلیدواژه:**
حمل‌ونقل عمومی الکتریکی، زیرساخت‌های برقی‌سازی حمل‌ونقل عمومی، زمینه‌های قانونی و مقررات برقی‌سازی حمل‌ونقل عمومی.

**چکیده**

گذار به حمل‌ونقل عمومی برقی، گامی اساسی در جهت کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و ارتقای بهره‌وری انرژی محسوب می‌شود، اما این گذار بدون آماده‌سازی زیرساخت‌های صنعت برق و بازنگری در آیین‌نامه‌های مرتبط، به نتایج مطلوب نخواهد رسید. این مقاله با هدف بررسی تعامل میان زیرساخت شبکهٔ برق و چارچوب‌های مقرراتی صنعت برق در توسعهٔ ناوگان عمومی برقی تدوین شده است. برای این‌منظور، ضمن تحلیل سیاست‌های تعرفه‌گذاری، ساختار اتصال به شبکه، و استانداردهای فنی ایستگاه‌های شارژ، نمونه‌هایی از تجربه‌های موفق در چین، اروپا و ایالات متحده بررسی شده‌اند. نتایج بیانگر آن است که اعمال تعرفه‌های زمان‌محور، تدوین مقررات اتصال فنی و تسهیل سرمایه‌گذاری خصوصی، سه رکن کلیدی در توسعهٔ پایدار ناوگان برقی به شمار می‌روند. بر اساس پیش‌بینی آژانس بین‌المللی انرژی، تقاضای برق خودروهای برقی تا سال ۲۰۴۰ به بیش از ۱۱۵۵ تراوات‌ساعت خواهد رسید، که حدود دو برابر کل مصرف برق سالانهٔ کشور برزیل است. این فشار، به‌ویژه در ساعت‌های اوج، می‌تواند بدون مدیریت هوشمند شارژ و تقویت شبکهٔ توزیع، به افت ولتاژ یا خاموشی منجر شود. همچنین، بررسی ساختار تعرفهٔ برق در ایران نشان می‌دهد دسته‌بندی ایستگاه‌های شارژ تحت عنوان «سایر مصارف» از مهم‌ترین موانع اقتصادی برای گسترش زیرساخت محسوب می‌شود. در پایان، این مقاله به ارائهٔ مجموعه‌ای از راهکارهای سیاستی در زمینهٔ تعرفه‌گذاری اختصاصی، مشوق‌های سرمایه‌گذاری، و استانداردسازی اتصال، چارچوبی عملیاتی برای توسعهٔ حمل‌ونقل عمومی برقی و بررسی چالش‌های اساسی موجود در کشورهای درحال‌توسعه می‌پردازد.

**استناد:** معینی اقطاعی، معین؛ بازوبندی، حسن و پاسبان، علی (۱۴۰۴). ارزیابی نقش زیرساخت‌های برق و چارچوب‌های مقرراتی در توسعهٔ حمل‌ونقل عمومی برقی: تحلیل تطبیقی و ارائهٔ توصیه‌های سیاستی و چالش‌های موجود. *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۲ (۱) ۳۱-۴۷.
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.510165.1013

© معین معینی اقطاعی، حسن بازوبندی، علی پاسبان
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.510165.1013

## مقدمه

بخش حمل‌ونقل جهانی در دهه‌های اخیر با فشار فزاینده‌ای برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای[1] و بهبود امنیت انرژی مواجه بوده است. در این‌میان، توسعهٔ ناوگان حمل‌ونقل عمومی برقی به عنوان راهکاری کارآمد، کم‌کربن و بهینه از نظر مصرف انرژی، توجه سیاست‌گذاران و نهادهای بین‌المللی را به خود جلب کرده است. با افزایش تراکم جمعیت در مراکز شهری، برقی‌سازی ناوگان اتوبوس‌ها، تراموا‌ها و قطارهای شهری می‌تواند سهم چشمگیری در بهبود کیفیت هوای شهرها، کاهش آلاینده‌های محلی و تحقق اهداف اقلیمی ایفا کند. با این‌حال، پذیرش گستردهٔ حمل‌ونقل عمومی الکتریکی، پیشرفت‌های اساسی در زیرساخت‌های شبکهٔ برق و چارچوب‌های نظارتی را ضروری می‌کند. افزایش تقاضا برای شارژ وسایل نقلیهٔ الکتریکی[2] پیچیدگی‌های جدیدی را برای تولید، انتقال و توزیع برق ایجاد می‌کند و اپراتورهای شبکه و سیاست‌گذاران را ملزم به اجرای استراتژی‌های تطبیقی می‌کند. فناوری‌های شارژ هوشمند، یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر و سرمایه‌گذاری در گسترش شبکه برای حفظ پایداری و کارایی برق ضروری هستند [۱].

آژانس بین‌المللی انرژی[3] انتظار دارد در صورت اجرای سیاست‌های اعلام‌شده، تقاضای وسایل نقلیهٔ برقی برای برق در سطح جهان از ۵۵ تراوات‌ساعت[4] در سال ۲۰۲۰ به ۱۱۵۵ تراوات‌ساعت تا سال ۲۰۴۰ افزایش یابد. این تقاضا تقریباً معادل دو برابر کل مصرف برق امروزی در برزیل است. برای اکثر کشورها، آژانس بین‌المللی انرژی انتظار دارد که سهم برق مصرفی خودروهای برقی از ۶ درصد تا سال ۲۰۳۰ و از ۱۰ درصد تا سال ۲۰۴۰ تجاوز نکند، در حالی که امروز حدود ۱ درصد است [۱].

علاوه بر این، مصرف برق آن باید به زمینهٔ برقی‌سازی گسترده‌تر بسیاری از کاربری‌های دیگر انرژی (مانند گرمایش و سرمایش)، تغییر الگوهای تقاضای بخش به دلیل بازسازی اقتصادی، و بهره‌وری انرژی بیشتر در نظر گرفته شود. چالش بزرگ‌تر این است که این تقاضا احتمالاً زمانی متمرکز می‌شود که بسیاری از دارندگان خودروهای برقی به طور هم‌زمان شارژ می‌کنند یا جایی که پذیرش زیاد است. شارژ ناهماهنگ – که این خطر را به همراه دارد که تقاضای مجدد وسیلهٔ نقلیه می‌تواند به‌شدت در مکان‌های خاص یا در ساعت‌های خاصی از روز متمرکز شود – ممکن است شبکه‌های توزیع موجود را تحت الشعاع قرار دهد یا نیاز به ارتقای گران‌قیمت برای مطابقت با پیک تقاضای کوتاه‌مدت داشته باشد. چنین نگرانی‌هایی می‌تواند با سرمایه‌گذاری بیشتر در ارتقای شبکه برطرف شود و با اقدامات مدیریت تقاضای فعالیت شارژ را در مکان‌ها و دوره‌های زمانی دوباره توزیع می‌کند، به طور مؤثر برطرف کند. راه حل‌های مختلفی در این حوزه از اطلاعات نسبتاً ساده در برنامه‌های تشویقی تا راه حل‌های فنی پیچیده‌تر شامل می‌شود [۲].

از آنجا که وسایل نقلیهٔ برقی[5] به‌تدریج جایگزین وسایل نقلیه با سوخت فسیلی می‌شوند، افزایش مطلق تقاضای برق احتمالاً کمتر از توزیع آن طی زمان و مکان خواهد بود که این موضوع برای دولت‌ها و شرکت‌ها چالش‌برانگیز است. مدیریت به‌روزرسانی‌های لازم در زیرساخت‌ها، به‌ویژه در کشورهای با درآمد کم و متوسط که شرکت‌های برق برای ارائهٔ خدمات اولیه با مشکل مواجه هستند، چالشی اساسی خواهد بود. یک چالش مهم دیگر، تنظیم قیمت‌گذاری انرژی و ساختارهای مالی است تا اطمینان حاصل شود که مصرف‌کنندگان انگیزهٔ لازم برای رفتار کارآمد در مورد شارژ خودرو دارند و توازن مالی شرکت‌های برق حفظ می‌شود. بدون آماده‌سازی اولیه و جامع، کشورها در معرض خطر تضعیف بیشتر سیستم‌های تأمین برق قرار دارند که برای رشد و رفاه ضروری هستند [۳].

بررسی شواهد اولیه و مطالعات علمی سه اولویت سیاستی را پیشنهاد می‌کند.

1. **برنامه‌ریزی دقیق سیستم انرژی:** کشورها باید با استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی، تأثیر تحرک برقی بر سیستم انرژی خود را ارزیابی کنند، که شامل تولید، انتقال و توزیع برق می‌شود. چنین تحلیل‌هایی به برنامه‌ریزی، سرمایه‌گذاری و اصلاحات تنظیم‌گری کمک می‌کند که سیستم انرژی را برای پذیرش گسترده وسایل نقلیهٔ برقی آماده می‌سازد.

1. GHG Emissions
2. Electric Vehicles
3. IEA
4. TWh
5. EVs

۲. **مدیریت تقاضا:** یک عنصر حیاتی از استراتژی‌های بخش برق مبتنی بر وسایل نقلیهٔ برقی، مدیریت تقاضاست که بارهای اوج را کاهش می‌دهد و در نهایت، وسایل نقلیهٔ برقی را به بخشی جدایی‌ناپذیر از سیستم انرژی با یکپارچگی شدید شبکه تبدیل می‌کند. یکی از عناصر مهم مدیریت تقاضا، اصلاح ساختارهای قیمت‌گذاری برق و سوخت است [۴].

۳. **بهبود بهره‌وری انرژی و سبز کردن تولید برق:** برای تضمین بیشترین منافع زیست‌محیطی و کاهش آلودگی با استفاده از خودروهای برقی، سیاست‌گذاران و شرکت‌های برق باید با بهبود بهره‌وری انرژی طی زنجیرهٔ تأمین برق و همچنین، افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق، پیشرفت کنند.

قیمت‌گذاری برق در زمان استفاده، انگیزه‌هایی برای کاربران خودروهای برقی ایجاد می‌کند تا زمانی که تقاضای کمتری است شارژ کنند. ادغام نزدیک‌تر خودروهای برقی با شبکه از طریق شارژ هوشمند به اپراتورهای سیستم اجاره می‌دهد تا برنامه‌های شارژ را هدایت کنند و ممکن است در آینده باتری‌های وسایل نقلیهٔ برقی به بخشی جدایی‌ناپذیر از شبکه تبدیل کنند. با این‌حال، چنین ادغامی نیاز به سرمایه‌گذاری اضافی در زیرساخت‌های شارژ هوشمند داشته باشد. خودروهای برقی تنها یکی از استفاده‌های جدید از برق خواهند بود که سیستم‌های تأمین برق را تحت فشار قرار می‌دهد، در حالی که در مسیر کربن‌زدایی تلاش می‌کنند تا با تقاضاهای توسعهٔ اقتصادی همگام شوند [۵]. ارتقای تولید و انتقال نیاز به سرمایه‌گذاری قابل توجهی دارد. ارتقای سیستم‌های توزیع محلی و تغذیه‌کننده بسیار چالش‌برانگیزتر است. اگر انحرافات مداوم قیمت در بخش‌های انرژی بسیاری از کشورها برطرف نشود، انجام سرمایه‌گذاری‌های مورد نیاز دشوارتر خواهد بود. برنامه‌ریزی و تجزیه‌وتحلیل کارآمدترین گزینه‌های فنی را شناسایی می‌کند، سطح مورد نیاز سرمایه‌گذاری را می‌سنجد، و اصلاحات نظارتی و بازار را پیشنهاد می‌کند که به پرداخت هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تضمین امنیت عرضه کمک می‌کند. از آنجا که خودروهای برقی در استفاده از انرژی به طور قابل توجهی کارآمدتر هستند، در حال حاضر، به هدف جهانی اجتناب از تغییرات آب‌وهوایی خطرناک حتی در کشورهایی که سوخت‌های فسیلی بر تولید برق غالب هستند، کمک می‌کنند. طی فرایند آماده‌سازی برای حمل‌ونقل برقی، سیاست‌گذاران و شرکت‌های برق نیاز به جست‌وجوی فرصت‌هایی برای بهبود کارایی سیستم قدرت و تغییر منابع انرژی کم‌کربن دارند. انرژی بادی و خورشیدی در حال حاضر به‌صرفه هستند، اما تأمین برق قابل اعتماد همچنین به ذخیره‌سازی برق در مقیاس بزرگ نیاز دارد که انتظار می‌رود هزینهٔ آن در سال‌های آینده کاهش یابد. جدول ۱ نمای کلی از نگرانی‌های اصلی مورد بحث در این حوزه را در زمینهٔ کشورهای در حال توسعه ارائه می‌دهد [۶].

در این میان، مقالهٔ حاضر یک مطالعهٔ مرور تطبیقی و سیاست‌محور است که به تحلیل چالش‌های فنی و مقرراتی مرتبط با گسترش حمل‌ونقل عمومی برقی می‌پردازد. روش تحقیق، مرور روایتی با تمرکز بر تحلیل آیین‌نامه‌ها، سیاست‌ها و تجارب موفق در سطح جهانی است. منابع مورد استفاده شامل گزارش‌های رسمی نهادهای بین‌المللی (IEA, UNEP)، مقررات داخلی ایران و مقالات علمی منتخب منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ است. کشورهای چین، ایالات متحده و اتحادیهٔ اروپا به عنوان مطالعات موردی انتخاب شده‌اند، زیرا دارای تجربه‌های موفق در توسعهٔ زیرساخت‌های شارژ، تدوین ساختار تعرفه‌ای، و تنظیم مقررات اتصال به شبکه هستند.

## مرور بر ادبیات

متعددی از مطالعات اخیر به توسعهٔ خودروهای برقی پرداخته‌اند که برخی از مهم‌ترین آن‌ها در ادامه ذکر شده‌اند. برای نمونه، آقای رزمجو و همکارانش بررسی کردند که چگونه خودروهای برقی می‌توانند در شهرهای هوشمند نقش مؤثری ایفا کنند. آن‌ها نشان دادند این وسایل نقلیه نه‌تنها باعث کاهش انتشار دی‌اکسید کربن می‌شوند، بلکه به بهبود سامانه‌های حمل‌ونقل شهری آینده نیز کمک خواهند کرد [۷].

**جدول ۱.** تأثیرات سیستم برق EV در کشورهای درحال‌توسعه

| دسته‌بندی | تأثیرات | موضوعات کشورهای درحال‌توسعه |
|---|---|---|
| تأثیر بر تقاضای برق | افزایش مصرف کل انرژی<br>تغییر شکل منحنی بار روزانه<br>تغییر بزرگی، مدت زمان و احتمالاً زمان اوج بار<br>تغییرپذیری مشخصات بار و افزایش عدم قطعیت بار | موقعیت جغرافیایی، آب‌وهوایی، جمعیت‌شناسی و الگوهای رانندگی نیز بر جذب، مصرف برق خودروهای برقی و رفتار شارژ تأثیر می‌گذارند.<br>دوچرخه برقی و سه‌چرخه برقی ممکن است یک حالت غالب در بسیاری از اقتصادها باشد.<br>موانع اقتصادی، مقرراتی و جغرافیایی در ایجاد زیرساخت‌های شارژ عمومی |
| تأثیر بر سیستم توزیع | اضافه بار فیدرها و ترانسفورماتورها<br>تلفات برق اضافی<br>انحرافات ولتاژ<br>مشکلات کیفیت برق (اوج‌بار، هارمونیک) | سیستم‌های توزیع نامناسب و ضعیف<br>سطح بالای تلفات سیستم توزیع<br>نرخ بالای خرابی ترانسفورماتور<br>فقدان یا مدیریت استانداردها و مقررات مناسب<br>نیاز زیاد به تقویت‌کننده‌ها |
| تأثیر بر سیستم انتقال | خطر ازدحام به دلیل ظرفیت ناکافی انتقال<br>افزایش نیاز به توان واکنشی انعطاف‌پذیر | سطح پایین اتصال و ظرفیت<br>فقدان مقررات مناسب مانع از سرمایه‌گذاری<br>الزامات سرمایه‌گذاری بالا برای ارائهٔ سطح مناسبی از ارتباطات متقابل با تقاضای رو به رشد |
| تأثیر بر تولید نیرو | نیاز به سرمایه‌گذاری ایجاد ظرفیت نسل جدید<br>افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای سیستم قدرت<br>نیازهای فزاینده به دلیل افزایش شدید تقاضای توان<br>افزایش نیاز به خدمات جانبی<br>افزایش نیاز به ذخیره‌سازی | ظرفیت و قابلیت اطمینان ناکافی برای برآوردن نیازهای فعلی<br>نیازهای سرمایه‌گذاری بالا به دلیل تقاضای رو به رشد سریع<br>ناتوانی تولیدکنندگان فشرده، اغلب بر اساس واحدهای سوخت فسیلی با کیفیت پایین<br>تنظیم ضعیف بازار برق و مشکلات در تأمین ذخایر |
| تأثیر بر تعرفیات | ساختارهای تعرفهٔ برق بار در نظر گرفتن شارژ EV طراحی نشده‌اند<br>در مواردی که به برق یارانه داده می‌شود، موقعیت مالی شرکت‌های آب و برق ممکن است با پذیرش EV تضعیف شود | افزایش تعرفه‌های بلوکی امری عادی است و ممکن است شارژ خودروهای برقی را جریمه کند<br>ساختار زمان استفاده و کنتورهای هوشمند مرتبط بسیار نادر است<br>قیمت برق یارانه‌ای است |

مطالعهٔ دیگری که توسط آقای گنان[1] و همکارانش انجام شد، به ارزیابی تأثیر خودروهای برقی قابل شارژ بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در آلمان طی سال ۲۰۲۰ پرداخت. آن‌ها دریافتند که قیمت انرژی و هزینهٔ باتری‌ها تأثیر قابل توجهی بر گسترش بازار این خودروها دارند، به گونه‌ای که انتظار می‌رفت خودروهای برقی بین ۰/۴ تا ۳ درصد از کل ناوگان خودروهای سواری آلمان را تا سال ۲۰۲۰ تشکیل دهند [۸].

برای مدیریت بحران‌های زیست‌محیطی و بهینه‌سازی سامانه‌های انرژی، هو و همکاران[2] تأثیر سیاست‌های دولتی بر میزان پذیرش خودروهای برقی را بررسی کرد. نتایج نشان داد اقداماتی نظیر حمایت از توسعهٔ زیرساخت‌ها و ارائهٔ یارانه‌های تولیدی می‌توانند نرخ پذیرش این خودروها را تا ۷۰ درصد افزایش دهند [۹]. در مطالعه‌ای دیگر، آقایان کاپوستین و گروشونکو[3]، تأثیر رشد خودروهای ـ برقی بر شبکهٔ برق را در بازهٔ زمانی طولانی‌مدت تحلیل کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد در صورت حمایت گستردهٔ دولت‌ها، بین ۱۱ تا ۲۸ درصد از ناوگان جهانی خودروها تا سال ۲۰۴۰ می‌توانند به خودروهای برقی تبدیل شوند [۱۰]. مو[4] و همکارانش نیز روندهای نوین و فناوری‌های در حال ظهور در صنعت خودروهای برقی را مورد بررسی قرار دادند. برخی از این فناوری‌ها شامل سیستم‌های خودرو به شبکه[5]، توزیع برق هوشمند، ارتباطات خودرو به خودرو[6]، فناوری شارژ بی‌سیم و سامانه‌های خودرو به خانه[7] است [۱۱]. علاوه بر این، آن‌ها به بررسی تجاری‌سازی خودروهای برقی در هنگ‌کنگ پرداختند و چالش‌هایی مانند کمبود زیرساخت‌های شارژ، مدیریت ضعیف امکانات عمومی و دشواری در یافتن خدمات تعمیر و نگهداری را

1. Gnann
2. Y. Hu
3. Kapustin and Grushevenko
4. Mo
5. V2G: Vehicle to Grid
6. V2V: Vehicle to Vehicle
7. V2H: Vehicle to Home

برای کاربران خصوصی مطرح کردند. در بخش مربوط به خودروهای برقی تجاری، مشکلاتی نظیر مدل‌های محدود، کمبود زیرساخت‌های شارژ، طولانی بودن زمان شارژ و کمبود جای پارک مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، آن‌ها پیشنهادهایی مانند توسعهٔ فناوری، ارائهٔ مشوق‌های مالی برای خودروهای تجاری، تقویت همکاری ذی‌نفعان، ایجاد ایستگاه‌های شارژ سریع و گسترش زیرساخت‌های لازم برای خودروهای شخصی و تجاری ارائه کردند [۱۲].

بر اساس تحلیل انجام‌شده در [۱۳] تا پایان سال ۲۰۱۹ حدود ۷/۳ میلیون ایستگاه شارژ خودروهای برقی در سطح جهان نصب شده بود که ۰/۹ میلیون مورد آن‌ها عمومی بودند. همچنین، تخمین زده می‌شود که تولید خودروهای برقی در اروپا از ۷۵۰ هزار دستگاه در سال ۲۰۱۹ به بیش از چهار میلیون دستگاه در سال ۲۰۲۵ برسد. علاوه بر این، برخی تحقیقات بر بررسی عوامل مؤثر بر پذیرش خودروهای برقی و انگیزه‌های خرید مشتریان تمرکز داشته‌اند. به عنوان نمونه، وانگ[1] و همکارانش (۲۰۱۷) سیاست‌های حمایتی را در سه گروه مشوق‌های مالی، آموزش عمومی و سیاست‌های تسهیل‌کننده طبقه‌بندی کرده و تأثیر هر یک بر رفتار مصرف‌کنندگان را بررسی کردند [۱۴]. در مطالعه‌ای دیگر، لو[2] و همکارانش رویکرد مصرف‌کنندگان نسبت به خودروهای انرژی نوین[3] را از طریق مدل معادلات ساختاری[4] تحلیل کرده و دریافتند که افراد تمایل بیشتری به خودروهای هیبریدی[5] و خودروهای برقی قابل شارژ[6] دارند، اما آگاهی کافی از این فناوری‌ها و سیاست‌های مرتبط با آن‌ها ندارند ]۱۵]. همچنین، جاوید و همکارانش با استفاده از مدل فعال‌سازی هنجار[7]، میزان پذیرش خودروهای برقی را در میان مسافران پاکستانی ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد افزایش آگاهی عمومی دربارهٔ مزایای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی خودروهای برقی، تأثیر مثبتی بر هنجارهای رفتاری مصرف‌کنندگان دارد [۱۶]. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که ترویج و توسعهٔ حمل‌ونقل برقی، به‌ویژه در ناوگان شهری، گامی کلیدی در راستای تحقق اهداف زیست‌محیطی، افزایش بازدهی انرژی، و بهبود کیفیت زندگی تلقی می‌شود.

## روش کار

این مطالعه به صورت مرور تحلیلی روایتی انجام شده است که هدف آن بررسی نقش زیرساخت‌های صنعت برق و چارچوب‌های مقرراتی در توسعهٔ حمل‌ونقل عمومی برقی، با تمرکز بر کشورهای درحال‌توسعه و به طور خاص ایران است. این نوع مرور پژوهشی با استفاده از تحلیل محتوای موضوع‌محور و تطبیقی، تلاش دارد تا از طریق دسته‌بندی منابع علمی، مستندات فنی، و اسناد سیاستی، مهم‌ترین چالش‌ها و راهکارهای سیاست‌گذاری را شناسایی کند.

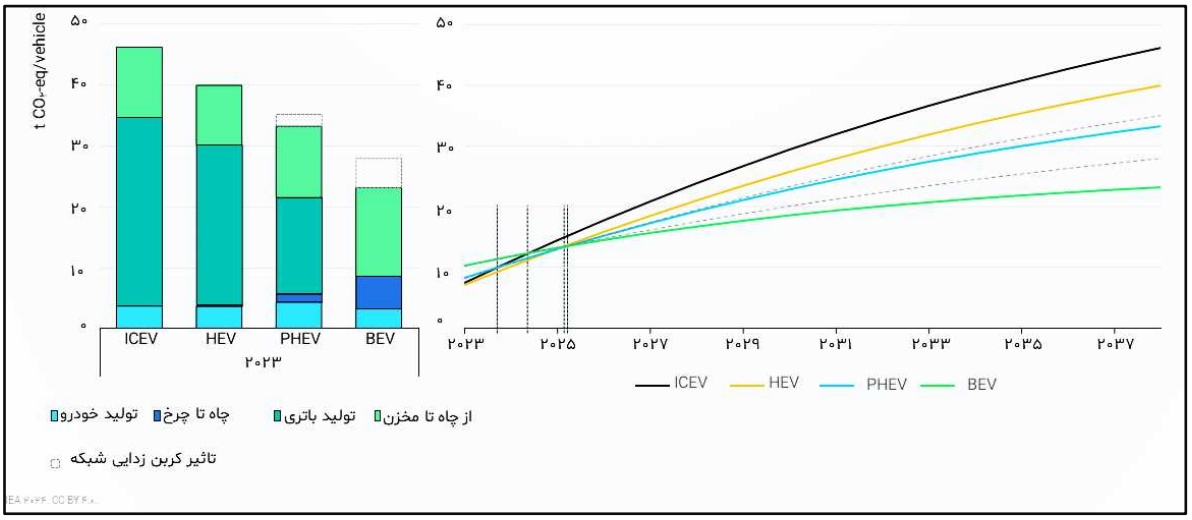
مطالعهٔ حاضر به جای تکیه بر داده‌های اولیه، از منابع ثانویه معتبر برای استخراج اطلاعات استفاده کرده است. برای این‌منظور، ابتدا پایگاه‌های دادهٔ علمی از جمله ScienceDirect، Scopus، Springer، IEEE Xplore و Google Scholar برای دستیابی به مقالات منتشرشده در زمینهٔ حمل‌ونقل برقی، زیرساخت شارژ، تعرفه‌گذاری برق، و سیاست‌های تنظیم‌گری در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ مورد جست‌وجو قرار گرفتند. همچنین، اسناد سیاستی و فنی از سوی نهادهای بین‌المللی مانند IEA، IRENA، UNEP، WRI و نیز مستندات رسمی منتشرشده توسط وزارت نیرو، شرکت توانیر، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی ایران (ساتبا) بررسی و تحلیل شدند.

گسترش حمل‌ونقل برقی، به‌ویژه در حوزهٔ ناوگان عمومی، از جنبه‌های مختلف می‌تواند به بهبود وضعیت زیست‌محیطی و پایداری انرژی کمک کند؛ پنج محور اصلی در این زمینه عبارت‌اند از:

1. Wang
2. Lou
3. NEVs: New Electric Vehicles
4. SEM: Structural Equetion Model
5. HEVs: Hybrid Electric Vehicles
6. PEVs: ؟؟ Electric Vehicles
7. NAM: ???

## ۱. کاهش انتشار آلاینده‌های محیط زیستی

خودروهای برقی به خلاف خودروهای احتراقی[1] انتشار مستقیم آلاینده‌هایی همچون NOx، $CO_2$ و ذرات معلق ندارند. این موضوع به‌ویژه در مناطق شهری پرتراکم، تأثیر چشمگیری بر کاهش مه‌دود و آلودگی هوای تنفسی دارد. شکل ۱ مقایسه‌ای آلایندگی انواع فناوری‌های خودورا[2] نشان می‌دهد حتی با محاسبهٔ چرخهٔ عمر باتری، در بلندمدت، استفاده از خودروهای برقی به کاهش ۲۵ درصدی انتشار کلی آلاینده‌ها منجر می‌شود. کاهش آلاینده‌های مستقیم و هم‌زمان کاهش آلودگی صوتی موتورهای احتراقی، می‌تواند کیفیت زندگی و سلامت عمومی را در شهرها ارتقا دهد.




**شکل ۱.** میانگین جهانی انتشار چرخهٔ عمر خودروهای متوسط در STEPS، 2023

## ۲. بهبود کارایی مصرف انرژی

مطابق جدول ۲ بازده موتورهای برقی نسبت به موتورهای احتراق داخلی، به‌مراتب بیشتر است. بنابراین در ازای هر واحد انرژی الکتریکی، مسافت بیشتری طی می‌شود و اتلاف انرژی حرارتی کاهش می‌یابد.

**جدول ۲.** مقایسهٔ راندمان در خودروهای برقی و خودروهای احتراق داخلی [۱۷]

| مرحله | خودروی احتراق داخلی (ICEV) | | خودروی برقی (EV) | |
|---|---|---|---|---|
| | بیشینه | کمینه | بیشینه | کمینه |
| نفت خام | – | – | – | – |
| پالایش (نفت خام / نفت کوره) | ۹۰ | ۸۵ | ۹۷ | ۹۵ |
| توزیع سوخت / تولید برق | ۹۹ | ۹۵ | ۴۰ | ۳۳ |
| انتقال تا ورودی نهایی | – | – | ۹۲ | ۹۰ |
| شارژر باتری | – | – | ۹۰ | ۸۵ |
| باتری (اسید–سربی) | – | – | ۷۵ | ۷۵ |
| موتور / کنترلر | ۲۲ | ۲۰ | ۸۵ | ۸۰ |
| انتقال نیرو به چرخها | ۹۸ | ۹۵ | ۹۸ | ۹۵ |
| بازده کلی (از نفت خام تا چرخها) | ۱۹ | ۱۵ | ۲۰ | ۱۴ |

1. ICEV
2. ICEV/HEV/PHEV/BEV

خودروهای برقی می‌توانند از ترمز احیاکننده[1] بهره ببرند و بخشی از انرژی جنبشی را به انرژی الکتریکی برگردانند. این قابلیت باعث بهره‌وری بیشتر و مدیریت بهتر انرژی در ترافیک شهری می‌شود.

### ۳. کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی

با جایگزینی سوخت‌های فسیلی توسط برق در حمل‌ونقل عمومی، نیاز به بنزین و گازوئیل کاهش می‌یابد و در بلندمدت، وابستگی کشور به واردات یا مصرف این سوخت‌ها کم می‌شود. به این‌ترتیب، می‌توان امنیت و تنوع عرضهٔ انرژی را نیز افزایش داد، به‌ویژه اگر برق مصرفی از منابع انرژی تجدیدپذیر تولید شود. همچنین قیمت برق معمولاً در مقایسه با سوخت‌های فسیلی، نوسان کمتری دارد (به‌شرط مدیریت صحیح تعرفه‌ها). از این‌رو، استفاده از حمل‌ونقل برقی در درازمدت ثبات اقتصادی بالاتری را فراهم می‌کند.

### ۴. هم‌افزایی با انرژی‌های تجدیدپذیر

در صورتی که تولید برق به طور هم‌زمان از منابع تجدیدپذیر نظیر نیروگاه‌های خورشیدی یا بادی تأمین شود، میزان آلایندگی چرخهٔ کامل انرژی تا حد چشمگیری کاهش خواهد یافت. پیوند میان حمل‌ونقل برقی و توسعهٔ انرژی‌های پاک، راهکاری مؤثر برای کاهش اثرات زیست‌محیطی بخش حمل‌ونقل است.

### ۵. بهبود سلامت شهروندان و ارتقای کیفیت زندگی

جایگزینی ناوگان عمومی برقی در شهرهای پرجمعیت، علاوه بر کنترل آلاینده‌های مضر، اثر قابل توجهی بر سلامت عمومی خواهد داشت. تحقیقات متعدد بیانگر آن که کاهش آلودگی هوا مستقیم با کاهش بیماری‌های تنفسی و قلبی ـ عروقی در ارتباط است. بنابراین، توسعهٔ ناوگان برقی به عنوان یک سرمایه‌گذاری در سلامت و رفاه اجتماعی نیز تلقی می‌شود.

در این بخش، به منظور تحلیل منسجم یافته‌ها، محتوای گردآوری‌شده دو قالب یک ساختار دووجهی (فنی ـ مقرراتی) سازمان‌دهی و تحلیل شد.

**محور اول:** تحلیل فنی و زیربنایی شامل چالش‌ها و ظرفیت‌های زیرساختی شبکهٔ برق در گذار به حمل‌ونقل عمومی الکتریکی

**محور دوم:** تحلیل محتوای مقرراتی و سیاست‌گذاری شامل نقش آیین‌نامه‌ها و مقررات صنعت برق در راستای پاسخ به نیازهای شارژ خودروهای برقی

## محور اول: چالش‌ها و ظرفیت‌های زیرساختی شبکهٔ برق در گذار به حمل‌ونقل عمومی الکتریکی

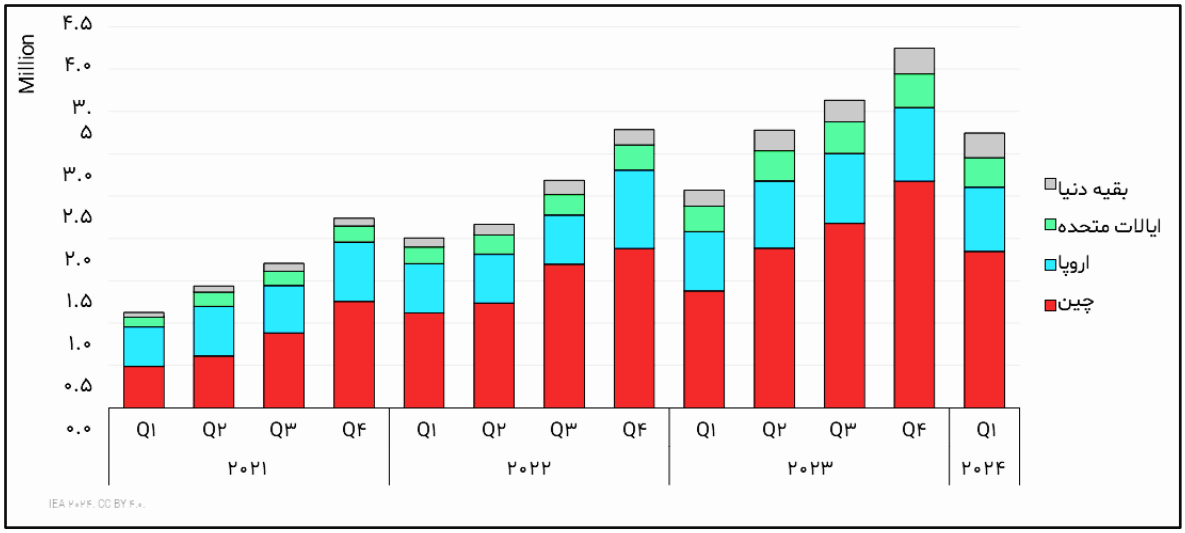
با گسترش خودروهای برقی در بازارهای جهانی و ورود آن‌ها به ناوگان شهری، تقاضای شارژ به‌سرعت رو به افزایش است. شکل (۱-۳) که روند فروش سه‌ماههٔ خودروهای برقی در دنیا و پیش‌بینی تا سال ۲۰۲۴ را نشان می‌دهد، بیانگر رشد چشمگیر این صنعت است. در این میان، صنعت برق باید خود را از چند جهت آماده کند:

- **افزایش تقاضای شارژ خودروهای برقی**

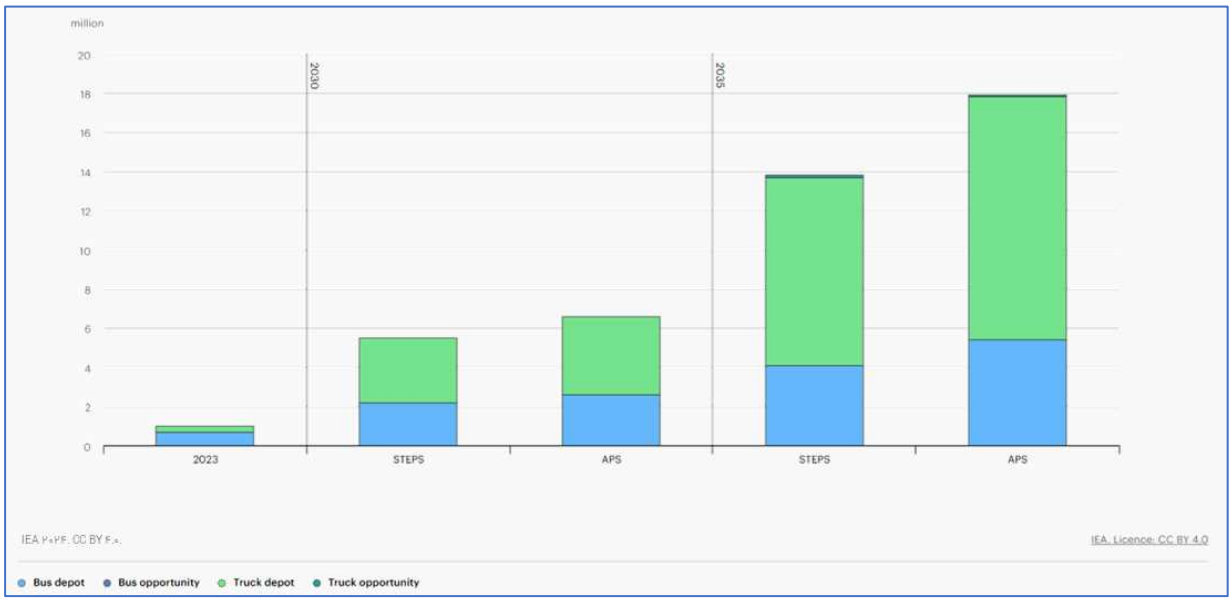
نمودارهای IEA در شکل ۲نشان می‌دهد تعداد خودروهای برقی فروخته‌شده سال به سال رشد چشمگیری داشته و پیش‌بینی‌ها حکایت از ادامه این روند در دههٔ جاری دارد.

وقتی اتوبوس‌ها، تاکسی‌ها و حتی کامیون‌های برقی وارد بازار شوند، بار شارژ مورد نیاز بسیار بالاتر از خودروهای سواری شخصی خواهد بود. مطابق شکل ۳ همان‌طور که اتوبوس‌ها و کامیون‌های بیشتری برقی می‌شوند، ظرفیت شارژ تا ۲۰۳۵ بیست برابر می‌شود که باید زیرساخت گسترده‌تری فراهم شود.

1. Regenerative Braking




**شکل ۲.** فروش سه‌ماههٔ خودروهای برقی بر اساس منطقه




**شکل ۳.** ظرفیت نصب‌شده شارژرهای خودروهای برقی سنگین

### ➢ ظرفیت محدود شبکهٔ برق فعلی

عدم تناسب ظرفیت شبکه با روند رشد برقی‌سازی: اگر تعداد زیاد خودرو به‌صورت هم‌زمان در ساعت‌های پیک نیاز به شارژ داشته باشند، ممکن است شبکهٔ برق با فشار شدیدی مواجه شود. تأثیر منفی افزایش بار ناشی از شارژ: بار اضافه ناشی از شارژ شبانه یا در ساعت‌های اوج، می‌تواند پایداری، کیفیت و قابلیت اطمینان شبکهٔ برق را به مخاطره بیندازد؛ از جمله ریسک خاموشی گسترده یا افت ولتاژ در مناطق شهری.

### ➢ نیاز به توسعهٔ ظرفیت تولید، انتقال و توزیع برق

سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌ها: سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌ها برای پاسخ‌گویی به بار اضافی شبکه ضروری است و باید ظرفیت نیروگاه‌های حرارتی و تجدیدپذیر افزایش یابد. توسعه و بهبود شبکهٔ انتقال و توزیع برق نیز از طریق احداث پست‌های فوق توزیع، ارتقای خطوط انتقال و ایجاد پست‌های محلی پرقدرت، به‌ویژه برای ایستگاه‌های شارژ سریع و فوق سریع، از اقدامات زیرساختی حیاتی محسوب می‌شود. بر اساس مصوبات هیئت وزیران و دستورالعمل‌های وزارت نیرو، کلیهٔ مشترکان برق با قدرت

بیش از یک مگاوات موظف‌اند از ابتدای خردادماه سال جاری، انرژی الکتریکی مورد نیاز خود را از طریق بورس انرژی و یا قراردادهای دوجانبه تأمین کنند. این الزام با هدف کاهش فشار بر شبکهٔ سراسری و بهینه‌سازی مصرف برق اعمال شده است. شرکت‌های برق منطقه‌ای و توزیع نیروی برق باید لزوم دریافت کد معاملاتی بورس و خرید انرژی از طریق بورس یا قراردادهای دوجانبه را به مشترکان اطلاع‌رسانی کنند و فهرست مشترکان مشمول را به شرکت بورس انرژی ارسال کنند تا حداکثر تا پایان خردادماه، کد معاملاتی برای آن‌ها صادر شود. در صورتی که مشترکی اقدامی در جهت تأمین برق از روش‌های پیش‌بینی‌شده انجام ندهد، در اولویت برنامهٔ مدیریت بار قرار خواهد گرفت و شرکت‌های برق منطقه‌ای و توزیع برق می‌توانند برق مصرفی این مشترکان را به نیابت از آن‌ها تأمین کرده و هزینهٔ برق مصرفی را با ضریب ۱/۲ برابر حداکثر قیمت برق بازار عمده‌فروشی محاسبه و دریافت کنند. علاوه بر هزینهٔ انرژی، مشترکان موظف‌اند هزینه‌های دیگری ازجمله هزینهٔ ترانزیت برق، آبونمان، تجاوز از قدرت مجاز، بهای انرژی راکتیو، عوارض برق و مالیات بر ارزش افزوده را نیز پرداخت کنند. مشترکانی که تعرفهٔ آن‌ها بالاتر از متوسط نرخ بازار است، باید مابه‌التفاوت اجرای مقررات را برای هر کیلووات ساعت برق خریداری‌شده از بورس پرداخت کنند. این مبلغ به صورت علی‌الحساب دریافت و به حساب شرکت توانیر واریز خواهد شد. همچنین، مشترکان باید سقف قدرت مجاز تعیین‌شده توسط شرکت مدیریت شبکهٔ برق ایران را در تأمین برق از طریق بورس انرژی و قراردادهای دوجانبه رعایت کنند. مشترکان دارای انشعاب برق آزاد با قدرت بیش از یک مگاوات باید هزینه‌های عمومی برقراری انشعاب را بر اساس شرایط جاری پرداخت کنند و در صورت درخواست، این هزینه‌ها می‌تواند تا سه سال تقسیط شود. شرکت توانیر موظف است به تمامی مشترکان پرمصرف، لزوم همکاری با برنامه‌های مدیریت بار را اطلاع‌رسانی کند. تسویه‌حساب بهای سوخت مبادلات برق مطابق مقررات بازار عمده‌فروشی انجام خواهد شد و خرده‌فروشان دارای مجوز از وزارت نیرو، در صورت رعایت ضوابط مربوط، مجاز به تأمین برق مشترکان مشمول این مقررات خواهند بود. بهبود شبکهٔ انتقال و توزیع: ایجاد پست‌های فوق توزیع جدید، ارتقای خطوط انتقال، یا احداث پست‌های محلی پرقدرت (برای ایستگاه‌های شارژ سریع و فوق‌سریع) از اقدامات زیرساختی حیاتی به شمار می‌رود.

### ➢ ایجاد زیرساخت‌های هوشمند شارژ و مدیریت بار

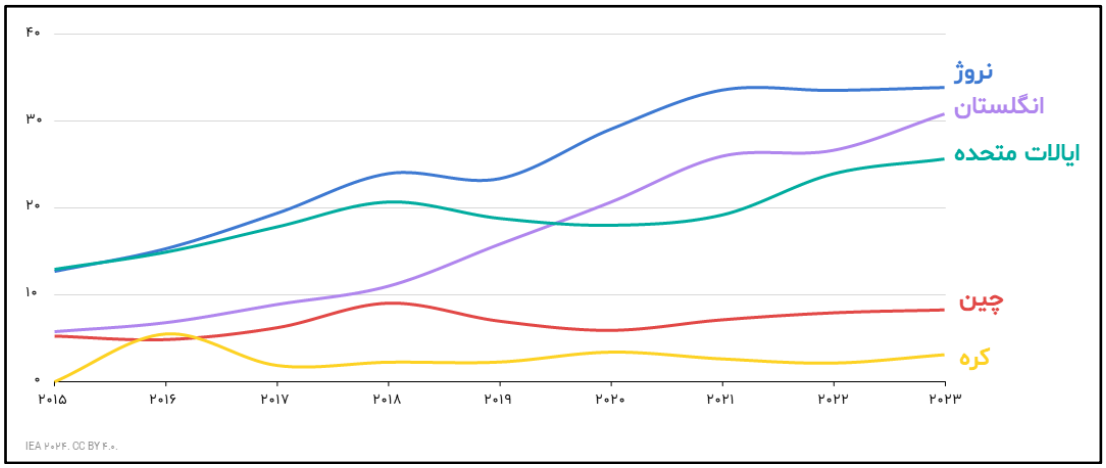
- مدیریت تقاضا (Demand Response): یکی از راهکارهای اصلی برای جلوگیری از فشار بیش از حد به شبکه، تعرفه‌های تشویقی در ساعت‌های کم‌بار یا مدیریت هوشمند شارژ است (مثلاً شارژ شبانه با تعرفهٔ ارزان).
- نرم‌افزارهای زمان‌بندی شارژ: پلتفرم‌های نرم‌افزاری می‌توانند به مالکان و ناوگان عمومی اجازه دهند زمان‌های خلوت شبکه را برای شارژ انتخاب کنند.
- شبکهٔ هوشمند (Smart Grid): بهره‌گیری از ارتباط دوطرفه میان خودرو و شبکه (V2G) یا حتی محدودسازی لحظه‌ای شارژ در ساعت‌های بحرانی می‌تواند بهره‌وری زیرساخت موجود را بالا برده و از توسعه فراتر از حد نیاز جلوگیری کند.

### ➢ پایش مستمر رشد EV و توسعهٔ مرحله‌ای زیرساخت

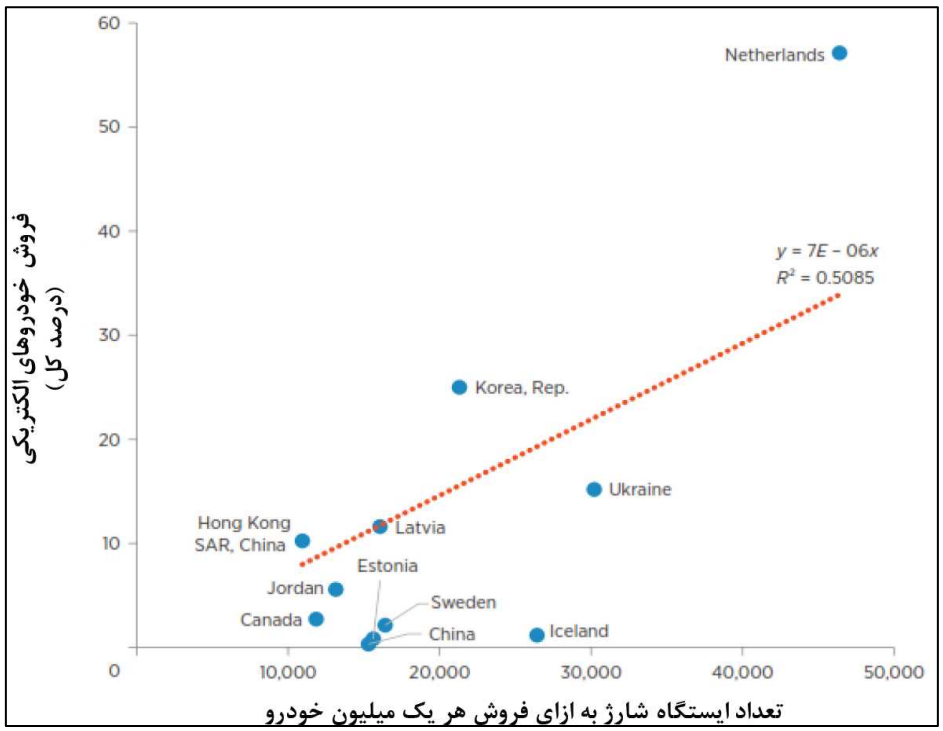
در شکل ۴ مقایسه‌ای میانگین تعداد خودروهای الکتریکی به ازای هر نقطه شارژ عمومی (مثلاً در چین، نروژ، انگلستان) دیده می‌شود که سرمایه‌گذاری پیوسته در ایستگاه‌های شارژ صورت گرفته و دولت‌ها نیز راهکارهای تشویقی ارائه کرده‌اند.

شکل ۵ رابطه بین تعداد ایستگاه‌های شارژ به ازای هر یک میلیون خودروی فروخته‌شده و سهم خودروهای الکتریکی از کل فروش خودرو را در کشورهای مختلف نشان می‌دهد. محور افقی تعداد ایستگاه‌های شارژ را نشان می‌دهد، در حالی که محور عمودی درصد فروش خودروهای الکتریکی را مشخص می‌کند. نقاط پراکنده نشان‌دهندهٔ کشورهای مختلف هستند، و یک روند کلی با یک خط رگرسیون مشخص شده است که نشان می‌دهد با افزایش تعداد ایستگاه‌های شارژ، سهم خودروهای الکتریکی در بازار نیز افزایش می‌یابد. مقدار $R^2$=۰/۵۰۸۵ نشان‌دهندهٔ همبستگی متوسط بین این دو متغیر است، که بیانگر این است که تعداد ایستگاه‌های شارژ یکی از عوامل تأثیرگذار بر افزایش فروش خودروهای الکتریکی است اما تنها عامل تعیین‌کننده نیست. کشورهایی مانند هلند دارای سهم بالایی از خودروهای الکتریکی هستند، در حالی که برخی کشورها مانند کانادا و اردن با وجود داشتن

ایستگاه‌های شارژ، سهم نسبتاً کمی از خودروهای الکتریکی در بازار دارند، که ممکن است به سیاست‌های دولتی، انگیزه‌های اقتصادی یا زیرساخت‌های دیگر مرتبط باشد.




**شکل ۴.** تعداد خودروهای سبک الکتریکی به ازای هر نقطه شارژ عمومی




**شکل ۵.** نسبت شارژرهای عمومی به ازای هر خودروی برقی، ۲۰۲۰

توسعهٔ گام‌به‌گام در ایران: با توجه به ضوابط و بخشنامه‌های وزارت نیرو دربارهٔ تأمین توان مشترکان پرقدرت، پیشنهاد می‌شود مدل‌های کسب‌وکار بخش خصوصی برای احداث ایستگاه‌های شارژ، به طور شفاف تعریف شود. همچنین، اصلاح تعرفه‌ها و آیین‌نامه‌های اتصال به شبکه برای ظرفیت‌های بالاتر از پنج مگاوات، الزامی به نظر می‌رسد.

در مجموع، با افزایش تقاضای شارژ چه در بخش خصوصی و چه در ناوگان عمومی باید برنامه‌ای جامع برای ارتقای تولید، انتقال و توزیع برق و نیز مدیریت هوشمند بار تدوین شود. موفقیت در برقی‌سازی ناوگان عمومی بدون تأمین زیرساخت مستحکم و مقررات انعطاف‌پذیر ممکن نیست. بنابراین، صنعت برق و رگولاتورهای مرتبط (وزارت نیرو، شرکت توانیر و غیره) باید به‌سرعت، اصلاحات لازم را در آیین‌نامه‌ها، تعرفه‌ها و ظرفیت‌های شبکه صورت دهند تا رشد حمل‌ونقل برقی تسهیل شود.

## محور دوم؛ نقش آیین‌نامه‌ها و مقررات صنعت برق در راستای پاسخ به نیازهای شارژ خودروهای برقی

از مهم‌ترین پیش‌نیازهای توسعهٔ حمل‌ونقل برقی، وجود مقررات و آیین‌نامه‌های شفاف در حوزهٔ تعرفه، اتصال به شبکه، و الزامات فنی برای ایستگاه‌های شارژ است. دولت و وزارت نیرو در ایران در سال‌های اخیر اقداماتی انجام داده‌اند که می‌توان آن‌ها را به چند بخش تقسیم کرد:

### ➢ تعریف چارچوب برای نرخ‌گذاری برق در ایستگاه‌های شارژ

در آیین‌نامهٔ تکمیلی تعرفه‌های برق، بند «و» (جزء ۴-۱۶۰-۱) ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی را مشمول تعرفهٔ «سایر مصارف» می‌داند. به بیان دیگر، تا زمان تصویب تعرفهٔ اختصاصی، ایستگاه‌های شارژ ناگزیر به پرداخت تعرفه‌ای هستند که ممکن است در برخی مواقع از نظر مالی صرفهٔ کافی نداشته باشد.

تعرفه‌های برق و دسته‌بندی «سایر مصارف»:

جدول‌های ۳-۵ مربوط به تعرفه سایر مصارف نشان می‌دهد نرخ انرژی و توان در ساعت‌های پیک و نیمه‌پیک چگونه محاسبه می‌شود. با توجه به نمودار قیمت انرژی در ساعت‌های اوج بار، میان‌بار، و کم‌بار، هزینهٔ تمام‌شده برای ایستگاه‌های شارژ می‌تواند متفاوت باشد.

این نحوهٔ قیمت‌گذاری در کنار عدم تعریف کد تعرفهٔ اختصاصی برای اتوبوس‌های برقی یا تاکسی‌های برقی، یکی از موانع گسترش زیرساخت شارژ عمومی به شمار می‌رود.

**جدول ۳.** تعرفهٔ مشترکان با قدرت بیش از ۳۰ کیلووات

| بهای قدرت (ریال بر کیلووات) | بهای انرژی (ریال بر کیلووات‌ساعت) | | |
|---|---|---|---|
| | ساعت‌های اوج بار | ساعت‌های میان‌باری | ساعت‌های کم‌باری |
| ۲۰۰۰۰۰ | ۱۴۰۰۰ | ۷۰۰۰ | ۳۵۰۰ |

**جدول ۴.** تعرفهٔ سایر مصارف برای مناطق گرم (با دمای ۳۰ درجه و بیشتر)

| متوسط انرژی مصرفی ماهانه (کیلووات‌ساعت در ماه) | قیمت پایه هر کیلووات‌ساعت (ریال) |
|---|---|
| تا ۱۰۰ | ۱۰۰۴ |
| بیش از ۱۰۰ تا ۲۰۰ | ۱۷۶۷ |
| بیش از ۲۰۰ تا ۳۰۰ | ۲۲۷۱ |
| بیش از ۳۰۰ تا ۴۰۰ | ۲۷۸۸ |
| بیش از ۴۰۰ تا ۵۰۰ | ۳۲۹۴ |
| بیش از ۵۰۰ تا ۶۰۰ | ۳۵۴۰ |
| بیش از ۶۰۰ تا ۷۰۰ | ۳۷۶۴ |
| بیش از ۷۰۰ | ۳۹۹۱ |

**جدول ۵.** تعرفهٔ سایر مصارف برای مناطق عادی (با دمای کمتر از ۳۰ درجه)

| متوسط انرژی مصرفی ماهانه (کیلووات‌ساعت در ماه) | قیمت پایه هر کیلووات‌ساعت (ریال) |
|---|---|
| تا ۱۰۰ | ۱۰۰۴ |
| بیش از ۱۰۰ تا ۲۰۰ | ۲۳۵۷ |
| بیش از ۲۰۰ تا ۳۰۰ | ۲۶۶۰ |
| بیش از ۳۰۰ تا ۴۰۰ | ۳۰۵۷ |
| بیش از ۴۰۰ تا ۵۰۰ | ۳۵۸۸ |
| بیش از ۵۰۰ تا ۶۰۰ | ۳۷۸۸ |
| بیش از ۶۰۰ تا ۷۰۰ | ۴۰۳۵ |
| بیش از ۷۰۰ | ۴۵۰۱ |

- **نگاه ویژه به مشترکان با قدرت مصرف بالا**

طبق «بخشنامهٔ وزارت نیرو – محاسبهٔ صورت‌حساب مشترکان با قدرت بیش از یک مگاوات»، از خرداد ۱۴۰۲ مشترکان پرمصرف ملزم شده‌اند انرژی مورد نیاز خود را از طریق بورس انرژی یا قراردادهای دوجانبه تأمین کنند.

این الزام می‌تواند بر ایستگاه‌های شارژ با توان بالا (مثلاً شارژرهای فوق‌سریع یا تأمین برق ناوگان اتوبوس‌های برقی) اثرگذار باشد، چرا که باید قسمتی از برق مصرفی را مستقیم از بازار عمده‌فروشی خریداری کنند. این موضوع، در صورت نبود راهکارهای حمایتی، ممکن است هزینهٔ اولیه سرمایه‌گذاران را بالا ببرد.

- **استانداردهای فنی و حفاظتی**

بهره‌برداری ایمن از ایستگاه‌های شارژ، به‌ویژه در زمینهٔ ولتاژ بالا یا شارژهای سریع، نیازمند تدوین ضوابط فنی و حفاظتی جامع است. مواردی نظیر ظرفیت قراردادی مشترک، شرایط اتصال به شبکه‌های فوق توزیع و توزیع، و دستورالعمل‌های ایمنی برای استفاده عمومی، همگی باید در آیین‌نامه‌ای دقیق و تخصصی ساماندهی شوند.

- **ضرورت بازنگری و تکمیل آیین‌نامهٔ موجود**

شواهد نشان می‌دهد برای ایجاد بستر مناسب به منظور توسعهٔ ناوگان برقی در حمل‌ونقل عمومی، لازم است قوانین مرتبط در بخش برق تکمیل یا بازنگری شود. به عنوان نمونه، تعیین کد تعرفه‌ای مستقل برای اتوبوس‌ها و تاکسی‌های برقی یا ایجاد بسته‌های تشویقی سرمایه‌گذاری می‌تواند انگیزهٔ ورود بخش خصوصی را در این عرصه افزایش دهد. همچنین، باید چارچوب روشنی برای مدیریت بار و تأمین برق در ساعت‌های اوج مصرف ایجاد شود تا زیرساخت برق شهرها از فشار ناگهانی حفظ شود.

در مجموع، آیین‌نامه‌ها و مقررات صنعت برق نقشی کلیدی در شکل‌دهی مدل کسب‌وکار و تسهیل توسعهٔ زیرساخت شارژ دارند. از همین‌رو، حرکت به سمت وضع دستورالعمل‌های شفاف و پایدار، به موازات تدوین مقررات اختصاصی برای حمل‌ونقل عمومی برقی، می‌تواند مسیر گذار به ناوگان برقی را هموارتر کند.

- **تعیین کد تعرفه‌ای مستقل برای اتوبوس و تاکسی‌های برقی**

چنین اقدامی ضمن ایجاد شفافیت بیشتر، اجازه می‌دهد سرمایه‌گذاران با مدل مالی مشخص‌تر وارد این عرصه شوند و بخش عمومی (شهرداری‌ها و شرکت‌های حمل‌ونقل) نیز بتوانند هزینه‌های بهره‌برداری را دقیق‌تر محاسبه کنند.

به طور کلی، می‌توان گفت که آیین‌نامه‌ها و مقررات صنعت برق در ایران هنوز نیازمند اصلاحات و تکمیل است تا پاسخ‌گوی رشد فزاینده تقاضای شارژ خودروهای برقی، به‌ویژه در ناوگان عمومی، باشد. اصلاح نظام تعرفه‌گذاری، حمایت از سرمایه‌گذاری بخش خصوصی، و تبیین استانداردهای فنی اتصال به شبکه مهم‌ترین اقداماتی است که طبق مستندات ارائه‌شده در اسلایدها باید مد نظر مسئولان و سیاست‌گذاران قرار گیرد.

## ۴. نتایج

در بررسی‌های انجام‌شده در مورد انوع چالش‌ها و مشکلات گسترش ناوگان برقی در حمل‌ونقل عمومی مورد بررسی قرار گرفت. ناوگان برقی در حمل‌ونقل عمومی مزایای قابل توجهی همچون کاهش آلایندگی و هزینه‌های سوخت را به همراه دارد، اما هم‌زمان با چالش‌هایی اساسی در حوزهٔ زیرساخت، اقتصاد و مقررات مواجه است. در عین حال، فرصت‌های گوناگونی برای توسعه و همکاری میان بخش‌های مختلف ایجاد می‌شود که در ادامه به هر دو بُعد اشاره می‌شود. فهرست چالش‌های موجود در جدول ۶ ذکر شده است.

**جدول ۶.** فهرست چالش‌ها و فرصت‌های کلیدی در توسعهٔ حمل‌ونقل برقی

| موضوع | چالش‌ها و فرصت‌ها | توضیحات |
|---|---|---|
| چالش‌های فنی و زیرساختی | ظرفیت محدود شبکه در مناطق پرتراکم | ایستگاه‌های شارژ در پایانه‌ها و مراکز شهرها نیازمند توان الکتریکی بالاست که ممکن است باعث افت ولتاژ یا قطعی برق شود. |
| | مدیریت اوج مصرف | افزایش نامنظم تقاضای شارژ می‌تواند اوج مصرف جدیدی برای شبکه ایجاد کند که نیازمند مدیریت هوشمند شارژ و تعرفه‌های زمان‌محور است. |
| چالش‌های اقتصادی و مالی | هزینهٔ ایجاد زیرساخت شارژ | ایجاد ایستگاه‌های شارژ سریع و فوق سریع نیازمند سرمایه‌گذاری در تجهیزات و شبکهٔ توزیع برق است. |
| | خرید برق از بازار عمده‌فروشی | تأمین برق از بورس انرژی می‌تواند هزینه‌های متغیر و غیرقابل پیش‌بینی برای اپراتورها ایجاد کند، مگر با قراردادهای دوجانبه بلندمدت. |
| چالش‌های مقرراتی و قانونی | عدم تعریف کد تعرفهٔ اختصاصی | تعرفه‌های عمومی یا «سایر مصارف» موجب عدم شفافیت سرمایه‌گذاری در ایستگاه‌های شارژ می‌شود. |
| | ضرورت تکمیل دستورالعمل اتصال به شبکه | تدوین دستورالعمل جامع برای استانداردهای حفاظتی، تجهیزات و شرایط قراردادی انشعاب برق ضروری است. |
| فرصت‌های توسعه و همکاری | جذب سرمایه بخش خصوصی | اصلاح تعرفه‌ها و شفافیت قوانین می‌تواند موجب افزایش سرمایه‌گذاری، اشتغال‌زایی و بهبود خدمات شود. |
| | همکاری میان شهرداری‌ها و نهادهای دولتی | برقی‌سازی ناوگان حمل‌ونقل عمومی نیازمند هم‌افزایی میان مدیریت شهری و بخش خصوصی است تا هزینه‌ها کاهش یابد. |
| | ارتقای بهره‌وری انرژی و سلامت عمومی | ناوگان برقی علاوه بر کاهش آلودگی، می‌تواند به عنوان الگویی برای سایر بخش‌های حمل‌ونقل عمل کند. |
| آینده‌نگری و توسعهٔ برقی‌سازی | توجه به ناوگان باری و سنگین | زیرساخت شارژ برای کامیون‌ها و وانت‌های برقی باید در مسیرهای بین‌شهری و مبادی ورودی و خروجی شهرها توسعه یابد. |
| | همگام‌سازی با انرژی‌های تجدیدپذیر | افزایش سهم انرژی خورشیدی و بادی همراه با مدیریت زمان‌بندی شارژ، می‌تواند هزینه‌های برق و آلودگی را کاهش دهد. |

به طور خلاصه، شرایط فعلی و رویکردهای آینده‌نگر نشان می‌دهد حمل‌ونقل عمومی برقی با وجود چالش‌های زیرساختی، مالی و قانونی، ظرفیت آن را دارد که به عنوان یک راهکار کارآمد در کاهش آلودگی و بهبود بهره‌وری انرژی ایفای نقش کند. سیاست‌گذاری منسجم، رفع موانع مقرراتی، و ارتقای زیرساخت برق در کنار همکاری همه‌جانبه ذی‌نفعان می‌تواند روند عملیاتی شدن این راهکار را شتاب بخشد.

## ۵. نتیجه‌گیری

نتایج بررسی منابع و مطالعات میدانی نشان می‌دهد استقرار موفق ناوگان حمل‌ونقل برقی، شامل اتوبوس‌ها، تاکسی‌ها و کامیون‌های سبک، مستلزم همکاری نزدیک میان بازیگران حوزهٔ برق و بخش حمل‌ونقل است. بخش برق باید ظرفیت تولید، انتقال و توزیع خود را متناسب با الگوی جدید تقاضا که تحت‌تأثیر شارژ وسایل نقلیهٔ برقی خواهد بود، ارتقا دهد. این تحول در مقیاس وسیع می‌تواند الگوی سنتی مصرف برق را متحول کند و سبب ایجاد پیک‌های ناگهانی شود. بنابراین، هوشمندسازی شارژ از طریق اعمال تعرفه‌های زمان‌محور و بهره‌گیری از فناوری‌های مدیریت بار، ازجمله راهکارهای کلیدی برای جلوگیری از فشار مضاعف بر شبکه محسوب می‌شود. در غیر این‌صورت، مشکلاتی همچون افت ولتاژ، خاموشی‌های موضعی یا نیاز به سرمایه‌گذاری‌های سنگین در زیرساخت برق اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. مرور آیین‌نامه‌های جاری صنعت برق نشان می‌دهد برای توسعهٔ ایستگاه‌های شارژ و بهره‌برداری از ناوگان برقی، اصلاحات مقرراتی و تعرفه‌ای ضروری است. این اصلاحات شامل بازنگری در ساختار تعرفه‌ها، تعریف کد تعرفهٔ مخصوص برای ناوگان عمومی برقی و تکمیل آیین‌نامه‌های فنی اتصال به شبکه است. در صورت ادامه استفاده از تعرفه‌های عمومی یا دسته‌بندی آن تحت عنوان «سایر مصارف»، جذابیت اقتصادی برای سرمایه‌گذاران در ایجاد زیرساخت‌های شارژ عمومی کاهش خواهد یافت و روند نفوذ حمل‌ونقل برقی به‌کندی پیش خواهد رفت.

مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد ناوگان برقی در مقایسه با وسایل نقلیهٔ سنتی از نظر اقتصادی به‌صرفه‌تر است، به‌ویژه در بلندمدت. از سوی دیگر، کاهش آلایندگی هوا و بهبود کارایی انرژی ازجمله پیامدهای مثبت این تغییر است که به بهبود کیفیت زندگی شهری کمک خواهد کرد. این ترکیب از مزایا، توجیه قوی برای اعمال اصلاحات ساختاری و سیاست‌های حمایتی در دو

بخش انرژی و حمل‌ونقل ایجاد می‌کند. با این‌حال، در کشورهای درحال‌توسعه، چالش‌هایی نظیر کیفیت پایین شبکهٔ توزیع و کمبود منابع مالی، موانع عمده‌ای محسوب می‌شوند. این کشورها برای توسعهٔ ناوگان برقی نیازمند سرمایه‌گذاری‌های کلان و همکاری چندجانبه میان دولت، بخش خصوصی و نهادهای مالی بین‌المللی هستند.

ادغام گستردهٔ ناوگان عمومی برقی نباید بدون برنامه‌ریزی دقیق و به صورت ضربتی انجام شود. تجربهٔ کشورهای پیشرو مانند چین، برخی کشورهای اروپایی و ایالات متحده نشان داده است که توسعهٔ گام‌به‌گام و پایش مداوم شرایط شبکه، علاوه بر کاهش ریسک‌های سرمایه‌گذاری، پذیرش اجتماعی و اقتصادی این تحول را نیز تسهیل خواهد کرد. در این راستا، برخی از اقدامات پیشنهادی شامل بازنگری ساختار تعرفه‌ای، تدوین کد تعرفهٔ مستقل، توسعهٔ ایستگاه‌های شارژ، مدیریت هوشمند بار، تقویت مقررات فنی و ارتقای استانداردهای ایمنی است. در زمینهٔ اصلاح ساختار تعرفه‌ای، پیشنهاد می‌شود که وزارت نیرو و نهادهای قانون‌گذار تعرفه‌ای اختصاصی برای ناوگان حمل‌ونقل عمومی برقی، به‌ویژه اتوبوس‌ها و تاکسی‌ها، تعریف کنند. این اقدام علاوه بر ایجاد شفافیت در هزینه‌های بهره‌برداری، انگیزهٔ سرمایه‌گذاران خصوصی را نیز افزایش خواهد داد. همچنین، اعمال تعرفه‌های زمان‌محور (ToU) با نرخ‌های ارزان‌تر در ساعت‌های کم‌بار می‌تواند به کاهش هزینهٔ برق برای اپراتورهای ناوگان برقی و جلوگیری از شکل‌گیری پیک‌های جدید کمک کند.

در حوزهٔ توسعهٔ زیرساخت، نوسازی و تقویت پست‌های فوق توزیع برای پاسخ‌گویی به نیاز بار بالا در پایانه‌های اتوبوس یا مسیرهای پرتردد درون‌شهری ضروری است. همچنین، ایجاد مکانیزم‌های تشویقی سرمایه‌گذاری، مانند اعطای تسهیلات ارزان‌قیمت، معافیت‌های مالیاتی و امکان دریافت برق از بورس انرژی با نرخ ترجیحی در فاز اولیه، ازجمله راهکارهایی است که می‌تواند مشارکت بخش خصوصی را در احداث ایستگاه‌های شارژ سریع و فوق سریع تسهیل کند. به‌کارگیری فناوری شارژ هوشمند یکی دیگر از راهکارهای مؤثر در مدیریت بار است. نصب شارژرهای مجهز به سیستم‌های کنترل از راه دور و قابلیت برنامه‌ریزی، این امکان را فراهم می‌کند که فرایند شارژ با ساعت‌های کم‌بار شبکه هماهنگ شود. همچنین، این فناوری‌ها امکان بهره‌گیری از الگوهای شارژ واکنش‌گرا (Demand Response) را نیز فراهم می‌کنند. در همین راستا، پیشنهاد می‌شود که پروژه‌های پایلوت V2G (تعامل خودرو و شبکه) در شهرهای بزرگ اجرا شود تا کارایی این فناوری و نیازهای زیرساختی آن ارزیابی شود.

برای تقویت مقررات فنی اتصال به شبکه، تدوین دستورالعمل جامعی برای ایستگاه‌های شارژ ضروری است. این دستورالعمل باید شامل جزئیاتی همچون ظرفیت قراردادی انشعاب، سیستم‌های حفاظتی، مدیریت حرارتی شارژرهای سریع و فوق سریع، الزامات ولتاژ بالا و پروتکل‌های اتصال باشد. همچنین، شرکت‌های توزیع باید ملزم به نظارت و صدور گواهی تطابق شوند تا از بروز مشکلاتی نظیر اضافه‌بار یا افت ولتاژ موضعی جلوگیری شود. در زمینهٔ همکاری میان بخش‌های دولتی و خصوصی، توسعهٔ مدل‌های مشارکت عمومی ـ خصوصی (PPP) می‌تواند راهگشا باشد. این مدل می‌تواند بخشی از بار مالی دولت را کاهش داده و روند پیاده‌سازی زیرساخت‌های حمل‌ونقل برقی را تسریع کند. همچنین، راه‌اندازی پلتفرم‌های جامع اطلاعاتی توسط وزارت نیرو و شهرداری‌ها، به‌اشتراک‌گذاری داده‌های ترافیکی، نقاط با اولویت نصب شارژر و ظرفیت شبکه را برای سرمایه‌گذاران و شرکت‌های حمل‌ونقل تسهیل خواهد کرد. در کنار تمامی این اقدامات، همگام‌سازی توسعهٔ ناوگان برقی با انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند نقش مهمی در کاهش آلایندگی ایفا کند. توسعهٔ نیروگاه‌های خورشیدی و بادی، به‌ویژه در مناطق گرم و آفتابی، می‌تواند مزایای قابل توجهی برای شبکه و محیط زیست به همراه داشته باشد. همچنین، طراحی سازوکارهای خرید برق سبز از طریق قراردادهای خرید تضمینی (PPA) یا بورس انرژی، علاوه بر کاهش انتشار آلاینده‌های چرخهٔ عمر، گامی مهم در جهت تحقق اهداف کربن‌زدایی خواهد بود.

در نهایت، روند توسعهٔ ناوگان حمل‌ونقل برقی باید گام‌به‌گام و تحت نظارت مستمر صورت گیرد. در مرحلهٔ نخست، تمرکز بر کلان‌شهرها و شهرهای پرجمعیت می‌تواند بیشترین بازدهی زیست‌محیطی و اقتصادی را به همراه داشته باشد. علاوه بر این، سازمان‌های مسئول باید به طور مداوم شاخص‌هایی نظیر ظرفیت شبکه، کیفیت ولتاژ، میزان آمادگی زیرساختی و میزان نفوذ ناوگان برقی را پایش کنند و بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، سیاست‌های اجرایی را اصلاح یا توسعه دهند.

## منابع


1. Global EV Outlook 2023 – Analysis - IEA [Internet]. [cited 2025 Mar 30]. Available from: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023
2. Update on electric vehicle costs in the United States through 2030 - International Council on Clean Transportation [Internet]. [cited 2025 Mar 30]. Available from: https://theicct.org/publication/update-on-electric-vehicle-costs-in-the-united-states-through-2030/
3. Policies to promote electric vehicle deployment – Global EV Outlook 2021 – Analysis - IEA [Internet]. [cited 2025 Mar 30]. Available from: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/policies-to-promote-electric-vehicle-deployment
4. Figenbaum E. Perspectives on Norway's supercharged electric vehicle policy. Environ Innov Soc Transit. 2017 Dec 1;25:14–34.
5. IRENA, Charging ES, Hosts S. Plug-In Electric Vehicle Handbook for Public Charging. The National Renewable Energy Laboratory (NREL), [Internet]. 2019 [cited 2025 Mar 30];DOE/GO-102:2–20. Available from: www.cleancities.energy.gov%0Awww.irena.org
6. Pamidimukkala A, Kermanshachi S, Rosenberger JM, Hladik G. Barriers and motivators to the adoption of electric vehicles: A global review. Green Energy and Intelligent Transportation. 2024 Apr 1;3(2):100153.
7. Razmjoo A, Nezhad MM, Kaigutha LG, Marzband M, Mirjalili S, Pazhoohesh M, et al. Investigating Smart City Development Based on Green Buildings, Electrical Vehicles and Feasible Indicators. Sustainability 2021, Vol 13, Page 7808 [Internet]. 2021 Jul 13 [cited 2025 Feb 25];13(14):7808. Available from: https://www.mdpi.com/2071-1050/13/14/7808/htm
8. Gnann T, Plötz P, Kühn A, Wietschel M. Modelling market diffusion of electric vehicles with real world driving data – German market and policy options. Transp Res Part A Policy Pract. 2015 Jul 1;77:95–112.
9. Hu Y, Wang Z, Li X. Impact of policies on electric vehicle diffusion: An evolutionary game of small world network analysis. J Clean Prod. 2020 Aug 20;265:121703.
10. Kapustin NO, Grushevenko DA. Long-term electric vehicles outlook and their potential impact on electric grid. Energy Policy. 2020 Feb 1;137:111103.
11. Mo T, Li Y, Lau KT, Poon CK, Wu Y, Luo Y. Trends and Emerging Technologies for the Development of Electric Vehicles. Energies 2022, Vol 15, Page 6271 [Internet]. 2022 Aug 28 [cited 2025 Feb 25];15(17):6271. Available from: https://www.mdpi.com/1996-1073/15/17/6271/htm
12. Mo T, Lau KT, Li Y, Poon CK, Wu Y, Chu PK, et al. Commercialization of Electric Vehicles in Hong Kong. Energies 2022, Vol 15, Page 942 [Internet]. 2022 Jan 27 [cited 2025 Feb 25];15(3):942. Available from: https://www.mdpi.com/1996-1073/15/3/942/htm
13. Novotny A, Szeberin I, Kovács S, Máté D. National Culture and the Market Development of Battery Electric Vehicles in 21 Countries. Energies 2022, Vol 15, Page 1539 [Internet]. 2022 Feb 19 [cited 2025 Feb 25];15(4):1539. Available from: https://www.mdpi.com/1996-1073/15/4/1539/htm
14. Wang S, Li J, Zhao D. The impact of policy measures on consumer intention to adopt electric vehicles: Evidence from China. Transp Res Part A Policy Pract. 2017 Nov 1;105:14–26.
15. Lou Y, Wang W, Yang X. Customers' Attitude on New Energy Vehicles' Policies and Policy Impact on Customers' Purchase Intention. Energy Procedia. 2017 May 1;105:2187–93.
16. Ashraf Javid M, Ali N, Abdullah M, Campisi T, Shah SAH. Travelers' Adoption Behavior towards Electric Vehicles in Lahore, Pakistan: An Extension of Norm Activation Model (NAM) Theory. J Adv Transp [Internet]. 2021 Jan 1 [cited 2025 Feb 25];2021(1):7189411. Available from: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2021/7189411
17. Hsu CW, Fingerman K. Public electric vehicle charger access disparities across race and income in California. Transp Policy (Oxf). 2021 Jan 1;100:59–67.

**Urban Development Policy Making**

Home Page: https://judpm.ir

Online ISSN: 3092-6564

# Assessment and Feasibility of Waste-to-Energy Conversion in Developing Country Metropolises (Case Study: Iran)

**Helia Sadat Hosseini Shekarabi[1*] | Shahla Razaghi[2] | Mahmood Abdoos[3]**

1. Corresponding Author, Head of the Biomass Power Plant Development Office, Renewable Energy and Electricity Efficiency Organization (SATBA), Ministry of Energy, Tehran, Iran. Email: h.hosseini.sh@gmail.com
2. Renewable Energy and Electricity Efficiency Organization (SATBA), Ministry of Energy, Tehran, Iran. Email: razaghi1988@gmail.com
3. School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mahmood.abdoos@ut.ac.ir

## ARTICLE INFO

**Article type:**
Research Paper

**Article History:**
Received 01 January 2025
Revised 14 January 2025
Accepted 17 February 2025
Published Online 05 April 2025

**Keywords:**
Renewable energy,
waste-to-energy,
electricity generation,
biomass resources,
municipal solid waste,
incinerator,
anaerobic digester.

## ABSTRACT

Urbanization and rapid population growth in cities have led to the production of significant amounts of municipal waste and have created numerous environmental problems. Meanwhile, by using modern technologies, including waste to energy, in addition to solving environmental problems, it is possible to produce energy and save on fossil fuel consumption. Biomass resources, including municipal solid waste, agricultural waste, livestock waste, and municipal and industrial wastewater, which are considered as renewable energy sources, have high potential for electricity generation; So as each ton of municipal solid waste per day, with a calorific value of 6,000 kj/kg while using incineration technology, has the potential to produce 466 kWh electricity per day. Likewise, it is expected to generate 280 kWh electricity from anaerobic digestion of one ton of organic waste per day. Producing this amount of electricity, in addition to saving on fossil fuels, also reduces greenhouse emissions such as methane and $CO_2$. Therefore, it seems necessary to use this potential to produce energy and solve environmental problems caused by landfilling.

**Cite this article:** Sadat Hosseini Shekarabi, H.; Razaghi, Sh. & Abdoos, M. (2025). Assessment and Feasibility of Waste-to-Energy Conversion in Developing Country Metropolises (Case Study: Iran). *Urban Development Policy Making*, 2 (1), 49-71. DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.512670.1021

© Helia Sadat Hosseini Shekarabi, Shahla Razaghi, Mahmood Abdoos
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.512670.1021

## 1. Introduction

In 2022, the total energy produced in the world reached 622 EJ, 80% of which was supplied by fossil fuels, while coal, oil, and gas were the main sources. Meanwhile, the share of bioenergy was only 9% of the total energy produced. In 2023, electricity generated from renewable sources was 8,931 TWh, 47% of which was supplied by hydropower and 26% by wind.

Bioenergy, as the fourth largest source of renewable electricity, produced 697 TWh (equivalent to 8%) of that. In 2021, energy supply from municipal and industrial waste was 2.7 EJ, 56% of which was provided using municipal solid waste.

In Iran, the capacity of electricity generation from biomass sources was about 21 MW at the end of December 2024 with five biomass power plants in operation, including two incinerations, two anaerobic digestions (sewage), and one landfill.

## 2. Literature review

This type of technology generates energy by heating waste in the presence or absence of auxiliary agents. The main advantage of thermochemical methods is a significant reduction in waste volume and a faster rate of energy production. Types of thermochemical technologies include: combustion (waste incineration), gasification, pyrolysis and plasma.

Biochemical and thermochemical technologies have advantages and disadvantages when compared to each other. The efficiency of energy conversion (energy produced per unit weight of input waste), the reduction in the amount of landfilled waste and the emission of pollutants are the three main aspects in the technical comparison of existing methods of energy recovery from waste. The efficiency of electricity production in each of these methods varies depending on the composition of the input waste and the technology used.

## 3. Methodology

The most common waste-to-energy technologies include landfill, anaerobic digestion, waste incineration, gasification and pyrolysis. Landfill and anaerobic digestion plants are called biochemical technologies, while the others are thermochemical.

## 4. Results

Several criteria are involved in selecting the most suitable landfill for a city, some of which are mentioned below. The task of selecting a site within a specific study radius from the waste generating center (for example, the city center) is based on the most economical distance of transporting waste from the city to the landfill, and different sites are identified on the map in accordance with environmental, social and economic criteria and unsuitable sites are screened. Then, from among the various options, the one that scores more points than the others is selected as the most suitable site.

In a sanitary-engineered landfill, the following environmental criteria must be observed:

- Waste buried in the landfill should not cause unpleasant odors to spread in the surrounding environment and air pollution.
- Waste buried should be kept away from animals, insects and vermin that can cause waste to spread to the surrounding environment and also spread microbial contamination.
- Noise pollution from waste handling machinery and machinery used in the landfill should be minimal and the landfill should not cause visual pollution.
- Gases produced in the landfill, such as methane and carbon dioxide, should be controlled and ventilated.
- Leachate produced in the landfill should be controlled, collected and treated so as not to pollute surface and groundwater.

## 5. Discussions

Given the human need to eliminate waste, there have been different methods for disposing of waste and municipal waste from time immemorial, each of which naturally has its advantages and disadvantages. Among these technologies, in Iran, waste incinerators are used only for the purpose of waste disposal. In a way, it can be stated that the technology of energy extraction by thermochemical method is somewhat unknown in Iran, and in most Iranian cities, landfills are used to dispose of waste, which is not a very suitable method and will have adverse environmental consequences, the most important of which is water and soil pollution by leachate produced at the landfill.

Given that a high percentage of municipal solid waste produced in Iran is wet (organic), it can be stated that the necessary conditions for the growth of microorganisms are well provided and the biogas waste disposal method will be more efficient than other technologies. Because, due to the high moisture content in wet waste, incineration technology, an additional cost is required to remove moisture and pre-processing to achieve a uniform heat value for waste incineration. By constructing and using these waste disposal centers in the country, a portion of electrical energy can be provided for domestic and industrial uses, which in addition to economic savings for energy production, creates job opportunities and attracts specialists and workers in this field and strengthens economic infrastructure in Iran. Considering the state of waste management in the country, it can be concluded that our

country has not yet addressed waste management methods in principle and needs to develop the necessary strategy for waste management, such as; avoiding waste production, reducing waste production, reusing, recycling and recovering materials and energy, etc. This is important by gaining the satisfaction and participation of stakeholders, increasing public awareness, improving technology, optimizing methods, and increasing participation in formulating and implementing executive guidelines and criteria in carrying out waste management activities. It is also certain that by utilizing the experiences of successful countries in waste management that have successfully overcome waste issues and problems after years of trial and error, our country can also be successful in this field. In this article, the importance of managing municipal solid waste with an energy recovery and waste disposal approach was examined. Given the limited resources of fossil fuels and the environmental pollution caused by burning these resources, which leads to an increase in greenhouse gases and global warming, waste management can be considered as one of the important sources of renewable and clean energy in the future, so that many developed countries look at the issue of waste management with a sustainable development perspective.

## 6. Conclusion

The use of waste-to-energy technologies, in addition to solving environmental problems caused by traditional waste management, also contributes significantly to the diversification of countries' energy supply portfolios. The expansion of the use of these technologies for energy supply in developed and some developing countries in recent years and the successful experiences in countries such as China, Japan and European countries confirm the effectiveness of the mentioned technologies. Although there are still concerns about the pollution caused by some types of waste-to-energy technologies in societies, with the maturity of technology and the use of new methods to eliminate the pollution caused, this concern has been significantly eliminated. There are also challenges in the development of waste-to-energy power plants, including the supply of drinking water, the supply of power plant feed under appropriate conditions, and the shortage of skilled labor, which can be solved with the cooperation of waste authorities and the localization of technologies. In upstream documents, such as the Seventh Development Plan, the Ministry of Energy is only required to purchase electricity from waste, so that the purchase price of electricity is an attraction for realizing investment in this area. However, it seems that the development of a national waste management program by the Environmental Protection Organization in cooperation with the Ministry of Interior will play a more key role. In this regard, the conversion of waste into energy, in addition to completing the waste life cycle and generating electricity, can be considered as a package that requires constructive interactions between the Renewable Energy Organization, the Municipalities and Rural Organization, and the Environmental Protection Organization. Considering the existing capacities in Iran and the daily production of 58 thousand tons of urban and rural waste nationwide, achieving the vision of producing 200 megawatts of electricity from urban solid waste can be achieved with the cooperation and serious determination of the responsible agencies. In terms of implementing numerous projects and localizing technology and training specialized personnel, waste management will move away from landfill in the future and reduce the major environmental problems created.

پیشرفت شهری
سیاستگذاری
سایت نشریه: https://judpmi.ir
شاپا الکترونیکی: ۶۵۶۴-۳۰۹۲

# ارزیابی و امکان‌سنجی تبدیل پسماند به انرژی در کلان‌شهرهای کشور درحال‌توسعه (مطالعهٔ موردی: ایران)

حلیا سادات حسینی شکرابی[۱*] | شهلا رزاقی[۲] | محمود عبدوس[۳]

۱. نویسندهٔ مسئول، مدیرکل دفتر توسعهٔ نیروگاه‌های زیست‌توده، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا)، وزارت نیرو. رایانامه: h.hosseini.sh@gmail.com
۲. کارشناس مطالعات فنی و ارزیابی اقتصادی، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا)، وزارت نیرو. رایانامه: razaghi1988@gmail.com
۳. دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mahmood.abdoos@ut.ac.ir

## اطلاعات مقاله

**نوع مقاله:**
پژوهشی

**تاریخ‌های مقاله:**
**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۳/۰۹/۱۲
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۳/۱۰/۲۵
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۳/۱۱/۲۹
**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۴/۰۱/۱۵

**کلیدواژه:**
انرژی تجدیدپذیر،
P2E،
تولید برق،
زیست‌توده،
پسماند جامد شهری،
زباله‌سوز،
هاضم بی‌هوازی.

## چکیده

توسعهٔ شهرنشینی و رشد سریع جمعیت شهرها به تولید میزان قابل توجهی پسماند شهری منجر شده و معضلات زیست‌محیطی متعددی را به وجود آورده است که دیگر نمی‌توان همانند گذشته آن‌ها را در دفنگاه‌ها دفن کرد. در این میان، با استفاده از فناوری‌های مدرن از جمله تبدیل پسماند به انرژی، علاوه بر رفع مشکلات زیست‌محیطی می‌توان به تولید انرژی پرداخت و در مصرف سوخت‌های فسیلی صرفه‌جویی کرد. منابع زیست‌توده شامل پسماند جامد شهری، زائدات کشاورزی، فضولات دامی و فاضلاب‌های شهری و صنعتی، که به عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر انرژی محسوب می‌شوند، از پتانسیل بالایی برای تولید انرژی الکتریکی برخوردار هستند؛ به طوری که هر تن پسماند جامد شهری در روز، با ارزش حرارتی ۶ هزار کیلوژول برکیلوگرم و با به‌کارگیری فناوری زباله‌سوزی، پتانسیل تولید حدود ۴۶۶ کیلووات ساعت برق در روز را دارد. به همین‌ترتیب، انتظار می‌رود با استفاده از بیوگاز حاصل از یک تن پسماند آلی که توسط فرایند هضم بی‌هوازی تولید شده است، حدود ۲۸۰ کیلووات ساعت برق در روز تولید شود. تولید این میزان برق علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی، موجب کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نظیر متان و $CO_2$ نیز می‌شود. بنابراین، استفاده از این پتانسیل برای تولید انرژی و همچنین اهمیت رفع مشکلات زیست‌محیطی ناشی از دفن پسماندها، ضروری به نظر می‌رسد.

**استناد:** حسینی شکرابی، حلیا سادات؛ رزاقی، شهلا و عبدوس، محمود (۱۴۰۴). ارزیابی و امکان‌سنجی تبدیل پسماند به انرژی در کلان‌شهرهای کشور درحال‌توسعه (مطالعهٔ موردی: ایران). *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۲ (۱) ۴۹-۷۱.
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.512670.1021

© حلیا سادات حسینی شکرابی، شهلا رزاقی، محمود عبدوس
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.512670.1021

## ۱. مقدمه

در سال ۲۰۲۲ میلادی مجموع انرژی تولیدشده در جهان به ۶۲۲ اگزاژول رسید که ۸۰ درصد آن توسط سوخت‌های فسیلی تأمین شده و زغال سنگ، نفت و گاز اصلی‌ترین منابع تولید این انرژی بوده‌اند. اگرچه منابع انرژی تجدیدپذیر در یک دهۀ گذشته رشد ۳۰ درصدی داشته‌اند، اما ۸۹ اگزاژول از این انرژی توسط آن‌ها تولید شده است [۱–۳]. در این میان، سهم بیوانرژی تنها ۹ درصد از کل انرژی تولیدشده بوده است. جدول ۱ سهم منابع مختلف تولید انرژی در سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲ را نشان می‌دهد [۴].

**جدول ۱.** مجموع انرژی تولیدشده در جهان به تفکیک منشأ (تمام واحدها اگزاژول است)

| سال | مجموع | زغال سنگ | نفت | گاز | هسته ای | تجدیدپذیر | بیوانرژی (٪) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲۰۱۳ | ۵۵۶ | ۱۶۳ | ۱۷۷ | ۱۲۱ | ۲۷ | ۶۷ | ۸/۴۳ |
| ۲۰۱۴ | ۵۶۳ | ۱۶۵ | ۱۸۰ | ۱۲۱ | ۲۸ | ۶۹ | ۸/۴۱ |
| ۲۰۱۵ | ۵۶۴ | ۱۶۱ | ۱۸۲ | ۱۲۲ | ۲۸ | ۷۰ | ۸/۴۴ |
| ۲۰۱۶ | ۵۶۹ | ۱۵۶ | ۱۸۵ | ۱۲۷ | ۲۸ | ۷۲ | ۸/۵۱ |
| ۲۰۱۷ | ۵۸۱ | ۱۵۹ | ۱۸۸ | ۱۳۰ | ۲۹ | ۷۵ | ۸/۵۰ |
| ۲۰۱۸ | ۵۹۵ | ۱۶۲ | ۱۸۹ | ۱۳۶ | ۳۰ | ۷۸ | ۸/۵۵ |
| ۲۰۱۹ | ۶۰۲ | ۱۶۲ | ۱۹۱ | ۱۳۹ | ۳۰ | ۸۱ | ۸/۵۸ |
| ۲۰۲۰ | ۵۸۰ | ۱۵۸ | ۱۷۳ | ۱۳۸ | ۲۹ | ۸۳ | ۸/۹۷ |
| ۲۰۲۱ | ۶۱۴ | ۱۶۹ | ۱۸۳ | ۱۴۶ | ۳۱ | ۸۶ | ۸/۷۵ |
| ۲۰۲۲ | ۶۲۲ | ۱۷۲ | ۱۸۸ | ۱۴۴ | ۲۹ | ۸۹ | ۸/۷۶ |

مطابق جدول ۱، بیان می‌شود که مجموع انرژی مصرف‌شده در جهان در سال ۲۰۲۲ به ۴۲۲ اگزاژول رسید که منشأ ۸۲ درصد از آن سوخت‌های فسیلی بوده است. محصولات نفتی اصلی‌ترین منابع تولید انرژی بوده و سهم آن‌ها ۱۶۸ اگزاژول بوده است که ۱۰۴ اگزاژول از آن به شکل برق و گرما مصرف شده است. با توجه به جدول ۲ بیان می‌شود که سهم انرژی مصرف‌شده با منشأ تجدیدپذیر (بدون در نظر گرفتن انرژی زیستی) رشد پایدار خود را حفظ کرده و به ۲/۸۷ اگزاژول رسیده که نسبت به سال ۲۰۱۲ دو برابر شده است [۵]. بیوانرژی نیز با سهم ۳۹ اگزاژولی، یک مؤلفۀ قابل ملاحظه در این آمار است. جدول ۲ مجموع انرژی مصرف‌شده در جهان را به تفکیک در سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد [۴]

**جدول ۲.** مجموع انرژی مصرف‌شده در جهان به تفکیک منشأ (تمام واحدها اگزاژول است)

| سال | زغال سنگ | محصولات نفتی | گاز طبیعی | دیگر تجدیدپذیرها | سوخت‌های زیستی | برق و گرما | مجموع |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲۰۱۳ | ۴۷ | ۱۵۵ | ۵۹ | ۱/۴۸ | ۴۲ | ۸۲ | ۳۶۸ |
| ۲۰۱۴ | ۴۷ | ۱۵۷ | ۵۹ | ۱/۵۹ | ۴۲ | ۸۴ | ۳۹۱ |
| ۲۰۱۵ | ۴۶ | ۱۶۱ | ۵۹ | ۱/۷۳ | ۴۲ | ۸۴ | ۳۹۴ |
| ۲۰۱۶ | ۴۴ | ۱۶۴ | ۶۱ | ۱/۸۸ | ۴۲ | ۸۷ | ۳۹۹ |
| ۲۰۱۷ | ۴۲ | ۱۶۸ | ۶۳ | ۲/۰۲ | ۴۲ | ۹۰ | ۴۰۷ |
| ۲۰۱۸ | ۴۰ | ۱۷۰ | ۶۷ | ۲/۲۱ | ۴۳ | ۹۴ | ۴۱۷ |
| ۲۰۱۹ | ۳۹ | ۱۷۱ | ۶۸ | ۲/۳۳ | ۴۴ | ۹۵ | ۴۱۹ |
| ۲۰۲۰ | ۳۸ | ۱۵۵ | ۶۷ | ۲/۵۰ | ۴۳ | ۹۵ | ۴۰۲ |
| ۲۰۲۱ | ۳۸ | ۱۶۴ | ۷۲ | ۲/۶۸ | ۴۴ | ۱۰۱ | ۴۲۲ |
| ۲۰۲۲ | ۳۷ | ۱۶۸ | ۷۱ | ۲/۸۷ | ۳۷ | ۱۰۴ | ۴۲۲ |

## ۲. پیشینهٔ پژوهش

### ۲–۱. وضعیت انرژی‌های تجدیدپذیر

در سال ۲۰۲۳ برق تولیدشده از منابع تجدیدپذیر ۸۹۳۱ تراوات ساعت بوده که ۴۷ درصد آن توسط نیروگاه‌های برق‌آبی و ۲۶ درصد آن توسط نیروگاه‌های بادی تأمین شده است [۱]. بیوانرژی به عنوان چهارمین منبع بزرگ تأمین برق تجدیدپذیر، تولید ۶۹۷ تراوات ساعت (معادل ۸ درصد) از این برق را به عهده داشته است. گرچه بیوانرژی رشد پیدا کرده، اما سهم نسبی آن در مقایسه با باد و خورشید که به‌سرعت در یک دههٔ گذشته توسعه یافته‌اند، ثابت بوده است [۴ و ۶].

**جدول ۳.** برق تجدیدپذیر تولیدشده در جهان (تمام مقادیر برحسب تراوات ساعت است)

| سال | مجموع | بیوانرژی | برق‌آبی | خورشیدی | بادی | دیگر تجدیدپذیرها | سهم بیوانرژی (٪) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲۰۰۰ | ۲۸۵۸ | ۱۵۴ | ۲۶۲۹ | ۱ | ۳۱ | ۴۴ | ۵ |
| ۲۰۰۵ | ۳۲۸۰ | ۲۱۱ | ۲۹۱۲ | ۴ | ۱۰۴ | ۴۹ | ۶ |
| ۲۰۱۰ | ۴۱۹۲ | ۳۲۵ | ۳۴۲۸ | ۳۲ | ۳۴۶ | ۶۰ | ۸ |
| ۲۰۱۵ | ۵۵۱۹ | ۴۷۷ | ۳۸۸۴ | ۲۵۶ | ۸۳۰ | ۷۳ | ۹ |
| ۲۰۲۰ | ۷۴۸۴ | ۶۰۹ | ۴۳۴۴ | ۸۵۳ | ۱۵۹۱ | ۸۶ | ۸ |
| ۲۰۲۱ | ۷۹۲۷ | ۶۵۹ | ۴۲۷۶ | ۱۰۵۶ | ۱۸۴۹ | ۸۷ | ۸ |
| ۲۰۲۲ | ۸۴۸۵ | ۶۷۶ | ۴۲۹۸ | ۱۳۲۳ | ۲۰۹۹ | ۸۹ | ۸ |
| ۲۰۲۳ | ۸۹۳۱ | ۶۹۷ | ۴۲۱۰ | ۱۶۳۱ | ۲۳۰۴ | ۹۰ | ۸ |

در سال ۲۰۲۲، ۱/۳۳ اگزاژول انرژی با منشأ تجدیدپذیر به شکل گرما تولید شده که ۹۶ درصد از آن توسط منابع زیست‌توده تأمین شده است. فناوری‌های زمین‌گرمایی و حرارت خورشیدی سهم اندکی در تولید گرما داشته‌اند [۵]. کشورهای اروپایی تقریباً ۸۰ درصد از گرمای تولیدشده از منابع تجدیدپذیر را در جهان تولید کرده‌اند که ۹۵ درصد از آن توسط منابع زیست‌توده تأمین شده است [۷].

### ۲–۲. تبدیل پسماند به انرژی

در سال ۲۰۲۱ تأمین انرژی از پسماند شهری و صنعتی ۲/۷ اگزاژول بوده که ۵۶ درصد از آن با استفاده از پسماند جامد شهری تأمین شده است. براساس اطلاعات منتشرشده توسط کنفدراسیون نیروگاه‌های تبدیل پسماند به انرژیِ اروپا، از سال ۲۰۲۱ نزدیک به ۵۰۰ نیروگاه تبدیل پسماند به انرژی در اروپا به بهره‌برداری رسیده است که حدود ۱۰۳ میلیون تن پسماند جامد شهری را پردازش می‌کنند [۸]. انرژی تولیدشده از این فرایند برق ۲۱ میلیون شهروند اروپایی و گرمای مورد نیاز ۱۷ میلیون شهروند را تأمین می‌کند [۷].

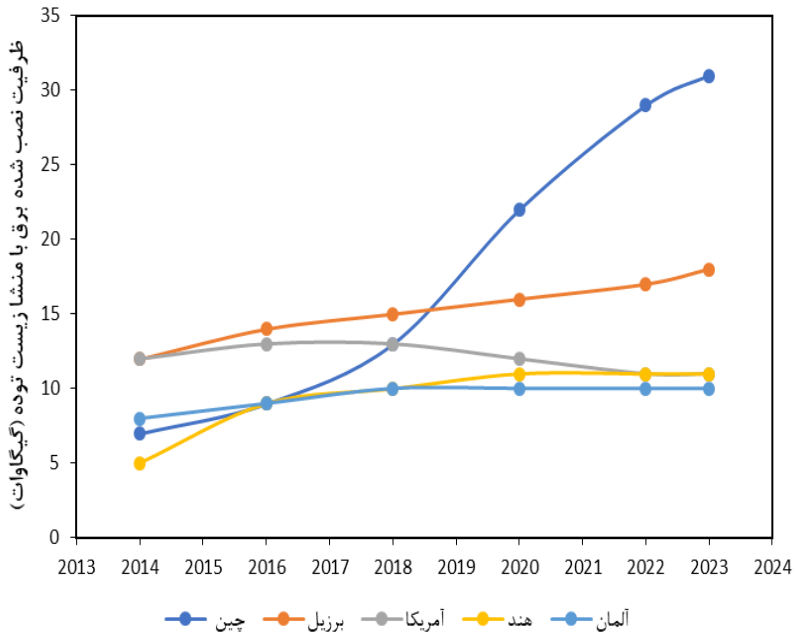
فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی به دلیل پتانسیل آن‌ها در کاهش اثرات زیست‌محیطی، به‌خصوص کاهش انتشار گاز کربن دی‌اکسید، شناخته‌شده هستند [۱]. با استفاده از پسماند به عنوان منبع انرژی، نیروگاه‌های تبدیل پسماند به انرژی می‌توانند نیاز به سوخت‌های فسیلی برای تولید برق را کاهش دهند. بسته به نوع سوخت فسیلی جایگزین، حدود ۱۰ تا ۵۶ میلیون تن صرفه‌جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی اتفاق خواهد افتاد که به کاهش انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید به میزان ۲۲ تا ۴۴ میلیون تن منجر می‌شود.

با تبدیل پسماند به انرژی، نیروگاه‌هایی که مبتنی بر این فناوری فعالیت می‌کنند باعث کاهش وابستگی به دفن پسماند و توسعهٔ لندفیل‌ها، حفظ زمین‌های با ارزش و کاهش انتشار گاز متان می‌شوند [۷].

ظرفیت تولید برق از منابع زیست‌توده به طور پیوسته طی یک دههٔ گذشته رشد یافته است و از ۸۸ گیگاوات در سال ۲۰۱۴ به ۱۵۰/۳ گیگاوات در سال ۲۰۲۳ رسیده که ۷۱ درصد رشد داشته است. قارهٔ آسیا بیشترین سهم را در این رشد داشته است و ظرفیت تولید برق با منشأ زیست‌توده در این قاره طی یک دهه سه برابر شده و از ۲۱ گیگاوات به ۶۳ گیگاوات رسیده است که علت آن، سرمایه‌گذاری قابل ملاحظهٔ ژاپن و چین در این زمینه بوده است. در حالی که اروپا ابتدا به صورت پیوسته در حال رشد

ظرفیت برق از منابع زیست‌توده بوده است، پس از سال ۲۰۱۹ رشد آن متوقف شده و ظرفیت حدود ۴۲–۴۳ مگاوات را حفظ کرده است. قارهٔ آمریکا رشد متوسطی داشته و در سال ۲۰۲۳ به ظرفیت ۳۸ گیگاواتی دست یافته است. در همین حال، ظرفیت تولید برق با منشأ زیست‌توده در آفریقا و اقیانوسیه از سال ۲۰۱۶ به میزان ۳ گیگاوات راکد مانده است.

طی یک دههٔ گذشته ظرفیت برق تولیدشده با منشأ زیست‌توده در چین از ۷ گیگاوات در سال ۲۰۱۴ به ۳۱ گیگاوات در سال ۲۰۲۳ رسیده که به داشتن بالاترین ظرفیت برق زیستی در میان کشورهای جهان منجر شده است. برزیل و ایالات متحدهٔ آمریکا رتبه‌های دوم و سوم را در این رده‌بندی دارند. کشور ژاپن با رشد ظرفیت سالانه ۱۸ درصد، بالاترین نرخ رشد ظرفیت برق زیستی را در میان کشورهای جهان دارد [۴].



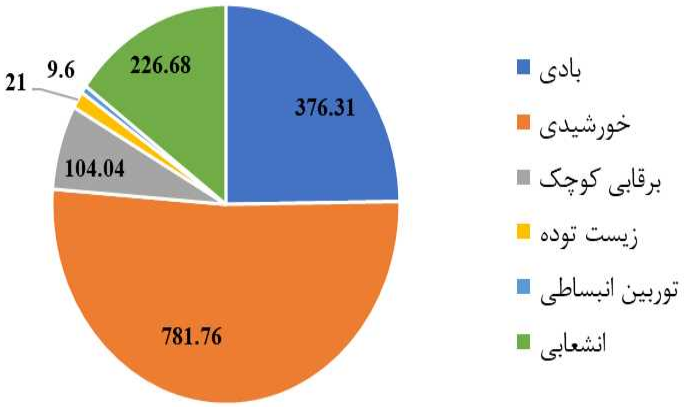

**شکل ۱.** ظرفیت نصب‌شده برق با منشأ زیست‌توده در کشورهای چین، برزیل، آمریکا، هند و آلمان

## ۲–۳. وضعیت انرژی‌های تجدیدپذیر و تبدیل پسماند به انرژی در ایران

کشور ایران یکی از دارندگان بزرگ ذخایر نفت و گاز در جهان است و بخش اعظم انرژی مورد نیاز کشور توسط این منابع تأمین می‌شود. افزایش تقاضا، استهلاک تجهیزاتِ استخراج نفت و گاز، عدم استفاده از تکنولوژی‌های روز دنیا برای تولید انرژی و همچنین سرانهٔ مصرف انرژی بالا به دلیل ارزان بودن انرژی، سبب شده است تا ناترازی قابل ملاحظه‌ای در بخش تولید و مصرف انرژی مشاهده شود [۷ و ۹]. از سویی دیگر، ارزان و در دسترس بودن سوخت‌های فسیلی سبب شده بود تا در سال‌های گذشته توجه چندانی به موضوع تنوع بخشی به سبد تأمین انرژی در کشور نشود و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در اولویت قرار نگرفته باشد [۱۰ و ۱۱]. در سال‌های اخیر موضوع ناترازی در تولید و مصرف انرژی توجه‌ها را به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده و توسعهٔ نیروگاه‌های تجدیدپذیر با شتاب بیشتری در دستور کار قرار گرفته است [۷، ۹ و ۱۲].

میزان تولید برق با استفاده از نیروگاه‌های بادی، خورشیدی، برق‌آبی، زیست‌توده، توربین انبساطی و انشعابی[۱] در ایران، تا پایان آذرماه ۱۴۰۳، در نمودار ۲ نمایش داده شده است. مجموع ظرفیت نصب‌شده تولید برق از منابع تجدیدپذیر تا تاریخ یادشده ۱۵۲۰ مگاوات بوده که نسبت به ظرفیت نصب‌شده در پایان اسفندماه ۱۴۰۲ حدود ۳۰ درصد افزایش داشته است. عمدهٔ این افزایشِ ظرفیت بر اثر توسعهٔ نیروگاه‌های خورشیدی و انشعابی بوده است [۱۲ و ۱۳]

۱. نوعی از نیروگاه‌های مقیاس کوچک خورشیدی هستند که توسط دارندگان انشعاب برق احداث شده و برق تولیدی آن‌ها به شبکه تزریق می‌شود.




**شکل ۲.** ظرفیت نصب‌شده نیروگاه‌های تجدیدپذیر تا پایان آذرماه ۱۴۰۳ در ایران

ظرفیت تولید برق از منابع زیست‌توده در پایان آذرماه ۱۴۰۳ حدود ۲۱ مگاوات بوده و نسبت به ظرفیت نصب‌شده تا انتهای سال ۱۴۰۲، ۶۴ درصد رشد داشته است. در حال حاضر، پنج نیروگاه زیست‌توده، شامل دو نیروگاه زباله‌سوز، دو نیروگاه هاضم بی‌هوازی (فاضلاب) و یک نیروگاه لندفیل در حال بهره‌برداری هستند. با توجه به تولید روزانه ۵۸ هزار تن پسماند در کشور، پتانسیل دست‌یابی به ظرفیت تولید ۵۵۰ مگاوات برق از منابع زیست‌توده وجود دارد [۹]. براساس ارزیابی‌های انجام‌شده در سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا)، ۲۵۰ مگاوات نیروگاه زباله‌سوز، ۲۰۰ مگاوات نیروگاه هاضم بی‌هوازی و ۱۰۰ مگاوات نیروگاه لندفیل قابل احداث است [۱۴].

**شکل ۳.** پتانسیل تولید انرژی از پسماند جامد شهری در ایران براساس ارزیابی‌های ساتبا

در این مقاله علاوه بر اشاره به فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی و ضعف‌ها و قوت‌های هر یک از این فناوری‌ها، به چالش‌های مدیریت پسماند در ایران و چگونگی رفع این چالش‌ها با استفاده از فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی اشاره خواهد شد. زیرساخت‌های مورد نیاز برای توسعهٔ این فناوری‌ها و همچنین، آثار مثبت زیست‌محیطی و اجتماعی آن‌ها نیز بیان خواهد شد.

## ۳. روش‌شناسی

### ۳–۱. تکنولوژی‌های ترموشیمیایی

این نوع از تکنولوژی‌ها به وسیلهٔ گرم کردن پسماند در شرایط حضور یا عدم حضور عوامل کمکی، انرژی تولید می‌کنند. مزیت عمدهٔ روش‌های ترموشیمیایی، کاهش قابل توجه حجم زباله و سرعت بیشتر در تولید انرژی است. انواع تکنولوژی‌های ترموشیمیایی عبارت‌اند از: احتراق (زباله‌سوز)، گازسازی، پیرولیز و پلاسما. فناوری‌های بیوشیمیایی و ترموشیمیایی در مقایسه با یکدیگر، دارای مزایا و معایبی هستند [۱۵]. بازده تبدیل انرژی تولیدی (انرژی تولیدی به ازای واحد وزن زباله ورودی)، میزان کاهش در مقدار زبالهٔ

دفن‌شونده و میزان انتشار آلاینده‌ها، سه جنبهٔ اصلی در مقایسه فنی روش‌های موجود استحصال انرژی از زباله هستند. بازده تولید الکتریسیته در هر یک از این روش‌ها، بسته به ترکیب زبالهٔ ورودی و فناوری به‌کارگرفته‌شده تغییر می‌کند.

**جدول ۴.** بازده فناوری‌های تولید انرژی از پسماند جامد شهری

| فناوری | بازده تبدیل انرژی(کیلووات ساعت بر تن زبالهٔ ورودی) |
|---|---|
| احتراق مستقیم (زباله‌سوز) | ۹۳۰تا۴۷۰ |
| گازسازی | ۶۵۰تا۴۰۰ |
| پیرولیز | ۵۳۰تا۴۵۰ |
| پلاسما | ۲۵۰۰تا۴۰۰ |
| هضم بی‌هوازی | ۱۵۰تا۷۵ |
| گاز دفنگاه | ۸۴تا۴۱ |

اما به‌کارگیری فناوری‌های استحصال انرژی از زباله فقط برای تولید الکتریسیته نبوده، بلکه هدف اصلی، کاهش حجم زباله و تبدیل آن به موادی بی‌ضرر است. انرژی تولیدی نیز فقط یک محصول جانبی آن محسوب می‌شود. میزان کاهش در مقدار زباله‌ای که پس از پردازش توسط هر یک از فناوری‌ها، به دفنگاه ارسال می‌شود نیز به ترکیب زبالهٔ ورودی وابسته است. درصد کاهش وزنی زباله پردازش‌شونده توسط فناوری‌های مختلف، جهت مقایسه، در جدول ۵ ارائه شده است.

**جدول ۵.** درصد کاهش حجم زباله پس از پردازش

| فناوری | کاهش وزنی زباله (٪) |
|---|---|
| احتراق مستقیم (زباله‌سوز) | ۷۵ |
| گازسازی | ۹۴ تا ۱۰۰ |
| پیرولیز | ۷۲ تا ۹۵ |
| پلاسما | ۹۵ تا ۱۰۰ |
| گاز دفنگاه | ۰ |

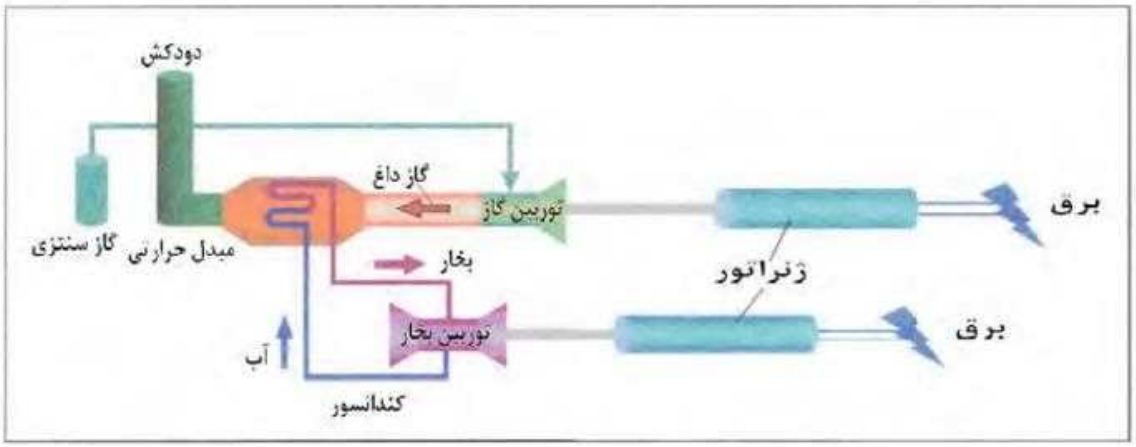
### ۳-۱-۱. زباله‌سوز

اولین نیروگاه تجاری در سال ۱۹۷۱ در آمریکا ساخته شد که هدف آن بازیابی مواد آهنی و غیرآهنی به‌خصوص آهن، آلومینیوم، شیشه و الیاف کاغذ بود و تقریباً می‌توان گفت که بحران‌های زباله و پسماند در اوایل ۱۹۹۰ تا حدودی رفع شد. در سال ۲۰۱۶ تعداد نیروگاه‌های زباله‌سوز به ۱۶۱۸ در سراسر جهان رسید که از این تعداد ۵۱۲ نیروگاه در اروپا، ۸۲۲ نیروگاه در ژاپن، ۸۸ نیروگاه در آمریکا و ۱۶۶ نیروگاه نیز در چین موجود است. در حدود ۹۰ درصد از پسماند جامد شهری در اروپا در سال ۲۰۱۵ در کوره سوزانده شد [۱۱].

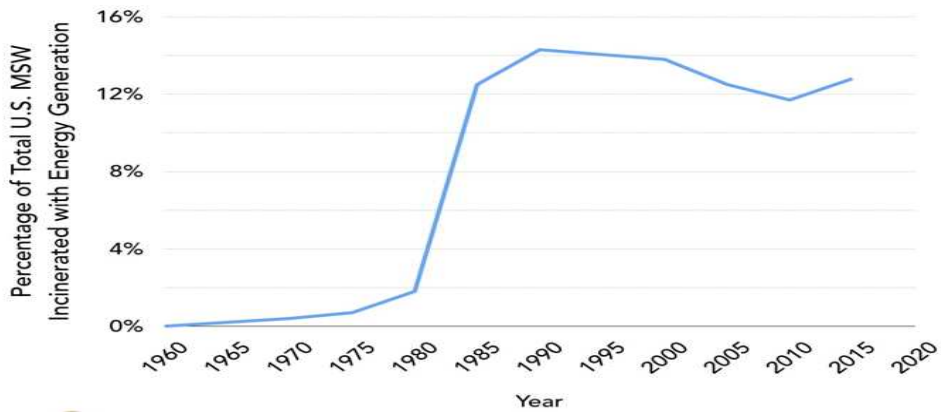
زمانی که بحث دفع زباله‌های خطرناک و بیمارستانی مطرح می‌شود، نقش زباله‌سوزها بیشتر نمایان می‌شود. زباله‌سوزها به عنوان واحدهایی تعریف می‌شوند که توسط حرارت، مواد زائد را اکسید و مواد کربنی را کاهش می‌دهند. محصولات خروجی از زباله‌سوزها، دی‌اکسید کربن، آب، خاکستر و حرارت حاصل از احتراق است. علاوه بر این، آلاینده‌های هوا نظیر ترکیبات سولفور و نیتروژن و هالوژن‌ها و فلزات سنگین نظیر کادمیوم نیز از محصولات دیگر احتراق هستند. در برخی موارد، سوزاندن زباله‌ها از مناسب‌ترین شیوه‌های مدیریت زباله به شمار می‌رود. حداقل ارزش حرارتی مناسب برای تولید انرژی از پسماند به روش زباله‌سوزی ۶ KJ/Kg هزار تخمین زده شده است [۱۶]. امروزه، ظرفیت جهانی زباله‌سوزی به منظور انهدام زباله و در کنار آن تولید انرژی و بازیافت فلزات (از زباله‌های جامد شهری) حدود ۱۳۰میلیون تن در سال است که حدود ۶۰۰ نیروگاه بزرگ زباله‌سوز انجام می‌شود. سوزاندن مواد زائد جامد شهری یک فرایند مهارشده است که در آن مواد زائد جامد می‌سوزد و به خاکستر تبدیل شده و باقی‌مانده به گازهای کم‌خطر و یا بی‌خطر تبدیل می‌شوند [۳]. زباله‌سوزی یکی از روش‌های دفع مواد زائد شهری است. از این دستگاه‌ها نیز می‌توان برای کاهش یا رفع ویژگی سمی مواد استفاده کرد. به طور کلی، می‌توان زباله‌های شهری، مواد

شیمیایی آلی، مواد پرتوشناسی، مواد بیولوژیکی، مواد آتش‌گرفتنی، مواد منفجرشدنی، لجن حاصل از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را در انواع مختلف زباله‌سوزها سوزاند. شکل ۴ نمایی از یک واحد زباله‌سوزی را نشان می‌دهد.

در شکل ۵ میزان رشد استفاده از فناوری زباله‌سوزی در آمریکا را در سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۰ مشاهده می‌شود که روند صعودی داشته است.




**شکل ۴.** شماتیک سیستم تولید نیرو در یک نیروگاه زباله‌سوز




**شکل ۵.** میزان رشد زباله‌های جامد شهری سوزانده‌شده در آمریکا بر حسب سال

## ۳-۲. انواع زباله‌سوز

انواع مختلفی از سیستم زباله‌سوزی موجود است که در ادامه برخی از آن‌ها که در پسماندهای جامد شهری مورد استفاده قرار می‌گیرند را توضیح مختصری خواهیم داد.

### ۳-۲-۱. زباله‌سوز توده‌سوز

این نوع زباله‌سوزها، زباله‌های فرآوری‌نشده شهری را در محفظهٔ احتراق واحد یا دوتایی با استفاده از هوای اضافی که برای اطمینان از احتراق کامل به کار می‌رود، می‌سوزانند که سبب افزایش زمان عمر تجهیزات می‌شود. عملیات با تخلیهٔ مواد زائد جامد از کامیون‌های جمع‌آوری در یک انبار ذخیره‌سازی شروع می‌شود. ظرفیت ذخیره به طور متوسط، حجم زباله یک روز است [۱۷].

چون اکثر زباله‌های آلی از لحاظ حرارتی ناپایدار هستند، گازهای متعددی هنگام فرایند احتراق که دما در حدود ۷۶۰°C است، متصاعد می‌شود. این گازها و ذرات ریز آلی از یک محفظه که معمولاً محفظهٔ احتراق نامیده می‌شود و در دمای بالای ۸۲۰°C سوزانده می‌شوند و محصولات بدبوی حاصل از احتراق معمولاً در دمای بالای ۷۶۰ تا ۸۲۰°C از بین می‌روند. با توجه به قوانین

کنترل آلودگی هوا، باید تجهیزات پاکسازی تدارک دیده شود [۱۸]. برای تأمین جریان خوب هوا و غلبه بر افت فشار ناشی از تجهیزات پاکسازی هوا، فن مورد استفاده قرار می‌گیرد. محصول نهایی سوزاندن زباله، گازهای تمیزی است که از دودکش تخلیه می‌شود. خاکستر و مواد نسوخته به داخل قیف که در زیرشبکه‌ها هستند می‌افتند که به وسیلهٔ آب سرد خاموش می‌شوند [۳]. ذرات خاکستر که در داخل محفظهٔ احتراق نشست می‌کنند به وسیلهٔ دستگاه مخصوص این کار دفع می‌شوند و باقی‌ماندهٔ نهایی حاصله به مناطق دفع یا واحدهای بازیافت هدایت می‌شوند به عنوان نمونه برای بازیافت حرارتی از این سیستم، بویلر دیگ بخار به کار می‌رود که از حرارت گازهای احتراقی که محفظهٔ احتراق را ترک می‌کنند برای تبدیل آب به بخار استفاده می‌کند. برای بالا بردن دما و فشار جهت تولید انرژی الکتریکی از یک مبدل حرارتی به نام سوپرهیتر استفاده می‌شود و سوپرهیترهای تابشی که از حرارت تابشی محفظهٔ احتراق استفاده می‌کنند در مقابل بویلر نصب می‌شوند، سپس بخارهای تولیدشده به بخش جمع‌آوری هدایت می‌شوند [۱۶].

### ۳-۲-۲. زباله‌سوز مدولار

این زباله‌سوزها واحدهای کوچک با ظرفیت ۵ تا ۱۰۰ تن در روز هستند. آن‌ها نوعاً دارای دو محفظهٔ احتراق اولیه و ثانویه هستند. زباله‌سوزهای مدولار، زباله‌ها را در یک محفظهٔ اولیه عایق‌شده با مواد نسوز با هوای کمتر از مقدار استوکیومتری که اکسیژن کافی برای احتراق کامل ندارد، می‌سوزانند. گازهای احتراق ابتدا مخلوطی از مونواکسیدکربن و آب هستند که وارد محفظهٔ احتراق دوم می‌شوند و در آن هوای اضافی و سوخت برای احتراق کامل موجود است. انرژی گازهای احتراق با عبور از لوله‌هایی می‌تواند برای تولید برق مورد استفاده قرار گیرد [۱۶].

### ۳-۲-۳. زباله‌سوز با سوخت RDF

سوخت‌های RDF از باقی‌مانده زباله‌های جامد شهری پس از جداسازی موادی از آن مانند شیشه‌ها و سایر ترکیباتی که نمی‌سوزند، تشکیل می‌شود. این سوخت می‌تواند به صورت یک سوخت جامد در بویلرهای RDF سوز استفاده شود و یا به همراه زغال سنگ و یا نفت در بویلرهای چندسوخته سوزانده شود. همچنین در حال حاضر RDF در کوره سیمان به عنوان جانشین سوخت‌های فسیلی تزریق می‌شود [۱۹].

### ۳-۲-۴. زباله‌سوز با بستر سیال

در مقابل زباله‌سوزهای توده‌سوز که زباله‌ها روی شبکه یا آتشدان کوره می‌سوزانند، زباله‌سوزهای بستر سیال، زباله را در یک بستر شامل مادهٔ بی‌اثر داغ نظیر شن و ماسه که به وسیلهٔ جریان سریع و رو به بالای هوای اولیه احتراق به صورت سوسپانسون درآمده‌اند، خشک می‌کند. احتراق مؤثر نیاز به سوخت همگن دارد. ذرات چوب یا سایر زباله‌های همگن را می‌توان به طور مستقیم وارد این زباله‌سوز کرد، ولی زباله‌های شهری ابتدا فرآوری شده و سپس وارد این زباله‌سوز می‌شوند. در طراحی استاندارد راکتور بستر سیال که گاهی اوقات بستر سیال حباب‌دار (BFB) نامیده می‌شود سرعت هوا ۱/۵ تا ۳ متر در ثانیه به کار می‌رود [۳]. در حالی که مواد بستر و مواد با احتراق ناقص نیم‌سوخته به داخل محفظه برمی‌گردند. این مواد از جریان گازهای دودکش جدا می‌شوند و دوباره به کوره برمی‌گردند [۱۸]. هوای احتراق ثانویه به بالای محفظه دمیده می‌شود. این زباله‌سوزها این قابلیت را دارند که محدودهٔ وسیعی از سوخت‌ها شامل زبالهٔ جامد شهری و لجن فاضلاب را بسوزانند. کوره‌های بستر سیال می‌توانند مواد فرآوری‌شده را به‌تنهایی یا در کنار سایر مواد با ظرفیت ۸۰۰ تن در روز بسوزانند. از مهم‌ترین مزیت زباله‌سوز بستر سیال راندمان احتراق ۹۹ درصد است [19].

### ۳-۲-۵. محصولات خروجی از زباله‌سوز

محصولات خروجی از زباله‌سوزها، دی‌اکسید کربن، آب، خاکستر و حرارت حاصل از احتراق است. علاوه بر این، آلاینده‌های هوا نظیر ترکیبات سولفور و نیتروژن و هالوژن‌ها و فلزات سنگین گوناگون (مانند کادمیوم، جیوه و...) نیز از دیگر محصولات احتراق

هستند. در مورد بسیاری از زباله‌ها، سوزاندن از بهترین و یا ضروری‌ترین شیوه‌های مدیریت زباله به شمار می‌رود. در اغلب موارد، سوزاندن تنها به عنوان مرحلهٔ پردازش برای بسیاری از زباله‌های جامد و مایع به شمار می‌آید و پسماندهای جامد یا مایع برای مراحل بعدی دفع باقی می‌مانند [۱۹ و ۲۰].

### ۳-۳. انواع مختلف خاکستر تولیدی در زباله‌سوزها

#### ۳-۳-۱. خاکستر ته‌نشین

حدود ۸۵ تا ۹۰ درصد خاکستر تولیدی در زباله‌سوزها از این نوع محسوب می‌شود، این نوع از خاکستر شامل مواد خنثی، شیشه و فلز است. اندازهٔ این ذرات بین ۰/۱۰ تا ۰/۱۵ میلی‌متر است. معمولاً این نوع از خاکستر خطرناک نیست.

#### ۳-۳-۲. خاکستر معلق

این نوع از خاکستر طی فرایند احتراق ایجاد می‌شود و از نظر اندازهٔ ذرات بسیار کوچک‌تر از خاکستر ته‌نشین و حدود ۰/۰۵ تا ۰/۱ میلی‌متر است، برعکس خاکستر ته‌نشین این نوع همواره به صورت خشک است و بسیار فرّار است، به این‌منظور از آب برای جلوگیری از پخش شدن آن استفاده می‌شود. برای تشخیص آلودگی‌های زیست‌محیطی معمولاً از این شاخص استفاده می‌شود [۱۰].

#### ۳-۳-۳. خاکستر اسکرابر

این نوع خاکستر از واکنش گازهای خروجی و مواد شیمیایی نظیر آهک که به منظور کنترل آلودگی مورد استفاده قرار می‌گیرد تولید می‌شود. این نوع از خاکستر نیز جزء خاکسترهای خطرناک محسوب می‌شود [۱۰].

#### ۳-۳-۴. موارد استفاده از خاکستر

مواد باقی‌مانده بعد از هضم و تصفیهٔ حرارتی به طور عمومی شامل خاکستر کف و لجن است. این مواد به طور مکانیکی جمع‌آوری و تا دمای $1000^{\circ}C$ حررات داده می‌شوند و سپس، به‌آرامی سرد می‌شوند (ابتدا به وسیلهٔ آب ته‌نشین شده و سپس به بیرون زباله‌سوز هدایت می‌شوند)، آهن‌ربای الکتریکی برای جدا کردن مواد قابل بازیافت مانند آهن و آلومینیوم استفاده می‌شود. استفاده از خاکستر در مصالح ساختمانی، که در این شرایط باید از بی‌خطر بودن آن اطمینان حاصل شود، به صورت یک مادهٔ بی‌اثر مثل شیشه تشکیل می‌شود [۲۱]. نیتروژن، فسفر و پتاسیم سه مادهٔ اصلی برای رشد گیاهان است. خاکستر حاصل از سوزاندن پسماند جامد شهری با فراهم آوردن این مواد کاربرد مفیدی برای کشاورزی دارد. خاکستر کف حاوی مقادیر زیادی فسفر و پتاسیم است که می‌تواند جایگزین کود تجاری عمل کند [۱۰].

### ۳-۴. تولید بیوگاز از زبالهٔ جامد شهری

نظر به اینکه درصد بالایی (حدود ۷۵ درصد) از مواد موجود در زباله‌های جامد شهری (MSW) تجزیه‌پذیر و جز آلی (پسماند تر) بوده، با فرایند بی‌هوازی قابلیت تبدیل به فرایند بیوگاز را دارند که علت بسیاری از مشکلات محیط زیستی مانند: آلودگی آب، خاک و هوا شناخته شده است [۳۳]. با توجه به رطوبت بالا در مواد آلی زباله‌های مناطق شهری، استفاده از سیستم‌های زباله‌سوز راهکار مناسبی نبوده، زیرا گازهای تولیدی از سوزاندن باعث آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود. استفاده از کمپوست نیز کارایی لازم را ندارد و عمل تثبیت مواد آلی در این روش به طور کامل انجام نمی‌گیرد [۲۲]. در روش هضم بی‌هوازی می‌توان ضمن حل معضل زباله و فاضلاب با رعایت مسائل زیست‌محیطی، کود آلی و انرژی قابل ملاحظه‌ای تولید کرد [۲۳]. در فرایند هضم بی‌هوازی مواد زائد آلی شهری، پسماندهای آلی در راکتورهای هاضم بسته بدون هیچ‌گونه برهم‌کنش زیست‌محیطی تحت تأثیر میکرو ارگانیسم‌های بی‌هوازی شکسته شده و به ترکیبات ساده‌تر تبدیل می‌شوند [۱۸]. حاصل نهایی این فرایند با ارزش گاز قابل سوختنی (متان) و کود آلی است که سرشار از مواد مغذی قابل استفاده در توسعهٔ کشاورزی و پرورش گل و گیاه آپارتمانی است [۱۹ و ۲۴].

از آنجا که تخمیر بی‌هوازی در راکتورها و تانک‌های بسته انجام می‌گیرد، امکان نشر آلاینده به محیط زیست وجود ندارد، چنین تجهیزاتی را می‌توان نزدیک به مناطق مسکونی ایجاد کرد. کل گاز تولیدشده از واحد تخمیر به وسیلهٔ لوله‌های مناسب به واحد

مصرف انتقال می‌یابد. این گاز می‌تواند با عنوان منبع سوخت در تولید انرژی (الکتریسیته) و یا در مصارف صنعتی و تولید آب گرم مورد استفاده قرار گیرد [۲۵]. همچنین، می‌توان با تزریق گاز تولیدی به شبکهٔ گازی شهری با توزیع مناسب از آن استفاده کرد. مقدار بیوگاز تولیدی از حدود ۶۰۰ تن زباله قابلیت تولید ۱۲ هزار مگاوات ـ ساعت انرژی الکتریکی در سال را دارد [۲۱].

در حال حاضر، در بسیاری از کشورها هضم بی‌هوازی به عنوان یک جایگزین مناسب برای کاهش حجم زباله و بازیابی انرژی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۲]. اهمیت و توسعهٔ بیوگاز در جهان طی سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. ازجمله عواملی که سبب افزایش علاقه‌مندی در زمینهٔ کاربرد و توسعهٔ این تکنولوژی شده است، عبارت‌اند از: تولید انرژی، کاهش آلودگی هوا، بهبود کیفیت کود و محصول این فرایند بیوگاز با حدود ۶۰ درصد متان است [۱۷]. سیستم هاضم بی‌هوازی سیستمی در جهت مدیریت پسماندهای آلی و تبدیل آن‌ها به انرژی و کود آلی بسیار مناسب است [۲۶]. با به‌کارگیری این روش از انتشار گازهای گلخانه‌ای به محیط زیست نیز جلوگیری می‌شود. امروزه در سطح گسترده‌ای این فرایند در حال اجرا است و یکی از روش‌های مناسب برای تبدیل مواد زائد جامد شهری به شمار می‌رود [۱۹].

### ۳-۵. لندفیل

لندفیل عبارت است از: فضایی ایزوله که به منظور ذخیرهٔ سیستماتیک بلندمدت پسماند در شرایطی که از نشت آن به هوا و آب جلوگیری می‌شود، طراحی می‌شود. لندفیل‌ها طی سالیان متمادی تنها روش دفع پسماند بوده‌اند.

در بسیاری از نقاط جهان لندفیل هنوز مهم‌ترین روش مدیریت پسماند صنعتی و شهری است. دفن پسماند به عنوان یکی از گزینه‌های ارزان در مدیریت پسماند شناخته شده است. این امر به دلیل این واقعیت است که دفن پسماند می‌توانند به پروژهٔ بهره‌برداری مجدد از گاز طبیعی تبدیل شوند و در عین حال، به عنوان راهی جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از دفن زباله‌ها عمل کند [۲۳].

#### ۳-۵-۱. ترکیب گاز لندفیل

خروج گاز در لندفیل‌ها در شرایط بی‌هوازی و از طریق تجزیهٔ باکتریایی در یک فرایند چهارمرحله‌ای صورت می‌گیرد که این گاز عمدتاً حاوی ۵۵ تا ۶۰ درصد متان، ۴۰ تا ۴۵ درصد دی‌اکسید کربن و به مقدار کمی (کمتر از ۵ درصد) ترکیبات غیر متانی است.

#### ۳-۵-۲. نیروگاه لندفیل

بخش آلی پسماند دفن‌شده در دفنگاه توسط میکرو ارگانیسم‌ها به بیوگاز تبدیل می‌شود که می‌توان با جمع‌آوری، کنترل و هدایت گاز به ژنراتورهای بیوگاز سوز، انرژی الکتریکی تولید کرد. بیوگاز متشکل از ۶۰ تا ۷۰ درصد متان و ۳۰ تا ۴۰ درصد دی‌اکسیدکربن است. حدود ۰/۶ درصد از گاز محل دفن را گازهای فرعی، شامل ترکیبات بودار، هیدروکربن‌های آروماتیک، حلال‌های کلردار، الکل‌ها، هیدروکربن‌های آلیفاتیک و پلی‌آروماتیک، تشکیل می‌دهند [۲۳]. ترکیبات موجود در پسماند، سن دفن پسماند، وجود اکسیژن در لندفیل، دما و میزان رطوبت از جمله عواملی هستند که بر کیفیت و کمیت بیوگاز تولیدشده تأثیرگذار هستند [۲۷ و ۲۸].

- ترکیبات موجود در پسماند؛ هر چه میزان مواد آلی موجود در پسماند بیشتر باشد، گاز بیشتری تولید می‌شود.
- سن دفن پسماند؛ اگر سن دفن کمتر از ۱۰ سال باشد، گاز بیشتری تولید می‌شود. ماکزیمم مقدار گاز ۵ تا ۷ سال پس از دفن تولید می‌شود.
- وجود اکسیژن در لندفیل؛ وجود اکسیژن مانع تولید گاز متان می‌شود.
- دما؛ افزایش دما به افزایش فعالیت باکتری‌های شیمیایی، تبخیر و واکنش‌های شیمیایی و در نتیجه افزایش تولید بیوگاز منجر می‌شود.
- میزان رطوبت؛ وجود رطوبت در شرایط غیراشباع، باعث افزایش تولید گاز می‌شود.

متداول‌ترین روش جمع‌آوری گاز لندفیل شامل حفر چاه‌های عمودی در زباله‌ها و اتصال سر چاه‌ها به لوله‌های جانبی برای انتقال گاز به جمع‌کننده است. نوع دیگری از سیستم جمع‌آوری گاز لندفیل که عموماً در لندفیل‌های عمیق استفاده می‌شود، مبتنی بر لوله‌کشی‌های افقی درون ترانشه‌های زباله است. برخی از سیستم‌ها ترکیبی از چاه‌های عمودی و لوله‌های افقی هستند.

تکنولوژی‌های رایج تولید برق از گاز لندفیل شامل موتورهای احتراق داخلی، توربین‌های گازی و میکروتوربین‌ها می‌شوند. موتورهای احتراق داخلی بیشترین استفاده را داشته و برای پروژه‌هایی با مقیاس ۸۰۰ کیلووات تا ۳ مگاوات مناسب هستند. توربین‌های گازی برای پروژه‌های بزرگ‌مقیاس با ظرفیت بیش از ۵ مگاوات و میکروتوربین‌ها برای پروژه‌هایی با ظرفیت کمتر از ۱ مگاوات مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۹].

### ۳-۵-۳. نیروگاه هاضم بی‌هوازی

در نیروگاه‌های هاضم بی‌هوازی مواد آلی فسادپذیر براساس واکنش هضم بی‌هوازی که در غیاب اکسیژن و در حضور میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی رخ می‌دهد تجزیه می‌شوند، مولکول‌های بزرگ به مولکول‌های ساده‌تر تبدیل شده و بیوگاز تولید می‌شود. این گاز با کمی پالایش برای تولید برق استفاده می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، بیوگاز حاوی ۶۰ تا ۷۰ درصد متان و ۳۰ تا ۴۰ درصد دی‌اکسید کربن است.

منابع اولیه مناسب برای تولید بیوگاز با استفاده از روش هضم بی‌هوازی شامل فضولات دامی، بقایای گیاهان، پسماند مواد غذایی و مواد آلی فسادپذیر، مواد آلی فاضلاب و پسماند کشاورزی هستند [۳۰]

فرایند تخمیر شامل سه مرحله است؛ در مرحلهٔ اول مواد آلی پیچیده و نامحلول هیدرولیز شده و به ترکیبات آلی محلول تبدیل می‌شوند، در مرحلهٔ دوم ترکیبات آلی محلول به وسیلهٔ باکتری‌های اسیدساز شکسته شده و اسیدهای آلی و هیدروژن تولید می‌شود، در مرحلهٔ سوم تمام اسیدهای آلی و ترکیبات تولیدشده در مرحلهٔ اسیدسازی، توسط باکتری‌های متان‌ساز به بیوگاز تبدیل می‌شوند. دما، نوع راکتور هاضم بی‌هوازی، حضور میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی، وجود مواد بازدارنده یا شرایط شیمیایی نامناسب و نرخ باردهی مواد ورودی، از جمله عواملی هستند که بر فرایند هضم تأثیر می‌گذارند [۳۰ و ۳۱].

انواع هاضم‌های بی‌هوازی، براساس نوع عملکرد، به سه دستهٔ ناپیوسته، پیوسته و نیمه‌پیوسته تقسیم می‌شوند. در نوع ناپیوسته، بارگیری هاضم یک بار انجام می‌شود، مواد برای دورهٔ مشخصی درون راکتور مانده و پس از آن تخلیه می‌شوند. در مدل پیوسته، بارگیری مواد به صورت روزانه انجام شده و با استفاده از همزن مواد مخلوط می‌شوند. در مدل نیمه‌پیوسته، بارگیری به صورت متناوب و در فواصل زمانی مشخص انجام می‌شود [۳۱ و ۳۲].

انواع هاضم‌های مناسب برای پسماند شهری شامل هاضم خشک گاراژی، هاضم خشک پیوسته و هاضم تر پیوسته هستند. ویژگی‌های هریک از این نوع هاضم‌ها در جدول ۶ نشان داده شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هاضم خشک پیوسته نیاز به آب کمتری دارد و در مناطقی که محدودیت منابع آب دارند مناسب است.

**جدول ۶.** مقایسهٔ انواع هاضم‌های مناسب برای پسماند شهری [۳۰-۳۲]

| هاضم خشک گاراژی | هاضم خشک پیوسته | هاضم تر پیوسته |
|---|---|---|
| نیاز به پیش‌پردازش محدود دارد:<br>– باز کردن کیسه‌ها، غربالگری و اختلاط<br>– نیاز به کاهش زیاد اندازهٔ مواد نیست<br>– اندازهٔ مواد باید کمتر از ۲۰ سانتی‌متر باشد. | نیاز به پیش‌پردازش دارد:<br>– باز کردن کیسه‌ها و کاهش اندازهٔ زیاد (خرد کردن)<br>– اندازهٔ مواد باید کمتر از ۵ سانتی‌متر باشد تا امکان پمپ کردن آن‌ها باشد. | نیاز به پیش‌پردازش بالایی دارد:<br>– باز کردن کیسه‌ها، کاهش اندازهٔ زیاد (مانند خرد کردن)<br>– جدا کردن مواد شناور و مواد ته‌نشین‌شده<br>– اندازهٔ مواد باید کمتر از ۵ سانتی‌متر باشد تا امکان پمپ کردن آن‌ها باشد. |
| به ازای هر تن پسماند نیاز به ۱۰۰ لیتر آب است. | به ازای هر تن پسماند نیاز به ۵۰ لیتر آب است. | به ازای هر تن پسماند نیاز به ۵۰۰ لیتر آب است. |
| مادهٔ هضم‌شده به وسیلهٔ لودر تخلیه می‌شود.<br>درصد رطوبت مادهٔ هضم‌شده ۵۰ تا ۶۰ درصد وزنی است.<br>برای تولید کمپوست نیاز به آبگیری نیست. | مادهٔ هضم‌شده توسط پمپ از هاضم خارج می‌شود.<br>درصد رطوبت مادهٔ هضم‌شده پیش از آبگیری ۷۰ تا ۹۰ درصد است.<br>معمولاً لازم است درصد رطوبت حدود ۵۰ درصد به وسیلهٔ پرس فیلتر یا پرس مارپیچ و ...، آبگیری شود. | |

### ۳-۶. نیروگاه‌های زباله‌سوز، گازی‌سازی و پیرولیز

فناوری تولید برق با استفاده از نیروگاه‌های زباله‌سوز، گازی‌سازی و پیرولیز، فناوری‌های ترموشیمیایی نامیده می‌شوند. در فناوری زباله‌سوزی، انرژی حاصل از ترکیبات آلی پیچیده بر اثر احتراق، برای تولید برق و حرارت استفاده می‌شود. در این فناوری میزان تولید انرژی به نوع فناوری و ارزش حرارتی پسماند بستگی دارد. فرایند گازی‌سازی مانند زباله‌سوزی از انرژی حاصل از احتراق استفاده می‌کند، اما این فرایند شامل احتراق دومرحله‌ای، برای تبدیل پسماند به انرژی است. در کورهٔ اول با تأمین دمای بالای ۷۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد و در حضور مقدار محدودی اکسیژن، گاز سنتز تولید می‌شود. گاز سنتز نیز در کورهٔ دوم سوزانده شده و از انرژی آن برای تولید برق استفاده می‌شود [۳۳].

فرایند پیرولیز در غیاب اکسیژن انجام می‌شود و می‌تواند تا ۸۰ درصد انرژی را از بخش آلی پسماند بازیابی کند. محصول این فرایند سوخت یا برق خواهد بود. ویژگی‌ها و مشخصات انواع فناوری‌های ترموشیمیایی در جدول ۷ نشان داده شده است [۳۴]. فناوری‌های مختلف ترموشیمیایی در تعداد مراحل احتراق، غلظت اکسیژن فرایند، نحوهٔ اختلاط پسماند با هوا برای سوختن کامل، نحوهٔ پاکسازی گاز خروجی و انواع خاکستر و سرباره با هم تفاوت دارند.

**جدول ۷.** ویژگی‌های فناوری‌های مختلف ترموشیمیایی [۳۳ و ۳۴]

| زباله‌سوزی | گازی‌سازی | پیرولیز |
|---|---|---|
| سوزاندن پسماند شهری با حداقل پردازش | تخریب و تجزیه حداکثری مواد خام در حضور عامل گازساز | تخریب مواد آلی به وسیلهٔ گرما در غیاب اکسیژن |
| دمای کوره بالای ۸۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد | دمای کورهٔ اول ۶۰۰-۶۵۰ درجه و دمای کورهٔ دوم ۱۰۰۰-۱۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد | آغاز واکنش در دمای ۳۰۰ تا ۳۷۵ درجهٔ سانتی‌گراد |
| خروجی $CO_2$، $H_2O$، خاکستر و حرارت حاصل از احتراق است. | مشابه پیرولیز است اما الویت تولید گاز است. قطران و روغن‌های آلی در محل گازی‌سازی تبدیل به گاز می‌شوند. | محصولات فرایند: زغال، مایعات آلی، گاز و آب |
| - | زمان ماند بیش از دو ثانیه جهت جلوگیری از بازترکیب دیوکسین | زمان ماند طولانی و دمای بالا⟵ تولید گاز بیشتر<br>زمان ماند کوتاه و دمای پایین ⟵ تولید زغال و مایعات بیشتر |
| پیش‌فرآوری شامل جداسازی مواد خطرناک، اجسام بزرگ و مواد غیرقابل سوختن. | نیازمند پیش‌پردازش پسماند و جداسازی مواد غیرآلی (شیشه و فلزات) | نیازمند پیش‌پردازش پسماند و جداسازی مواد غیرآلی (شیشه و فلزات) |
| – | اضافه کردن عامل گازساز باعث تولید گاز مصنوعی می‌شود | تولید گاز مصنوعی متشکل از هیدروژن و متان با اضافه کردن بخار به راکتور پیرولیز |
| آلاینده‌ها: $SO_x$، $NO_x$ و فلزات سنگین | آلاینده‌ها: $SO_x$،$NO_x$،HCl، $H_2S$، دیوکسین | آلاینده‌ها: $NO_x$،HCl، دی اکسین، ذرات معلق و کلوئیدها |
| حرارت تولیدشده برای تبدیل آب به بخار و تولید برق استفاده می‌شود. | گاز تولیدشده از این فناوری مانند گاز طبیعی در توربین‌های گازسوز یا در موتورهای برق استفاده می‌شود. | برای تولید الکتریسیته تجاری‌سازی‌نشده و جنبهٔ تحقیقاتی دارد. |

## ۴. نتایج

### ۴-۱. معیارهای انتخاب محل دفن و اثر متقابل زمین

معیارهای متعددی در انتخاب مناسب‌ترین محل دفن زباله برای یک شهر دخالت دارند که به پاره‌ای از آن‌ها اشاره می‌شود. کار انتخاب محل در یک شعاع مطالعاتی مشخصی نسبت به مرکز تولیدکنندهٔ زباله (مثلاً مرکز شهر) براساس اقتصادی‌ترین فاصلهٔ حمل زباله از شهر تا محل دفن انتخاب، و محل‌های مختلف مطابق با معیارهای زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی روی نقشهٔ مشخص و محل‌های نامناسب الک می‌شوند. سپس، از میان گزینه‌های مختلف آنکه امتیاز بیشتری نسبت به سایرین کسب کرد به عنوان مناسب‌ترین محل انتخاب می‌شود. در یک لندفیل بهداشتی ـ مهندسی باید معیارهای زیست‌محیطی زیر رعایت شوند [۲۱]:

- ✓ زبالهٔ دفن‌شده در لندفیل نباید موجب پخش بوی نامطبوع در محیط اطراف و آلودگی هوا شوند.

- ✓ زباله‌های دفن‌شده باید از دسترس حیوانات، حشرات و پرندگان موذی که می‌توانند موجب پخش شدن زباله به محیط اطراف و همچنین انتشار آلودگی میکروبی شوند، دور نگه داشته شوند.
- ✓ آلودگی صوتی توسط ماشین‌آلات حمل زباله و ماشین‌آلات به‌کارگرفته‌شده در لندفیل باید حداقل باشد و لندفیل نباید موجب آلودگی بصری شود.
- ✓ گازهای تولیدشده در لندفیل مانند گاز متان و دی‌اکسید کربن، باید منترل و تهویه شوند.
- ✓ شیرابهٔ تولیدشده در لندفیل باید کنترل، جمع‌آوری و تصفیه شود تا موجب آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی نشود.

### ۴-۲. معیارهای طراحی و المان‌های لندفیل‌های مهندسی

پس از انتخاب محل مناسب و مطالعهٔ دقیق هیدروژئولوژی منطقهٔ استقرار لندفیل، معیارهای مختلف طراحی مطالعه و بررسی‌شده و طرح مناسب لندفیل که دارای المان‌های مختلف مهندسی است ارائه می‌شود. از جمله نکاتی که باید در طراحی مد نظر قرار گیرند می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ انتخاب خطوط تراز کف لندفیل پس از حفاری و قبل از ساخت المان‌های مهندسی
- ✓ حجم و تعداد سلول‌های لندفیل براساس میزان تولید زباله و عمر طرح
- ✓ شیب شیروانی‌های کناری لندفیل
- ✓ تعداد، جنس و ضخامت المان‌های مهندسی مانند لایه‌های زهکش شیرابه، لاینرهای رسی و یا مصنوعی مانند ژئوسینتتیک‌ها
- ✓ لایه‌های پوششی روزانه، میانی و نهایی لندفیل
- ✓ سیستم تهیهٔ گاز

#### ۴-۲-۱. عوامل مؤثر بر تولید گاز لندفیل

تولید گاز در لندفیل به عواملی همچون نوع ترکیب پسماند (مقدار مواد آلی)، مقدار رطوبت پسماند، مواد مغذی، وجود ترکیبات بازدارنده، سن پسماند، محیط بیوشیمیایی لندفیل و طراحی پوشش لندفیل بستگی دارد. تولید گاز سال‌ها پس از دفن گاز و تا وقتی که محتوای مواد آلی پسماند کم شود، ادامه دارد، معمولاً تولید گاز پس از دو ماه از دفن آغاز شده و تا ۱۰۰ سال نیز ادامه دارد. تولید گاز در لندفیل صورت می‌گیرد، اما بر اثر فرایند انتشار به بیرون از لندفیل فرار می‌کند.

در لندفیل‌های مهندسی ابتدا زمانی طول می‌کشد تا پسماند در لندفیل تثبیت شود و پس از آن لندفیل شروع به تولید گاز می‌کند که قسمتی از آن در پوشش خاک اکسید می‌شود و باقی به اتمسفر منتشر می‌شود. با نصب سیستم جمع‌آوری گاز بخشی از گاز تولیدشده یا شبکه‌ای از چاه‌ها و کانال‌ها که تحت فشار منفی قرار دارند، جمع‌آوری می‌شود اما حتی کاراترین سیستم‌ها هم نمی‌توانند همهٔ گاز تولیدشده را جمع‌آوری کنند.

### ۴-۳. طرح جامع مدیریت پسماند تهران

#### ۴-۳-۱. طرح تفکیک از مبدأ

در شهر تهران روزانه حدود ۷۵۰۰ تن و سالیانه حدود ۲/۵ میلیون تن پسماند تولید می‌شود که از این میزان پسماند با توجه به آنالیز انجام‌شده حدود ۷۰ تا ۷۵ درصد مواد آلی قابل کمپوست (زبالهٔ تر) و ۲۰ تا ۲۵ درصد مواد خشک قابل بازیافت و ۵ تا ۱۰ درصد سایر مواد زائد وجود دارد و به منظور بهینه‌سازی شیوهٔ دفع پسماندهای خانگی، این سازمان، تفکیک در مبدأ را طراحی، برنامه‌ریزی و سامان‌دهی کرده و با همکاری ادارات بازیافت مناطق، ضمن آموزش و اطلاع‌رسانی اجرا می‌کند. در ادامه وضعیت گذشته و حال این طرح بررسی می‌شود. یکی از نکات مهمی که در مدیریت پسماند باید به آن توجه ویژه‌ای داشت کاهش تولید پسماند است. تولید کمتر پسماند کار آسانی نیست و نیازمند یک برنامه جامع است که باید در آیندهٔ نزدیک به این امر مهم دست یابیم. در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته، موضوع کاهش پسماند از مبدأ را در برنامهٔ مدیریت پسماند خود لحاظ کرده‌اند که

موجب کاهش هزینه‌های جمع‌آوری و ساماندهی پسماند و کاهش بارهای زیست‌محیطی و همچنین سبب تقویت خدمات شهرداری در MSWM می‌شود. جلوگیری از تولید پسماند اولین گام از مراحل برنامه‌های ملی مدیریت پسماند محسوب می‌شود و از دیدگاه اقتصادی مناسب‌تر به نظر می‌آید [۲۱]. MSWM پرهزینه‌ترین خدمات شهری در کشورهای در حال توسعه هستند، تا جایی که مقامات محلی ۲۰ تا ۵۰ درصد بودجهٔ خود را صرف هزینهٔ سرویس جمع‌آوری و حمل‌ونقل MSW می‌کنند. یعنی قسمت اعظم بودجه برای جمع‌آوری و حمل‌ونقل صرف می‌شود و منابع مالی و انسانی زیادی صرف این مهم می‌شود. بنابراین هر یک از تولیدکنندگان پسماند شهری اعم از خانگی و غیر خانگی سهم قابل توجهی از مدیریت پسماند را به عهده دارند. MSW به طیف گسترده‌ای از موضوعات از جمله؛ اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی، فناوری، قانون‌گذاری مربوط می‌شود.

### ۴-۴. وضعیت گذشته

سیستم‌های تفکیک پسماندهای خشک شهر تهران از سال ۱۳۷۴ تا کنون، طرح‌های متعددی توسط سازمان بازیافت و تبدیل مواد با همکاری شهرداری‌های مناطق، به منظور سامان‌دهی امر تفکیک و جمع‌آوری پسماندهای خشک در مناطق مختلف شهر تهران به اجرا درآمده است. این طرح‌ها به دلایل متفاوتی با عدم موفقیت همراه بود. با استفاده از تجربیات گذشته و رفع ضعف‌ها و تقویت قوت‌های طرح‌های قبلی، طرح «تفکیک پسماندها در مبدأ» در تابستان سال ۱۳۸۳ تدوین و به مورد اجرا درآمد که به لحاظ مالی ۱۱۴۰ ریال در ازای هر کیلوگرم زیان دربرداشت.

این طرح‌ها به لحاظ روش اجرا به چهار گروه تقسیم می‌شدند:

۱. سامان‌دهی عوامل بازیافت سنتی با استفاده از پیمانکاران بازیافت
۲. استفاده از خودروهای خدمات شهری جهت جمع‌آوری زبالهٔ خشک در روز
۳. استفاده از خودروهای دومنظوره برای جمع‌آوری هم‌زمان پسماندهای تر و خشک
۴. استفاده از خودروهای خدمات شهری جهت جمع‌آوری زبالهٔ خشک در شب

### ۴-۵. وضعیت حال

در حال حاضر، مجتمع بازیافت و پردازش آرادکوه با ظرفیت دریافت بیش از ۲ هزار تن زباله در روز، اقدام به جداسازی مواد و تولید کمپوست می‌کند و به این‌ترتیب موجب کاهش دفن زباله، تولید زهرابه و گاز متان و بوی نامطبوع شده است و درنهایت، باعث بهبود هوای منطقه و حفظ سلامتی افراد ساکن در اطراف مجتمع و حفظ بهداشت محیط شده است. همچنین، در این مجتمع واحدهای جدید پردازش پسماندها و تولید کمپوست احداث شده است. از آنجا که یکی از اهداف استراتژیک مدیریت پسماند، کاهش تدریجی دفع و افزایش ظرفیت بازیافت و پردازش است. لذا اجرای ۱۲ خط ۲۵۰ تنی پردازش و تولید کمپوست، با استفاده از آخرین تکنولوژی روز دنیا، در مجتمع پردازش و دفع در حال اتمام است. در این روش پسماندهای آلی از پسماندهای خشک جداسازی شده و در پروسهٔ تخمیر هوازی به کمپوست تبدیل می‌شود و مواد خشک به روش‌های بهینهٔ جداسازی شده و به چرخهٔ تولید بازخواهند گشت و موجب بهبود محیط زیست شهری و بهبود وضعیت اجتماعی و بهداشتی مردم خواهد شد.کاهش شیرابه و عدم تولید گازهای گلخانه‌ای (متان)، کاهش میزان مواد دفنی و افزایش طول عمر مراکز دفع، جلوگیری از دفن مواد با ارزش از دیگر مزایای زیست‌محیطی احداث واحدهای پردازش است.

### ۴-۶. پروژهٔ استحصال گاز از مرکز دفن آرادکوه

یکی از معضلات زیست‌محیطی مراکز دفن زائدات جامد، تولید حجم بالایی از گازهای گلخانه‌ای یا به بیانی، گازهای گرم‌کنندهٔ اتمسفر زمین است. ضرورت جمع‌آوری و تصفیهٔ این‌گونه گازها در چارچوب کنوانسیون‌های حفظ محیط زیست جهانی از یک‌سو و قابلیت استفاده از این گازها به عنوان منبع انرژی جهت تولید برق از سوی دیگر باعث شده تا با بهره‌گیری از فناوری روز دنیا شرایطی جهت استحصال این گاز در مراکز دفن زائدات جامد شهر تهران فراهم آورد. انجام این پروژه ضمن شناسایی منابع جدید تولید انرژی برای استفاده در مرکز دفن، با حذف گازهای قابل اشتعال و انفجار، امکان ایجاد آتش‌سوزی را در مرکز دفن به

حداقل خواهد رساند که دارای ظرفیت ۲۲۰ حلقه چاه و ۴ هزار تن کمپوست است که ۳ میلیون تن گاز متان و ۴ هزار تن کمپوست روزانه تولید می‌کند. اولین سلول دفن بهداشتی ایران با ظرفیت حدود ۶۰۰ هزار تن طراحی و اجرا شده است. هدف از اجرای این پروژه، بررسی نتایج و امکان‌سنجی دفن اصولی در این مرکز است. این پروژه مزایای مختلفی دارد که عبارت‌اند از:

- ✓ کنترل استحصال گازهای حاصله از مرکز دفن $CO_2$ و $CH_4$ و جلوگیری از گازهای گلخانه‌ای
- ✓ کنترل استحصال شیرابه‌های به‌وجودآمده برای تصفیه و استفادهٔ مجدد برای فضای سبز
- ✓ بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی ملی و محلی و کاهش آثار نامطلوب زیست‌محیطی
- ✓ بالا بردن سرعت تجربهٔ بیولوژیکی و ایجاد فضای مناسب برای دفع مجدد
- ✓ امکان استفادهٔ مجدد از زائدات دفع‌شده به عنوان کمپوست پس از پایان فرایند تثبیت

آن دسته از پسماندهایی که قابلیت بازیافت و نیز استفاده در فرایندهای تولید کمپوست، تولید سوخت جایگزین و دیگر تکنولوژی‌های پردازش را ندارند، برای دفع به مراکز دفن ارسال می‌شود. برای دفن این بخش از پسماندها اولین سلول دفن بهداشتی ایران با ظرفیتی حدود ۶۰۰ هزار تن طراحی و اجرا شده که با تعبیهٔ لوله‌های جمع‌آوری گاز در این سلول گاز تولیدی بر اثر فرایندهای بیولوژیکی که غالباً از نوع گاز متان است جمع‌آوری شده و به منظور استحصال و بازیابی انرژی مورد مصرف قرار می‌گیرد تا به این وسیله از آلودگی هوا به واسطهٔ این گازهای گلخانه‌ای جلوگیری شود. با بهره‌برداری از این پروژه، دفن سنتی پسماندها متوقف می‌شود و معضلات زیست‌محیطی مرتفع خواهد شد. چشم‌انداز برنامهٔ جامع مدیریت پسماند شهر تهران ۱۳۹۲، توسعهٔ سیستمی معتبر در مدیریت پسماند شهری به لحاظ زیست‌محیطی و اجتماعی به روش پایدار و به‌صرفه برای کلان‌شهر تهران است [۳۵]. سیستم جامع تلفیقی مدیریت پسماند تهران با بهره‌گیری از تمام امکانات و روش‌های ممکن، مشارکت مردمی و بخش خصوصی، کمینه کردن فشار بر زمین، بازیافت و تولید مواد و انرژی، اعمال روش مناسب و جدید مدیریت پسماند با کمترین آسیب به محیط زیست است.

### ۴-۷. قوت‌ها و ضعف‌های استفاده از فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی

استفاده از فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی موجب کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، حل معضل فاضلاب‌ها و پساب‌های آلی و از بین رفتن خطر آلودگی آب‌های سطحی، کاهش جرم و حجم پسماند، کاهش قابل توجه پسماند ارسالی به دفنگاه و جلوگیری از توسعهٔ محل‌های دفن، کنترل آلودگی‌های زیست‌محیطی (حذف بوها، حشرات موذی و ...)، جلوگیری از انفجار و آتش‌سوزی‌های احتمالی در محل‌های دفن می‌شود و همچنین می‌توان کودهای آلی سازگار با محیط زیست تولید کرد.

در مقابل نیاز به نیروی کار متخصص، هزینهٔ بالای بهره‌برداری و نگهداری، نیاز به پردازش دقیق پسماند در هاضم‌های بی‌هوازی و تولید آلاینده‌هایی مانند NOx، SOx، CO2 و ترکیبات کلر، وجود فلزات سنگین در خاکستر و سرباره و همچنین تکنولوژی پرهزینه در فناوری‌های ترموشیمیایی، از جمله ضعف‌های فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی هستند.

### ۴-۸. زیرساخت‌های مورد نیاز برای توسعهٔ فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی

برای احداث نیروگاه‌های تبدیل پسماند به انرژی ضرورت دارد که زیرساخت‌های زیر فراهم شود: ۱) تخصیص زمین به همراه جادهٔ دسترسی، ۲) تأمین و تحویل پسماند در محل اجرای پروژه، ۳) واحد پیش‌پردازش و آماده‌سازی پسماند، ۴) تأمین آب به میزان ۵۰ تا ۵۰۰ لیتر به ازای هر تن پسماند برای نیروگاه‌های هاضم بی‌هوازی (بسته به نوع هاضم) و تأمین پساب یا آب صنعتی برای نیروگاه‌های زباله‌سوز، ۵) تأمین برق پروژه طی دورهٔ احداث.

## ۵. بحث و تحلیل

با توجه به نیاز بشر برای از بین بردن ضایعات، از دیرباز تا کنون روش‌های متفاوتی برای دفع پسماند و زباله‌های شهری وجود داشت که به‌طبع هر یک دارای مزایا و معایبی هستند. از بین این تکنولوژی‌ها در ایران زباله‌سوز آن هم تنها با هدف امحا پسماند استفاده می‌شود و به نوعی می‌توان اظهار داشت که تکنولوژی استحصال انرژی به روش ترموشیمیایی تا حدودی در ایران

ناشناخته است و در بیشتر شهرهای ایران از لندفیل در جهت دفع زائدات استفاده می‌شود که روش چندان مناسبی نیست و پیامدهای سوء زیست محیطی،که مهم‌ترین آن‌ها آلودگی آب و خاک توسط شیرابه‌های تولیدی در مکان دفن هستند را در بر خواهد داشت.

با توجه به اینکه درصد بالایی از زباله‌های جامد شهری تولیدشده در ایران از نوع تر (آلی) هستند، می‌توان اظهار داشت که شرایط لازم برای رشد میکروارگانیسم‌ها به‌خوبی فراهم بوده و روش دفع پسماند با روش بیوگاز کارایی بهتری نسبت به سایر فناوری‌ها خواهد داشت، چرا که با توجه به رطوبت بالای موجود در زبالهٔ تر، در فناوری زباله‌سوز یک هزینهٔ اضافی برای از بین بردن رطوبت و پیش‌فرآوری لازم است تا به ارزش حرارتی یکنواختی برای زباله‌سوز برسد. با احداث و استفاده از این مراکز دفع زباله در کشور می‌توان بخشی از انرژی الکتریکی را برای مصارف خانگی و صنعتی تأمین کرد که علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی جهت تولید انرژی به ایجاد فرصت‌های شغلی و جذب متخصصان و کارمندان و کارگران در این حوزه و تقویت زیرساخت‌های اقتصادی در ایران می‌شود. با توجه به وضعیت مدیریت پسماند در کشور، می‌توان به این نتیجه رسید که کشور ما هنوز به طور اصولی به روش‌های مدیریت پسماند نپرداخته و نیازمند تدوین استراتژی لازم جهت مدیریت پسماند، مانند اجتناب از تولید زباله،کاهش تولید زباله، استفادهٔ مجدد، بازیافت و بازیابی مواد و انرژی و... است، که این مهم با جلب رضایت و مشارکت ذی‌نفعان، افزایش سطح آگاهی عمومی، ارتقای سطح فناوری و بهینه‌سازی روش‌ها و افزایش مشارکت در تدوین و اعمال دستورالعمل‌ها و ضوابط اجرایی در انجام فعالیت‌های مدیریت اجرایی پسماند است و همچنین مسلم است که با بهره‌گیری از تجارب کشورهای موفق در مدیریت پسماند که پس از سال‌ها آزمون و خطا با موفقیت توانستند به مسائل و مشکلات پسماند فائق شوند در کشور ما نیز می‌توان در این زمینه موفق بود. در این مقاله اهمیت مدیریت زباله‌های جامد شهری با رویکرد استحصال انرژی و امحای پسماند مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی و ایجاد آلودگی زیست‌محیطی ناشی ازسوختن این منابع که به افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرمایش زمین منجر می‌شوند، می‌توان مدیریت پسماند را به عنوان یکی از منابع مهم انرژی تجدیدپذیر و پاک در آینده دانست، به طوری که بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته به مسئلهٔ مدیریت پسماند با دید توسعهٔ پایدار نگاه می‌کنند.

### ۵-۱. نقش توسعهٔ نیروگاه‌های زیست‌توده رفع چالش‌های مدیریت پسماند و حل مشکلات زیست‌محیطی

#### ۵-۱-۱. چالش‌های مدیریت پسماند در ایران و نقش نیروگاه‌های تبدیل پسماند به انرژی در رفع این چالش‌ها

چالش‌های حوزهٔ مدیریت پسماند در ایران را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: چالش‌های ساختاری، چالش‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری و چالش‌های مالی. نبود یکپارچگی و مدیریت جزیره‌ای، ضعف ضمانت اجرا در قوانین و ضعف در بازدارندگی و اعمال مجازات‌ها، نبود نگاه کلان برای مدیریت پسماند، نبود برنامهٔ ملی و منطقه‌ای مناسب از جمله چالش‌های ساختاری حوزهٔ مدیریت پسماند در ایران هستند [۳۶].

کم‌توجهی به آموزش و مسائل اجتماعی، عدم پردازش پسماند، ضعف در به‌کارگیری مشارکت جوامع محلی، بخش خصوصی و گروه‌های مردم‌نهاد، ضعف استفاده از فناوری‌های متناسب با شرایط هر منطقه نیز بخشی از چالش‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری مدیریت پسماند در کشور هستند. ضعف در موضوعات مربوط به تخصیص اعتبار و بودجه نیز یکی از چالش‌های مهم مالی این حوزه است [۳۶].

توسعهٔ نیروگاه‌های تبدیل پسماند به انرژی کمک شایانی به حل بخشی از چالش‌های مدیریت پسماند در کشور خواهد کرد. در حوزهٔ چالش‌های ساختاری، با توجه به اینکه توسعهٔ این نیروگاه‌ها نیازمند هماهنگی بخش‌های مختلف مدیریتی و اجرایی است، با ایجاد مشارکت و هم‌افزایی در دستگاه‌های متولی چالش نبود یکپارچگی تا حد قابل ملاحظه‌ای برطرف خواهد شد. همچنین، با تدوین برنامهٔ ملی براساس برنامهٔ هفتم توسعه و بازبینی طرح‌های جامع پسماند به منظور در دستور کار قرار دادن استفاده از فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی، چالش نبود برنامهٔ ملی و منطقه‌ای مناسب مرتفع خواهد شد.

از آنجا که یکی از زیرساخت‌های مورد نیاز برای توسعهٔ نیروگاه‌های تبدیل پسماند به انرژی، احداث خطوط پردازش و تفکیک پسماند به صورت دقیق و جزئی است، چالش عدم پردازش پسماند در بخش چالش‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری به شکل قابل

توجهی رفع می‌شود. همچنین مشاهدهٔ خروجی این نیروگاه‌ها که همانا تبدیل پسماند به برق است سبب ایجاد انگیزه و جلب مشارکت‌های مردمی در مدیریت پسماند خواهد شد که به شکل هم‌زمان چالش‌های محیط زیستی جامعه و ناترازی برق را برطرف خواهد کرد و چالش ضعف در به‌کارگیری ظرفیت‌های مشارکت جوامع محلی را حل خواهد کرد.

با توجه به تنوع فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی و شرایط متفاوت مناطق مختلف از منظر آنالیز پسماند و ارزش حرارتی آن، می‌توان متناسب با شرایط هر منطقه فناوری مناسب را انتخاب کرده و چالش ضعف در استفاده از فناوری‌های متناسب با شرایط هر منطقه که یکی از چالش‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری حوزهٔ مدیریت پسماند در کشور است را رفع کرد.

مهم‌ترین چالشی که حوزهٔ مدیریت پسماند با آن روبه‌روست، نبود منابع مالی و اعتبارات مورد نیاز برای مدیریت پسماند است. با توجه به اینکه تبدیل پسماند به انرژی و کسب درآمد از محل فروش آن از جذابیت اقتصادی برخوردار است، تأمین مالی این پروژه‌ها از طریق جذب سرمایه‌گذار بخش خصوصی قابل انجام است. همچنین، از طریق بهبود و ایجاد سازوکارهای حمایتی نو می‌توان جذابیت اقتصادی پروژه‌ها را افزایش داد و منابع مالی و اعتبارات مورد نیاز را جذب کرد.

### ۵-۲. آثار مثبت اجتماعی و زیست‌محیطی احداث نیروگاه‌های تبدیل پسماند به انرژی

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، روزانه حدود ۵۸ هزار تن پسماند در کشور تولید می‌شود که ۲۵ درصد از آن بازیافت و ۷۵ درصد از آن دفن می‌شود که عمدتاً دفن غیر بهداشتی و به شکل تلنباری است. به منظور حل بخشی از مشکلات ناشی از دفن غیراصولی پسماند و کاهش حجم پسماند ارسالی به محل‌های دفن و همچنین کمک به حفظ محیط زیست، شورای اقتصاد در جلسه‌ای به تاریخ ۱۴۰۲/۰۸/۱۰ مجوز سرمایه‌گذاری در طرح احداث ۲۰۰ مگاوات نیروگاه زیست‌توده از محل مادهٔ ۱۲ قانون رفع موانع تولید رقابت‌پذیر و ارتقای نظام مالی کشور را صادر کرد. به موجب این مصوبه، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهروری انرژی برق (ساتبا) موظف است در چارچوب قانون برگزاری مناقصات، شرکت‌های سرمایه‌گذار برای احداث نیروگاه را از طریق برگزاری مناقصه انتخاب کند. برندهٔ مناقصه شرکتی است که کمترین قیمت به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی را پیشنهاد دهد. سقف قیمت پیشنهادی ۹/۵ سنت دلار است و وزارت نیرو به مدت ۴/۵ سال از زمان بهره‌برداری، برق تولیدی نیروگاه را خریداری می‌کند. همچنین، برق تولیدی نیروگاه تا پایان عمر آن متعلق به سرمایه‌گذار بوده و وزارت نیرو مجوز فروش برق در بورس انرژی سبز را صادر می‌کند.

به همین دلیل، پیش‌بینی می‌شود با احداث ۲۰۰ مگاوات نیروگاه زیست‌توده (تبدیل پسماند به انرژی)، سالیانه ۱۶۰۰ گیگاوات ساعت برق تولید شده و ۴۳۲ میلیون متر مکعب در مصرف گاز طبیعی صرفه‌جویی شود. همچنین، تولید این میزان برق از پسماند سبب می‌شود تا از انتشار ۲/۸ میلیون تن گاز گلخانه‌ای معادل $CO_2$ جلوگیری شود. با توجه به آنکه هر تن زباله ۴۰۰ تا ۵۰۰ لیتر شیرابه تولید می‌کند و هر لیتر شیرابه می‌تواند ۴ هزار لیتر آب را آلوده کند، از آلودگی آب جلوگیری خواهد شد.

## ۶. نتیجه‌گیری

استفاده از فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی، علاوه بر حل معضلات زیست‌محیطی ناشی از مدیریت سنتی پسماند، به تنوع سبد تأمین انرژی کشورها نیز کمک قابل توجهی می‌کند. گسترش به‌کارگیری این فناوری‌ها برای تأمین انرژی در کشورهای توسعه‌یافته و برخی کشورهای درحال‌توسعه در سال‌های اخیر و تجربه‌های موفقی که در کشورهایی نظیر چین، ژاپن و کشورهای اروپایی وجود دارد، تأییدی بر کارآمدی فناوری‌های مورد اشاره است. اگرچه همچنان نگرانی‌هایی در خصوص آلایندگی‌های ایجادشده توسط برخی از انواع فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی در جوامع وجود دارد، اما با بلوغ تکنولوژی و استفاده از روش‌های نوین برای حذف آلایندگی‌های ایجادشده، این نگرانی تا حد قابل ملاحظه‌ای مرتفع شده است. همچنین چالش‌هایی در مسیر توسعهٔ نیروگاه‌های تبدیل پسماند به انرژی، از جمله تأمین آب مصرفی، تأمین خوراک نیروگاه با شرایط مناسب و کمبود نیروی کار متخصص، وجود دارد که با همکاری متولیان امر پسماند و بومی‌سازی فناوری‌ها، قابل حل هستند. در اسناد بالادستی، مانند برنامهٔ هفتم توسعه، وزارت نیرو فقط مکلف به خرید برق حاصل از پسماند است، به طوری که قیمت خرید برق جذابیتی برای تحقق سرمایه‌گذاری در این حوزه است. حال آنکه به نظر می‌رسد تدوین برنامهٔ ملی مدیریت پسماند توسط

سازمان حفاظت محیط زیست با همکاری وزارت کشور نقش کلیدی‌تری را ایفا خواهد کرد. در همین ارتباط تبدیل پسماند به انرژی علاوه بر تکمیل چرخهٔ حیات پسماند و تولید برق می‌تواند به صورت بسته‌ای مد نظر قرار گیرد که نیازمند تعاملات سازنده میان سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر، سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌ها و سازمان حفاظت محیط زیست است. با توجه به ظرفیت‌های موجود در ایران و تولید روزانه ۵۸ هزار تن پسماند شهری و روستایی در سطح کشور، رسیدن به چشم‌انداز تولید ۲۰۰ مگاوات برق از پسماند جامد شهری، با همکاری و عزم جدی دستگاه‌های متولی قابل حصول است. از جهتی اجرای پروژه‌های متعدد و بومی‌سازی فناوری و تربیت نیروهای متخصص سبب خواهد شد در آینده مدیریت پسماند از دفن فاصله گیرد و از عمده مشکلات زیست‌محیطی ایجادشده کاسته شود.

## منابع


1. Razeghi, M., et al., Evaluating the economic impact of solar energy on local industries in Semnan, Iran. 2025. **3**(1): p. 49-58.
2. Feizi, R., et al., Technical and environmental assessment of biofuel utilization in light and heavy vehicles: implications for carbon footprint reduction on high-traffic freeway. 2025. **3**(2): p. 1-7.
3. Yousefi, H., et al., GIS-based spatially integrated bioenergy resources assessment in Kurdistan Province-Northwest Iran. 2017. **23**: p. 11-20.
4. Shukla-Pandya, H., Bioenergy as a global public tool and technology transfer, in Microbial Biotechnology for Bioenergy. 2024, Elsevier. p. 263-275.
5. Rasaei, F., et al., Optimal selection of CSP site for desalination system using GIS and AHP method in Hormozgan province, Iran. 2025. **13**: p. 2255-2268.
6. Gholami, A., et al., The effect of hydrodynamic and ultrasonic cavitation on biodiesel production: An exergy analysis approach. 2018. **160**: p. 478-489.
7. Ahmadi, S., et al., Reducing the share of electricity generation from fossil fuels by replacing renewable energies in rainy areas. 2023.
8. Yousefi, H., et al., Identifying and Ranking the Effective Components in City Branding Emphasizing on the Economic (Case study: Tajrish Neighborhood of Tehran). 2025. **2**(1): p. 1-15.
9. Tabrizi, A., et al., Evaluating renewable energy adoption in G7 countries: a TOPSIS-based multi-criteria decision analysis. 2025. **5**(1): p. 2.
10. Abdous, M., et al., Design and analysis of zero-energy and carbon buildings with renewable energy supply and recycled materials. 2024. **324**: p. 114922.
11. Aboutorabi, R.S.S., et al., A comparative analysis of the carbon footprint in green building materials: a case study of Norway. 2024. **31**(49): p. 59320-59341.
12. Abdoos, M., et al., Forecasting solar energy generation in the Mediterranean region up to 2030–2050 using convolutional neural networks (CNN). 2025. **10**: p. 100167.
13. George, A.S., T. Baskar, and P.B.J.P.U.I.I.J. Srikaanth, Cyber threats to critical infrastructure: assessing vulnerabilities across key sectors. 2024. **2**(1): p. 51-75.
14. Oztemel, E. and S.J.J.o.i.m. Gursev, Literature review of Industry 4.0 and related technologies. 2020. **31**(1): p. 127-182.
15. Hajinezhad, A., et al., Biodiesel production from Norouzak (Salvia lerifolia) seeds as an indigenous source of bio fuel in Iran using ultrasound. 2015. **99**: p. 132-140.
16. Bahrani, S., et al., Modeling landfill site selection by multi-criteria decision making and fuzzy functions in GIS, case study: Shabestar, Iran. 2016. **75**: p. 1-14.
17. Zahedi, R., et al., Technical, economic and environmental assessment of carbon capture from thermal power plants and convert it into value added concrete material. 2024: p. 1-12.
18. Aliabadi, Y., et al., Analysis of energy generation from MSW with auxiliary feed in the north of Iran. 2023. **18**: p. 101185.
19. Salaripoor, H., H. Yousefi, and M.J.F.C. Abdoos, Life Cycle Environmental Assessment of Refuse-Derived Fuel (RDF) as an Alternative to Fossil Fuels in Cement Production: A Sustainable Approach for Mitigating Carbon Emissions. 2025: p. 100135.
20. Fardnia, K., et al., A bibliometric analysis of carbon and water footprints in renewable energy: The post-COVID-19 landscape. 2024: p. 100162.
21. Yousefi, H.J.W.m., Canola straw as a bio-waste resource for medium density fiberboard (MDF) manufacture. 2009. **29**(10): p. 2644-2648.
22. Noorollahi, Y., et al., Biogas production potential from livestock manure in Iran. 2015. **50**: p. 748-754.
23. Tayefeh, A., et al., Advanced bibliometric analysis on water, energy, food, and environmental nexus (WEFEN). 2023. **30**(47): p. 103556-103575.
24. Abdoos, M., et al., Evaluating zero-energy strategies in mixed-use buildings: a case study. 2025: p. 8-18.
25. Ghahremani, A., et al., Experimental investigation of spray characteristics of a modified bio-diesel in a direct injection combustion chamber. 2017. **81**: p. 445-453.

26. Panbechi, B., et al., Environmental, economic and energy evaluation of alternative fuels for a steam power plant: focus on biodiesel-nanoparticles utilization. 2024. **23**: p. 102636.
27. Zeng, Y., et al., Characterization of solid waste disposed at Columbia Sanitary Landfill in Missouri. 2005. **23**(1): p. 62-71.
28. Althouse, P., et al., 2004 Environmental Report. 2005, Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States).
29. Noorollahi, Y., H. Yousefi, and M. Pourarshad. Three dimensional modeling of heat extraction from abandoned oil well for application in sugarcane industry in Ahvaz—Souther Iran. in Proceedings World Geothermal Congress. 2015.
30. Kumar, D.J.P., et al., A comprehensive study on anaerobic digestion of organic solid waste: A review on configurations, operating parameters, techno-economic analysis and current trends. 2024.
31. Nayono, S.E., Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production. Vol. 46. 2010: KIT scientific Publishing.
32. Ghaedi, M., et al., Evaluation of the efficiency of dry anaerobic digester in the production of biogas and fertilizer using activated sludge and plant waste. 2024. **14**(1): p. 24727.
33. Helsen, L. and A. Bosmans. Waste-to-Energy through thermochemical processes: matching waste with process. in Proceedings of the 1st International Academic Symposium on Enhanced Landfill Mining. 2010. Haletra; Houthalen-Helchteren.
34. Nandhini, R., et al., Thermochemical conversion of municipal solid waste into energy and hydrogen: a review. 2022. **20**(3): p. 1645-1669.
35. Noorollahi, Y., et al., Biofuel for energy self-sufficiency in agricultural sector of Iran. 2021. **44**: p. 101069.
36. Abdulfatah, A.K., Exploring municipal solid waste management in Nigeria: Challenges, opportunities, and roadmap for sustainable development. 2023.

**Urban Development Policy Making**

Home Page: https://judpm.ir

Online ISSN: 3092-6564

# Artificial Intelligence and Its Applications in Urban Management

**Hadi Veisi[1*] | Seyed Ebrahim Barahang[2]**

1. Corresponding Author, Associate Professor, School of Intelligent Systems, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Iran. Email: h.veisi@ut.ac.ir
2. MSc student in Computational Linguistics, School of Intelligent Systems, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Iran. Email: ebrahimbarahang@ut.ac.ir

**ARTICLE INFO**

**Article type:**
Research Paper

**Article History:**
Received 01 January 2025
Revised 14 January 2025
Accepted 17 February 2025
Published Online 05 April 2025

**Keywords:**
Deployment of Artificial Intelligence,
Data Governance,
Urban Management,
Artificial Intelligence.

**ABSTRACT**

In recent years, artificial intelligence technology, with its numerous applications in urban management, has become one of the key pillars of transformation in this field. In this review article, the fundamentals of artificial intelligence, machine learning, and the general applications of AI were first introduced. Additionally, the concept of data governance, its layers, and its critical importance for municipalities were examined. The article then specifically discussed the applications of AI in smart cities and its role in addressing urban management challenges, demonstrating how this technology can contribute to improving transportation, enhancing public safety, optimizing waste management, strengthening urban planning, improving energy management, and facilitating city governance. Furthermore, the importance of prioritizing artificial intelligence applications in the city was discussed, and the implementation of artificial intelligence in urban management was analyzed. Finally, suggestions were provided for optimizing the use of artificial intelligence in urban management. These suggestions can be summarized as follows: 1. Enhancing organizational knowledge and expertise to fully harness the potential of AI; 2. Establishing the necessary technical infrastructures and integration between systems; 3. Collecting diverse data and formulating robust data governance; 4. Optimizing the application of AI technologies through testing; 5. Adopting a people-centered approach in proposing and designing AI projects. Given these points and the recognition of artificial intelligence's capabilities in urban management, a more efficient use of this technology in cities can be achieved.

**Cite this article:** Veisi, H. & Barahang, E. (2025). Artificial Intelligence and Its Applications in Urban Management. *Urban Development Policy Making*, 2 (1), 73-94. DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.510003.1012

© Hadi Veisi, Seyed Ebrahim Barahang
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.510003.1012

## 1. Introduction

Nowadays, with the rapid growth of city populations and the increasing trend toward urban living, numerous challenges have emerged in the management of metropolitan areas, such as transportation management, energy resource management, waste management, and public safety. In the present era, the use of artificial intelligence in cities has been introduced as an innovative solution for better managing these issues. By employing innovative methods, artificial intelligence can overcome these challenges with exceptional speed and precision, playing a crucial role in enhancing the efficiency of urban infrastructure. In other words, artificial intelligence can offer extensive applications in urban management across areas including transportation management, waste management, city governance, public safety, urban planning, and energy management. Hence, the use of artificial intelligence in urban management is both a necessity and of high importance in today's world. By incorporating

artificial intelligence into cities, the concept of a smart city emerges. With the advent of AI, various forms of non-biological intelligence have been introduced that significantly impact smart cities; in such cities, for the first time in history, city control is not exclusively managed by humans.

Generally speaking, artificial intelligence refers to the development of computers and machines to perform tasks that require human intelligence: tasks such as learning, understanding, problem-solving, and human decision-making. With the capability to analyze both real-time and historical urban data and forecast future trends, artificial intelligence can shift managerial decisions from a reactive approach to a more controlling and forward-looking one. Since data plays a key role in the development of new AI technologies, the concept of data governance and optimal data management becomes a fundamental issue in the implementation of artificial intelligence systems.

In this paper, we first review the fundamentals of artificial intelligence and introduce the various levels of AI. Additionally, the concepts of machine learning, deep learning, generative artificial intelligence, and their applications are described. Next, the concept of data governance and its importance in AI systems is examined. Following this, we address the most significant part of the paper: the applications of artificial intelligence in urban management and its deployment. Finally, conclusions and recommendations are offered regarding the optimization of AI use in urban management.

The aim of this review study is to clarify the potential of AI and to investigate its applications in smart cities, thereby fostering a comprehensive understanding of this technology's capabilities in addressing urban management challenges.

## 2. Methodology

This study adopts a review-based approach to examine artificial intelligence and its applications in urban management. This article will first introduce the fundamentals and levels of artificial intelligence, machine learning, and data governance. It then specifically explores the applications of AI in smart cities and urban management.

To collect sources for this study, the following approach was taken: In the initial search, only the titles and abstracts of articles were reviewed to identify relevant sources. Keywords such as “artificial intelligence,” “urban management,” “AI implementation,” “data governance,” and other related combinations were used in the search process. The time frame for selecting articles related to AI applications in cities was set from 2015 to 2024 (with a particular emphasis on sources published after 2020) to ensure the inclusion of up-to-date and relevant papers. However, for foundational concepts such as the basics of artificial intelligence and data governance, the selection criteria were based solely on the content’s relevance to the research topic and the number of citations. After evaluating and fully reviewing the collected articles, 46 papers were selected for final analysis.

## 3. Results

Due to the review nature of the research, this article presents findings from the analysis of compiled articles and studies rather than direct results. According to these studies, applications of artificial intelligence in each level of urban management should first be prioritized based on the city's needs, existing infrastructure, and impact on citizens' lives. Then, artificial intelligence systems should be implemented considering deployment challenges and the technology lifecycle stages in the urban environment. Therefore, given the strategic importance of artificial intelligence deployment and lifecycle in urban settings, this topic will be explored in detail throughout the article.

## 4. Conclusion

In this research, we first became acquainted with the fundamental concepts of artificial intelligence and the extraordinary opportunities that this technology offers us. Then, strategies for managing AI risks and data governance were presented. Subsequently, we examined smart cities and the role of artificial intelligence in such cities in detail, and introduced examples of successful projects in this domain. Furthermore, our investigations revealed that for the application of artificial intelligence in cities, awareness of the AI lifecycle and the risks associated with deploying AI is of great importance.

However, this review study has also faced certain limitations. Firstly, due to its review nature, the analyses rely on existing findings and do not present new experimental data. Moreover, in many large-

scale AI projects in cities, detailed and up-to-date information is not publicly available. As a result, most of the examples cited in this article are based on secondary data. Additionally, due to the growing use of artificial intelligence in urban projects and the wide range of topics involved, it was not possible to conduct an in-depth analysis of all dimensions. Furthermore, political, economic, and social differences between countries can hinder the generalizability and implementation of similar projects in other countries - particularly in developing countries - and focusing on successful projects may not fully reflect the challenges faced by less developed cities. Despite these limitations, this study can offer valuable insights for policymaking and the development of smart cities.

Based on the findings of this research, several recommendations for optimizing the use of artificial intelligence in urban management can be proposed. Firstly, enhancing organizational knowledge and expertise to fully harness the capabilities of artificial intelligence is essential. Additionally, it is necessary to establish the required technical infrastructures - including both hardware and software technologies - and to achieve integration between systems. On the other hand, as mentioned in Section 3, the collection of diverse data and the formulation of data governance should not be ignored; this may include designating an agency or individuals for managing, maintaining, and providing data, as well as defining specific standards and procedures for data utilization. Moreover, testing technologies can have a significant impact on optimizing the application of artificial intelligence; for example, developing chatbots for internal or public communication and conducting intelligent analyses of existing data. Finally, to address the real needs of society, adopting a people-centered approach in designing AI projects is of utmost importance. These recommendations can pave the way toward smarter and more efficient urban management.

پیشرفت شهری
سیاستگذاری
سایت نشریه: https://judpmi.ir
شاپا الکترونیکی: ۶۵۶۴-۳۰۹۲

# هوش مصنوعی و کاربردهای آن در مدیریت شهری

هادی ویسی[1*] | سید ابراهیم برآهنگ[2]

۱. نویسندۀ مسئول، دانشیار دانشکدۀ سامانه‌های هوشمند، دانشگاه تهران، رایانامه: h.veisi@ut.ac.ir
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکدۀ سامانه‌های هوشمند، دانشگاه تهران، رایانامه: ebrahimbarahang@ut.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:**
پژوهشی

**تاریخ‌های مقاله:**
**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۳/۰۹/۱۲
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۳/۱۰/۲۵
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۳/۱۱/۲۹
**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۴/۰۱/۱۵

**کلیدواژه:**
استقرار هوش مصنوعی،
حکمرانی داده،
مدیریت شهری،
هوش مصنوعی.

**چکیده**

در سال‌های اخیر، فناوری هوش مصنوعی با کاربردهای فراوانی که از خود در مدیریت شهری به جا گذاشته، به یکی از ارکان مهم تحول در این حوزه تبدیل شده است. به منظور آشنایی بهتر با هوش مصنوعی در این مقالۀ مروری، ابتدا به معرفی مبانی هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و کاربردهای کلی هوش مصنوعی پرداخته شد. همچنین، مفهوم حکمرانی داده، لایه‌های آن و اهمیت زیاد حکمرانی داده برای شهرداری‌ها مورد بررسی قرار گرفت. سپس، به طور خاص کاربردهای هوش مصنوعی در شهر هوشمند و نقش آن در رفع چالش‌های مدیریت شهری شرح داده شد؛ به طوری که نشان داده شد این فناوری چگونه می‌تواند در بهبود حمل‌ونقل، افزایش امنیت عمومی، بهینه‌سازی مدیریت پسماند، تقویت برنامه‌ریزی شهری، بهبود مدیریت انرژی و تسهیل ادارۀ شهر مؤثر باشد. در ادامه، اهمیت اولویت‌بندی کاربردهای هوش مصنوعی در شهر مطرح شد و استقرار هوش مصنوعی در مدیریت شهری تحلیل مورد بررسی قرار گرفت. در آخر، پیشنهادهایی در زمینۀ بهینه‌سازی به‌کارگیری هوش مصنوعی در مدیریت شهری ارائه شد. این پیشنهادها به طور خلاصه عبارت‌اند از: ۱. تقویت دانش و تخصص سازمانی برای استفاده از تمام ظرفیت‌های هوش مصنوعی؛ ۲. ایجاد زیرساخت‌های فنی لازم و برقراری یکپارچگی بین سامانه‌ها؛ ۳. جمع‌آوری داده‌های مختلف و تدوین حکمرانی داده؛ ۴. بهینه‌سازی کاربرد فناوری‌های هوش مصنوعی از طریق آزمودن فناوری‌های هوش مصنوعی؛ ۵. بهره‌گیری از رویکرد مردم‌محور برای پیشنهاد و طراحی پروژه‌های هوش مصنوعی. با توجه به این نکات و شناخت قابلیت‌های هوش مصنوعی در مدیریت شهری، می‌توان استفادۀ کارآمدتری از این فناوری در شهر داشت.

**استناد:** ویسی، هادی و برآهنگ، سید ابراهیم (۱۴۰۴). هوش مصنوعی و کاربردهای آن در مدیریت شهری. *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۲ (۱) ۷۳-۹۴.
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.510003.1012

© هادی ویسی، سید ابراهیم برآهنگ
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.510003.1012

## ۱. مقدمه

امروزه با رشد سریع جمعیت شهرها و افزایش گرایش به زندگی شهری، چالش‌های متعددی برای مدیریت کلان‌شهرها به وجود آمده است؛ از جمله چالش‌هایی در زمینهٔ مدیریت حمل‌ونقل، مدیریت منابع انرژی، مدیریت پسماند و امنیت عمومی. در عصر حاضر، استفاده از هوش مصنوعی[1] در شهر به عنوان راهکاری مبتکرانه برای مدیریت بهتر چالش‌های یادشده معرفی شده است. هوش مصنوعی با معرفی و به‌کارگیری روش‌های نوآورانه قادر است با سرعت و دقت بسیار زیاد در جهت غلبه بر این چالش‌ها عمل کند و نقش اساسی در افزایش کارایی زیرساخت‌های شهری ایفا کند. به بیان دیگر، هوش مصنوعی می‌تواند کاربردهای گسترده‌ای برای مدیریت شهری در زمینه‌های مدیریت حمل‌ونقل، مدیریت پسماند، ادارهٔ شهر، امنیت عمومی، برنامه‌ریزی شهری و مدیریت انرژی داشته باشد. به همین‌دلیل، در دنیای امروزی استفاده از هوش مصنوعی در مدیریت شهری ضرورت و اهمیت بالایی دارد. با استفاده از هوش مصنوعی در شهرها، مفهوم شهر هوشمند[2] مطرح می‌شود. با ظهور هوش مصنوعی، انواع مختلفی از هوش‌های غیرزیستی ارائه شده است که بر شهرهای هوشمند اثر قابل توجهی می‌گذارند؛ در چنین شهری برای اولین‌بار در تاریخ، کنترل شهر فقط توسط انسان‌ها انجام نمی‌شود [1].

به طور کلی، هوش مصنوعی به معنای توسعهٔ رایانه و ماشین‌ها[3] برای انجام وظایفی است که به هوش انسانی نیاز دارند [2]: وظایفی همچون یادگیری، درک، حل مسئله و تصمیم‌گیری انسانی. هوش مصنوعی با قابلیت تحلیل لحظه‌ای[4] و تاریخی[5] داده‌های شهری و پیش‌بینی روندهای آتی، می‌تواند تصمیم‌های مدیریتی را از رویکرد واکنشی به رویکردی کنترلی و آینده‌نگر تبدیل کند. از آنجا که دادهٔ نقشی کلیدی در توسعهٔ فناوری‌های هوش مصنوعی جدید دارد، مفهوم حکمرانی داده[6] و مدیریت بهینهٔ داده‌ها یک مسئلهٔ اساسی در پیاده‌سازی سیستم‌های هوش مصنوعی به شمار می‌آید.

در این مقاله ابتدا مبانی هوش مصنوعی را مرور می‌کنیم و با سطوح مختلف هوش مصنوعی آشنا می‌شویم. همچنین، مفاهیم یادگیری ماشین[7]، یادگیری عمیق[8]، هوش مصنوعی زاینده[9] و کاربردهای آن شرح داده می‌شود. سپس، مفهوم حکمرانی داده و اهمیت آن در سیستم‌های هوش مصنوعی بررسی خواهد شد. در ادامه، به مهم‌ترین بخش مقاله یعنی کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت شهری و استقرار آن می‌پردازیم. در آخر، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی در راستای بهینه‌سازی به‌کارگیری هوش مصنوعی در مدیریت شهری ارائه می‌شود.

هدف این پژوهش مروری، معرفی ظرفیت‌های هوش مصنوعی و بررسی کاربردهای آن در شهر هوشمند است تا درک جامع‌تری از قابلیت‌های این فناوری در حل چالش‌های مدیریت شهری به دست آید.

## ۲. روش‌شناسی

پژوهش حاضر با رویکرد مروری به بررسی هوش مصنوعی و کاربردهای آن در مدیریت شهری می‌پردازد. در این مقاله ابتدا مبانی و سطوح هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و حکمرانی داده معرفی خواهند شد. سپس، به طور خاص کاربردهای هوش مصنوعی در شهر هوشمند و مدیریت شهری مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

برای جمع‌آوری منابع این پژوهش، چنین رویکردی اتخاذ شد: در جست‌وجوی اولیه، تنها عنوان و چکیدهٔ مقالات بررسی شد تا منابع مرتبط با موضوع شناسایی شوند. برای جست‌وجوی مقالات از عبارت‌های کلیدی «هوش مصنوعی»، «مدیریت شهری»، «استقرار هوش مصنوعی»، «حکمرانی داده» و سایر ترکیبات مرتبط استفاده شد. بازهٔ زمانی جست‌وجو برای انتخاب مقالات مرتبط با مفاهیم کاربردهای هوش مصنوعی در شهر، سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ (با تأکید بر منابع منتشرشده پس از سال ۲۰۲۰) تعیین

1. Artificial Intelligence
2. Smart City
3. Machines
4. Real-time
5. Historical
6. Data Governance
7. Machine Learning
8. Deep Learning
9. Generative AI

شد تا مقالات به‌روز و مرتبط جمع‌آوری شوند؛ اما برای مفاهیم بنیادی مانند مبانی هوش مصنوعی و حکمرانی داده، معیارهای انتخاب تنها بر اساس میزان ارتباط محتوایی با موضوع پژوهش و تعداد استنادات تعیین شد. پس از ارزیابی و مطالعهٔ کامل مقالات گردآوری‌شده، ۴۶ مقاله برای بررسی نهایی انتخاب شد.

## ۲-۱. مروری بر مفاهیم و مبانی هوش مصنوعی

هوش مصنوعی به معنای شبیه‌سازی هوش انسانی روی رایانه و ماشین‌هاست تا بتوانند رفتاری همانند انسان از خود نشان دهند. به بیان کامل‌تر، هوش مصنوعی شاخه‌ای از علوم رایانه است که در آن رایانه و ماشین‌ها برای انجام وظایف مرتبط با هوش انسانی آماده می‌شوند.

### ۲-۱-۱. سطوح هوش مصنوعی

هوش مصنوعی را می‌توان به ۳ سطح تقسیم کرد [3]: هوش مصنوعی محدود (ANI)[1]، هوش مصنوعی عمومی (AGI)[2] و هوش مصنوعی فوق‌العاده (ASI)[3].

**هوش مصنوعی محدود:** هوش مصنوعی محدود به نوعی از هوش مصنوعی گفته می‌شود که تنها برای یک وظیفهٔ خاص و محدود ساخته شده است. هوش مصنوعی محدود نمی‌تواند فراتر از وظیفهٔ تعریف‌شده عمل کند و فاقد آگاهی عمومی است. با این‌وجود، هوش مصنوعی محدود کاربردهای فراوانی در دنیای امروز دارند، از جمله:

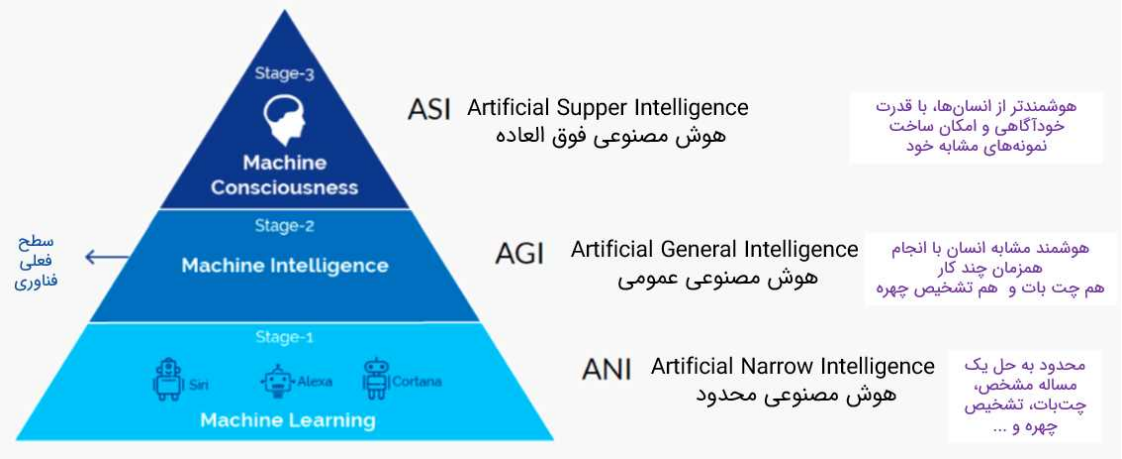
- چت‌بات‌ها مانند چت‌بات‌های پشتیبان مشتری و رزرواسیون
- تشخیص تصویر و چهره
- سامانه‌های توصیه‌گر[4]
- خودروهای خودران[5]
- تشخیص پلاک خودرو
- پیش‌بینی مصرف برق

**هوش مصنوعی عمومی:** میزان هوشمندی هوش مصنوعی عمومی مشابه انسان است و می‌تواند هر وظیفهٔ فکری را که یک انسان قادر به انجام آن است، به طور هم‌زمان و با همان سطح (و یا مشابه آن) انجام دهد. بنابراین، هوش مصنوعی عمومی به خلاف هوش مصنوعی محدود این توانایی را دارد که دانش خود را به حوزه‌های جدید گسترش دهد. هدف هوش مصنوعی عمومی فقط تقلید فرایندهای فکری و رفتار انسان نیست، بلکه دستیابی به درکی عمیق از آن‌هاست. این سطح از هوش مصنوعی می‌تواند آزمون تورینگ[6] را با موفقیت پشت سر بگذارد؛ یعنی قادر است رفتاری غیر قابل تمایز از انسان از خود نشان دهد. در حال حاضر، تلاش پژوهشگران بر این است که فناوری هوش مصنوعی به سطح هوش مصنوعی عمومی برسد؛ تا جایی که شرکت‌های بزرگی مانند OpenAI سرمایه‌گذاری‌های کلانی در این حوزه انجام داده‌اند.

**هوش مصنوعی فوق‌العاده:** هوش مصنوعی فوق‌العاده نوعی مفهوم فرضی است که به ماشینی با توانایی‌هایی فراتر از انسان در تمامی حوزه‌ها اشاره دارد. این سطح از هوش، به یک ابرهوش منتهی می‌شود که نه تنها از انسان بی‌نیاز است، بلکه می‌تواند به طور مستقل فکر کند و خود را بهبود بخشد. همین ویژگی‌ها موجب بروز نگرانی‌هایی دربارهٔ کنترل و مدیریت آن پس از ایجاد می‌شود. البته هنوز امکان دستیابی به هوش مصنوعی فوق‌العاده مشخص نیست و حداقل می‌توان گفت که سال‌های زیادی تا دستیابی به چنین سطحی از هوش مصنوعی فاصله داریم. شکل ۱، سطوح هوش مصنوعی را نشان می‌دهد.

1. Artificial Narrow Intelligence
2. Artificial General Intelligence
3. Artificial Superintelligence
4. Recommender System
5. Self-driving Vehicles

۶. آزمونی برای ارزیابی عملکرد هوش مصنوعی که توسط آلن تورینگ پیشنهاد شد. اگر هوش مصنوعی بتواند به گونه‌ای پاسخ دهد که یک انسان نتواند آن را از یک انسان واقعی تشخیص دهد، در این آزمون قبول می‌شود.




**شکل ۱.** سطوح هوش مصنوعی

### ۲-۱-۲. یادگیری ماشین و یادگیری عمیق

یادگیری ماشین و یادگیری عمیق دو مفهوم بنیادین و بسیار رایج در حوزهٔ هوش مصنوعی هستند که نقش مهمی در پیشرفت فناوری‌های هوش مصنوعی داشته‌اند. به همین‌دلیل، در ادامه به معرفی این دو مفهوم می‌پردازیم.

یادگیری ماشین زیرمجموعه‌ای از هوش مصنوعی است که با بهره‌گیری از داده‌ها به ماشین‌ها امکان می‌دهد بدون نیاز به دستورالعمل صریح، الگوها را شناسایی کنند و برای داده‌های جدید پیش‌بینی انجام دهند [4]. درخت تصمیم[۱]، ماشین بردار پشتیبان[۲]، رگرسیون لجستیک[۳] و نزدیک‌ترین همسایه[۴] از معروف‌ترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین کلاسیک هستند. همچنین، یادگیری ماشین را می‌توان به سه دستهٔ اصلی تقسیم کرد: یادگیری با نظارت[۵]، یادگیری بدون نظارت[۶] و یادگیری تقویتی[۷].

یادگیری عمیق زیرشاخه‌ای از یادگیری ماشین است؛ با این تفاوت که در یادگیری عمیق به جای استفاده از روش‌های آماری سنتی، از شبکه‌های عصبی عمیق[۸] برای یادگیری الگوها و پیش‌بینی استفاده می‌شود [4]. هرچه تعداد لایه‌های شبکهٔ عصبی بیشتر باشد، شبکه عمیق‌تر محسوب می‌شود. به دلیل ساختار پیچیده، این شبکه‌ها برای حل مسائل پیچیده و پردازش حجم بالایی از داده‌ها بسیار مناسب هستند. برخی از پرکاربردترین شبکه‌های عصبی عبارت‌اند از: شبکهٔ عصبی پیچشی[۹]، شبکهٔ عصبی بازگشتی[۱۰] و مبدل‌ها[۱۱].

### ۲-۱-۳. هوش مصنوعی زاینده

هوش مصنوعی زاینده یکی از زیرشاخه‌های هوش مصنوعی است که قادر به تولید محتوای جدید از جمله متن، گفتار، تصویر، کد، ویدئو و موسیقی است [5]. مدل‌های هوش مصنوعی زایندهٔ امروزی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و پردازش حجم انبوهی از داده‌ها، الگوهای موجود را شناسایی کرده و بر اساس آن‌ها محتوای جدید با کارایی بالا ایجاد می‌کنند. جدول ۱ ابزارهای تولید محتوا مبتنی بر هوش‌مصنوعی زاینده را در ۶ حوزهٔ متن، گفتار، تصویر، کدنویسی، ویدئو و موسیقی نشان می‌دهد.

1. Decision Tree
2. Support Machine Vector (SVM)
3. Logistic Regression
4. K-Nearest Neighbors (KNN)
5. Supervised Learning
6. Unsupervised Learning
7. Reinforcement Learning
8. Deep Neural Network (DNN)
9. Convolutional Neural Network (CNN)
10. Recurrent Neural Network (RNN)
11. Transformers

**جدول ۱.** ابزارهای هوش مصنوعی زاینده در تولید محتوا

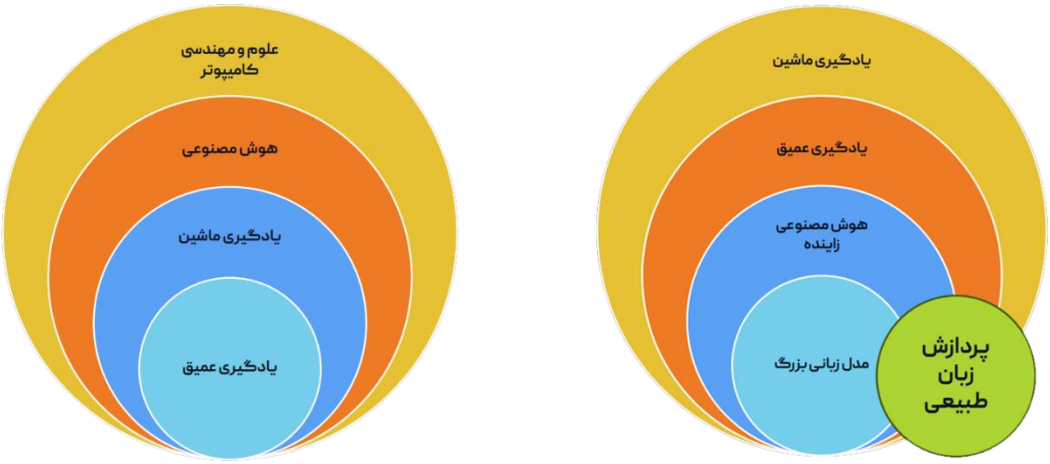
| متن | گفتار | تصویر | کد | ویدئو | موسیقی |
|---|---|---|---|---|---|
| ChatGPT | Vall-E | Dall-E | CodeX | Synthesia | SoundRaw |
| Gemini | WellSaid | Midjourney | Replit | Sora | Boomy |
| Claude | VoiceBox | OpenArt | GithubCopilot | HourOne | Suno |
| DeepSeek | Murf | Diagram | AI2SQL | Tavus | Mubert |

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌کنید، چت‌بات‌هایی مانند ChatGPT و Gemini از برجسته‌ترین دستاوردهای هوش مصنوعی زاینده در حوزهٔ متن و پردازش زبان طبیعی[1] محسوب می‌شوند که بر پایهٔ مدل‌های زبانی‌های بزرگ[2] توسعه یافته‌اند. مدل‌های زبانی بزرگ نوعی از مدل‌های هوش مصنوعی هستند که روی حجم گسترده‌ای از داده‌های متنی آموزش داده می‌شوند تا بتوانند احتمال وقوع کلمات در جمله را با دقت زیادی تشخیص دهند [6]. این مدل‌ها با استفاده از معماری مبدل‌ها، روابط پیچیدهٔ معنایی را شناسایی می‌کنند، به طوری که پاسخ‌های تولیدی آن‌ها مشابه نوشته‌های انسان به نظر می‌رسد. از این‌رو، چت‌بات‌های مبتنی بر مدل‌های زبانی بزرگ نسبت به چت‌بات‌های قبلی بسیار هوشمندتر عمل می‌کنند. این چت‌بات‌ها مزایای فراوانی را برای کاربران فراهم می‌کنند، از جمله:

- پشتیبانی از چند زبان
- درک عمیق درخواست‌ها
- استنتاج و تولید خودکار (و نه کپی) پاسخ
- عدم حساسیت به غلط‌های املایی و دستوری
- درک سابقهٔ گفت‌وگو و محاوره بر اساس تاریخچه
- تطبیق آسان با محتواهای اختصاصی سازمان

از هوش مصنوعی زاینده می‌توان در سطوح مختلفی از مدیریت شهری بهره برد، از جمله ایجاد مدل دیجیتالی دقیق از شهر (دوقلوی دیجیتال[3])، مدیریت آب و مدیریت بحران [7]. برای مثال، مک میلان و همکاران [8] با استفاده از مدل‌های زاینده چارچوبی نوین برای تشخیص نشتی آب در شبکه‌های توزیع ارائه داده‌اند که با دقت بالای ۹۸ درصد، امکان تشخیص خودکار و لحظه‌ای نشتی‌ها را فراهم می‌سازد. این چارچوب گامی مهم برای دستیابی به زیرساخت‌های خودترمیم‌پذیر در مدیریت پایدار آب شهری به شمار می‌رود.

شکل ۲ خلاصه‌ای از مطالب گفته‌شده و سلسله‌مراتب هوش مصنوعی را نشان می‌دهد.



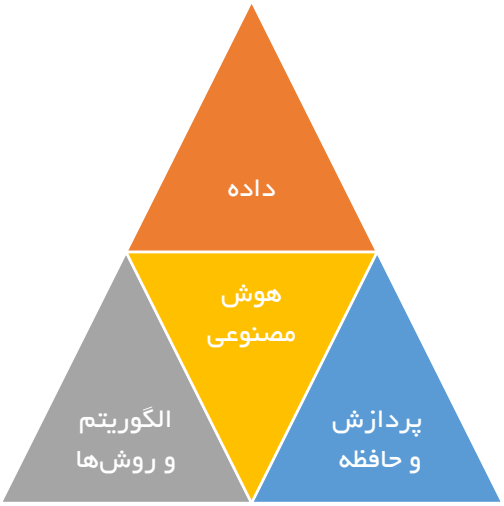

**شکل ۲.** سلسله‌مراتب هوش مصنوعی، از علوم کامپیوتر تا مدل‌های زبانی بزرگ

1. Natural Language Processing (NLP)
2. Large Language Models (LLM)

۳. دوقلوی دیجیتال یا Digital twin یک مدل مجازی از یک شیء فیزیکی است.

### ۲-۲. هوش مصنوعی و حکمرانی داده

داده، پردازش و حافظه، الگوریتم و روش‌های آن سه بعد مهم هوش مصنوعی را تشکیل می‌دهد (شکل ۳). در این میان، با گسترش استفاده از شبکه‌های عصبی عمیق، اهمیت داده بیش از پیش افزایش یافته است؛ زیرا مدل‌های عمیق‌تر برای دستیابی به دقت بالاتر به حجم وسیع‌تری از داده‌های متنوع نیاز دارند. از این‌رو، حکمرانی داده به یکی از الزامات اساسی در توسعه و به‌کارگیری هوش مصنوعی تبدیل شده است.




**شکل ۳.** مؤلفه‌های اصلی تأثیرگذار در ایجاد هوش مصنوعی

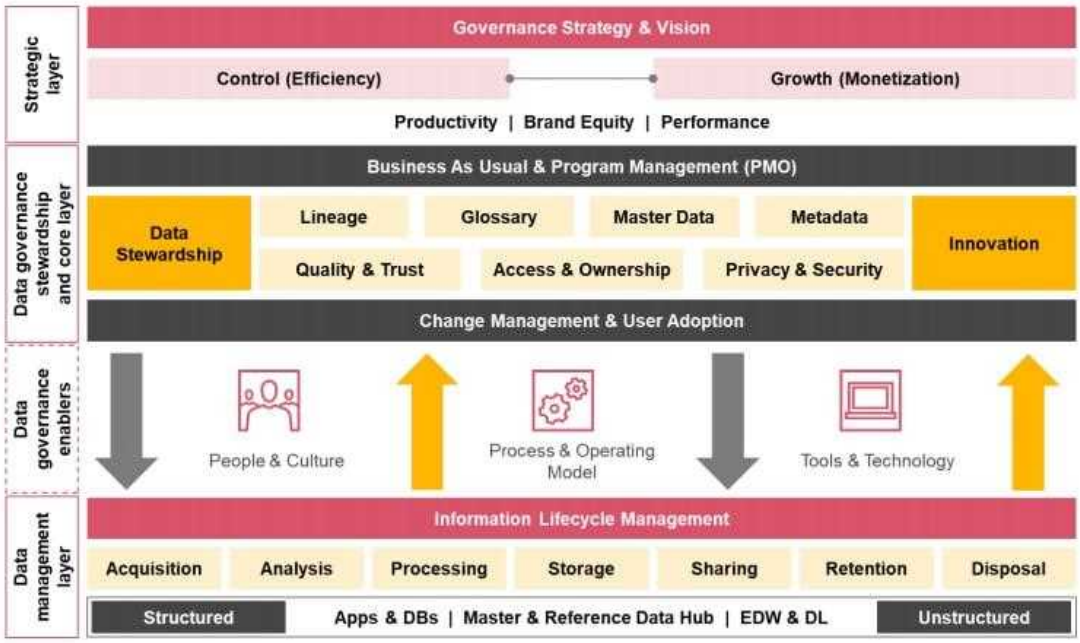
در عصر هوش مصنوعی، داده‌ها مهم‌ترین دارایی شهرداری‌ها به شمار می‌آیند. حکمرانی داده به سیاست‌ها و فرایندهایی اشاره دارد که به منظور مدیریت داده‌ها در یک سازمان اتخاذ می‌شوند [9]. حکمرانی داده چارچوب خاص خود را نیاز دارد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

چارچوب حکمرانی داده[1] مجموعه‌ای از فرایندها است که تضمین می‌کند داده‌های مهم موجود[2] به صورت ساختارمند در تمامی بخش‌های سازمان مدیریت شوند [10]. از این‌رو، ساختارمند کردن داده‌ها و تضمین داده‌های با کیفیت و مدیریت دسترسی از مهم‌ترین ابعاد حکمرانی داده محسوب می‌شوند. در مدیریت شهری، تولید داده‌های ساختارمند و به‌روز موجب می‌شود با تحلیل دقیق نیازهای شهری، خدمات عمومی بهبود یابند. همچنین، با تعریف سطوح دسترسی، احتمال سوء استفاده از داده‌های حساس و نفوذهای غیرمجاز کاهش پیدا می‌کند.

در شکل ۴، چارچوب حکمرانی دادهٔ شرکت PwC به نمایش گذاشته شده است. این چارچوب از چهار لایهٔ اصلی تشکیل می‌شود:

۱. **لایهٔ مدیریت داده:** مدیریت چرخهٔ حیات داده از جمع‌آوری تا حذف.
۲. **دسترسی و عوامل تسهیل‌کنندهٔ حکمرانی داده:** فراهم‌کنندهٔ بستر مناسب با تمرکز بر افراد، فرایندها و فناوری.
۳. **هسته و نظارت حکمرانی داده:** نوآوری و نظارت بر عواملی مانند کیفیت، امنیت و مالکیت داده‌ها.
۴. **لایهٔ راهبردی:** تعیین چشم‌انداز، راهبردها و اهداف کلان سازمان برای حکمرانی داده همراه با کنترل و رشد پایدار.

1. Data Governance Framework
2. Data Assets




**شکل ۴.** چارچوب حکمرانی دادهٔ شرکت PwC [11]

### ۲-۲-۱. امنیت داده و انتشار آزاد اطلاعات غیرحساس

یکی از ابعاد مهم در حکمرانی داده، تأمین امنیت داده‌ها و اطلاعات است. حکمرانی داده بر تدوین الزامات امنیتی برای حفاظت از اطلاعات شخصی تأکید دارد و نقش مشخصی برای مسئول امنیت داده‌ها در نظر می‌گیرد تا دسترسی و استفادهٔ ایمن از داده‌ها را تضمین کند [12]. با توجه به اهمیت بالای امنیت داده‌ها، چندین کشور چارچوب‌های مقرراتی برای تأمین امنیت داده‌ها ارائه کرده‌اند؛ برای مثال، قانون حفاظت از اطلاعات شخصی در ژاپن (APPI)[1].

از سوی دیگر، انتشار آزاد اطلاعات غیرحساس در حکمرانی داده با افزایش شفافیت و دسترسی به داده‌های باکیفیت، می‌تواند نقش مؤثری در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی داشته باشد. در ایالات متحدهٔ آمریکا، حکمرانی داده در حوزه‌هایی مانند امنیت، سلامت و مدیریت بحران کاربرد دارد؛ مانند استفاده از آن در دوران کرونا برای واکنش سریع. همچنین، طرح‌های حکمرانی مانند Open Government با هدف افزایش شفافیت و مشارکت شهروندان در تصمیم‌گیری‌ها از طریق انتشار داده‌های دولتی اجرا شده است.

با توجه به نکات یادشده، می‌توان گفت که حکمرانی داده فقط یک مسئله فنی نیست، بلکه مستلزم هم‌افزایی عواملی مانند فرایندها، فرهنگ سازمانی و فناوری است. چارچوب حکمرانی داده به دنبال آن است که با بهره‌برداری مناسب از داده‌ها به عنوان منابع با ارزش سازمانی، زمینه برای تصمیم‌گیری بهتر، ایجاد نوآوری و رشد پایدار سازمان فراهم شود [13].

### ۲-۲-۲. محدودیت‌ها و ریسک‌های هوش مصنوعی

همان‌طور که می‌دانیم، هوش مصنوعی با سرعت و دقت زیاد امکانات گسترده‌ای را در اختیار ما قرار می‌دهد، از جمله توسعهٔ چت‌بات‌های هوشمند، تولید محتوا (متنی، صوتی، ویدئو و موسیقی)، خودکارسازی فرایندها و کمک به مدیریت شهری. با این‌حال، ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی با محدودیت و ریسک‌هایی همراه هستند [14] که برخی از مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

۱. **اطلاعات نادرست و توهم**[2]: چت‌بات‌های مبتنی بر مدل‌های زبانی بزرگ علی‌رغم دقت زیاد گاهی اطلاعات نادرست و ساختگی تولید می‌کنند؛ برای مثال به منابعی ارجاع می‌دهند که وجود خارجی ندارند. به منظور مدیریت این چالش استفاده از روش‌های خودکار اعتبارسنجی منابع پیشنهاد می‌شود [15].

1. Act on the Protection of Personal Information
2. Hallucination

۲. **سوگیری[1] در یادگیری:** مدل‌های هوش مصنوعی تحت تأثیر داده‌های آموزشی خود قرار دارند و منعکس‌کنندهٔ آن‌ها هستند. در صورت وجود سوگیری در این داده‌ها، نتایج آن‌ها نیز می‌تواند همراه با سوگیری و ناعادلانه باشد. برای مثال، رد درخواست وام برای گروه‌های خاص و مشکلات شناسایی چهرهٔ نژادهای خاص در سیستم‌های تشخیص چهره. برای کاهش اثر این مشکل می‌توان از روش‌های تنوع‌بخشی به داده‌های آموزش و الگوریتم‌های کاهش سوگیری بهره برد.

۳. **محرمانگی و امنیت:** ذخیره و پردازش داده‌های کاربر در چت‌بات‌ها می‌تواند خطر نشت اطلاعات حساس یا سوء استفاده از آن‌ها را به همراه داشته باشد؛ برای مثال چت‌بات‌های مبتنی بر ChatGPT.

۴. **جایگزینی شغل‌ها:** امروزه بسیاری از وظایفی که پیش‌تر توسط نیروی انسانی انجام می‌شد، توسط هوش مصنوعی به صورت خودکار انجام می‌شوند. برای مثال، جایگزین شدن چت‌بات در مراکز تماس، آموزش زبان، برنامه‌نویسی و مشاورهٔ حقوقی، مالی و پزشکی. برای غلبه بر این مشکل می‌توان سیستم‌هایی را طراحی کرد که در آن‌ها هوش مصنوعی و انسان با همکاری یکدیگر به فعالیت بپردازند. در این سیستم‌ها، هوش مصنوعی به عنوان دستیار عمل می‌کند.

۵. **اثرات زیست‌محیطی:** در آموزش مدل‌های زبانی بزرگ، به توان پردازشی بالایی نیاز است که به مصرف زیاد انرژی و تولید کربن منجر می‌شود. برای مثال، طبق محاسبات انجام‌شده انرژی مصرفی در آموزش مدل زبانی بزرگ GPT-4 معادل برق‌رسانی به ۱۳۰۰ خانه در یک سال است [16].

۶. **جعبه‌سیاه[2] بودن مدل‌های شبکهٔ عصبی عمیق:** با وجود اینکه بسیاری از مدل‌های یادگیری عمیق دارای دقت و بازده بسیار زیادی هستند، اما در بیشتر موارد هنوز نحوهٔ تصمیم‌گیری آن‌ها مشخص و توضیح‌پذیر[3] نیست. یکی از راهکارهایی که برای غلبه بر این مشکل وجود دارد، استفاده از روش‌های توضیح‌پذیری مدل‌های هوش مصنوعی مانند LIME[4] و SHAP[5] است.

بنابراین، در حالی که هوش مصنوعی امکانات و فرصت‌های فراوانی را برای فراهم می‌کند، نیاز است تا راهکارهایی برای مدیریت محدودیت‌ها و ریسک‌های آن در نظر بگیریم. در این میان، حکمرانی داده و همچنین، حکمرانی هوش مصنوعی می‌توانند نقش مهمی را ایفا کنند. حکمرانی هوش مصنوعی ابزاری برای هدایت توسعهٔ آن بر اساس ارزش‌هایی مانند توسعهٔ فراگیر و پایدار است. اگر این فرایند آگاهانه انجام نشود، ساختارهای هوش مصنوعی به طور ناخودآگاه ارزش‌هایی را در خود جای می‌دهند که ممکن است چالش‌های جدی را به همراه داشته باشد [17]. بنابراین، حکمرانی آگاهانهٔ هوش مصنوعی می‌تواند ریسک‌ها و محدودیت‌های هوش مصنوعی را تعدیل و فرصت‌های بزرگی را خلق کند.

### ۲-۳. شهر هوشمند و هوش مصنوعی

همان‌طور که در بخش ۱ اشاره کردیم، در دنیای مدرن امروز، مدیریت شهرها به فناوری‌های نوین وابسته است. با رشد جمعیت و افزایش چالش‌های مدیریت شهری، رویکردهای سنتی دیگر پاسخ‌گوی نیازها نیستند؛ به همین‌دلیل مفهوم شهر هوشمند مطرح شده است. شهر هوشمند به شهری اشاره دارد که در آن از فناوری اطلاعات و ارتباطات[6] برای بهبود بهره‌وری، تسهیل دسترسی عمومی به اطلاعات و ارتقای کیفیت خدمات شهری استفاده می‌شود [18].

میزان بلوغ هوشمندی شهر را می‌توان به‌ترتیب به ۴ سطح تقسیم کرد:

۱. **نظارت هوشمند:** جمع‌آوری داده و نظارت بر فرایندهای شهری با استفاده از ابزارهای هوشمند.

۲. **کنترل هوشمند:** تنظیم و کنترل سیستم‌های شهری با استفاده از هوش مصنوعی.

۳. **بهینه‌سازی هوشمند:** استفاده از هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی سازوکارهای شهری.

1. Bias
2. Black Box
3. Explainable
4. Local Interpretable Model-agnostic Explanations
5. Shapley Additive ExPlanations
6. ICT

**۴. خودمختاری هوشمند:** ساخت سیستم‌های خودکار و بدون نیاز به دخالت انسانی مانند خودروهای خودران.

به طور کلی، شهر هوشمند مزایای زیادی برای شهروندان و مدیریت شهری رقم می‌زنند، از جمله [18]:

- **خودکارسازی فرایندها:** که به افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها منجر می‌شود.
- **افزایش مشارکت اجتماعی:** با ارائهٔ داده‌های شفاف و دسترسی آسان به اطلاعات، تعامل میان شهروندان و نهادهای دولتی افزایش پیدا می‌کند.
- **جذب سرمایه‌گذاری:** نوآوری در خدمات شهری می‌تواند سرمایه‌گذاری و ساکنان جدید را جذب کند.
- **مدیریت بهتر بحران‌ها:** با هوشمندسازی فرایندها، می‌توان بحران‌هایی مانند بیماری‌های همه‌گیر و بلایای طبیعی را بهتر مدیریت کرد.

در چنین شهری، هوش مصنوعی به عنوان یکی از ارکان اصلی شهر هوشمند شناخته می‌شود که نقش مهمی در بهبود عملکرد و فرایندهای شهری ایفا می‌کند [19]. هوش مصنوعی را می‌توان در سطوح مختلفی از مدیریت شهری پیاده‌سازی کرد؛ سطوحی مانند:

۱. مدیریت حمل‌ونقل
۲. مدیریت پسماند
۳. امنیت عمومی
۴. اداره، حکمرانی شهر و برنامه‌ریزی شهری
۵. سلامت و بهداشت عمومی
۶. مدیریت انرژی

در ادامه، بعضی از کاربردهای هوش مصنوعی در سطوح مختلف مدیریت شهری را توضیح می‌دهیم.

### ۲-۳-۱. هوش مصنوعی در مدیریت حمل‌ونقل

با گسترش شهرنشینی و به‌تبع آن، افزایش وسایل نقلیه، مدیریت ترافیک و حمل‌ونقل در کلان‌شهرها به یکی از دغدغه‌های اساسی مدیریت شهری تبدیل شده است. افزایش ترافیک نه‌تنها باعث اتلاف وقت شهروندان می‌شود، بلکه آسیب‌های زیست‌محیطی و اقتصادی را به همراه دارد. خوشبختانه، فناوری‌های هوش مصنوعی با ارائهٔ راه‌حل‌های نوین و خلاقانه می‌توانند تا حد زیادی این چالش‌ها را برطرف سازند و مدیریت حمل‌ونقل را تسهیل کنند. برخی از مهم‌ترین کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت حمل‌ونقل عبارت‌اند از:

- **پیش‌بینی تقاضای حمل‌ونقل:** در حوزهٔ هوش مصنوعی می‌توان با آموزش مدل‌ها روی داده‌های تاریخی[1] و لحظه‌ای[2]، الگوهای تقاضا و حجم سفرها را شناسایی و پیش‌بینی کرد [20]. همچنین، هوش مصنوعی می‌تواند زمان رسیدن وسایل نقلیه مانند اتوبوس و قطار را پیش‌بینی کند و حتی برای آن برنامه‌ریزی زمانی انجام دهد.
- **یکپارچه‌سازی خدمات حمل‌ونقل[3]:** این مفهوم که تحت عنوان «حمل‌ونقل به عنوان یک خدمت واحد» نیز از آن یاد می‌شود به یکپارچه‌سازی خدمات حمل‌ونقل مانند اتوبوس، تاکسی و دوچرخه اشاره دارد. هوش مصنوعی با یکپارچه‌سازی داده‌ها و پردازش سریع آن‌ها، بستری جامع برای دسترسی به انواع خدمات حمل‌ونقل فراهم می‌کند [21]. بستری که در آن می‌توان مسیرها و وسایل حمل‌ونقل مختلف طی یک مسیر را انتخاب نمود.
- **تشخیص حوادث رانندگی:** با کمک هوش مصنوعی و داده‌های شبیه‌سازی شده، امکان تشخیص خودکار مکان و زمان حوادث رانندگی میسر شده است. همچنین، پایش و کاوش لحظه‌ای داده‌های شبکه‌های اجتماعی به کمک

1. Historical (batch) Data
2. Real-time Data
3. Mobility as a Service (MaaS)

متن‌کاوی[1]، روشی کارآمد برای اطلاع از وقوع حادثه در بزرگراه‌ها محسوب می‌شود [22].

- **بهینه‌سازی جریان ترافیک:** سامانه‌های مبتنی بر هوش مصنوعی با بهره‌گیری از دوربین‌های نظارت ترافیکی، داده‌ها را به صورت لحظه‌ای گردآوری کرده و الگوهای تردد را شناسایی می‌کنند. به این‌ترتیب، با مدیریت چراغ‌های راهنما و اطلاع‌رسانی دربارهٔ وضعیت ترافیک می‌توان جریان تردد وسایل نقلیه را بهینه‌سازی کرد.
- **خودروی خودران:** توسعه و ساخت خودروهای خودران به وسیلهٔ الگوریتم‌های بینایی ماشین و یادگیری عمیق میسر شده است. به این‌ترتیب، رانندگی خودکار، مسیریابی و حرکت ایمن به سمت مقصد امکان‌پذیر می‌شود. این قابلیت‌ها به‌ویژه در شرایط پیچیده و شلوغ شهری، اهمیت فوق‌العاده‌ای دارند و می‌توانند تحولی بزرگ در حوزهٔ حمل‌ونقل ایجاد کنند.
- **حمل‌ونقل پایدار[2]:** هوش مصنوعی نقشی مهمی را در پیشرفت سیستم‌های حمل‌ونقل پایدار ایفا می‌کند. فناوری هوش مصنوعی با بهینه‌سازی مصرف انرژی و تسهیل ادغام خودروهای برقی و خودران در شبکه‌های حمل‌ونقل، به پایداری بیشتر این حوزه کمک می‌کنند [23].
- **بهبود خودروهای برقی:** هوش مصنوعی با پردازش و شناسایی الگوی داده‌های مربوط به مصرف باتری خودروهای برقی به بهینه‌سازی مصرف باتری و شارژ آن کمک می‌کند. از سوی دیگر، هوش مصنوعی با تحلیل این داده‌ها می‌تواند در طراحی و ساخت باتری‌های جدید ایفای نقش داشته باشد.
- **زیرساخت حمل‌ونقل:** فناوری هوش مصنوعی از طریق پردازش داده‌های مرتبط با نگهداری سامانه‌های حمل‌ونقل، امکان پایش وضعیت زیرساخت‌ها و شناسایی نقاط آسیب‌پذیر شبکهٔ حمل‌ونقل شهری را فراهم می‌کند.

از نمونه‌های عینی کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت حمل‌ونقل شهری می‌توان به پروژهٔ شرکت Alibaba Cloud با نام Hangzhou City Brain در شهر هانگژو چین اشاره کرد. سامانهٔ Hangzhou City Brain که بر کاهش ترافیک تمرکز دارد با بهره‌گیری از هوش مصنوعی، کلان‌داده[3] و رایانش ابری، ازدحام ترافیکی شهر هانژو را به میزان ۱۵ درصد کاهش داده است. همچنین این سامانه موجب کاهش ۵۰ درصدی زمان انتظار برای خدمات اضطراری مانند آمبولانس شده است [24]. یکی دیگر از کاربردهای فناوری دیجیتال در حمل‌ونقل شهری، سیستم اتوبوس سفارشی (CB[4]) در کشور چین است. اتوبوس سفارشی سیستمی نوآورانه در حمل‌ونقل عمومی چین است که با استفاده از پلتفرم‌های آنلاین، مسیرهای مسافران را هماهنگ می‌کند و خدماتی کارآمد و کاربرمحور ارائه می‌دهد. این سیستم ترافیک و آلودگی را کاهش می‌دهد و نسبت به اتوبوس‌های معمولی قابل‌اعتمادتر و از خودروهای شخصی به‌صرفه‌تر است [25].

### ۲-۳-۲. هوش مصنوعی در مدیریت پسماند

یکی دیگر از چالش‌های مهم در مدیریت شهرها، مدیریت پسماند و آثار زیست‌محیطی آن است. هوش مصنوعی قادر است با پیش‌بینی تولید پسماند، بهینه‌سازی مراحل جمع‌آوری پسماند و کنترل فرآیندهای مرتبط نقش شایانی در افزایش کارایی مدیریت شهرها ایفا کند. در ادامه نقش هوش مصنوعی در مدیریت پسماند به‌تفصیل آورده شده است:

- **کنترل تصفیه و دفع پسماند:** فرایند تصفیه و دفع پسماند تأثیر چشمگیری بر محیط زیست دارد و نیازمند برنامه‌ریزی دقیق برای کاهش اثرات مخرب است. با استفاده از هوش مصنوعی می‌توان داده‌های مربوط به کمپوست (مانند رنگ و بافت) را تحلیل و پردازش کرد [26] و در نتیجه به روش‌های بهینه‌تری برای تصفیه و دفع دست یافت. همچنین، هوش مصنوعی قادر است وضعیت سوزاندن پسماند را پایش کند و انرژی لازم برای سوزاندن و آلودگی ناشی از آن را تخمین بزند.
- **جمع‌آوری پسماند:** یکی از عوامل مهم در کاهش هزینه‌های جمع‌آوری پسماند، تشخیص پر بودن سطل‌های زباله و

1. Text Mining
2. Sustainable Transportation
3. Big data
4. Customized Bus

یافتن بهترین مسیر برای وسایل جمع‌آوری پسماند است. تحقیقات بسیاری در زمینهٔ بهینه‌سازی جمع‌آوری و حمل پسماند با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی صورت گرفته است که نقش هوش مصنوعی در کاهش این هزینه‌ها را نشان می‌دهد [27].

- **دسته‌بندی پسماند:** هوش مصنوعی قادر است با شناسایی انواع پسماند دقت دسته‌بندی آن‌ها را افزایش دهد. در این زمینه ربات‌هایی با استفاده از رویکرد یادگیری عمیق و بینایی ماشین ساخته شده است که می‌توانند با دقت زیادی انواع پسماند را از یکدیگر تشخیص دهد [28].
- **پیش‌بینی مقدار تولید پسماند:** با استفاده از داده‌های زمانی تولید پسماند و آموزش مدل‌های هوش مصنوعی روی این داده‌ها، می‌توان مقدار پسماند تولیدی در مناطق مد نظر را تخمین زد [29]. این رویکرد برای پیش‌بینی تولید پسماندهای بیمارستانی نیز کاربرد دارد [30]. بنابراین، پیش‌بینی تولید پسماند می‌تواند به بهبود طراحی سیستم‌های مدیریت پسماند کمک کند.

### ۲-۳-۳. هوش مصنوعی برای افزایش امنیت عمومی

زندگی پایدار در شهرها نیازمند امنیت عمومی است. امنیت عمومی شهرها تحت تأثیر چالش‌های مختلفی مانند بیماری‌های همه‌گیر، حوادث طبیعی و جرائم ممکن است در معرض خطر قرار بگیرد. با رشد جمعیت شهرها و پیچیده‌تر شدن این چالش‌ها، مدیریت شهری بیش از پیش نیاز به راهکارهایی نظیر فناوری‌های هوش مصنوعی برای مقابله با این چالش‌ها دارد. نقش هوش مصنوعی در مدیریت چالش‌های امنیت عمومی عبارت است از:

- **مدیریت همه‌گیری‌ها:** هوش مصنوعی با پیش بینی وضعیت ابتلا در نواحی مختلف و کنترل تردد در همه‌گیری قادر است تا از شیوع بیشتر بیماری‌های همه‌گیر پیش‌گیری کرده و به از بین رفتن همه‌گیری کمک کند. با کمک هوش مصنوعی، می‌توان شیوع بیماری کرونا را مدل‌سازی و ابتلا به آن را پیش‌بینی کرد [31].
- **پایش وضعیت امنیت غذایی:** فناوری هوش مصنوعی می‌تواند با تحلیل داده‌های حاصل از فعالیت‌های شبکه‌های اجتماعی، کمبودهای مواد غذایی را شناسایی کند [32]. همچنین، با کمک داده‌کاوی شبکه‌های اجتماعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند رستوران‌های نیازمند بازرسی را شناسایی و از بیماری‌های ناشی از غذا جلوگیری کرد [33].
- **ارزیابی سلامت عمومی:** سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی قادرند با تحلیل عوامل مؤثر بر سلامت عمومی – از جمله کیفیت هوا، میزان آلاینده‌ها و کیفیت آب – ریسک‌های احتمالی برای سلامت شهروندان را شناسایی کنند.
- **مدیریت بحران:** الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند با تحلیل داده‌های ویدئوهای نظارتی[1] حوادثی مانند آتش‌سوزی را به صورت خودکار تشخیص دهند و امکان واکنش سریع‌تر به این رخدادها را فراهم کنند [34]. همچنین، به وسیلهٔ یادگیری ماشین و پایش لحظه‌ای فضای مجازی می‌توان میزان خسارت واردشده را تخمین زد.
- **پیش‌بینی وضعیت جوی:** هوش مصنوعی با پیش‌بینی حوادث جوی مخاطره‌آمیز مانند سیل و توفان از وارد شدن تلفات سنگین جلوگیری می‌کند.

### ۲-۳-۴. هوش مصنوعی برای برنامه‌ریزی شهری

شهرها – به‌خصوص کلان‌شهرها – به طور پیوسته در حال دگرگونی و تکامل هستند. رشد سریع شهرنشینی، افزایش نیاز به محل سکونت و کمبود منابع، برنامه‌ریزی شهری را با چالش‌های اساسی روبه‌رو کرده است. در چنین شرایطی، هوش مصنوعی با ارائهٔ روش‌های بهینه می‌تواند برنامهٔ شهری را برای رویارویی با چالش‌های حال و آینده آماده کند. بنابراین، امروزه هوش مصنوعی کاربردهای بسیاری در برنامه‌ریزی شهری دارد، از جمله:

- **ساخت‌وساز:** به وسیلهٔ هوش مصنوعی می‌توان هزینه‌های پروژه را تخمین زد و با ریسک‌های احتمالی آن آشنا شد.

1. Surveillance Video

- **خانه و فضای عمومی هوشمند:** به‌کارگیری فناوری‌های هوش مصنوعی در خانه‌های هوشمند به افزایش کیفیت زندگی منجر می‌شود [35]. این امر با ادغام هوش مصنوعی و تجهیزات اینترنت اشیا[1] تحقق می‌یابد. در ابعاد بزرگ‌تر، با استفاده از هوش مصنوعی امکان مدیریت هوشمند فضاهای عمومی مانند پارک‌ها و پارکینگ‌ها نیز فراهم می‌شود.
- **رفع آلودگی صوتی:** برای تشخیص آلودگی صوتی ناشی از وسایل نقلیه، می‌توان از دستگاه‌های جمع‌آوری داده و نظارت لحظه‌ای استفاده کرد تا هنگام فراتر رفتن دامنه صدا از یک حد مشخص به مسئولان محلی اعلان صادر شود [36].
- **شبیه‌سازی فرایند شهری و مدیریت ریسک:** با طراحی مدل دیجیتالی دقیق از شهر (دوقلوی دیجیتال) و نقشهٔ ریسک شهری می‌توان فرایندهای شهری را شبیه‌سازی و ریسک‌های آتی را ارزیابی و مدیریت کرد [37].
- **بازار املاک:** به کمک هوش مصنوعی می‌توان تصاویر ۳بعدی از املاک را شبیه‌سازی کرد و به این‌ترتیب، خریداران قادر خواهند بود تا به صورت مجازی جزئیات املاک را بررسی کنند. همچنین، فناوری هوش مصنوعی می‌تواند با پردازش داده‌های قیمتی و روند میزان معاملات، قیمت املاک و نرخ اجازه را تخمین بزند [38].
- **تخمین جمعیت:** الگوریتم‌های هوش مصنوعی با تحلیل تصاویر و داده‌هایی مانند تراکنش‌های بانکی ما را قادر می‌سازد تا جمعیت شهر را تخمین بزنیم.

### ۲-۳-۵. هوش مصنوعی و مدیریت انرژی

امروزه، هوش مصنوعی نقش شایانی در بهبود کارایی و پایداری سیستم‌های انرژی ایفا می‌کنند. با به‌کارگیری الگوریتم‌های پیشرفتهٔ هوش مصنوعی، می‌توان مصرف انرژی را مدیریت کرد و نیازهای آتی را پیش‌بینی کرد. برخی از کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت انرژی عبارت‌اند از:

- **پیش‌بینی مصرف انرژی:** به وسیلهٔ داده‌های زمانی مصرف انرژی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، می‌توان مصرف انرژی ساختمان‌ها را پیش‌بینی کرد [39]. به این‌ترتیب، مدیران شهری قادر خواهند بود تا بین عرضه و تقاضای انرژی تعادل برقرار سازند.
- **تنظیم مصرف انرژی:** سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی امکان تنظیم مصرف انرژی را از طریق مدیریت هوشمند تأسیسات ساختمانی، از جمله سیستم‌های روشنایی و تأسیسات گرمایشی را فراهم می‌کنند. این سیستم‌ها با تشخیص حضور یا عدم حضور افراد در فضاهای مختلف ساختمان، به صورت خودکار تنظیمات لازم را اعمال می‌کنند که نتیجهٔ آن، مدیریت بهینهٔ مصرف انرژی خواهد بود.

### ۲-۳-۶. هوش مصنوعی برای ادارهٔ شهر

علاوه‌بر مواردی که تا اینجا گفته شد، می‌توان از هوش مصنوعی در سطوح کلان‌تر مانند ادارهٔ شهر استفاده کرد تا با بهبود سیاست‌گذاری شهری به کاهش هزینه‌ها و افزایش کیفیت زندگی شهری کمک شود. در ادامه کاربردهای هوش مصنوعی در ادارهٔ شهر را به‌تفصیل توضیح می‌دهیم:

- **ارزیابی و تدوین خط مشی:** به کمک دوقلوی دیجیتال شهر – که به کمک هوش مصنوعی به دست می‌آید – می‌توان اثرات تصمیم‌گیری‌های مختلف بر شهر را شبیه‌سازی کرد [40]. به این‌ترتیب، مدیران شهری قادر خواهند بود تا با ارزیابی تصمیمات مختلف، خط مشی مناسب را اتخاذ کنند.
- **فرایندهای اداری:** به کمک هوش مصنوعی امکان خدمات و احراز هویت غیرحضوری فراهم می‌شود. همچنین، می‌توان با به‌کارگیری هوش مصنوعی و تحلیل داده برخی فرایندها ادارای را به صورت خودکار انجام داد؛ برای مثال خودکارسازی تولید گزارش‌های اداری و سامانه‌های پاسخ‌گویی.

1. Internet of Things (IoT)

- **تعامل با شهروندان:** با پیاده‌سازی روش‌های پردازش زبان طبیعی و یادگیری ماشین می‌توان به صورت هدفمند با شهروندان تعامل داشت [41]. بارزترین نمونه‌های کاربرد هوش مصنوعی در این حوزه، چت‌بات‌ها و سامانه‌های تحلیل احساس[1] خودکار هستند که از آن‌ها برای پایش تجربه‌ها و نگرش شهروندان استفاده می‌شود.
- **افزایش کارایی:** به‌کارگیری ابزارهای هوشمند تولید محتوا در بخش‌های مختلف اداری و بهینه‌سازی تخصیص منابع به افزایش کارایی ادارهٔ هوشمند شهر منجر می‌شود.

پروژهٔ Smart Dublin یکی از نمونه‌های نقش هوش مصنوعی در ادارهٔ شهر و تعامل با شهروندان است. در این پروژه با بهره‌گیری از پردازش زبان طبیعی و یادگیری ماشین، تحلیل احساس داده‌های غیرساختاریافته شهروندان (مانند نظرات مردم در شبکه‌های اجتماعی) انجام می‌شود که در نتیجه آن، بینشی ارزشمند از نظرات و احساس مردم دربارهٔ رویدادها به دست می‌آید [41].

جدول ۲ خلاصه‌ای ار کاربردهای هوش مصنوعی در سطوح مختلف مدیریت شهری را نشان می‌دهد.

**جدول ۲.** کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت شهری

| کاربرد | توضیحات |
|---|---|
| مدیریت حمل‌ونقل | ▪ پیش‌بینی تقاضای سفر<br>▪ یکپارچه‌سازی خدمات حمل‌ونقل<br>▪ تشخیص حوادث رانندگی<br>▪ بهینه‌سازی جریان ترافیک<br>▪ خودروی خودران<br>▪ حمل‌ونقل پایدار<br>▪ بهبود خودروهای برقی<br>▪ زیرساخت حمل‌ونقل |
| مدیریت پسماند | ▪ کنترل تصفیه و دفع پسماند<br>▪ جمع‌آوری پسماند<br>▪ دسته‌بندی پسماند<br>▪ پیش‌بینی مقدار تولید پسماند |
| افزایش امنیت عمومی | ▪ مدیریت همه‌گیری‌ها<br>▪ پایش وضعیت امنیت غذایی<br>▪ ارزیابی سلامت عمومی<br>▪ مدیریت بحران<br>▪ پیش‌بینی وضعیت جوی |
| برنامه‌ریزی شهری | ▪ ساخت و ساز<br>▪ خانه و فضای عمومی هوشمند<br>▪ رفع آلودگی صوتی<br>▪ شبیه‌سازی فرایند شهری و مدیریت ریسک<br>▪ بازار املاک<br>▪ تخمین جمعیت |
| مدیریت انرژی | ▪ پیش‌بینی مصرف انرژی<br>▪ تنظیم مصرف انرژی |
| اداره شهر | ▪ ارزیابی و تدوین خط مشی<br>▪ فرایندهای اداری<br>▪ تعامل با شهروندان<br>▪ افزایش کارایی |

1. Sentiment Analysis

## ۳. نتایج

به دلیل ماهیت مروری پژوهش، این مقاله به جای ارائهٔ نتایج مستقیم، یافته‌های حاصل از تحلیل مقالات و مطالعات گردآوری‌شده در مدیریت شهری و نحوهٔ استقرار و استفاده از آن‌ها را ارائه می‌دهد. طبق این مطالعات، ابتدا باید کاربردهای هوش مصنوعی در هر یک از سطوح مدیریت شهری بر اساس نیاز شهر، زیرساخت‌های موجود و تأثیر بر زندگی شهروندان اولویت‌بندی شوند و سپس، سیستم‌های هوش مصنوعی با در نظر گرفتن چالش‌های استقرار و مراحل چرخهٔ عمر این فناوری در محیط شهری مستقر شوند. بنابراین، با توجه به اهمیت راهبردی موضوع استقرار و چرخهٔ عمر هوش مصنوعی در محیط شهری، این مبحث در ادامه به‌تفصیل مورد واکاوی قرار خواهد گرفت.

### ۳-۱. استقرار و چرخهٔ عمر هوش مصنوعی در مدیریت شهری

به دلیل کاربردهای گسترده و مؤثر هوش مصنوعی در مدیریت شهری، تمایل به استفاده از این فناوری در شهرها رو به افزایش است. یکی از جنبه‌های حیاتی استفاده از هوش مصنوعی در مدیریت شهری، نحوهٔ استقرار آن در شهرها است. استقرار هوش مصنوعی در شهر را می‌توان در چارچوب مفهوم «چرخهٔ هوش مصنوعی» بررسی کرد. چرخهٔ عمر هوش مصنوعی نوعی رویکرد ساختاریافته است که به سازمان‌ها کمک می‌کند تا سیستم‌های هوش مصنوعی را از مراحل ابتدایی مفهوم‌سازی تا استقرار و نگهداری به طور بهینه مدیریت کنند. با توجه به شکل ۵، چرخهٔ عمر هوش مصنوعی نمایانگر تعامل سیستم با محیط اطرافش است که شامل ۵ فاز اصلی در هم تنیده می‌شود [42]:

۱. **چارچوب‌بندی و تحلیل**[1]: اولین فاز چرخهٔ هوش مصنوعی، فاز چارچوب‌بندی و تحلیل نیازهای پروژه است [43]. در این فاز، ابتدا مسئله و اهداف پروژهٔ مدیریت شهری مشخص می‌شود. همچنین، در فاز چارچوب‌بندی ارزیابی‌هایی همچون میزان نقش هوش مصنوعی در فرایند صورت می‌گیرد. این فاز از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است، زیرا ارزیابی‌ها و تصمیمات اتخاذشده در این بخش، شالودهٔ تصمیم‌گیری فازهای بعدی را تعیین می‌کند.

۲. **طراحی**[2]: یکی از بخش‌های مهم در فاز طراحی، تعریف و انتخاب الگوریتم یا معماری سیستم است [43]. تعریف الگوریتم تحت تأثیر نحوهٔ تفکر و درک طراحان از مسئله قرار دارد. لذا، در فاز طراحی باید به این نکته توجه داشت که تصمیمات اتخاذشده ممکن است به سوگیری‌ها و تبعیض علیه برخی گروه‌ها در جامعه ختم شود. علاوه بر این، در فاز طراحی جمع‌آوری داده‌ها و ارزیابی آن‌ها نیز صورت می‌گیرد [44].

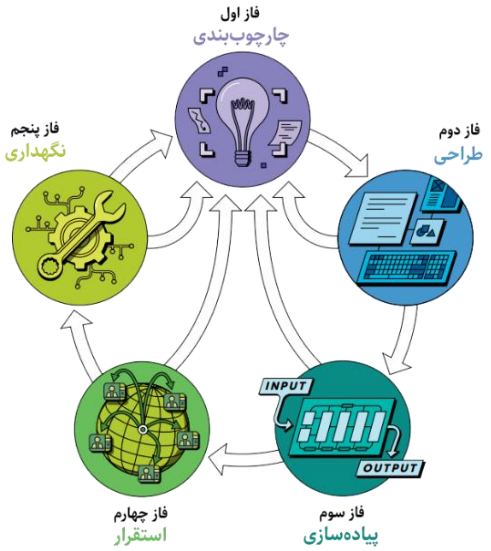
۳. **پیاده‌سازی**[3]: در فاز پیاده‌سازی، الگوریتم تعریف‌شده در فاز طراحی، پیاده‌سازی می‌شود. همانند سایر پیاده‌سازی‌ها، کیفیت و حجم داده در این فاز از اهمیت قابل توجهی برخوردار است، زیرا خروجی نهایی سیستم وابستگی زیادی با کیفیت ورودی دارد. از اساسی‌ترین چالش‌های این فاز، توضیح‌پذیری الگوریتم پیاده‌سازی‌شده برای سیستم است؛ به‌ویژه آنکه بسیاری از الگوریتم‌های جدید هوش مصنوعی، توضیح‌پذیری چندانی ندارند.

۴. **استقرار**[4]: زمانی که مدل پیاده‌سازی‌شده در مرحلهٔ آزمایش عملکرد مطلوبی از خود نشان دهد، وارد فاز استقرار می‌شویم. در فاز استقرار، مدل به‌دست‌آمده به محیط عملیاتی منتقل می‌شود. در این فاز، نظارت بر عملکرد مدل و دریافت بازخورد از کاربران صورت می‌گیرد [45]. همچنین، مواردی مانند امنیت سیستم پیاده‌سازی‌شده و کارکرد آن در دنیای واقعی مطرح می‌شود. این موارد بر محافظت از داده‌ها و حریم خصوصی کاربران تأثیر مستقیم می‌گذارد. از طرفی، در این فاز ممکن است مدل با سیستم‌های قبلی ادغام شود.

۵. **نگهداری**[5]: پس از استقرار هوش مصنوعی، فاز نگهداری آغاز می‌شود که تا آخر حیات آن ادامه دارد. در این فاز، حفظ عملکرد الگوریتم و به‌روزرسانی آن بیشترین اهمیت را دارند. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌کنید، فاز نگهداری

1. Framing
2. Design
3. Implementation
4. Deployment
5. Maintenance

تحت تأثیر فازهای قبلی قرار دارد؛ به طوری که در بعضی از موارد به دلیل مشکلاتی که در فاز نگهداری به وجود می‌آید، فازهای قبلی دوباره باید انجام شوند. برای رویارویی با این مسئله، باید در فازهای قبلی امکاناتی را برای تحلیل و اصلاح سیستم‌ها پیش‌بینی کرد.




**شکل ۵.** چرخهٔ عمر هوش مصنوعی [42]

### ۳-۲. ریسک‌های هوش مصنوعی در مدیریت شهری

در هر یک از فازهای چرخهٔ عمر هوش مصنوعی، ممکن است با محدودیت‌ها و ریسک‌های خاص آن فاز مواجه شویم. به همین‌دلیل، آشنایی با این محدودیت‌ها و یافتن راهکارهایی برای پیشگیری از آن‌ها قبل از استقرار هوش مصنوعی بسیار حائز اهمیت است. برخی ریسک‌ها و محدودیت‌ها در هر یک از فازهای چرخهٔ عمر هوش مصنوعی در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت [46].

#### ۳-۲-۱. ریسک‌های فاز چارچوب‌بندی

در فاز چارچوب‌بندی، چالش‌های متعددی وجود دارد که شامل عدم شفافیت مأموریت، کمبود مهارت و ظرفیت انسانی، نبود زیرساخت متناسب با سطح هوش مصنوعی، کمبود بودجه، ناسازگاری یک فناوری هوش مصنوعی خاص با مقررات و افزایش تدریجی وظایف پروژه می‌شود.

برای مقابله با این مشکلات، راهکارهایی همچون اطلاع‌رسانی عمومی دربارهٔ قابلیت‌های هوش مصنوعی، تضمین حضور نیروی متخصص در تمامی مراحل پروژه، ارزیابی زیرساخت‌های دیجیتال موجود پیش از پیاده‌سازی پروژهٔ هوش مصنوعی، برآورد دقیق هزینه‌ها، ارزیابی دقیق قوانین قبل از طراحی فناوری هوش مصنوعی و بررسی دقیق کاربرد اصلی فناوری هوش مصنوعی قبل از استفاده در وظایف جدید پیشنهاد می‌شود.

#### ۳-۲-۲. ریسک‌های فاز طراحی

در فاز طراحی ممکن است با محدودیت‌هایی از قبیل کمبود تنوع (فرهنگی، نژادی و تحصیلی) در اعضای گروه، شکاف دیجیتال و تفاوت در دسترسی به فناوری‌های نوین، سوء استفاده از هوش مصنوعی، ناهمسویی ارزش‌های انسانی و هوش مصنوعی (عدم تطابق خروجی با ارزش‌های مشخص‌شده) مواجه شویم.

به منظور غلبه بر این محدودیت‌ها می‌توان راهکارهایی مانند تشکیل تیم‌های طراحی متنوع از افراد با زمینه‌های مختلف، آموزش سواد دیجیتال، ارتقای سواد عمومی در زمینهٔ تأثیرات پنهان هوش مصنوعی و تعریف دقیق ارزش‌های انسانی در الگوریتم هوش مصنوعی را مد نظر قرار داد.

### ۳-۲-۳. ریسک‌های فاز پیاده‌سازی

برخی از مهم‌ترین ریسک‌هایی که ممکن است در فاز پیاده‌سازی با آن‌ها روبه‌رو شویم عبارت‌اند از: سوگیری، دقت ناکافی برای برخی جمعیت‌های آماری[1]، نشت اطلاعات حساس، عدم توضیح‌پذیری، وجود اطلاعات حساس و تبعیض‌آمیز، مقاوم نبودن سیستم[2]، حریم خصوص ناکافی، مصرف انرژی بالا و نقض حریم خصوصی هنگام جمع آوری داده.

برای مدیریت این چالش‌ها راهکارهایی همچون تحلیل تبعیض‌های ساختاری در داده‌ها، جمع‌آوری داده‌های متنوع، شناسایی و حذف ویژگی‌های حساس غیرضروری، استفاده از الگوریتم‌های قابل تفسیر یا شفاف کردن نحوهٔ تصمیم‌گیری الگوریتم‌ها با روش‌های تفسیرپذیری، طراحی سیستم با در نظر گرفتن داده‌های دارای نویز و استفاده از مدل‌های از پیش آموزش‌دیده برای کاهش هزینه‌های انرژی در فاز آموزش می‌تواند مناسب باشد.

### ۳-۲-۴. ریسک‌های فاز استقرار

در فاز استقرار ریسک‌هایی همچون امنیت ناکافی سامانه، ذخیره‌سازی ناامن داده‌ها، بی‌اعتمادی مردم نسبت به سیستم هوش مصنوعی، خرید بدون بررسی الگوریتم‌های آماده دیده می‌شود.

برای مقابله با ریسک‌های گفته‌شده در فاز استقرار راه‌حل‌هایی مانند انجام آزمایش‌های امنیتی و نظارت مداوم بر سیستم‌ها، رعایت استانداردهای امنیتی برای ذخیره‌سازی داده‌ها و تعامل مؤثر با جامعه پیشنهاد می‌شود.

### ۳-۲-۵. ریسک‌های فاز نگهداری

در فاز نگهداری نیز ممکن است با چالش‌هایی همچون آسیب‌های اجتماعی (عدم همسویی بین اهداف انسانی و اهداف هوش مصنوعی)، کاهش تدریجی تطابق داده‌ها و مفهوم با واقعیت‌های جامعه[3] و از دور خارج نکردن سیستم هوش مصنوعی با وجود پایان چرخهٔ عمر آن مواجه شویم.

برای رفع این چالش‌ها می‌توان راهکارهایی مانند بررسی مستمر و اصلاح الگوهای مضر سیستم، اطمینان از به‌روز بودن داده‌ها و مدل‌ها و برنامه‌ریزی برای از دور خارج کردن سیستم‌های هوش مصنوعی قدیمی را مد نظر قرار داد.

با توجه به نکات یادشده، نیاز است قبل از استقرار هوش مصنوعی در مدیریت شهری، ریسک‌ها و محدودیت‌های آن به دقت بررسی شود تا از بروز مشکلات در هر یک از فازها جلوگیری شود. از آنجا که هر یک از فازهای چرخهٔ عمر هوش مصنوعی به یکدیگر وابسته هستند، بروز مشکل در هر یک از فازها، بخش‌های دیگر را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. بنابراین، تعیین هدف و بودجه به صورت شفاف، ایجاد زیرساخت‌های لازم، دسترسی به فناوری‌های نوین، جلوگیری از سوگیری‌های اجتماعی، تأمین امنیت سامانه و به‌کارگیری دادگان به‌روز از اهمیت بالایی در کاهش ریسک برخوردار هستند.

## ۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، ابتدا با مفاهیم بنیادین هوش‌مصنوعی و فرصت‌های فوق‌العاده‌ای که این فناوری برای ما فراهم می‌کند، آشنا شدیم. سپس، راهکارهایی برای مدیریت ریسک‌های هوش مصنوعی و حکمرانی داده ارائه شد. در ادامه، شهر هوشمند و نقش هوش مصنوعی در چنین شهری را به‌تفصیل بررسی و نمونه پروژه‌های موفق در این حوزه را معرفی کردیم. همچنین، با

1. Demography
2. Lack of Robustness
3. Data and Concept Drift

بررسی‌های صورت‌گرفته مشخص شد که برای به‌کارگیری هوش مصنوعی در شهر، آگاهی از چرخهٔ عمر هوش مصنوعی و ریسک‌های استقرار هوش در مصنوعی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است.

با این‌حال، در این پژوهش مروری با محدودیت‌هایی نیز روبه‌رو بوده‌ایم. نخست آنکه، به دلیل ماهیت مروری، تحلیل‌ها به یافته‌های موجود وابسته بوده و داده‌های تجربی جدیدی ارائه نشده است. علاوه بر این، در بسیاری از پروژه‌های کلان هوش مصنوعی در شهر، اطلاعات دقیق و به‌روز منتشر نمی‌شود؛ به همین‌دلیل، بیشتر نمونه‌های یادشده در مقاله براساس داده‌های ثانویه بوده است. از طرفی، به دلیل افزایش استفاده از هوش مصنوعی در پروژه‌های شهری و گستردگی موضوعات مورد بررسی، امکان تحلیل عمیق همهٔ ابعاد وجود نداشت. همچنین، تفاوت‌های سیاسی، اقتصادی و اجتماعی میان کشورها می‌تواند مانعی برای تعمیم‌پذیری و پیاده‌سازی پروژه‌های مشابه در کشورهای دیگر (به‌ویژه کشورهای در حال توسعه) باشد و تمرکز بر پروژه‌های موفق ممکن است چالش‌های شهرهای کمترتوسعه‌یافته را به‌خوبی منعکس نکند. با وجود این محدودیت‌ها، پژوهش حاضر می‌تواند راهکارهای مفیدی را برای سیاست‌گذاری و توسعهٔ شهرهای هوشمند ارائه دهد.

بر اساس یافته‌های این پژوهش، می‌توان پیشنهادهایی برای بهینه‌سازی به‌کارگیری هوش مصنوعی در مدیریت شهری مطرح کرد. در وهلهٔ اول، تقویت دانش و تخصص سازمانی برای استفاده از تمام ظرفیت‌های هوش مصنوعی امری ضروری است. همچنین، نیاز است زیرساخت‌های فنی لازم – شامل زیرساخت‌های سخت‌افزاری و فناوری‌های نرم‌افزاری – ایجاد و یکپارچگی بین سامانه‌ها انجام شود. همان‌طور که در بخش ۲-۲ اشاره شد، جمع‌آوری داده‌های مختلف و تدوین حکمرانی داده‌ها نباید نادیده گرفته شود؛ این مورد می‌تواند شامل تعیین اداره یا افراد برای مدیریت، نگهداری و ارائهٔ داده‌ها و همچنین تعریف استانداردها و رویه‌های مشخص در به‌کارگیری داده‌ها باشد. علاوه بر این، آزمودن فناوری‌ها می‌تواند تأثیر به‌سزایی در بهینه‌سازی کاربرد هوش مصنوعی داشته باشد؛ برای مثال توسعهٔ چت‌بات‌ها برای ارتباط درون‌سازمانی یا ارتباط مردمی و تحلیل هوشمند داده‌های موجود. در نهایت، برای برطرف کردن نیازهای واقعی جامعه، استفاده از رویکرد مردم‌محور برای طراحی پروژه‌های هوش مصنوعی بسیار حائز اهمیت است. این پیشنهادها می‌توانند مسیر حرکت به‌سوی مدیریت شهری هوشمندتر و کارآمدتر را هموار سازند.

## منابع


1. Cugurullo F, Caprotti F, Cook M, Karvonen A, Mcguirk P, Marvin S. Artificial Intelligence and the City: Urbanistic Perspectives on AI. 2023.
2. Russell SJ, Norvig P. Artificial intelligence : a modern approach. 3rd ed. Pearson; 2016.
3. Strelkova O. Three Types of Artificial Intelligence. 2017.
4. Janiesch C, Zschech P, Heinrich K. Machine learning and deep learning. Electron Markets. 2021 Sep 1;31(3):685–95.
5. Jovanovic M, Campbell M. Generative Artificial Intelligence: Trends and Prospects. Computer. 2022 Oct;55(10):107–12.
6. Zhao WX, Zhou K, Li J, Tang T, Wang X, Hou Y, et al. A Survey of Large Language Models. arXiv; 2024.
7. Xu H, Omitaomu F, Sabri S, Zlatanova S, Li X, Song Y. Leveraging generative AI for urban digital twins: a scoping review on the autonomous generation of urban data, scenarios, designs, and 3D city models for smart city advancement. Urban Info. 2024;3(1):29.
8. McMillan L, Fayaz J, Varga L. Domain-informed variational neural networks and support vector machines based leakage detection framework to augment self-healing in water distribution networks. Water Research. 2024;249:120983.
9. Chamberlain A. Using Aspects of Data Governance Frameworks to Manage Big Data as an Asset. University of Oregon; 2013.
10. Sarsfield S. The Data Governance Imperative. IT Governance Publishing; 2009.
11. PricewaterhouseCoopers. Global and industry frameworks for data governance. PwC.
12. Ning Z, Yuan QJ. An Overview of Data Governance. Economics Paper. 2016;
13. Bernardo BMV, Mamede HS, Barroso JMP, Dos Santos VMPD. Data governance & quality management—Innovation and breakthroughs across different fields. Journal of Innovation & Knowledge. 2024 Oct;9(4):100598.
14. Khanzode K, Sarode R. Advantages and disadvantages of artificial intelligence and machine learning: a literature review. International Journal of Library & Information Science (IJLIS). 2020 Jan 1;9(1):3.
15. Li W, Li J, Ma W, Liu Y. Citation-Enhanced Generation for LLM-based Chatbots. arXiv; 2024.
16. Vaidheeswaran A. The Carbon Impact of Large Language Models: AI's Growing Environmental Cost | LinkedIn.
17. Hutter R, Hutter M. Chances and Risks of Artificial Intelligence—A Concept of Developing and Exploiting Machine Intelligence for Future Societies. ASI. 2021 Jun 2;4(2):37.
18. Harnessing open data to create smart communities [Internet]. opendatasoft.; Available from: https://www.opendatasoft.com/wp-content/uploads/2023/01/202212_Smart-cities_V3.pdf
19. Diran D, Van Veenstra AF, Timan T, Testa P, Kirova M. Artificial Intelligence in smart cities and urban mobility. Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies. 2021;
20. Zhang X, Ke Q, Zhao X. Travel Demand Forecasting: A Fair AI Approach. IEEE Trans Intell Transport Syst. 2024 Oct;25(10):14611–27.
21. Rajabi E, Nowaczyk S, Pashami S, Bergquist M, Ebby GS, Wajid S. A Knowledge-Based AI Framework for Mobility as a Service. Sustainability. 2023 Feb 2;15(3):2717.
22. Gu Y, Qian Z (Sean), Chen F. From Twitter to detector: Real-time traffic incident detection using social media data. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2016;67:321–42.
23. Hasan U, Whyte A, Al Jassmi H. A Review of the Transformation of Road Transport Systems: Are We Ready for the Next Step in Artificially Intelligent Sustainable Transport? ASI. 2019;3(1):1.
24. How ET City Brain Is Transforming the Way We Live – One City at a Time [Internet]. Alibaba Cloud Community. Available from: https://www.alibabacloud.com/blog/how-et-city-brain-is-transforming-the-way-we-live-one-city-at-a-time_593745
25. Liu T, Ceder A (Avi). Analysis of a new public-transport-service concept: Customized bus in China. Transport Policy. 2015;39:63–76.
26. Aydın Temel F, Cagcag Yolcu O, Turan NG. Artificial intelligence and machine learning approaches in composting process: A review. Bioresource Technology. 2023;370:128539.

27. Fang B, Yu J, Chen Z, Osman AI, Farghali M, Ihara I, et al. Artificial intelligence for waste management in smart cities: a review. Environ Chem Lett. 2023 Aug 1;21(4):1959–89.
28. Mao wei lung, Chen WC, Fathurrahman HIK, Lin YH. Deep learning networks for real-time regional domestic waste detection. Journal of Cleaner Production. 2022 Feb 1;344:131096.
29. Soni U, Roy A, Verma A, Jain V. Forecasting municipal solid waste generation using artificial intelligence models—a case study in India. SN Appl Sci. 2019 Jan 14;1(2):162.
30. Golbaz S, Nabizadeh R, Sajadi HS. Comparative study of predicting hospital solid waste generation using multiple linear regression and artificial intelligence. J Environ Health Sci Engineer. 2019 Jun 1;17(1):41–51.
31. Namasudra S, Dhamodharavadhani S, Rathipriya R. Nonlinear Neural Network Based Forecasting Model for Predicting COVID-19 Cases. Neural Process Lett. 2023;55(1):171–91.
32. Kim J, Cha M, Lee JG. Nowcasting commodity prices using social media. PeerJ Computer Science. 2017 Jul 31;3:e126.
33. Sadilek A, Kautz H, DiPrete L, Labus B, Portman E, Teitel J, et al. Deploying nEmesis: Preventing Foodborne Illness by Data Mining Social Media. Ai Magazine. 2017 Mar 1;38:37–48.
34. Jung D, Tran Tuan V, Quoc Tran D, Park M, Park S. Conceptual Framework of an Intelligent Decision Support System for Smart City Disaster Management. Applied Sciences. 2020 Jan 17;10(2):666.
35. Alaa M, Zaidan AA, Zaidan BB, Talal M, Kiah MLM. A review of smart home applications based on Internet of Things. Journal of Network and Computer Applications. 2017 Nov 1;97:48–65.
36. Garcia E. Ai-Driven Noise Pollution Monitoring and Mitigation in Smart Cities.
37. Shahat E, Hyun CT, Yeom C. City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda. Sustainability. 2021;13(6):3386.
38. Pinter G, Mosavi A, Felde I. Artificial Intelligence for Modeling Real Estate Price Using Call Detail Records and Hybrid Machine Learning Approach. Entropy. 2020 Dec;22(12):1421.
39. Wei N, Li C, Peng X, Zeng F, Lu X. Conventional models and artificial intelligence-based models for energy consumption forecasting: A review. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019 Oct 1;181:106187.
40. Bosco G, Riccardi V, Sciarrone A, D'Amore R, Visvizi A. AI-driven innovation in smart city governance: achieving human-centric and sustainable outcomes. Transforming Government: People, Process and Policy. 2024;
41. SmartDublin. The Dublin Beat Understanding Citizen Sentiment [Internet]. Smart Dublin. 2020. Available from: https://smartdublin.ie/the-dublin-beat-understanding-citizen-sentiment/
42. Koseki S, Jameson S, Farnadi G, Rolnick D, Régis C, Denis JL, et al. AI & Cities: Risks, Applications and Governance. United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat); 2022.
43. Padmanaban H, Sharma DrY. Implication of Artificial Intelligence in Software Development Life Cycle: A state of the art review. 2019 Jun 1;93–928.
44. De Silva D, Alahakoon D. An artificial intelligence life cycle: From conception to production. Patterns. 2022 Jun 10;3(6):100489.
45. Chen Y, Clayton E, Novak L, Anders S, Malin B. Human-Centered Design to Address Biases in Artificial Intelligence. Journal of medical Internet research. 2023 Mar 24;25:e43251.
46. Ben Dhaou S, Isagah T, Distor C, Campos Ruas I. Global Assessment of Responsible AI in Cities – Research and recommendations to leverage AI for people-centred smart cities. Nairobi, Kenya: United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat); 2024.

**Urban Development Policy Making**

Online ISSN: 3092-6564

Home Page: https://judpm.ir

# 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

**Morteza Moaven[1] | Mohammadali Allahrabbi Shirazi[2*] | Mohammad Hasan Ghodusinejad[3]**

1. Department of Art, School of Art and Architecture, University of Shiraz, Shiraz, Iran. Email: moaven1998@gmail.com
2. Corresponding Author, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: aliallahrabbi@ut.ac.ir
3. School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mh.ghodusi@ut.ac.ir

**ARTICLE INFO**

**Article type:**
Research Paper

**Article History:**
Received 08 January 2025
Revised 18 January 2025
Accepted 17 February 2025
Published Online 05 April 2025

**Keywords:**
Urban heat island,
Life cycle assessment,
Sustainability,
Building materials,
Urban policy.

**ABSTRACT**

Urban heat island (UHI) is a key challenge in densely populated cities, influenced by the thermal properties of materials, reflective and cooling materials, life cycle assessment (LCA) and urban policies. This study, using a systematic review and the PRISMA method, examines the impact of these factors in four categories and shows that materials with high heat capacity and low reflectance contribute significantly to the intensification of thermal effects. In contrast, the use of cooling materials and reflective coatings leads to a reduction in surface temperatures. In addition, LCA has been highlighted as an analytical tool for assessing the environmental impacts of materials and optimizing material selection. However, this method's lack of standardization and integration into urban policymaking has faced challenges. The findings suggest that integrating LCA into urban decision-making processes and developing policies that promote the development and use of sustainable materials can significantly reduce UHI and contribute to urban sustainability in various fields, such as environmental and energy.

**Cite this article:** Moaven, M.; Allahrabbi Shirazi, M. & Ghodusinejad, M. H. (2025). 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*, 2 (1), 95-110. DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.512352.1019

© Morteza Moaven, Mohammadali Allahrabbi Shirazi, Mohammad Hasan Ghodusinejad
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.512352.1019

## Introduction

Urbanization is a complex socio-economic process with multiple consequences for society, the environment, and biodiversity. Despite covering only, a small portion of the Earth's surface, urban areas are increasingly becoming the most familiar environment for most of the world's population. Over half of the global population now resides in urban regions, a number that is expected to grow in the coming decades. This urban growth, fueled by industrialization and increasing energy consumption, has brought significant benefits in terms of living standards, but also has led to challenges such as global warming, industrial waste, and air pollution. These issues are particularly pronounced in urban areas due to the concentration of industrial activities and the extensive use of building materials. Urban heat islands (UHI), a phenomenon where urban areas experience higher

temperatures than their rural surroundings, is a major environmental issue exacerbated by improper urban planning and construction materials. The use of dark and inappropriate materials in urban spaces, combined with poorly designed building layouts, traps solar energy, raising surface temperatures. In contrast, sustainable materials and reflective coatings can mitigate these effects by reducing surface temperatures. Choosing appropriate materials can significantly contribute to sustainable urban development by reducing environmental harm and supporting energy efficiency. Sustainable materials minimize pollution, require less maintenance, and are reusable. Evaluating these materials through Life Cycle Assessment (LCA) helps to understand their environmental impacts from production to disposal, enabling informed decisions that promote sustainability. While substantial progress has been made in understanding the impacts of materials on UHI, there remains a gap in systematically analyzing the role of LCA in mitigating these effects. Previous research has examined UHI from various perspectives, but few studies have explored how sustainable materials, evaluated through LCA, can reduce UHI. This study aims to fill this gap by systematically reviewing the literature on the impact of LCA on material selection and UHI reduction in urban environments.

The primary objective of this review is to analyze the role of LCA in assessing the effects of construction materials on UHI. The review categorizes relevant studies into four main groups: materials and sustainability, materials and LCA, materials and UHI, and the combination of UHI and LCA. By employing the PRISMA method for systematic article selection, this research provides a comprehensive framework for analyzing the environmental and functional effects of building materials in reducing urban heat islands.

This approach contributes to advancing sustainable urban policy by providing insights into how LCA can influence material selection and UHI mitigation strategies.

## Methodology

This study is a systematic review using the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) method, which provides a standardized approach for conducting systematic reviews and meta-analyses to enhance transparency and accuracy in reporting and article selection. This method is especially useful for comprehensive scientific reviews to identify, evaluate, and synthesize research findings on a specific topic. The PRISMA approach involves several stages, including identifying articles from various sources, screening titles and abstracts, evaluating the quality of selected articles, and systematically analyzing the data. One key feature of PRISMA is the flowchart, which clearly illustrates the article selection process and the reasons for excluding certain articles, helping readers understand the decision-making process and assess the validity of the study's results. The flowchart of the article review process is shown in Figure 1.

The target population of this study consisted of documents and articles related to the role of LCA in building materials for reducing urban heat islands, which were searched in June 2024. The sampling method involved reviewing relevant documents using keywords such as LCA, sustainable materials, recycling, ecology, climate change, urban heat islands, and sustainability. After preliminary screening, specific research questions were posed:

- What is the current impact of materials on reducing urban heat islands with an LCA approach?
- What improvements can be made in this area that have not been addressed yet?
- What are the limitations in this field?
- How can the impact of materials on reducing urban heat islands using LCA be increased?

The study involved searching for articles in credible academic databases such as Google Scholar, ScienceDirect, SID, and Scopus, using both English and Persian keywords. The articles reviewed were published between 2000 and 2023 and were selected based on criteria such as relevance to LCA, materials, urban heat islands, and sustainability. A total of 213 articles were initially reviewed, and after applying the inclusion and exclusion criteria, 14 articles were selected for final analysis using the PRISMA checklist. EndNote software (version 21) was used to manage references and extract relevant data.

## Conclusion

The study concludes that building materials play a significant role in addressing UHI effects and contributing to sustainable urban development. The selection of sustainable materials, which minimize

energy consumption and environmental pollution, is crucial for reducing UHI impacts. LCA is a valuable tool in evaluating the environmental effects of materials throughout their life cycle, helping to make better choices to reduce negative environmental outcomes.

While recent technological developments, such as reflective and cooling coatings, have been proposed to manage excess heat in urban spaces, comprehensive studies on sustainable materials' impact on UHI through LCA are still limited. To reduce UHI and improve environmental conditions, urban policies should promote stricter standards for material selection, encourage the use of sustainable materials, and incorporate LCA into urban planning. Advanced technologies, such as high-reflectivity materials and energy-efficient designs, should be prioritized to help mitigate UHI effects and reduce environmental impact. Additionally, the development of smart monitoring systems and climate-responsive materials will further support sustainable urban solutions.

پیشرفت شهری
سیاستگذاری
سایت نشریه: https://judpmi.ir
شاپا الکترونیکی: ۶۵۶۴-۳۰۹۲

# تحلیل سیستماتیک تأثیر ارزیابی چرخهٔ حیات مصالح بر کاهش جزیرهٔ گرمایی شهری: رهیافتی به سوی سیاست‌گذاری پایدار شهری با استفاده از روش PRISMA

مرتضی معاون[۱] | محمدعلی الهربی شیرازی[۲*] | محمدحسن قدوسی‌نژاد[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش هنر، دانشکدهٔ هنر و معماری، دانشگاه شیراز. رایانامه: moaven1998@gmail.com
۲. نویسندهٔ مسئول، دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار دانشگاه تهران. رایانامه: aliallahrabbi@ut.ac.ir
۳. دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار دانشگاه تهران. رایانامه: mh.ghodusi@ut.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:**
پژوهشی

**تاریخ‌های مقاله:**
**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۳/۰۹/۱۲
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۳/۱۰/۲۵
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۳/۱۱/۲۹
**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۴/۰۱/۱۵

**کلیدواژه:**
جزیرهٔ گرمایی شهری،
ارزیابی چرخهٔ حیات،
پایداری،
مصالح ساختمانی،
سیاست‌گذاری شهری.

**چکیده**

جزیرهٔ گرمایی شهری (UHI) یکی از چالش‌های کلیدی در شهرهای متراکم است که تحت تأثیر ویژگی‌های حرارتی مصالح، مصالح بازتابنده و خنک‌کننده، ارزیابی چرخهٔ حیات (LCA) و سیاست‌های شهری قرار دارد. این مطالعه با استفاده از مرور سیستماتیک و روش PRISMA، تأثیر این عوامل را در چهار دسته بررسی می‌کند و نشان می‌دهد مصالح با ظرفیت حرارتی بالا و ضریب بازتاب پایین نقش قابل توجهی در تشدید اثرات گرمایی دارند، در حالی که استفاده از مصالح خنک‌کننده و پوشش‌های بازتابی، کاهش دمای سطحی را به دنبال دارد. همچنین، LCA به عنوان یک ابزار تحلیلی در ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی مصالح و بهینه‌سازی انتخاب مواد مطرح شده است، اما عدم استانداردسازی و یکپارچگی این روش در سیاست‌گذاری‌های شهری، چالش‌هایی را ایجاد کرده است. یافته‌ها بیانگر آن است که ادغام LCA در فرایندهای تصمیم‌گیری شهری و تدوین سیاست‌های تشویقی برای توسعه و استفاده از مصالح پایدار می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش UHI و دستیابی به پایداری شهری در زمینه‌های مختلف، مانند محیط زیستی و انرژی داشته باشد.

**استناد:** معاون، مرتضی؛ الهربی شیرازی، محمدعلی و قدوسی‌نژاد، محمدحسن (۱۴۰۴). تحلیل سیستماتیک تأثیر ارزیابی چرخهٔ حیات مصالح بر کاهش جزیرهٔ گرمایی شهری: رهیافتی به سوی سیاست‌گذاری پایدار شهری با استفاده از روش PRISMA. *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۲ (۱) ۹۵-۱۱۰.
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.512352.1019

© مرتضی معاون، محمدعلی الهربی شیرازی، محمدحسن قدوسی‌نژاد
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.512352.1019

## ۱. مقدمه

در ایران شهرنشینی نوعی فرایند پیچیدهٔ اجتماعی ـ اقتصادی با پیامدهای متعدد برای سطوح مختلف جامعه، محیط زیست و تنوع زیستی است [۱]. علی‌رغم اینکه مناظر شهری تنها بخش کوچکی از سطح زمین را پوشش می‌دهند، به‌تدریج در حال تبدیل شدن به آشناترین محیط برای بیشتر مردم جهان هستند [۲]. در حال حاضر، بیش از نیمی از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی می‌کنند. در سال ۲۰۱۸، ۵۵ درصد از جمعیت جهان در مناطق شهری سکونت داشتند که در مقایسه با ۳۰ درصد در سال ۱۹۵۰، نشان‌دهندهٔ تغییر در توزیع فضایی جمعیت از روستاها به مناطق شهری است [۳]. پیش‌بینی می‌شود که رشد جمعیت شهری ادامه یابد، به طوری که جمعیت شهری جهان در سال ۲۰۲۸ به پنج میلیارد نفر و در سال ۲۰۴۱ به شش میلیارد نفر خواهد رسید [۴].

تاریخ نشان می‌دهد انسان همواره سطح زمین را تغییر داده است. برخی تغییرات با سرعت نسبتاً آهسته رخ داده‌اند، اما شهرنشینی مدرن نمونه‌ای از تغییرات سریع است که در آن انسان زیستگاه خود را ایجاد کرده است [۵]. شهرنشینی و صنعتی شدن، مواد، زندگی و آسایش ما را بهبود بخشیده است؛ با این‌حال، مشکلات زیادی نیز برای انسان ایجاد کرده، ازجمله گرمایش زمین، زباله‌های صنعتی و آلودگی هوا. جدا از اثرات نامطلوب جهانی، مناطق شهری به طور جدی‌تری تحت تأثیر این مشکلات قرار می‌گیرند، زیرا در این مناطق فعالیت‌های صنعتی و استفاده از مصالح ساختمانی بیشتری مشاهده می‌شود. درنتیجه، محیط طبیعی و اکولوژی به‌شدت تحت تأثیر قرار گرفته و تعادل خود را از دست داده‌اند [۶].

یکی از بخش‌های مهم مرتبط، آلودگی‌های ناشی از مصرف انرژی است؛ زیرا کشورهای نوظهور و درحال‌توسعه به‌تدریج ظرفیت تولید انرژی خود را برای ارتقای صنعتی شدن و توسعهٔ اقتصادی افزایش داده‌اند [۷]. با شتاب توسعهٔ شهرنشینی، ساختار اکولوژیکی شهرها مختل شده است. این امر باعث حذف تدریجی فضاهای سبز، جایگزینی سطوح طبیعی با ساختمان‌های بلند و خیابان‌های متعدد و درنتیجه، افزایش دمای هوا و سطح مناطق شهری شده است. این افزایش دما در مناطق شهری نسبت به مناطق روستایی و اطراف شهر، «جزیرهٔ گرمایی شهری» نامیده می‌شود [۸]. از زمانی که هاوارد برای نخستین‌بار واژهٔ «جزیرهٔ حرارتی» را مطرح کرد، بیش از یک قرن می‌گذرد و تا کنون پژوهش‌های زیادی در این زمینه انجام شده است [۹].

برخی پژوهشگران به دنبال راهکارهایی برای کاهش اثر جزیرهٔ حرارتی و آسیب‌های ناشی از آن بوده‌اند، در حالی که برخی دیگر این پدیده را از لحاظ مکانی و زمانی بررسی کرده‌اند. استفاده از مصالح تیره‌رنگ و نامناسب در معابر و فضاهای شهری و همچنین، آرایش دره‌مانند ساختمان‌ها، بخشی از انرژی خورشید را به دام می‌اندازد. درنتیجه، خورشید سطوح خشک و تیره، مانند آسفالت خیابان‌ها و نماهای ساختمان‌ها را گاهی تا ۲۰ تا ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد نسبت به محیط اطراف گرم‌تر می‌کند [۱۰]. استفاده از مصالح نامناسب تأثیرات زیادی بر مسائل زیست‌محیطی و منابع طبیعی دارد و درنتیجه موجب آلودگی و آسیب به آن‌ها می‌شود. در حالی که استفاده از مصالح مناسب و پایدار، دستیابی به توسعهٔ پایدار را تسهیل می‌کند. این مصالح به محیط زیست آسیب نمی‌زنند و می‌توانند کاهش‌دهندهٔ مشکلات زیست‌محیطی باشند [۱۱]. به‌کارگیری مصالح و فناوری‌های بادوام که نیازمند نگهداری کمتری هستند، قابلیت استفادهٔ مجدد دارند و از نظر اقتصادی نیز به‌صرفه‌اند، نکتهٔ مهمی است که معماران باید بر آن تمرکز کنند. مصالح باید دارای فاکتورهایی مانند کمترین میزان آلودگی در فرایند تولید باشند. در انتخاب مصالح مناسب، سه عامل دوام، نگهداری و قابلیت دسترسی باید در نظر گرفته شوند [۱۲].

امروزه، کنفرانس‌های بین‌المللی متعددی در زمینهٔ مسائل شهری و زیست‌محیطی برگزار شده و مشخص شده است که آیندهٔ شهرها باید در راستای پایداری، اکولوژی، محیط زیست و سلامت توسعه یابد. موضوع توسعهٔ پایدار یکی از چالش‌های مهمی است که امروزه مردم باید آن را درک کنند و با آن مواجه شوند [۱۳]. مفهوم توسعهٔ پایدار از زمان ظهور آن در گزارش براندتلند در سال ۱۹۸۷، به مرجعی برای تحقیقات علمی در زمینهٔ محیط زیست تبدیل شده و به عنوان یک پارادایم برای توسعه شناخته می‌شود [۱۴].

پایداری واژه‌ای است که امروزه در بسیاری از زمینه‌های مربوط به توسعه و ساخت‌وساز به طور مستمر در چارچوب گفتمان حوزه‌های یادشده به کار گرفته می‌شود [۱۵]. ساخت‌وساز پایدار در سال‌های اخیر به دلیل کاهش منابع به طور سریع در سراسر

جهان در حال رشد است و از این‌رو با چالش‌ها و مشکلاتی از دیدگاه‌های مدیریتی، استراتژیک و عملیاتی مواجه شده است. علاوه بر این، صنعت ساخت‌وساز نقش مهمی در تأمین نیازهای جامعه از طریق بهبود کیفیت زندگی ایفا می‌کند [۱۶]. با این‌حال، این بخش ۳۵ درصد از انتشار $CO_2$ جهانی را به خود اختصاص داده و بین ۴۵ تا ۶۵ درصد از زباله‌هایی که در دفن‌گاه‌ها جمع‌آوری می‌شود را تولید می‌کند [۱۷].

گسترش مباحث در این موضوع نشان داد دست‌یابی به این هدف تنها از راه توجه به طبیعت و محیط زیست قابل دسترسی نیست، زیرا این رویکرد یک‌جانبه در عمل در مقابل خواسته‌های انسانی برای توسعه و تأمین نیاز قرار گرفت و مانع پذیرش آن شد. صنعت ساخت‌وساز یکی از بخش‌های بزرگ صنعتی جهان است و از این‌رو مصرف‌کنندهٔ بزرگ انرژی است. انتشار گازهای گلخانه‌ای، که به گرم شدن کرهٔ زمین منجر شده، یکی از پیامدهای آن است [۱۸]. تولید مصالح، نگهداری، حمل‌ونقل و تخریب آن مقدار قابل توجهی انرژی مصرف می‌کند که به انتشار کربن‌دی‌اکسید در محیط وآسیب‌های مختلف زیست‌محیطی و اجتماعی منجر می‌شود. از این‌رو، توجه به چرخهٔ حیات مصالح، می‌تواند پاسخی مناسب در جهت دستیابی به پایداری در ابعاد مختلف خود باشد [۱۹]. ارزیابی چرخهٔ عمر ابزاری است که می‌تواند برای ارزیابی فرایند یا فعالیت طی چرخهٔ زندگی یک محصول با در نظر گرفتن بار زیستی محیطی از زمان تولید تا گور آن محصول استفاده شود [۲۰]. مصرف بیش از حد و ناصحیح مصالح جدید موجب آسیب‌های زیست محیطی جبران‌ناپذیری شده است و از این پس با رواج مصالح صنعتی، این آسیب‌ها بیشتر و زیان‌آورتر خواهد شد. انرژی مصرفی برای تهیه مصالح جدید بسیار زیاد است. مصرف بالای انرژی و چالش‌های زیست‌محیطی فراوان، بازبینی در روند ساخت‌وساز در کشور را حیاتی می‌سازد [۲۱]. تصمیمات مؤثر و حیاتی معمولاً در فرایند طراحی اتخاذ می‌شود. در زمان طراحی تصمیماتی گرفته می‌شود که تا پایان عمر طرح و حتی سال‌ها پس از تخریب آن، بر محیط زیست و طبیعت تأثیر می‌گذارد [۲۲].

در حالی که جوامع و شهرها در نقاط مختلف دنیا در حال گسترش و به دنبال آن، استفاده از منابع و انرژی سرعت گرفته است، آلودگی‌های ناشی از این توسعه‌های عموماً ناپایدار آسیب‌های زیست‌محیطی فراوانی مانند تغییرات آب‌وهوایی، زباله‌های صنعتی، مصرف منابع، انتقال کربن به محیط، کاهش لایهٔ ازن و غیره ایجاد کرده است. از این‌رو، متخصصان انجام مطالعات متعدد برای بررسی و شناسایی قوت‌ها و ضعف‌ها و چالش‌ها در زمینه‌های مختلف، ارزیابی چرخهٔ حیات (LCA) و اثر جزیرهٔ گرمایی شهری را ضروری می‌دانند. علی‌رغم انجام مطالعات مختلف در این زمینه‌ها، بررسی جامعی در مورد تأثیر ارزیابی چرخهٔ حیات مصالح در طراحی فضاهای شهری بر کاهش جزایر گرمایی شهری صورت نگرفته است. از این‌رو، این مطالعه با هدف شناسایی خلأها و چالش‌های موجود در تأثیر مصالح با رویکرد ارزیابی چرخهٔ حیات بر کاهش جزیرهٔ گرمایی شهری با روش پریسما صورت گرفت.

هدف اصلی این مطالعهٔ مروری، بررسی رویکرد ارزیابی چرخهٔ حیات در تحلیل تأثیرات مصالح ساختمانی بر کاهش جزیرهٔ گرمایی شهری است. در این مطالعه، مقالات مختلف مرتبط با مصالح ساختمانی و تأثیرات آن‌ها بر جزیرهٔ گرمایی شهری و ارزیابی چرخهٔ حیات انتخاب و بررسی شدند. این مقالات در چهار دستهٔ اصلی شامل مصالح و پایداری، مصالح و ارزیابی چرخهٔ حیات، مصالح و جزیرهٔ گرمایی شهری و ترکیب جزیرهٔ گرمایی شهری با ارزیابی چرخهٔ حیات طبقه‌بندی شده‌اند. در ادامه، نتایج و شاخص‌های کلیدی مرتبط با هر بخش مورد تحلیل و بررسی قرار خواهند گرفت. نوآوری این مطالعه در ارائهٔ یک چارچوب تحلیلی ترکیبی برای ارزیابی هم‌زمان اثرات زیست‌محیطی و عملکردی مصالح ساختمانی در کاهش جزیرهٔ گرمایی شهری است. این تحقیق از روش پریسما برای انتخاب و دسته‌بندی سیستماتیک مقالات استفاده کرده است. به طورکلی، نوآوری‌های این مطالعه عبارت‌اند از:

۱. ارائهٔ یک چارچوب تحلیلی ترکیبی برای بررسی هم‌زمان اثرات زیست‌محیطی و عملکردی مصالح ساختمانی در کاهش جزیرهٔ گرمایی شهری.
۲. طبقه‌بندی ساختارمند مقالات در چهار حوزهٔ اصلی شامل مصالح و پایداری، مصالح و ارزیابی چرخهٔ حیات، مصالح و جزیرهٔ گرمایی شهری، و ترکیب جزیرهٔ گرمایی شهری با ارزیابی چرخهٔ حیات.

۳. استفاده از روش PRISMA برای انتخاب و دسته‌بندی سیستماتیک مقالات مرتبط به منظور شناسایی شکاف‌های پژوهشی و چالش‌های موجود در سیاست‌گذاری مصالح شهری پایدار.

## ۲. روش‌شناسی

این مطالعه، یک پژوهش مروری، از نوع پریسما (PRISMA) است. روش یک رویکرد استاندارد برای انجام مرور سیستماتیک و متاآنالیزها است که به منظور افزایش شفافیت و دقت در فرایند گزارش‌نویسی و انتخاب مقالات طراحی شده است. این روش به‌ویژه در زمینهٔ مرورهای جامع علمی برای شناسایی، ارزیابی و ترکیب نتایج تحقیقاتی در یک موضوع خاص کاربرد دارد [۲۳].

در این رویکرد، مراحل مختلف شامل شناسایی مقالات از منابع مختلف، غربالگری عناوین و چکیده‌ها، ارزیابی کیفیت مقالات منتخب و درنهایت، تحلیل داده‌ها به طور ساختارمند و شفاف انجام می‌شود. یکی از ویژگی‌های کلیدی روش پریسما، استفاده از نمودار جریان انتخاب مقالات است که روند انتخاب مقالات و دلایل حذف هر یک را به‌وضوح نشان می‌دهد. این فرایند کمک می‌کند تا خوانندگان بتوانند روند تصمیم‌گیری در انتخاب مقالات را درک کرده و اعتبار نتایج مطالعه را ارزیابی کنند. فلوچارت روند بررسی مقالات در این پژوهش به روش پریسما در شکل ۱ نشان داده شده است.

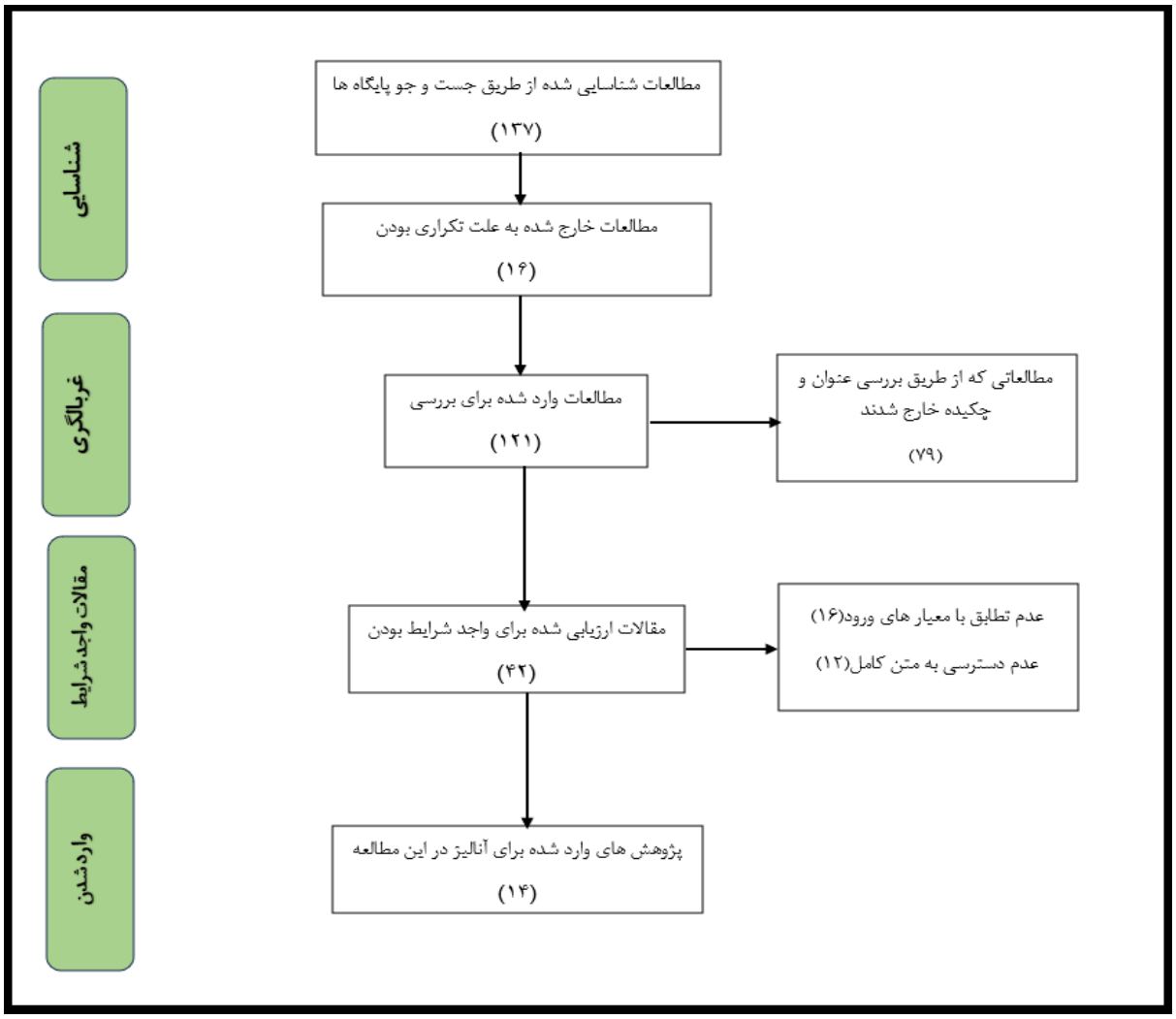
جامعهٔ آماری شامل اسناد و مقالات در دسترس با موضوع بررسی رویکرد ارزیابی چرخهٔ حیات در مصالح بر کاهش جزیرهٔ گرمایی شهری در ژوئن ۲۰۲۴ صورت گرفت. روش نمونه‌گیری با ابزار بررسی اسنادی مرتبط با موضوع و با کلیدواژگان ارزیابی چرخهٔ حیات، مصالح پایدار، مصالح، بازیافت، بوم‌آورد، پایداری، معماری منظر، تغییرات اقلیمی، جزایر گرمایی شهری انجام شد. پس از بررسی‌های اولیه و رسیدن به کلیدواژه‌های مشخص‌تر در زمینهٔ تأثیر مواد و مصالح بر کاهش جزیرهٔ گرمایی با رویکرد ارزیابی چرخهٔ حیات؛ سؤالات پژوهش به صورت زیر مطرح شد:

- در حال حاضر، تأثیر مصالح روی کاهش جزیرهٔ گرمایی با رویکرد ارزیابی چرخهٔ حیات چگونه است؟
- چه کارهایی می‌توان برای بهبود این موضوع انجام داد که انجام نمی‌شود؟ چرا؟
- محدودیت‌ها در این موضوع چه چیزهایی است؟
- چگونه می‌شود تأثیر مصالح روی کاهش جزیرهٔ گرمایی با رویکرد ارزیابی چرخهٔ حیات را افزایش داد؟

مطالعهٔ حاضر با جست‌وجوی مقالات در پایگاه‌های معتبر علمی، فارسی و انگلیسی، ازجمله Google Scholar، ScienceDirect، SID و Scopus انجام شد. در این جست‌وجو، از کلیدواژگان ارزیابی چرخهٔ حیات، جزیرهٔ گرمایی شهری، پایداری، مصالح و ارزیابی چرخهٔ حیات مواد به زبان فارسی و معادل‌های آن‌ها به زبان انگلیسی، شامل Urban heat island، Life cycle assessment، Sustainability، Materials، Life cycle assessment of materials استفاده شد.

محدودهٔ زمانی مقالات بررسی‌شده از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ در نظر گرفته شد و مقالات براساس معیارهای مشخصی انتخاب شدند. این معیارها شامل پژوهشی بودن مقالات به زبان فارسی و انگلیسی، تخصصی بودن آن‌ها در زمینهٔ ارزیابی چرخهٔ حیات، مصالح، جزیرهٔ گرمایی شهری و پایداری و همچنین، بررسی تأثیر این مفاهیم بر یکدیگر بود. علاوه بر این، تنها مقالاتی انتخاب شدند که دسترسی به متن کامل آن‌ها امکان‌پذیر بود و کلمات کلیدی جست‌وجو شده یا معادل‌های آن‌ها در عنوان یا چکیدهٔ مقاله وجود داشت. همچنین، مقالات تکراری از روند انتخاب حذف شدند تا از بررسی‌های مجدد و اطلاعات تکراری جلوگیری شود.

منابع استخراج‌شده مورد بررسی قرار گرفتند؛ به این‌صورت که ابتدا عنوان و چکیدهٔ مقالات و در صورت نیاز متن مقاله مورد مطالعه قرار گرفت. سپس، برای بررسی بیشتر متن کامل مطالعات کاملاً مرتبط با مطالعه شدند و مقالات نهایی انتخاب شدند. برای اطمینان بیشتر، همهٔ مراحل جست‌وجو دوباره تکرار شد. برای مدیریت منابع از نرم‌افزار اندنوت نسخهٔ ۲۱ استفاده شد. برای استخراج اطلاعات مورد نظر از فرمی شامل نام نویسنده، سال چاپ مقاله، عنوان مقاله، حوزهٔ تمرکز پژوهش و یافته‌ها و نتایج اصلی استفاده شد. از ۲۱۳ مقالهٔ مورد بررسی و پس از لحاظ کردن معیارهای ورود و خروج، ۱۴ مقاله در بررسی نهایی و سپس با استفاده از چک‌لیست پریسما، مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته است.




**شکل ۱.** فلوچارت پریسما از روند بررسی و انتخاب مقالات در مطالعهٔ حاضر

## ۳. نتایج

از بین مقالات استخراج‌شده، تعداد ۱۴ مقاله واجد شرایط برای ورود به مطالعه انتخاب شد که شامل ۵ مقالهٔ فارسی و ۹ مقالهٔ انگلیسی است (جدول ۱ مقالات مورد بررسی را نشان می‌دهد). پس از مطالعه و بررسی، این مقالات در چهار دستهٔ کلی طبقه‌بندی شدند: ۱- مصالح و پایداری (۴ مقاله)؛ ۲- مصالح و ارزیابی چرخهٔ حیات (LCA) (۵ مقاله)؛ ۳- مصالح و جزیرهٔ گرمایی شهری (UHI) (۳ مقاله)؛ ۴- جزیرهٔ گرمایی شهری (UHI) و ارزیابی چرخهٔ حیات (۲ مقاله). در ادامه، ابتدا این دسته‌بندی‌ها و شاخص‌های مرتبط با آن‌ها تشریح شده و سپس نتایج مطالعات در جدول ۱ ارائه می‌شود.

- **مصالح و پایداری**

در دهه‌های اخیر، نگرانی‌های زیادی در مورد کاهش منابع طبیعی و مشکلات زیست‌محیطی ایجاد شده که موجب تلاش‌های گسترده‌ای برای توسعهٔ ساخت‌وساز پایدار شده است. بخش‌های مختلف صنعت ساخت‌وساز یکی از عوامل اصلی کاهش منابع طبیعی هستند، و این واقعیت، فعالان این عرصه را تحت فشار قرار داده تا استراتژی‌های مؤثری برای سازگاری با محیط زیست اتخاذ کنند [۲۴]. این فشارها نیاز به شناخت و هماهنگی میان تکنیک‌ها، مصالح و محیط زیست را برجسته می‌کند. در معماری پایدار، اهمیت استفاده از مصالح بومی که همسویی بیشتری با اقلیم دارند، به‌ویژه در طراحی فضاهای شهری در مناطق بیابانی ایران، قابل مشاهده است. طراحی‌هایی که مصرف انرژی را کاهش می‌دهند و به حفظ منابع طبیعی کمک می‌کنند، مانند بهره‌گیری از نور خورشید برای تأمین انرژی در تمام فصل‌ها، به پایداری زیست‌محیطی بیشتر منجر می‌شود [۲۵].

با ورود مصالح جدید ساختمانی مانند آهن و بتن، آسیب‌هایی در زمینهٔ همساز بودن با اقلیم و پایداری ایجاد شد (رستمی و جاویدی‌نژاد، ۲۰۱۷). معماری پایدار، به‌ویژه با استفاده از مصالح سبز که زیست‌محیطی، تجدیدپذیر و قابل بازیافت هستند، می‌تواند در کاهش آلودگی، صرفه‌جویی در انرژی و جلوگیری از آلودگی هوا کمک کند. استفاده از مصالح بادوام، با نیاز کمتر به نگهداری و بازیافت‌پذیر، برای معماران امری ضروری است. انتخاب مصالح مناسب باید بر اساس دوام، نگهداری و قابلیت دسترسی صورت گیرد [۲۶].

پیچیدگی و تعدد ذی‌نفعان در صنعت ساخت‌وساز، تصمیم‌گیری در مورد مصالح پایدار را دشوار می‌کند. انتخاب نادرست مصالح می‌تواند تأثیر منفی بر اهداف پروژه داشته باشد. استفاده از مصالح پایدار، علاوه بر کمک به کاهش گازهای گلخانه‌ای، در صرفه‌جویی هزینه‌ها و جلوگیری از هدررفت منابع و آلودگی ناشی از زباله‌ها مؤثر است. در نهایت، سازگاری مصالح با محیط زیست، به عنوان یک اصل کلیدی در معماری پایدار، به کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و مصرف انرژی در صنعت ساختمان‌سازی کمک می‌کند [۲۷].

- **مصالح و LCA**

در دنیای امروز، صنعتی شدن و استفادهٔ بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی موجب بروز مشکلات زیست‌محیطی فراوانی شده است، از جمله افزایش زباله‌ها و پسماندها. یکی از راه‌های مقابله با این مشکل، استفادهٔ مجدد از ضایعات و بازگرداندن آن‌ها به چرخهٔ مصرف است [۲۸]. برای کاهش خطرات زیست‌محیطی ناشی از مصالح ساختمانی، ضروری است چرخهٔ حیات این مصالح از زمان استخراج تا بازگشت به طبیعت و انرژی مصرفی در این فرایند مورد بررسی قرار گیرد. استفاده از مصالح با کمترین آلودگی، مصرف انرژی پایین در تولید، صرفه‌جویی در انرژی حمل‌ونقل و بهره‌برداری، و بازگشت سریع به طبیعت از مزایای این مصالح است.

تأثیرات منفی مصالح را می‌توان با ترویج تکنیک‌های نوآورانهٔ زیست‌محیطی در فرایند تولید، مصرف و دفع آن‌ها کاهش داد، که باعث افزایش رقابت در تولید محصولات سازگار با محیط زیست می‌شود [۲۹]. به‌ویژه در طراحی پارک‌های شهری، که ابتدا کربن زیادی جذب می‌کنند، استفاده از مصالح مناسب می‌تواند با در نظر گرفتن چرخهٔ حیات مواد، به کاهش تولید کربن و ایجاد پارک‌های کربن منفی منجر شود. ارزیابی شاخص‌های زیست‌محیطی از طریق مراحل ارزیابی چرخهٔ حیات برای دستیابی به استانداردهای پایداری در ساخت‌وساز و حفاظت از محیط زیست ضروری است.

- **مصالح و UHI**

گرمای بیش از حد شهرها یکی از مشکلات عمدهٔ زیست‌محیطی، بهداشتی و انرژی است [۳۰]. مواد تشکیل‌دهندهٔ مناطق شهری تابش خورشید را جذب کرده و گرما را به جو منتشر می‌کنند؛ به این معنا که پوشش‌های شهری نقش کلیدی در افزایش یا کاهش دمای سطح و هوا در شهر دارند. تحقیقات نشان می‌دهد پوشش‌های افقی شهرها در مواجهه با پخش گرما به محیط، در وضعیت بحرانی قرار دارند، بنابراین بهبود رفتار این سطوح در اثر جزیرهٔ گرمایی شهری ضروری است. استفاده از مصالح بومی و همساز با محیط می‌تواند به کاهش این اثرات کمک کند. همچنین تغییر رنگ و بافت مصالح می‌تواند رفتار حرارتی آن‌ها را تغییر دهد و موجب کاهش اثر جزیرهٔ گرمایی شود [۳۱].

مواد به‌کاررفته در ساختمان‌ها و محیط‌های شهری تأثیر زیادی بر انرژی، کیفیت محیط زیست و سلامت دارند و در افزایش یا کاهش جزیرهٔ گرمایی مؤثر هستند. برای جبران گرمای اضافی در فضاهای شهری، پوشش‌های سطوح توسعه یافته‌اند. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند استفاده از مواد سرد در فضاهای شهری می‌تواند به خنک‌سازی محیط کمک کند. افزایش جمعیت، گسترش شهرنشینی، کاهش فضاهای سبز، مصرف زیاد سوخت‌های فسیلی و استفاده از مصالح نامناسب، موجب بروز جزایر حرارتی در شهرها شده است که دمای هوای آن‌ها را چندین درجهٔ سانتی‌گراد نسبت به مناطق اطراف افزایش می‌دهد. عوامل تأثیرگذار بر شدت جزیرهٔ حرارتی شامل ظرفیت و هدایت حرارتی مصالح، ضریب انتشار و انعکاس، نفوذپذیری مصالح و انرژی نهفته در آن‌ها است. تعادل حرارتی محیط نیز عمدتاً از بازتاب پرتوهای خورشیدی و انتشار پرتو مادون قرمز مصالح به محیط پیرامون ناشی می‌شود. در نتیجه، مصالح پوستهٔ شهر نقش مهمی در کاهش دریافت و ذخیرهٔ حرارت و انتقال آن به محیط شهری دارند [۳۲].

- **UHI و LCA**

جزیرهٔ گرمایی شهری (UHI)، یکی از اثرات LCA است. بسیاری از تحقیقات جزیرهٔ گرمایی شهری در درجهٔ نخست بر نقش آلبدو متمرکز و محدود شده است. مسائل متعددی بر جزیرهٔ گرمایی شهری تأثیرگذار است، (از جمله ویژگی‌های مختلف چرخهٔ زندگی در روسازی‌ها)؛ به این معناست که پارامترهای مؤثر در جزیرهٔ گرمایی شهری علاوه بر مسائلی که به آن پرداخته می‌شود باید در مطالعات ارزیابی چرخهٔ حیات نیز تحلیل شود [۳۳]. برای کاهش تأثیرات مخرب بر سلامت انسان و محیط انجام اقدامات مؤثر در حوزهٔ جزیرهٔ گرمایی شهری بسیار مهم است. ارزیابی چرخهٔ زندگی، نوعی ابزار ارزیابی است که توانایی گرفتن آن اقدامات را دارد. ارزیابی چرخهٔ حیات به تعاملات محیط ساخته‌شده و طبیعی توجه می‌کند و تأثیرات نامناسب ناشی از آن‌ها را روی هم حذف می‌کند. باید توجه داشت که با اعمال ارزیابی چرخهٔ حیات بر شهرها و در نظر نگرفتن مسائل دیگر پایداری ممکن است نتایج گمراه‌کننده‌ای برای ذی‌نفعان ایجاد شود. بنابراین باید به تمامی جنبه‌ها و با نگرشی سیستماتیک به ارزیابی چرخهٔ حیات و تأثیرات آن بر جزیرهٔ گرمایی شهری پرداخت. شهرها از اهمیت بالایی برخوردار هستند، چرا که از کانون‌های اصلی تأثیرات زیست‌محیطی هستند [۳۴].

**جدول ۱.** مطالعات منتخب و مورد بررسی در پژوهش حاضر

| ردیف | نویسنده | عنوان | تمرکز پژوهش | یافته‌ها و نتایج اصلی | منابع |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | گووندان و همکاران | انتخاب مصالح پایدار برای صنعت ساخت‌وساز – رویکرد ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره | ارزیابی پایداری مصالح ساخت‌وساز بر اساس شاخص‌های پایدار با رویکرد MCDM | ۱_شاخص‌های پایدار مناسب برای انتخاب بهترین مصالح ساختمانی پایدار انتخاب شدند: ۲_ تأثیرگذارترین شاخص پایدار آشکار شد «پتانسیل بازیافت و استفادهٔ مجدد.» ۳_ مناسب‌ترین مادهٔ پایدار به عنوان آجر پشمی در میان گزینه‌های دیگر یافت شد. | [۳۵] |
| ۲ | رستمی و همکاران | هماهنگی تکنیک، مصالح و محیط زیست و کاربرد آن در زیبایی و عملکرد بناهای سنتی شهرهای کویری ایران | تشریح چگونگی تطابق آب‌وهوایی و پاسخ‌گویی محیطی ابنیهٔ سنتی ایرانی به شرایط اقلیمی خاص کویر | یکی از عوامل مهم طراحی پایدار بناهای سنتی مناطق کویری ایران، استفادهٔ مناسب از مصالح محلی با طراحی ویژه‌ای است که موجبات و امکان بهره‌وری از گرمای روز در سرمای شب و به‌عکس را با توجه به خاصیت تأخیری انتقال دما در مصالح یادشده فراهم می‌کند. | [۳۶] |
| ۳ | جعفری فشارکی و همکاران | مصالح سبز؛ سکوی بلند موفقیت در معماری پایدار مطالعهٔ موردی: برج هرست نیویورک | نقش تعیین‌کنندهٔ مصالح سبز و چگونگی کاربرد و طراحی این نوع مصالح با توجه به شرایط محیطی کشور ایران در جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی | در نهایت به این نتیجه می‌رسیم که استفاده از مصالح سبز یک مؤلفه و فاکتوری کلیدی در راه رسیدن به معماری پایدار است و برای نسل‌های آینده می‌توان محیط زیستی پایدار فراهم آورد. | [۳۷] |
| ۴ | ایزه و همکاران | عوامل تعیین‌کنندهٔ انتخاب مصالح ساختمانی پایدار (SBM) در پروژه‌های ساختمانی | ارزیابی پارامترهای اصلی انتخاب مصالح ساختمانی سبز و پایدار در پروژه‌های ساختمانی در منطقهٔ ژئوپلیتیک جنوب شرقی نیجریه | عوامل کلیدی مؤثر بر انتخاب مصالح ساختمانی پایدار در ساخت‌وساز عبارت‌اند از: کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از ساختمان‌ها، هزینهٔ انرژی متشکل از مواد، هزینه‌های عملیاتی و نگهداری، انتشار غیرسمی محصولات/مواد، قابلیت بازیافت مصالح ساختمانی، در دسترس بودن مهارت‌های فنی، قابلیت تجدیدپذیری | [۳۸] |
| ۵ | اکرمی و همکاران | نقش مصالح بومی در معماری پایدار از دیدگاه زیست‌محیطی | مشکلات زیست‌محیطی ساخت‌وساز امروزین که به دلیل استفاده نامناسب از مصالح جدید در ساختمان‌سازی پدید آمده است | با بررسی و مقایسهٔ مصالح بومی و مصالح جدید، مشخص می‌شود که مزایای استفاده از مصالح بومی به مراتب بیشتر است. عدم تخریب طبیعت در برداشت، کمترین آلودگی در تولید، پایین بودن مصرف انرژی در تولید، صرفه‌جویی در انرژی حمل‌ونقل، کاهش مصرف انرژی در بهره‌برداری، کاهش هزینه‌های تمام شده و از همه مهم‌تر بازگشت سریع به طبیعت و عدم تخریب محیط زیست از مزایای مصالح بومی به شمار می‌رود. | [۳۹] |
| ۶ | طالقانی و همکاران | بررسی نقص بازیافت و کاربرد مواد بازیافتی در معماری به عنوان روشی نو در طراحی همساز با محیط زیست | تشریح ضرورت استفاده از مواد بازیافتی بر اساس رویکرد معماری پایدار | ارائهٔ پیشنهاد بناهای بافت زیستی که از نظر مصرف انرژی مستقل هستند و بدون نیاز به افراد ماهر ساخته می‌شوند. این بناها روشی از ساخت را ایجاد می‌کند که نتیجهٔ آن، کاهش زباله‌های موجود و همین‌طور کاهش مصرف انرژی است. | [۴۰] |

**ادامهٔ جدول ۱.**

| ردیف | نویسنده | عنوان | تمرکز پژوهش | یافته‌ها و نتایج اصلی | منابع |
|---|---|---|---|---|---|
| ۷ | ساسترسا و همکاران | ارزیابی چرخهٔ عمر مصالح ساختمانی: تحلیل مقایسه‌ای انرژی و اثرات زیست‌محیطی و ارزیابی پتانسیل بهبود بهره‌وری زیست‌محیطی | بررسی مشخصات مصرف انرژی و زیست‌محیطی مصالح ساختمانی، تجزیه‌وتحلیل امکانات آن‌ها | این مطالعه ثابت می‌کند که تأثیرات نامطلوب محصولات ساختمانی را می‌توان به میزان قابل توجهی با استفاده از بهترین تکنیک‌های موجود و نوآورانهٔ زیست‌محیطی در کارخانه‌های تولیدی کاهش داد و جایگزین استفاده از منابع طبیعی محدود در سایر فرایندهای تولید، که به صورت محلی در دسترس هستند کرد. | [۴۱] |
| ۸ | پارک و همکاران | طراحی زیست‌محیطی و استراتژی‌های ساخت‌وساز از طریق ارزیابی چرخهٔ حیات‌ای کربن برای پارک‌های شهری در کره | بررسی استراتژی‌های ساخت‌وساز برای به حداقل رساندن میزان کربن با رویکرد LCA | ارائهٔ راهبردهای اکولوژیکی طراحی و ساخت از جمله گسترش فضای سبز شهری، استفاده از سطوح نفوذپذیر، استفاده از مصالح بوم‌آورد باعث می‌شود که جذب خالص کربن حدود ۹/۲ برابر افزایش یابد. | [۴۲] |
| ۹ | پتروویچ و همکاران | ارزیابی چرخهٔ حیات مصالح ساختمانی برای یک خانهٔ مستقل | بررسی مصالح ساختمانی در رویکرد LCA با تمرکز بر فواصل حمل‌ونقل مصالح و جایگزینی مواد ضروری | نتایج نشان می‌دهد دال بتنی ساخته‌شده در ساختمان بیشترین میزان تأثیر در انتشار کربن‌دی‌اکسید است، در حالی که قاب‌های چوبی تأثیرات زیست‌محیطی مخرب کمتری دارند. جایگزین کردن مصالح ساختمانی مخرب با نمونه‌های کم‌اثرتر برای حفظ محیط زیست ضروری است. | [۴۳] |
| ۱۰ | آلچاپار و همکاران | طبقه‌بندی مصالح ساختمانی مورد استفاده در سطوح شهری با توجه به ظرفیت آن‌ها برای کاهش جزیرهٔ گرمایی شهری در مناطق نیمه‌خشک | بررسی عملکرد حرارتی سطوح مختلف شهری با رویکرد SRI | نتایج نشان می‌دهند سطوح عمودی مانند نمای ساختمان‌ها تأثیر کمتری در ایجاد جزیرهٔ حرارتی شهری نسبت به سطوح افقی مانند روسازی‌ها دارند، اما امکان بیشتری برای مدیریت رفتار حرارتی این سطوح وجود دارد. | [۴۴] |
| ۱۱ | سانتاموری و همکاران | توسعهٔ اخیر و اولویت‌های تحقیق در مورد مصالح سرد برای کاهش جزیرهٔ گرمایی شهری | بررسی روند پیشرفت‌های طراحی، توسعه و اجرای مواد کاهش‌دهندهٔ دما | نتایج تجربی در مورد ظرفیت خنک‌کننده و عملکرد حرارتی معمولی و مواد پیشرفته به صورت مقایسه‌ای شرح داده شده است. نتایج نشان می‌دهد مواد نوآورانه می‌تواند دمای محیط را کاهش دهد و به کاهش گرمای بیش از حد شهری کمک زیادی کند. | [۴۵] |
| ۱۲ | حاجی فتحعلی و همکاران | رابطهٔ گرمای هوا، میانگین گرمای تابشی و آلبدو در کاهش جزایر حرارتی شهرها | ۱_شناخت عوامل مؤثر بر ایجاد جزایر حرارتی؛ ۲_ معرفی استراتژی‌های کاهشی؛ ۳_ بررسی پارامترهایی همچون میانگین دمای تابشی و دمای هوا در سه آلبدوی بالا ، متوسط و پایین | با وجود مناسب بودن مصالح سرد با آلبدوی بالا برای کف خیابان‌ها و بام‌ها، اما مصالح دارای آلبدوی بالا در نما به دلیل انعکاس زیادی که به محیط دارند، آسایش حرارتی را پایین‌تر می‌آورند و محیط را گرم‌تر می‌کنند و در شهرهایی که دارای جزیرهٔ حرارتی هستند مصالح روشن باعث گرم شدن محیط می‌شوند | [۴۶] |
| ۱۳ | سوسا و همکاران | اثرات جزیرهٔ گرمایی در ارزیابی چرخهٔ حیات شهری بینش‌های جدید شامل اثرات جزیرهٔ گرمایی شهری و کاهش UHI در LCA برای اقدامات مؤثر در سیاست‌گذاری | بررسی تعاملات بین محیط ساخته‌شده و آب‌وهوای محلی در LCA | لزوم گسترش رویکردهای LCA افزایش تعاملات مدل‌های اقلیمی بین اقلیم محلی با محیط ساخته‌شده یک ارزیابی جامع در جهت اقدامات کاهشی اثرات جزیرهٔ حرارتی شهری با رویکرد LCA تبیین می‌شود. | [۴۷] |
| ۱۴ | سن و همکاران | ارزیابی سازهٔ روسازی بتنی در جزیرهٔ حرارتی شهری | اثرات بالقوهٔ UHI توسط یک سیستم روسازی بتنی کنترلی و انجام تنظیمات مستقل در لایه‌های مختلف خواص حرارتی برای آب‌وهوای شیکاگو | یک سیستم روسازی بتنی با جرم حرارتی بالاتر تجزیه‌وتحلیل شد و نشان داد دمای سطح را در فصل گرم کاهش می‌دهد و در فصل سرد حدود ۶۰ درصد نسبت به مورد شاهد در هر دو شهر افزایش می‌دهد. تجزیه‌وتحلیل نشان داد خواص حرارتی لایه روسازی بر UHI تأثیر دارد و باید علاوه بر آلبدو، باید در مطالعات LCA اندازه‌گیری شود. | [۴۸] |

در تفسیر جدول ۱، مقالات انتخاب‌شده به چهار دستهٔ اصلی تقسیم شده‌اند که هریک به جنبه‌های مختلف تأثیر مصالح بر محیط زیست، پایداری، و جزیرهٔ گرمایی شهری پرداخته‌اند. اولین دسته شامل مقالاتی است که به رابطهٔ مصالح و پایداری می‌پردازد. در این مقالات، اهمیت انتخاب مصالح بومی و تجدیدپذیر برای کاهش مصرف انرژی و حفظ منابع طبیعی در صنعت ساخت‌وساز تأکید شده است. این مقالات نشان می‌دهند استفاده از مصالح پایدار به بهینه‌سازی هزینه‌ها و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی کمک می‌کند. دستهٔ دوم مقالات مربوط به LCA است. این مقالات بررسی می‌کنند که چگونه با تحلیل اثرات زیست‌محیطی مصالح از مرحلهٔ استخراج مواد اولیه تا بازیافت آن‌ها می‌توان انتخاب‌های بهتری برای کاهش تأثیرات منفی بر محیط زیست داشت. این دسته از مقالات به راهکارهایی برای کاهش مصرف انرژی و آلاینده‌ها اشاره دارند. دستهٔ سوم شامل مقالاتی است که به ارتباط مصالح ساختمانی با پدیدهٔ جزیرهٔ گرمایی شهری UHI می‌پردازند. این مقالات نشان می‌دهند انتخاب مصالح مناسب می‌تواند به کاهش دمای زیاد در مناطق شهری و مقابله با اثرات منفی جزیرهٔ گرمایی کمک کند. درنهایت، دستهٔ چهارم مقالاتی است که به ترکیب دو رویکرد جزیرهٔ گرمایی شهری و ارزیابی چرخهٔ حیات LCA پرداخته‌اند. این مقالات بر اهمیت توجه به تأثیرات زیست‌محیطی تمام مراحل زندگی مصالح در مقابله با جزیرهٔ گرمایی تأکید دارند. این تحلیل‌ها می‌توانند به سیاست‌گذاری‌های مؤثری در جهت کاهش جزیرهٔ گرمایی و بهبود شرایط زیست‌محیطی کمک کنند. در مجموع، این ۱۴ مقاله به طور کلی به بررسی تأثیرات مصالح بر محیط زیست، کاهش آلودگی‌ها، پایداری و چالش‌های مربوط به جزیرهٔ گرمایی شهری می‌پردازند و نشان می‌دهند انتخاب مصالح مناسب می‌تواند راه‌حل‌های مؤثری برای کاهش مشکلات زیست‌محیطی و بهبود کیفیت زندگی شهری ارائه دهد.

## ۵. نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه دیدگاهی جامع از نقش مصالح ساختمانی در پدیدهٔ جزیرهٔ گرمایی شهری ارائه می‌دهد و بر اهمیت ارزیابی چرخهٔ حیات مواد در مسیر دستیابی به توسعهٔ پایدار تأکید دارد. مصالح ساختمانی به عنوان یکی از عوامل مؤثر در تغییرات اقلیمی شهری، تأثیر مستقیم بر انرژی، کیفیت محیط زیست، سلامت عمومی و شدت جزیرهٔ گرمایی دارند. انتخاب مصالح مناسب، با در نظر گرفتن ویژگی‌هایی نظیر حداقل تولید آلاینده‌ها، دوام، قابلیت نگهداری و دسترسی، نقش کلیدی در طراحی شهری پایدار ایفا می‌کند.

ارزیابی چرخهٔ حیات مصالح نشان می‌دهد رویکردهای نوآورانهٔ زیست‌محیطی، از مرحلهٔ تولید تا مصرف و بازیافت، می‌توانند به طور قابل توجهی اثرات مخرب محیطی را کاهش دهند. در سال‌های اخیر، توسعهٔ فناوری‌های جدید در پوشش‌های سطوح شهری و استفاده از مصالح بازتاب‌دهنده یا خنک‌کننده، به عنوان راهکارهایی برای مدیریت گرمای اضافی در فضاهای شهری مطرح شده‌اند. با این‌حال، هنوز مطالعات جامع و سیستماتیکی که تأثیر مصالح پایدار را بر کاهش جزیرهٔ گرمایی شهری از منظر ارزیابی چرخهٔ حیات مورد بررسی قرار دهند، محدود است.

در این راستا، سیاست‌گذاری شهری باید به سمت تدوین استانداردهای سخت‌گیرانه‌تری در حوزهٔ انتخاب و استفاده از مصالح ساختمانی سوق پیدا کند. توسعهٔ مشوق‌های اقتصادی برای تولیدکنندگان و طراحان شهری برای استفاده از مصالح پایدار، تصویب مقرراتی برای کاهش اثرات گرمایی ساختمان‌ها و ارتقای فناوری‌های سازگار با محیط زیست، از جمله اقداماتی هستند که می‌توانند در کاهش پدیدهٔ جزیرهٔ گرمایی مؤثر باشند. همچنین، لازم است که در فرایند برنامه‌ریزی شهری، شاخص‌های مربوط به ارزیابی چرخهٔ حیات مصالح به عنوان یکی از معیارهای کلیدی در تصمیم‌گیری‌های کلان در نظر گرفته شوند. پیشنهاد می‌شود که تحقیقات آینده به بررسی دقیق‌تر نحوهٔ تأثیرگذاری انواع مختلف مصالح پایدار بر کاهش جزیرهٔ گرمایی پرداخته و دستورالعمل‌های اجرایی برای پیاده‌سازی این مصالح در پروژه‌های شهری ارائه شود. علاوه بر این، سیاست‌های توسعهٔ شهری باید به سمت استفاده از فناوری‌های نوین در تولید و بازیافت مصالح هدایت شوند تا بتوان اثرات زیست‌محیطی ناشی از چرخهٔ حیات این مواد را به حداقل رساند و گامی مؤثر در راستای پایداری شهری برداشت.

برای کاهش اثرات جزیرهٔ گرمایی شهری، سیاست‌گذاران باید استانداردهای اجباری برای مصالح کم‌آلاینده و با ضریب بازتاب بالا تدوین کنند. توسعهٔ فناوری نانو در پوشش‌های خنک‌کننده، افزایش ضریب آلبدو در زیرساخت‌های شهری و استفاده از بتن‌های پرواکنشی (HPC) و کامپوزیت‌های حرارتی باید در اولویت قرار گیرد. الزام به تحلیل LCA در پروژه‌های کلان‌شهری،

ایجاد سیستم اعتباری کربن برای تولیدکنندگان مصالح پایدار و محدودیت در استفاده از مواد با چرخهٔ حیات کوتاه می‌تواند به بهینه‌سازی انتخاب مصالح کمک کند. یکپارچه‌سازی طراحی پارامتریک با مدل‌های انرژی شهری (UBEM)، توسعهٔ پوشش‌های تغییر فازدهنده (PCM) در نمای ساختمان و استفاده از مصالح فوتوکاتالیستی برای کاهش آلودگی و گرمایش ضروری است. همچنین، شهرداری‌ها باید الزام به خنک‌سازی سطحی از طریق تکنیک‌های ژئوترمال سطحی و سیستم‌های متخلخل را در کدهای ساخت‌وساز بگنجانند. توسعهٔ سیستم‌های هوشمند سنجش دمای سطحی و تحلیل داده‌های ماهواره‌ای برای پایش اثرات UHI باید در سیاست‌گذاری لحاظ شود.

## منابع


1. Nations, United, World urbanization prospects: The 2014 revision, highlights. Department of Economic and Social Affairs. Population Division, United Nations, 2014. 32: p. 1–1.
2. de Barros Ruas, R., Costa, L.M.S., and Bered, F., Urbanization driving changes in plant species and communities–A global view. Global Ecology and Conservation, 2022. 38: p. e02243.
3. Parris, K.M., Ecology of urban environments. John Wiley & Sons, 2016.
4. Rehman, E., and Rehman, S., Modeling the nexus between carbon emissions, urbanization, population growth, energy consumption, and economic development in Asia: Evidence from grey relational analysis. Energy Reports, 2022. 8: p. 5430–5442.
5. Darbani, E.S., et al., Urban design strategies for summer and winter outdoor thermal comfort in arid regions: The case of historical, contemporary and modern urban areas in Mashhad, Iran. Sustainable Cities and Society, 2023. 89: p. 104339
6. Rizwan, A.M., and Dennis, L.Y.C., A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. Journal of Environmental Sciences, 2008. 20(1): p. 120–128.
7. Allah, Rabbi Shirazi Mohammad Ali. "Idea generation and examination of environmental challenges of floating solar photovoltaic power plants on wetlands and its economic advantage for local communities." (2024): 39-51.
8. Taghvaie, A., et al., Assessment of Urban Heat Mitigation Strategies to Improve Outdoor Thermal Comfort Regarding Carbon Dioxide Concentration in Tehran Metropolis. International Journal of Environmental Research, 2023. 17(3): p. 36.
9. Goward, S.N., Thermal behavior of urban landscapes and the urban heat island. Physical Geography, 1981. 2(1): p. 19–33.
10. Rezaeei Rad, H., and Rafieyan, M., Estimating the spatial-temporal changes in intensity of the heat island in Tehran Metropolitan by using ASTER and Landsat8 satellite images. Regional Planning, 2017. 7(27): p. 47–60.
11. Eze, E.C., et al., Determinants of sustainable building materials (SBM) selection on construction projects. International Journal of Construction Supply Chain Management, 2021. 11(2): p. 166–194.
12. Rey-Álvarez, B., Sanchez-Montanes, B., and García-Martínez, A., Building material toxicity and life cycle assessment: A systematic critical review. Journal of Cleaner Production, 2022. 341: p. 130838.
13. Hsu, C.Y., and Ou, S.J., Innovative practice of sustainable landscape architecture education—parametric-aided design and application. Sustainability, 2022. 14(8): p. 4627.
14. WCED, U., Our common future—The Brundtland report. Report of the World Commission on Environment and Development, 1987. 11: p. 1–1.
15. Hwang, B.G., Zhu, L., and Tan, J.S.H., Green business park project management: Barriers and solutions for sustainable development. Journal of Cleaner Production, 2017. 153: p. 209–219.
16. Doan, D.T., et al., A critical comparison of green building rating systems. Building and Environment, 2017. 123: p. 243–260.
17. Lima, L., et al., Sustainability in the construction industry: A systematic review of the literature. Journal of Cleaner Production, 2021. 289: p. 125730.
18. Allahrabbi Shirazi, M.A., Goldoust, A., Khatami, M., Abedi, E., and Janfeshan, M.H., Modeling and simulation of a solar tracker with bifacial panel: A case study of Tehran city. Journal of Sustainable Energy Systems, 2024. 3(3): p. 271–287.
19. Ding, G.K.C., Life cycle assessment (LCA) of sustainable building materials: An overview. Eco-efficient construction and building materials, 2014: p. 38–62.
20. Zahedi, R., Shoaei, M., and Aslani, A., Life cycle assessment and comparison of the conventional and third generation of photovoltaic panels. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2025. 47(2): p. 1–11
21. Zahedi, R., et al., Optimization of solar heating system for heating urban spaces and domestic water heating. Urban Development Policymaking, 2025. 1(1): p. 1–17.
22. Pajchrowski, G., et al., Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings. Construction and Building Materials, 2014. 52: p. 428–436.

23. Page, M.J., et al., Updating guidance for reporting systematic reviews: Development of the PRISMA 2020 statement. Journal of Clinical Epidemiology, 2021. 134: p. 103–112.
24. Govindan, K., et al., Accelerating the transition towards sustainability dynamics into supply chain relationship management and governance structures. Journal of Cleaner Production, 2016. 112: p. 1813–1823.
25. Qaidi, S.M.A., et al., Engineering properties of sustainable green concrete incorporating eco-friendly aggregate of crumb rubber: A review. Journal of Cleaner Production, 2021. 324: p. 129251.
26. Coffetti, D., et al., Pathways towards sustainable concrete. Cement and Concrete Research, 2022. 154: p. 106718.
27. Wicke, D., et al., Emissions from building materials—a threat to the environment?. Water, 2022. 14(3): p. 303.
28. Christensen, T.H., et al., Application of LCA modelling in integrated waste management. Waste Management, 2020. 118: p. 313–322.
29. Cherubini, F., Bargigli, S., and Ulgiati, S., Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. Energy, 2009. 34(12): p. 2116–2123.
30. Stewart, I.D., A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. International Journal of Climatology, 2011. 31(2): p. 200–217.
31. Kim, H.H., Urban heat island. International Journal of Remote Sensing, 1992. 13(12): p. 2319–2336.
32. Yadav, N., et al., Systematic exploration of heat wave impact on mortality and urban heat island: A review from 2000 to 2022. Urban Climate, 2023. 51: p. 101622.
33. Susca, T., and Pomponi, F., Heat island effects in urban life cycle assessment: Novel insights to include the effects of the urban heat island and UHI-mitigation measures in LCA for effective policy making. Journal of Industrial Ecology, 2020. 24(2): p. 410–423.
34. Sen, S., and Roesler, J., Contextual heat island assessment for pavement preservation. International Journal of Pavement Engineering, 2018. 19(10): p. 865–873.
35. Govindan, K., Kannan, D., and Shankar, M., Evaluation of green manufacturing practices using a hybrid MCDM model combining DANP with PROMETHEE. International Journal of Production Research, 2015. 53(21): p. 6344–6371.
36. Rostami, Z., Nezhad, J., and Mansouri, M., Coordination of technique, materials, and environment and its application in the beauty and performance of traditional buildings in the desert cities of Iran. Studies in Islamic Art, 2019. 15(34): p. 215–239.
37. Jafari Fesharaki, M., Mahmoudi Farahani, Y., and Podineh, A.H., Green materials: A successful platform in sustainable architecture (Case study: Hearst Tower, New York). Scientific Journal of Civil Engineering and Architecture Research in Iran, 2019. 4(13): p. 49–55.
38. Eze, E.C., Ugulu, R.A., Onyeagam, O.P., and Adegboyega, A.A., Determinants of sustainable building materials (SBM) selection on construction projects. International Journal of Construction Supply Chain Management, 2021. 11(2): p. 166–194.
39. Akrami, G., and Alipour, L., The role of local materials in sustainable architecture from the environmental perspective of housing and rural environments. Journal of Journal Name, 2016. 35(156): p. 29–48.
40. Taleghani, A., and Kaboudar Ahangi, M., Investigating the role of recycling and the application of recycled materials in architecture as a novel method for environmentally harmonious design. Elite of Science and Engineering, 2017. 8(2): p. 135–145
41. Sastresa, E.L., Usón, A.A., Bribián, I.Z., and Scarpellini, S., Local impact of renewables on employment: Assessment methodology and case study. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. 14(2): p. 679–690.
42. Park, H.M., and Jo, H.K., Ecological design and construction strategies through life cycle assessment of carbon budget for urban parks in Korea. Forests, 2021. 12(10): p. 1399.
43. Petrovic, B., Myhren, J.A., Zhang, X., Wallhagen, M., and Eriksson, O., Life cycle assessment of building materials for a single-family house in Sweden. Energy Procedia, 2019. 158: p. 3547–3552.

44. Alchapar, N.L., Correa, E.N., and Cantón, M.A., Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones. Energy and Buildings, 2014. 69: p. 22–32.
45. Santamouris, M., and Yun, G.Y., Recent development and research priorities on cool and super cool materials to mitigate urban heat island. Renewable Energy, 2020. 161: p. 792–807.
46. Haji Fathali, M., Feyzi, M., and Dehghan, A., The relationship between air heat, mean radiant heat, and albedo in reducing heat islands in cities. Geography, 2021. 19(71): p. 173–190.
47. Susca, T., and Pomponi, F., Heat island effects in urban life cycle assessment: Novel insights to include the effects of the urban heat island and UHI-mitigation measures in LCA for effective policy making. Journal of Industrial Ecology, 2020. 24(2): p. 410–423.
48. Sen, S., Li, H., and Khazanovich, L., Effect of climate change and urban heat islands on the deterioration of concrete roads. Results in Engineering, 2022. 16: p. 100736

Urban Development Policy Making

Vol. 2, No. 1, Spring 2025

## Contents


- **Identifying and Ranking the Effective Components in City Branding Emphasizing on the Economic (Case study: Tajrish Neighborhood of Tehran).....1**

Hossein Yousefi, Niloufar Zakhimi, Seyedeh Mahsa Mousavi Reineh, Mahmood Abdoos, Marziyeh Razeghi

- **Optimization of Urban Metro Scheduling for Reducing Travel Time and Enhancing Transportation System Efficiency .....17**

Mohammad Mahdi Mobaraki, Ali Roghani Araghi, Younes Noorollahi

- **Assessing the role of electricity infrastructure and regulatory frameworks in the development of electric public transportation: Comparative analysis and policy recommendations .....31**

Moein Moeini-Aghtaie, Hassan Bazoubandi, Ali Pasban

- **Assessment and Feasibility of Waste-to-Energy Conversion in Developing Country Metropolises (Case Study: Iran) .....49**

Helia Sadat Hosseini Shekarabi, Shahla Razaghi, Mahmood Abdoos

- **Artificial Intelligence and Its Applications in Urban Management .....73**

Hadi Veisi, Seyed Ebrahim Barahang

- **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 .....95**

Morteza Moaven, Mohammadali Allahrabbi Shirazi, Mohammad Hasan Ghodusinejad

Journal of **Urban Development Policy Making**

**Spring 2025, Vol. 2, No. 1, Serial No. 2**

**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**
Shahedeh Mohammad Alikhani

**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*

## 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-Aghtaie**
*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*

موسسه آموزش عالی علمی-کاربردی شهرداری تهران

Journal

02

# Urban Development Policy Making

Spring 2025. Vol 02. Issue 01. Serial No. 02

**Identifying and Ranking the Effective Components in City Branding Emphasizing on the Economic (Case study: Tajrish Neighborhood of Tehran)**
Hossein Yousefi, Niloufar Zakhimi, Seyedeh Mahsa Mousavi Reineh, Mahmood Abdoos, Marziyeh Razeghi

**Optimization of Urban Metro Scheduling for Reducing Travel Time and Enhancing Transportation System Efficiency**
Mohammad Mahdi Mobaraki, Ali Roghani Araghi, Younes Noorollahi

**Assessing the role of electricity infrastructure and regulatory frameworks in the development of electric public transportation: Comparative analysis and policy recommendations**
Moein Moeini-Aghtaie, Hassan Bazoubandi, Ali Pasban

**Assessment and Feasibility of Waste-to-Energy Conversion in Developing Country Metropolises (Case Study: Iran)**
Helia Sadat Hosseini Shekarabi, Shahla Razaghi, Mahmood Abdoos

**Artificial Intelligence and Its Applications in Urban Management**
Hadi Veisi, Seyed Ebrahim Barahang

**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**
Morteza Moaven, Mohammadali Allahrabbi Shirazi, Mohammad Hasan Ghodusinejad