ASPI | Afarand Scholarly Publishing Institute; Turkey
ISSN: 2538-4384; Geographical Researches. 2025;40(2):151-160 10.58209/geores.40.2.151

# Redefining the Design Process of Urban Subsurface Spaces in Iran Based on International Studies

## ARTICLE INFO

***Article Type***
Systematic Review

***Authors***
Houshmand M.[1] *MA*
Zarabadi Z.S.S.[2]* *PhD*
Majdi H.[2] *PhD*
Noori S.A.[3] *PhD*

**How to cite this article**
Houshmand M, Zarabadi ZSS, Majdi H, Noori SA. Redefining the Design Process of Urban Subsurface Spaces in Iran Based on International Studies. Geographical Researches. 2025;40(2):151-160.

[1]Department of Urban Development, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[2]Department of Urban Development, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[3]Department of Architecture, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

***Correspondence**
*Address*: Islamic Azad University, Science and Research Center, Shahid Hesarak Boulevard, University Square, End of Shahid Sattari Highway, Tehran, Iran. Postal Code: 1477893855
*Phone*: +98 (21) 44865179
z.zarabadi@iau.ac.ir

***Article History***
Received: March 5, 2024
Accepted: May 11, 2025
ePublished: May 20, 2025

## ABSTRACT

**Aims** A comparative analysis of international experiences in subsurface development can help identify the key factors contributing to the success or failure of underground urban projects. The present study aims to conduct a comparative analysis of global experiences and propose a conceptual model for urban subsurface development.

**Methodology** This qualitative research was conducted in 2024 using a systematic review approach and content analysis. Out of 609 articles identified from reputable databases, 26 articles were selected for final analysis after applying inclusion and exclusion criteria. The data were analyzed using the SWOT method, examining strengths, weaknesses, opportunities, and threats, and were used to formulate strategies for subsurface urban development.

**Findings** This study examined subsurface development experiences in 10 cities across 8 countries: Canada, Singapore, Finland, France, Australia, Russia, the United States, and Spain. These cities have adopted diverse approaches to address urban challenges through the utilization of underground spaces. The main opportunities identified include reduction in traffic and pollution, improved quality of urban life, enhanced public transportation, commercial development, and increased tourism. Most projects were implemented with gradual, technology-driven, and multifunctional approaches. Conversely, key challenges included institutional coordination, spatial limitations, geological issues, high costs, and ownership complexities. Ultimately, a conceptual model based on five main components was developed to localize and implement similar projects in other cities.

**Conclusion** The comparative analysis reveals that countries adopting data-driven strategies, continuous feedback mechanisms, and participatory policymaking have achieved greater success in sustainable subsurface development.

**Keywords** Subsurface Development; Urban Development; Comparative Analysis; International Experiences; SWOT Approach

## CITATION LINKS

[Admiraal & Cornaro, 2016] Why underground space should be included ...; [Bélanger, 2007] Underground landscape: The urbanism and infrastructure ...; [Beneventi, 2012] Montreal ...; [Besner, 2016] Underground space needs an interdisciplinary ...; [Bobylev & Sterling, 2016] Urban underground space: A growing imperative ...; [Canadian Infrastructure Report, 2019] Monitoring the State of Canada's core ...; [Chow, 2023] Planning the future of the underground ...; [Cui *et al.*, 2021] Underground space utilisation for urban ...; [Das *et al.*, 2021] Framework for comparative evaluation of car-sharing alternatives for urban and suburban regions: Case ...; [Demers, 2016] Over & underground spaces & networks ...; [Fesselmeyer & Liu, 2018] How much do users value a network expansion? ...; [Guohua & Zhili, 2022] Connotation, path and suggestion of integrated development of urban ...; [Kishii, 2015] Utilization of underground space ...; [Lee & Zho, 2018] Status and issues for underground space ...; [Li *et al.*, 2023] Comprehensive evaluation of the underground ...; [Nishi *et al.*, 2010] Estimation of the value of the internal and external environment in ...; [Raposo & Carlos, 2021] The implementation of network governance for ...; [Richter *et al.*, 2024] Trees in sponge cities-a systematic review of trees as a component of blue-green infrastructure, vegetation ...; [Ronka *et al.*, 1998] Underground space in land-use ...; [Shirlaw *et al.*, 2001] Underground space for sustainable urban ...; [Sterling *et al.*, 2012] Sustainability issues for underground space ...; [Sterling & Carmody, 1993] Underground space design: Part 1: Overview of ...; [Vähäaho, 2016] An introduction to the development for urban ...; [Von Der Tann *et al.*, 2018] The hidden role of the subsurface for ...; [Von Winterfeldt *et al.*, 2010] Estimating behavioral changes for transportation modes ...; [Wang *et al.*, 2023] Low-carbon development strategy of urban ...; [Wang *et al.*, 2025] Role of urban underground-space development in ...; [Xiaobo *et al.*, 2023] Geological suitability evaluation of underground space ...; [Xu *et al.*, 2023] A Bayesian network model for suitability evaluation ...; [Zhang *et al.*, 2025] Evaluation of the suitability of urban underground ...; [Zhou & Zhao, 2016] Assessment and planning of underground space ...; [Zongchao *et al.*, 2019] Simulating pedestrians' spatio-temporal distribution in underground ...;

*Copyright© 2025, the Authors | Publishing Rights, ASPI. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.*

# بازتعریف فرآیند طراحی فضاهای زیرسطحی شهری در ایران بر اساس مطالعات بین‌المللی

**مرجانه هوشمند MA**
گروه شهرسازی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
**زهراسادات سعیده زرآبادی* PhD**
گروه شهرسازی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
**حمید ماجدی PhD**
گروه شهرسازی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
**سیدعلی نوری PhD**
گروه معماری، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

## چکیده
**اهداف:** تحلیل تطبیقی تجارب بین‌المللی در زمینه توسعه زیرسطحی می‌تواند به شناسایی عوامل کلیدی موفقیت و شکست طرح‌های زیرسطحی کمک کند. هدف پژوهش حاضر تحلیل تطبیقی تجارب بین‌المللی و ارایه مدل مفهومی توسعه زیرسطحی شهری بود.
**روش‌شناسی:** این پژوهش کیفی در سال ۱۴۰۳ با رویکرد مرور سیستماتیک و تحلیل محتوا انجام شد. از میان ۶۰۹ مقاله شناسایی‌شده در پایگاه‌های معتبر، پس از غربالگری و اعمال معیارهای ورود، ۲۶ مقاله برای تحلیل نهایی انتخاب شد. داده‌ها با روش SWOT در چهار بخش قوت‌ها، ضعف‌ها، فرصت‌ها و تهدیدها تحلیل و برای تدوین استراتژی‌های توسعه زیرسطحی استفاده شدند.
**یافته‌ها:** در این مطالعه، تجارب توسعه زیرسطحی در ۱۰ شهر از ۸ کشور کانادا، سنگاپور، فنلاند، فرانسه، استرالیا، روسیه، آمریکا و اسپانیا بررسی شد. این شهرها از رویکردهای متنوعی برای حل چالش‌های شهری با استفاده از فضاهای زیرسطحی بهره گرفته‌اند. فرصت‌های اصلی شامل کاهش ترافیک و آلودگی، بهبود کیفیت زندگی، تقویت حمل و نقل عمومی، توسعه تجاری و جذب گردشگر بوده و اغلب طرح‌ها با رویکرد تدریجی، فنّاوری‌محور و چندمنظوره اجرا شدند. در مقابل، چالش‌های مهم شامل هماهنگی نهادی، محدودیت فضا، مسایل زمین‌شناسی، هزینه‌های بالا و پیچیدگی مالکیت بودند. در پایان، یک مدل مفهومی در پنج محور اصلی برای بومی‌سازی و اجرای طرح‌های مشابه در سایر شهرها ارایه شد.
**نتیجه‌گیری:** کشورهایی که از رویکردهای داده‌محور، نظام‌های بازخورد مستمر و سیاست‌گذاری مشارکتی بهره برده‌اند، موفقیت چشمگیرتری در توسعه پایدار زیرسطحی دارند.

**کلیدواژگان:** توسعه زیرسطحی، توسعه شهری، تحلیل تطبیقی، تجارب بین‌المللی، رویکرد SWOT

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱
*نویسنده مسئول: z.zarabadi@iau.ac.ir

## مقدمه
با افزایش مداوم سطح شهرنشینی و رشد بی‌وقفه جمعیت، منابع اراضی شهری به طور فزاینده‌ای محدودتر می‌شوند که این امر باعث بروز مشکلات مختلفی چون ترافیک، آلودگی محیط زیست، کمبود منابع طبیعی و سایر مشکلات جدی موسوم به "بیماری‌های شهری" می‌شود. این چالش‌ها نه‌تنها کیفیت زندگی شهری را کاهش می‌دهند، بلکه به‌شدت روند توسعه پایدار و برنامه‌ریزی شهری را تحت فشار قرار می‌دهند و فرآیندهای مدیریتی و ساختاری شهرها را با موانع جدی مواجه می‌سازند [Zhang *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2025]. با توجه به محدودیت‌های روزافزون زمین و ظرفیت‌های موجود برای توسعه فیزیکی، توسعه بی‌وقفه و بدون توجه به ظرفیت‌های جغرافیایی افقی نمی‌تواند به طور موثر مشکلات ساختاری و زیست‌محیطی ناشی از "بیماری شهری" را کاهش دهد؛ بنابراین، برای تحقق توسعه پایدار و کاهش فشارها بر زمین‌های شهری، ساخت‌وسازهای شهری باید از گسترش افقی به توسعه سه‌بُعدی تغییر یابد. این توسعه سه‌بعدی شامل ترکیب هوشمندانه ساختمان‌های سطحی و زیرزمینی است و در پی آن، ایجاد یک ساختار شهری ارگانیک، هماهنگ و یکپارچه که به بهره‌برداری بهینه از زمین‌های شهری منجر می‌شود، ضروری است [Wang *et al.*, 2023]. توسعه فضای زیرزمینی شهری به عنوان یک راهکار کارآمد و پایدار برای تقویت ظرفیت جامع تحمل شهر و دستیابی به توسعه پایدار و سالم، به اجماع گسترده‌ای در بین متخصصان و نهادهای مرتبط تبدیل شده است [Sterling *et al.*, 2012; Guohua & Zhili, 2022].

فضای زیرزمینی مدلی ایده‌آل از محیطی کاملاً تکنولوژیکی است. نبود اثری از طبیعت یکی از عناصر اصلی فضای زیرزمینی است [Ronka *et al.*, 1998]. یک فضای زیرزمینی از دیده‌ها پنهان است و توانایی پنهان‌کردن پدیده‌ها را دارد. همیشه بخشی از فضای زیرزمینی برای افراد قابل مشاهده و دسترسی بوده است. فضای زیرزمینی اغلب فضایی نامطلوب تصور می‌شود، حتی هنگامی که مشکلات اساسی در آن وجود ندارد [Sterling & Carmody, 1993]. نقش فضای زیرزمینی به عنوان سرپناه، یادآور ذهنیات مثبتی همچون ایمنی، امنیت و حفاظت است [Bobylev & Sterling, 2016]. هرچند فضای زیرزمینی تحت تاثیر ذهنیت منفی قرار دارد، اما در مواردی با فضای روی سطح زمین قابل مقایسه است: نیاز این‌گونه فضاها به انرژی بیشتر برای نورپردازی نیاز دارند و هزینه ساخت بالایی دارند. به علاوه درک منفی که در ارتباط با فضاهای زیرزمینی وجود دارد، ارتباط نامشخص میان فضاهای زیرزمینی، دشواری جهت‌یابی در زیر زمین، سختی ارتباط فضاهای زیرزمینی با یکدیگر و ارتباط آنها با روی سطح زمین و در نهایت پتانسیل آب سفره‌های زیرزمینی از دیگر مشکلات مربوط به این فضاهاست. همچنین فضاهای زیرزمینی می‌تواند به عنوان یک راه حل پایدار برای تاسیسات و زیرساخت شهری در نظر گرفته شود [Zongchao *et al.*, 2019].

فضاهای زیرزمینی دارای پتانسیل فراوانی برای آینده‌اند [Kishii, 2015]. طراحان شبکه‌های فضایی زیرزمینی را که ایده‌هایی خیال‌پردازانه هستند، برای مقابله همه‌جانبه با مشکلات ناشی از تراکم و مشکلات زیست‌محیطی در شهرهای بزرگ پیشنهاد کرده‌اند [Sterling *et al.*, 2012]. فضای زیرزمینی طی هزاران سال برای اهداف استراتژیک و نظامی و همچنین برای ساختمان‌های مذهبی، آب و فاضلاب و انتقال آن و مسکن استفاده می‌شده است. کمی

بعد این‌گونه فضاها به دلایل حمل و نقلی و به طور خاص حمل و نقل ریلی (مترو) با صدها تونل ساخته شده‌اند [Kishii, 2015]. برخی از کیفیت‌ها مانند نور برای فضاهای زیرزمینی برخلاف فضاهای روی سطح زمین فراهم نیست. بنابراین طبیعی است که کلمه کیفیت برای فضاهای زیرزمینی نسبتاً محسوس شده است [Besner, 2016].

فضای زیرزمینی می‌تواند به عنوان فضای محافظ، امن ، پایدار و مناسب برای نمایشگاه‌ها و حفظ آثار تاریخی مورد استفاده قرار گیرد. در مقایسه با فضای روی سطح، زمین‌های زیرزمینی کاملاً محصور است و یا با خاک پوشیده شده است. به همین دلیل شاید تا حدودی برنامه‌ریزی و طراحی فضاهای روی سطح زمین به صورت دوبُعدی امکان‌پذیر باشد، اما برنامه‌ریزی و طراحی فضاهای زیرزمینی و توسعه آنها به طور حتم نیازمند آگاهی و دانش سه‌بُعدی است. فضای زیرزمینی در برابر سایر سوانح طبیعی بهتر حفظ می‌شوند. این‌گونه فضاها نسبت به فضاهای روی سطح زمین در برابر اثرات مخرب زلزله‌ها بسیار کمتر آسیب‌پذیر هستند. یک فضای زیرزمینی بزرگ در برابر زلزله یک یا دو درجه مناسب‌تر از فضای روی زمینی مشابه است. جدا از موضوع زمین، سازه‌های زیرزمینی قدرت ضد حریق فراوانی دارند.

فواید مکانیابی برخی از آثار ارزشمند زیر زمین این است که بسیاری از قسمت‌های آن در دیدرس فضاهای روی زمین نیست [Nishi *et al.*, 2010]. این دست از فضاها دارای محدودیت ورودی‌ها و خروجی‌ها و رویت و بررسی آثار هستن و بنابراین می‌توانند ضد سرقت باشند. به طور کلی این‌گونه بیان می‌شود که استفاده فضای زیرزمینی همچون سیستم مترو، حمل و نقل زیرزمینی جاده‌های تونلی شهری، فضای پارکینگ و غیره به حل بخشی از مشکلات شهری کمک کرده است [Kishii, 2015].

منابع فضای زیرزمینی شهری جزو منابع غیرقابل تجدید هستند و فرآیند توسعه آنها عموماً با ویژگی‌های غیرقابل بازگشت همراه است. در این زمینه، توسعه کورکورانه و بی‌هدف این منابع نه‌تنها منجر به استفاده ناکارآمد از آنها می‌شود، بلکه در طول فرآیندهای مختلف ساخت‌وساز و اجرای طرح‌ها زیرزمینی، می‌تواند خطرات جدی ایمنی و آسیب به زیرساخت‌های موجود را به دنبال داشته باشد. این خطرات می‌تواند بر امنیت جانی شهروندان و همچنین کیفیت ساخت‌وساز تاثیر منفی بگذارد [Admiraal & Cornaro, 2016]. به همین دلیل، ارزیابی دقیق و علمی توسعه فضای زیرزمینی شهری نه‌تنها برای بهره‌برداری بهینه از این منابع، بلکه برای اطمینان از ایمنی و پایداری ساختارهای شهری، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بدون یک ارزیابی همه‌جانبه و علمی از وضعیت زیرزمینی، توسعه شهری می‌تواند به یک معضل زیست‌محیطی و اجتماعی تبدیل شود که نه‌تنها به کاهش کیفیت زندگی منجر می‌شود، بلکه برای آینده پایدار شهرها تهدیداتی جدی ایجاد می‌کند [Xu *et al.*, 2023; Xiaobo *et al.*, 2023].

در این راستا، نیاز به رویکردی جامع و هماهنگ برای مدیریت و توسعه فضای زیرزمینی به‌شدت احساس می‌شود که در آن همراستایی بین مسایل مهندسی، زیست‌محیطی و اجتماعی لحاظ گردد. این رویکرد باید از یک سیستم ارزیابی جامع، علمی و چندجانبه برای بررسی شرایط و ویژگی‌های مختلف زیرسطحی بهره گیرد که نه‌تنها به تحلیل وضعیت فعلی فضای زیرزمینی، بلکه به شبیه‌سازی و پیش‌بینی آثار احتمالی تغییرات در این فضا نیز پرداخته شود. در این صورت می‌توان از ظرفیت‌های فضای زیرزمینی به طور موثر و پایدار استفاده کرد و زمینه‌های توسعه اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را به طور همزمان فراهم ساخت [Li *et al.*, 2023].

این رویکرد باید امکان بهره‌برداری از ظرفیت‌های زیرسطحی را به گونه‌ای فراهم کند که همگام با ملاحظات زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی و حقوقی باشد. از این منظر، پایداری توسعه زیرسطحی نه‌تنها به عوامل فنّی و مهندسی وابسته است، بلکه نیازمند درک عمیق از سازوکارهای حاکم بر مدیریت شهری و برنامه‌ریزی است. در این میان، بررسی وضعیت زمین‌شناختی و مخاطرات مرتبط با توسعه زیرزمینی از یک سو و تحلیل کارکردهای اقتصادی، از جمله هزینه‌های اجرا و تاثیرات آن بر ارزش زمین، از سوی دیگر، از جمله مولفه‌های کلیدی در ساخت این مدل به شمار می‌رود.

همچنین، الزامات حقوقی و سیاست‌گذاری‌های مرتبط با مالکیت، بهره‌برداری و نظارت بر فضاهای زیرسطحی از چالش‌های اساسی در این زمینه است که می‌تواند بر شیوه‌های برنامه‌ریزی و اجرای این نوع طرح‌ها تاثیرگذار باشد. علاوه بر این، بُعد زیست‌محیطی در توسعه زیرسطحی، از نظر تاثیر بر منابع طبیعی، کیفیت هوا و مدیریت انرژی اهمیت ویژه‌ای دارد و باید به عنوان یکی از شاخص‌های اصلی در مدل‌سازی توسعه پایدار این فضاها مد نظر قرار گیرد. از سوی دیگر، پذیرش اجتماعی و سازگاری توسعه زیرسطحی با الگوهای زندگی شهری، در کنار کاربری‌های چندمنظوره‌ای که می‌تواند این فضاها را به بخشی از زیست شهری تبدیل کند، در موفقیت طرح‌های توسعه زیرسطحی نقش کلیدی دارد. در این راستا، یکپارچه‌سازی این عوامل در یک مدل مفهومی نیازمند نگرشی جامع است که بتواند میان الزامات فنّی، اقتصادی و اجتماعی پیوندی منطقی برقرار کرده و توسعه زیرسطحی را نه صرفاً به عنوان یک پاسخ به محدودیت‌های فیزیکی شهر، بلکه به عنوان محرکی برای ارتقای کیفیت زندگی شهری تبیین کند [Cui *et al.*, 2021].

در این راستا، تحلیل تطبیقی تجارب بین‌المللی می‌تواند به شناسایی عوامل کلیدی موفقیت و شکست طرح‌های زیرسطحی کمک کند و با استفاده از رویکرد SWOT، نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدهای این تجارب به صورت نظام‌مند ارزیابی می‌شود. این تحلیل بستری فراهم می‌کند تا از دستاوردها و اشتباهات دیگر کشورها درس گرفته شود و الگوی مناسبی متناسب با شرایط بومی طراحی گردد.

در نهایت، این پژوهش با ارایه یک مدل مفهومی، به مدیران شهری، برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا با دیدی جامع‌تر و

استراتژیک، طرح‌های توسعه زیرسطحی را با کمترین ریسک و بیشترین کارآیی به اجرا درآورند. اهمیت این مدل در آن است که ضمن استفاده از تجارب موفق جهانی، با شرایط فرهنگی، اقتصادی و کالبدی شهرهای ایرانی نیز همخوانی دارد و می‌تواند به تحقق توسعه پایدار شهری کمک کند. بدین ترتیب، هدف مطالعه حاضر تحلیل تطبیقی تجارب بین‌المللی و ارایه مدل مفهومی توسعه زیرسطحی شهری بوده است.

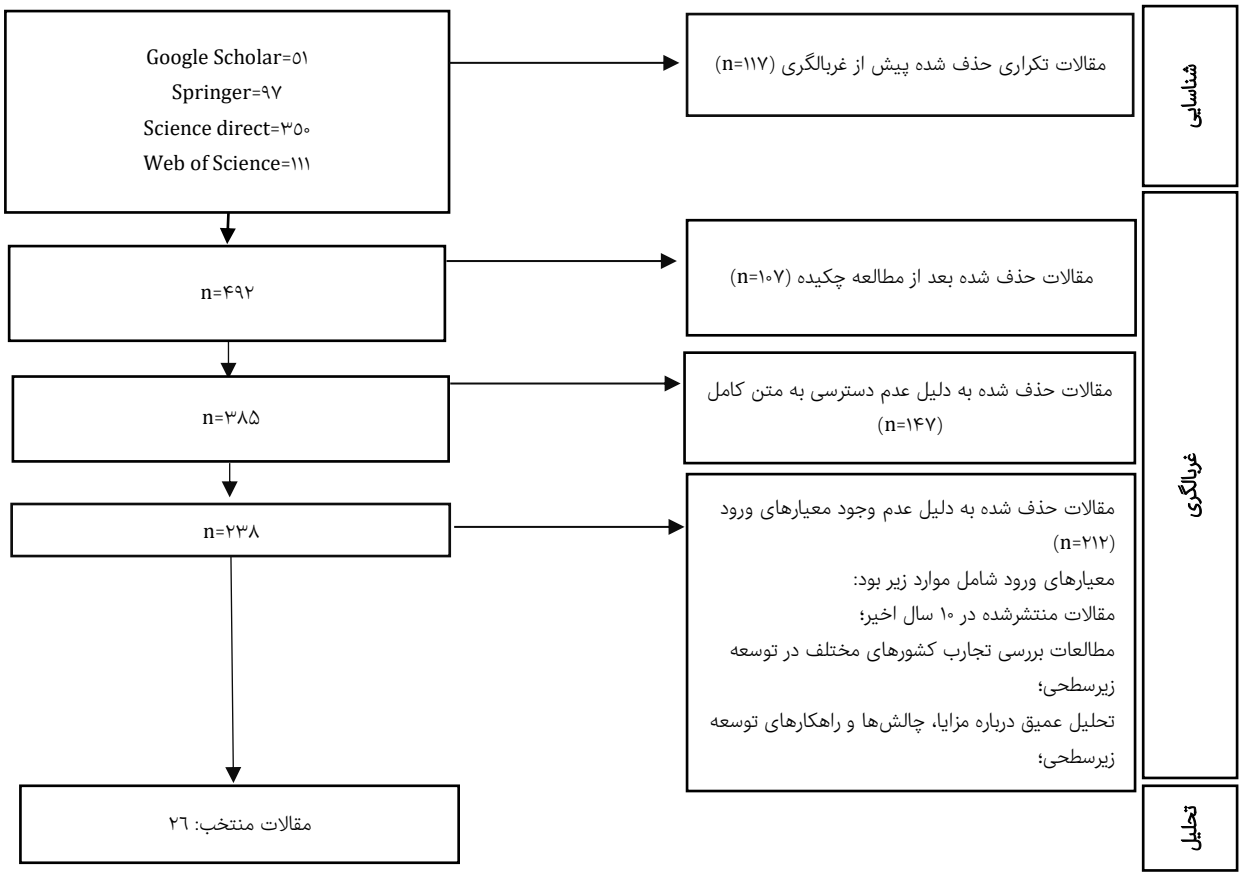
## روش‌شناسی

این پژوهش کیفی با رویکرد مرور سیستماتیک و تحلیل محتوا در سال ۱۴۰۳ به انجام رسید. فرآیند پژوهش در چندین مرحله انجام شد که شامل جست‌وجوی اولیه، غربالگری، ارزیابی نهایی و تحلیل داده‌ها بود.

ابتدا جست‌وجوی جامعی در پایگاه‌های داده معتبر علمی از جمله Web of Science، ScienceDirect، Springer و Google Scholar انجام شد. کلیدواژه‌های جست‌وجو شامل "Underground Development"، "Subsurface Urban Planning"، "Benefits of Underground Construction"، "Challenges of Subsurface Development"، "Urban Infrastructure" و ترکیب‌های مختلف این عبارات بودند. در مرحله نخست، ۶۰۹ مقاله مرتبط براساس عنوان و چکیده استخراج شدند. در مرحله غربالگری، مقالات تکراری حذف شده و سپس مقالاتی که دسترسی کامل به متن آنها امکان‌پذیر نبود حذف شدند (n=۱۴۷). سپس مقالات براساس معیارهای ورود بررسی شدند.

پس از حذف مقالات تکراری و فاقد دسترسی به متن کامل، ۲۳۸ مقاله باقی ماندند. از میان ۲۳۸ مقاله باقی‌مانده، ۲۱۲ مقاله به دلیل عدم وجود معیارهای ورود حذف شدند. در نهایت، ۲۶ مقاله واجد شرایط برای تحلیل نهایی شدند.

در این پژوهش از روش SWOT برای تحلیل یافته‌ها استفاده شد. بر این اساس، اطلاعات در چهار بخش قوت‌ها، ضعف‌ها، فرصت‌ها و تهدیدها دسته‌بندی شد. از این تحلیل برای تدوین استراتژی‌های مناسب استفاده شد (شکل ۱).




## یافته‌ها

تجربیات توسعه فضاهای شهری زیرسطحی ده شهر از کشورهای کانادا، سنگاپور، فنلاند، فرانسه، استرالیا، روسیه، آمریکا و اسپانا از مقالات منتخب مطالعه و تحلیل شد. ویژگی‌های کلیدی، اهداف، چالش‌ها، راه حل‌ها و دستاورهای توسعه زیرسطحی این شهرها نیز استخراج شد (جدول ۱).

پس از استخراج تجربیات کشورهای مختلف، با استفاده از روش swot به تحلیل این تجربیات و استخراج نقاط مشترک ضعف، قوت، فرصت‌ها و تهدیدها پرداخته شد.

نقاط قوت تجربیات کشورهای مختلف به شرح زیر بود:

۱) اتصال گسترده به شبکه‌های حمل و نقل عمومی:

- در مونترال، تورنتو، سنگاپور و مسکو، اتصال به مترو و ایستگاه‌های

قطار زیرسطحی باعث تسهیل دسترسی به مراکز تجاری و اداری شد.
- در تورنتو، با اتصال به بیش از ۱۲۰۰ مغازه و ۵ ایستگاه مترو، یک مرکز تجاری و اداری یکپارچه ایجاد شد.
- در سنگاپور، شبکه‌های زیرسطحی گسترده موجب کاهش ترافیک سطحی و بهبود دسترسی به مراکز تجاری و اداری شد.

۲) کاهش ترافیک و آلودگی سطحی:
- مونترال با توسعه یک مجموعه زیرسطحی گسترده، ترافیک سطحی را کاهش داد و در شرایط زمستانی از سرمای زیاد جلوگیری کرد.
- مادرید با انتقال بزرگراه به زیر زمین و احیای فضای سبز، آلودگی صوتی را کاهش داد.

**جدول ۱)** مشخصات تجربه توسعه شهری زیرسطحی در کشورهای مختلف

| شهر/کشور | ویژگی‌های کلیدی | اهداف اصلی | چالش‌ها | راه حل‌ها | نتایج و دستاوردها |
|---|---|---|---|---|---|
| **مونترال، کانادا** **[Beneventi (2012); Demers (2016); Canadian Infrastructure Report (2019); Bobylev & Sterling (2016); Zongchao Gu *et al.* (2019)]** | بزرگ‌ترین مجموعه زیرسطحی جهان با ۱۲ کیلومتر مربع مساحت، ۳۲ کیلومتر راهرو، اتصال ۶۰ مجموعه مسکونی و تجاری، ۷ خط مترو، ۲ ایستگاه قطار و پایانه اتوبوسرانی | کاهش ترافیک سطحی، محافظت از سرمای زمستان، ایجاد فضای تجاری و اداری یکپارچه | مدیریت پیچیدگی اتصال ساختمان‌ها زیرساخت‌ها | توسعه تدریجی و برنامه‌ریزی بلندمدت، استفاده از مترو به عنوان هسته مرکزی | اتصال ۸۰٪ فضای اداری و ۳۵٪ فضای تجاری مرکز شهر، جذب ۵۰۰ هزار کاربر روزانه |
| **تورنتو، کانادا** **[Bélanger (2007); Chow (2023); Canadian Infrastructure Report (2019); Zongchao Gu *et al.* (2019]** | مجموعه پث با ۱۷ کیلومتر تونل پیاده‌رو، ۳۷۱۶۰۰ متر مربع فضای تجاری، و اتصال ۱۲۰۰ مغازه و ۵ ایستگاه مترو | ایجاد شبکه پیاده‌روی زیرسطحی برای کاهش ترافیک و بهبود دسترسی | هماهنگی بین مالکین مختلف و مدیریت فضای زیرسطحی | توسعه تدریجی و اتصال ساختمان‌ها به مرور زمان | جذب ۱۰۰ هزار کاربر روزانه، ایجاد بزرگ‌ترین مرکز خرید زیرسطحی جهان |
| **ونکوور، کانادا** **[Canadian Infrastructure Report (2019); Sterling *et al.* (2012); Bobylev & Sterling (2016)]** | دو مرکز تجاری زیرسطحی (پسفیک و مونترال) با بیش از ۲۰۰ مغازه و اتصال به ایستگاه‌های مترو | بهبود دسترسی و رفاه شهری در شرایط آب و هوایی نامساعد | محدودیت فضای زیرسطحی و نیاز به هماهنگی با توسعه‌های آینده | برنامه‌ریزی برای اتصال به ایستگاه‌های جدید در آینده | ایجاد فضای تجاری یکپارچه و بهبود دسترسی به حمل و نقل عمومی |
| **هلسینکی، فنلاند** **[Vähäaho (2016), Raposo & Carlos (2021); Ronka, Ritola & Rauhala (2009); von der Tann *et al.* (2018)]** | بیش از ۲۰۰ کیلومتر تونل و ۴۰۰ طرح زیرسطحی، شامل فضاهای عمومی، پارکینگ، و تاسیسات شهری | مدیریت تراکم شهری و ایجاد فضاهای چندمنظوره زیرسطحی | هماهنگی بین طرح‌های مختلف و مدیریت منابع | ارایه طرح جامع توسعه زیرسطحی با رویکرد دانش‌بنیان | ایجاد شهر زیرسطحی یکپارچه و بهبود کیفیت زندگی شهری |
| **پاریس، فرانسه** **[Van der Tann *et al.*, (2018); Sterling *et al.* (2012); Sterling & Carmody (1993); Besner (2016)]** | مجموعه‌های زیرسطحی مانند فورم دزال و لوور، اتصال به مترو، و ایجاد فضاهای تجاری و فرهنگی | بهبود دسترسی به مراکز فرهنگی و تجاری، و کاهش ترافیک سطحی | حفظ معماری تاریخی و هماهنگی با بافت شهری | طراحی فضاهای زیرسطحی با الهام از معماری سطحی | افزایش جذب توریست و بهبود دسترسی به مراکز فرهنگی مانند موزه لوور |
| **سیدنی، استرالیا** **[Shirlaw, Zhao & Krishnan (2004); Sterling *et al.* (2012); Besner (2016)]** | مراکز خرید زیرسطحی پیرامون ایستگاه تاون هال، اتصال به شبکه حمل و نقل عمومی | بهبود دسترسی به مراکز تجاری و کاهش ترافیک | محدودیت‌های ناشی از ساختار تاریخی شهر | استفاده از فضاهای زیرسطحی برای توسعه تجاری | ایجاد مراکز خرید پررونق و بهبود دسترسی به حمل و نقل عمومی |
| **سنگاپور** **[Zhou & Zhao (2016); Lee & Zho (2018); Fesselmeyer & Liu (2018); Zongchao Gu *et al.* (2019), Chow (2023)]** | شبکه‌های زیرسطحی گسترده پیرامون ایستگاه‌های مترو مانند رافلز پلیس، اتصال به مراکز تجاری و اداری | ایجاد شبکه‌های زیرسطحی پیاده‌روی برای کاهش ترافیک و بهبود دسترسی | مدیریت پیچیدگی اتصال ساختمان‌ها زیرساخت‌ها | توسعه تدریجی و برنامه‌ریزی بلندمدت | بهبود دسترسی به مراکز تجاری و اداری، کاهش ترافیک سطحی |
| **مسکو، روسیه** **[Sterling *et al.* (2012); Bobylev & Sterling (2016); Besner (2016)]** | مجموعه تجاری چهار طبقه اخدنیارایادبا۲۹۰۰۰مترمربع فضای تجاری، اتصال به ایستگاه مترو | ایجاد فضای تجاری یکپارچه و بهبود دسترسی به حمل و نقل عمومی | چالش‌های فنی ناشی از شرایط خاک و ساختار شهری | استفاده از فنّاوری‌های پیشرفته مهندسی برای ساخت زیرساخت‌ها | ایجاد مرکز تجاری پررونق و بهبود دسترسی به مترو |
| **شیکاگو، آمریکا** **[Sterling & Carmody (1993); Sterling *et al.* (2012); Nishi *et al.* (2010)]** | مجموعه زیرسطحی شامل تونل‌ها، پل‌های هوایی، و اتصال به ایستگاه‌های مترو و مراکز تجاری | محافظت از کاربران برابر آب و هوای نامساعد و بهبود دسترسی | در عدم برنامه‌ریزی یکپارچه و توسعه نامنظم | توسعه مشترک توسط بخش‌های دولتی و خصوصی | ایجاد شبکه‌های زیرسطحی پرکاربرد، اگرچه فاقد یکپارچگی کامل |
| **مادرید، اسپانیا** **[von der Tann *et al.* (2018); Sterling *et al.* (2012); Raposo & Carlos (2021), Van Winterfeldt (2010)]** | انتقال ۵۶ کیلومتر بزرگراه به زیر زمین، احیای ۱ میلیون متر مربع فضای سبز | کاهش آلودگی صوتی و بهبود کیفیت زندگی شهری | چالش‌های فنی و مالی ناشی از انتقال بزرگراه | استفاده از فنّاوری‌های پیشرفته برای ساخت تونل‌ها | کاهش آلودگی صوتی، احیای فضای سبز، و بهبود کیفیت زندگی شهری |

۳) ایجاد فضاهای تجاری یکپارچه و بهره‌وری اقتصادی:
- در ونکوور و تورنتو، مجموعه‌های تجاری و اداری زیرسطحی موجب افزایش بهره‌وری اقتصادی و جلب کاربران روزانه شدند.
٤) ارتقای کیفیت زندگی شهری:
- طرح‌هایی مانند هلسینکی و مادرید فضاهای عمومی زیرسطحی با چندمنظوره‌بودن، به ارتقای کیفیت زندگی شهری کمک کردند.
۵) جذب توریست و گردشگری:
- پاریس با طراحی مجموعه‌های زیرسطحی برای دسترسی به موزه‌ها و مراکز فرهنگی، توانست تعداد بازدیدکنندگان را افزایش دهد.
نقاط ضف تجربیات کشورهای مورد مطالعه استخراج و به شرح زیر عنوان شد:
۱) پیچیدگی و چالش‌های هماهنگی بین بخش‌های مختلف:
- در سنگاپور، مسکو و تورنتو، هماهنگی بین مالکین مختلف، طراحان و مسئولان مختلف برای اتصال ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها مشکلاتی ایجاد کرد.
- در شیکاگو، فقدان برنامه‌ریزی یکپارچه باعث توسعه نامنظم شبکه‌های زیرسطحی شد.
۲) محدودیت فضای زیرسطحی:
- در ونکوور و سنگاپور، محدودیت در فضای زیرسطحی باعث شد که برخی طرح‌ها با مشکلات توسعه روبه‌رو شوند.
۳) چالش‌های فنّی و مالی:
- مادرید با چالش‌های فنی و هزینه‌بر ناشی از انتقال بزرگراه‌ها به زیرزمین مواجه شد.
- در مسکو، مشکلات فنّی و شرایط خاص خاک و ساختار شهری مانع از توسعه موفق طراحی فضاهای زیرسطحی شد.
٤) نیاز به هماهنگی با توسعه‌های آینده:
- در ونکوور و هلسینکی، نیاز به هماهنگی با توسعه‌های شهری آینده و اتصال به طرح‌های جدید یکی از نقاط ضعف محسوب می‌شود.
پس از بررسی نقاط ضعف و قوت تجربیات کشورهای مورد مطالعه در زمینه توسعه زیرسطحی به بررسی فرصت‌ها و تهدیدها پرداخته شد. فرصت‌های این تجربیات به شرح زیر بود:
۱) توسعه تدریجی و بهبود دسترسی:
- در طرح‌های مونترال، تورنتو و سنگاپور، توسعه تدریجی زیرساخت‌ها فرصت‌هایی برای بهبود دسترسی به مراکز تجاری و مسکونی ایجاد کرد.
۲) افزایش ظرفیت جذب کاربران و توریست‌ها:
- در پاریس، تورنتو و شیکاگو، با ایجاد فضاهای تجاری و فرهنگی زیرسطحی، ظرفیت جذب توریست و کاربران روزانه افزایش یافت.
۳) پتانسیل بهبود کیفیت زندگی شهری و فضاهای سبز:
- در مادرید و هلسینکی، امکان بهبود کیفیت زندگی شهری با استفاده از فضای زیرسطحی برای احیای فضای سبز و کاهش آلودگی‌ها ایجاد شد.
٤) پایداری و کاهش مصرف انرژی:
- طرح‌های توسعه زیرسطحی مانند هلسینکی و پاریس با طراحی فضاهای زیرسطحی برای کاهش مصرف انرژی و استفاده از سیستم‌های حمل و نقل پایدار، به تحقق اهداف پایداری شهری کمک کردند.
تهدیدهای تجربیات کشورهای مختلف در زمینه توسعه زیرسطحی با استفاده از تحلیل سوات در ٤ مورد خلاصه شد:
۱) مشکلات ساختاری و زمین‌شناسی:
- در طرح‌هایی مانند مسکو، مشکلات زمین‌شناسی و شرایط خاص خاک باعث بروز مشکلات فنّی و افزایش هزینه‌ها شد.
۲) عدم هماهنگی و هماهنگی نادرست بین بخش‌های مختلف:
- در شیکاگو و تورنتو، عدم هماهنگی بین بخش‌های مختلف شهری و فنّی می‌تواند توسعه فضاهای زیرسطحی را با مشکلات اجرایی مواجه کند.
۳) محدودیت منابع مالی و فنی:
- در طرح‌هایی مانند مادرید و مسکو، محدودیت‌های مالی و فنّی می‌تواند مانع از تکمیل فضاهای زیرسطحی و بهره‌برداری کامل از امکانات زیرسطحی شود.
٤) رقابت و توسعه‌های شهری دیگر:
- طرح‌های ونکوور و سیدنی ممکن است با توسعه‌های جدید دیگر در سطح شهر مواجه شوند که باعث کاهش تاثیرگذاری یا ظرفیت بهره‌برداری از زیرساخت‌های زیرسطحی شود.
پس از ارایه نقاط ضعف و قوت تجربیات توسعه زیرسطحی، براساس اشتراکات این تجربیات، فرآیند مفهومی مرحله‌ای طراحی فضاهای زیرسطحی شهری ارایه شد. این فرآیند از ۵ بخش پیش‌نیازهای طرح‌ریزی، عناصر اصلی، فرآیند اجرایی، ارزیابی و بازخورد و استراتژی‌های اجرایی تشکیل شده است.
الف- پیش‌نیازهای طرح‌ریزی و طراحی فضاهای زیرسطحی
- تحلیل محیطی و زمین‌شناسی: قبل از هر چیز، باید محیط زمین‌شناسی و زیرساخت‌های موجود شهر به دقت تحلیل شوند. این تحلیل باید شامل ارزیابی خاک، ساختارهای موجود و میزان مقاومت ساختاری باشد.
- شناسایی نیازهای جامعه و فضاهای تجاری: تحلیل دقیق نیازهای شهری و تجاری باید انجام شود تا فضایی طراحی شود که علاوه بر بهره‌برداری تجاری، نیازهای حمل و نقل و رفاه اجتماعی را نیز تامین کند.
- هماهنگی با برنامه‌ریزی شهری بلندمدت: برنامه‌ریزی برای اتصال به توسعه‌های آینده شهری و هماهنگی با طرح‌های آتی باید در مراحل اولیه مد نظر قرار گیرد.
ب- عناصر اصلی
- شبکه حمل و نقل زیرسطحی: طراحی سیستم‌های حمل و نقل زیرسطحی مانند مترو و تونل‌های پیاده‌روی برای کاهش ترافیک سطحی و تسهیل دسترسی به مراکز تجاری، مسکونی و فرهنگی.
- فضاهای تجاری و اداری یکپارچه: ایجاد فضای تجاری زیرسطحی یکپارچه که باعث افزایش بهره‌وری اقتصادی و جذب کاربران روزانه شود.

- پایداری محیطی و اجتماعی: درنظرگرفتن جنبه‌های محیط زیستی مانند کاهش آلودگی صوتی، حفظ فضاهای سبز و بهبود کیفیت هوای شهر.

- مدیریت فنی و منابع: طراحی سیستم‌های مدیریت طرح با توجه به محدودیت‌های مالی، فنّی و ساختاری، و استفاده از فنّاوری‌های پیشرفته برای مقابله با مشکلات ساختاری.

ج- فرآیند اجرایی

- توسعه تدریجی: توسعه فضاهای زیرسطحی باید به طور تدریجی و در مراحل مختلف توسعه یابند تا از هرگونه شکست‌های ناگهانی جلوگیری شود.

- ارتباط موثر بین بخش‌های مختلف: یکی از ارکان موفقیت این مدل، ارتباط مستمر و هماهنگ بین طراحان، سازندگان، مسئولان شهری و سایر ذی‌نفعان است.

- توسعه مبتنی بر نوآوری‌های تکنولوژیکی: استفاده از فنّاوری‌های جدید برای حل مشکلات فنی و ساختاری از جمله توسعه ابزارهای دیجیتال و مدل‌های شبیه‌سازی زیرساخت‌ها.

د- ارزیابی و بازخورد مستمر

- میزان موفقیت در جذب کاربران و توریست‌ها: ارزیابی تعداد کاربران روزانه و تاثیرات اقتصادی و فرهنگی طرح بر جامعه.

- اندازه‌گیری اثرات محیطی: ارزیابی تاثیرات زیست‌محیطی طرح‌ها بر کاهش آلودگی، بهبود فضای سبز و بهینه‌سازی مصرف انرژی.

- تحلیل بازخورد عمومی و اجتماعی: نظرسنجی و ارزیابی رضایت شهروندان و ذی‌نفعان از کیفیت زندگی و دسترسی به فضاهای عمومی و تجاری.

ه- راه حل‌ها و استراتژی‌های اجرایی

- توسعه تدریجی و مرحله‌ای: توسعه فضاهای زیرسطحی باید در مراحل مختلف انجام شود تا مشکلات ساختاری و اجرایی به‌مرور حل شوند.

- همکاری بخش‌های دولتی و خصوصی: در توسعه فضاهای زیرسطحی باید از مشارکت بین بخش‌های دولتی و خصوصی بهره‌مند شد تا منابع مالی و اجرایی به بهترین نحو استفاده شوند.

- استفاده از مدل‌های اقتصادی پایدار: ایجاد مدل‌های اقتصادی که به تداوم و بهره‌برداری بلندمدت طرح‌ها کمک کنند.

## بحث

هدف مطالعه حاضر تحلیل تطبیقی تجارب بین‌المللی و ارایه مدل مفهومی توسعه زیرسطحی شهری بود. یافته‌های حاصل از تحلیل تجربیات ده شهر پیشرو در توسعه زیرسطحی شهری، الگوهای مشترکی را نمایان می‌سازد که با مقایسه تطبیقی، می‌توان به درک عمیق‌تری از مولفه‌های موفقیت، چالش‌های رایج و چشم‌اندازهای توسعه چنین فضاهای زیرسطحی دست یافت. این تحلیل‌ها به طور کلی نشان داد که مدل‌های توسعه زیرسطحی در این شهرها اغلب شامل عناصر مشابهی هستند که به طور عمده بر زیرساخت‌های حمل و نقل عمومی زیرزمینی، هماهنگی نهادی، و تطبیق با شرایط جغرافیایی و زمین‌شناسی تاکید دارند. به عنوان مثال، در اکثر شهرهای بررسی‌شده از جمله مونترال [Demers, 2016; Bélanger, 2007; Chow, 2023]، تورنتو [Beneventi, 2012]، سنگاپور [Zhou & Zhao, 2016; Lee & Zho, 2018] و هلسینکی [Vähäaho, 2016]، ارتباط مستقیم و گسترده با شبکه‌های حمل و نقل عمومی زیرزمینی به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر موفقیت طراحی فضاهای زیرسطحی ذکر شده است. این ارتباط مستقیم با شبکه‌های حمل و نقل عمومی به‌ویژه به عنوان عاملی برای کاهش ازدحام ترافیکی و ارتقای دسترسی به خدمات شهری اهمیت دارد. این موضوع با یافته‌های مطالعات *داس* و همکاران [Das *et al.*, 2021] هم‌راستا است که تاکید دارند اتصال یکپارچه زیرساخت‌های حمل و نقل با فضاهای تجاری و خدماتی، نه‌تنها سبب افزایش بهره‌وری اقتصادی می‌شود، بلکه دسترسی شهروندان به خدمات شهری را نیز به طرز چشمگیری بهبود می‌بخشد و کیفیت زندگی را ارتقا می‌دهد.

از منظر بهبود کیفیت زندگی شهری، نتایج تجربی مادرید، هلسینکی و پاریس نشان می‌دهد که توسعه زیرسطحی می‌تواند با احیای فضاهای سبز، کاهش آلودگی صوتی و بهبود زیست‌پذیری محیط شهری همراه شود. توسعه چنین طرح‌هایی در این شهرها نشان‌دهنده تحول در فضای شهری و ایجاد محیط‌های زیست‌محیطی پایدار است. یافته‌ای که با نتایج تحقیقات *ریشتر* و همکاران [Richter *et al.*, 2024] و *وندرتن* و همکاران [Von Der Tann *et al.*, 2018] به عنوان زیرساخت‌های سبز زیرسطحی در شهرهای اروپایی مطابقت دارد. این نوع زیرساخت‌ها می‌توانند به بهبود شرایط زیست‌محیطی در شهرها کمک کرده و همچنین تاثیرات منفی تغییرات اقلیمی را کاهش دهند. در مقابل، چالش‌های متعددی نیز در مسیر توسعه این طرح‌ها وجود دارد؛ به‌ویژه پیچیدگی‌های فنّی و زمین‌شناسی در شهرهایی نظیر مسکو و مادرید که شرایط خاک و ساختار زمین آنها، نیازمند فنّاوری‌های پیشرفته و منابع مالی قابل توجه بوده است. این چالش‌ها به‌ویژه در مناطقی که زمین‌شناسی پیچیده‌ای دارند، نیازمند توجه ویژه به مطالعات دقیق و برنامه‌ریزی هوشمندانه است. این نکته با نتایج مطالعات *شرلاو* و همکاران [Shirlaw *et al.*, 2001] در زمینه آسیب‌پذیری ژئوتکنیکی فضاهای زیرسطحی در شهرهای روسیه نیز هماهنگ است.

مقایسه میان دو مدل توسعه زیرسطحی در شیکاگو و هلسینکی، شکاف آشکاری را در نحوه برنامه‌ریزی و یکپارچگی نشان داد. در حالی که شیکاگو از عدم هماهنگی نهادها و فقدان چشم‌انداز بلندمدت رنج می‌برد و بسیاری از طرح‌های توسعه فضاهای زیرسطحی با چالش‌هایی همچون ضعف در برنامه‌ریزی و انسجام میان بخش‌های مختلف روبه‌رو هستند، شهر هلسینکی با ارایه یک طرح جامع توسعه زیرسطحی مبتنی بر داده‌ها و پژوهش‌های محیطی، موفق به طراحی شبکه‌ای چندمنظوره شده است که از لحاظ کاربری، زیرساختی و زیست‌محیطی به طور همزمان توانسته

پاسخ‌گوی نیازهای مختلف شهری باشد. این تفاوت نشان می‌دهد که موفقیت طرح‌های زیرسطحی نه‌تنها در گرو منابع مالی یا توان فنّی، بلکه به طور جدی وابسته به هماهنگی نهادی، شفافیت تصمیم‌گیری و رویکرد برنامه‌ریزی یکپارچه است؛ موضوعی که در پژوهش *راپوسو* و *کارلوس* [Raposo & Carlos, 2021] نیز مطرح شده است. در واقع، این تجارب نشان داد که برنامه‌ریزی دقیق و همکاری میان نهادهای مختلف، از جمله دولت، بخش خصوصی و جوامع محلی، می‌تواند به طور چشمگیری بر موفقیت این طرح‌ها تاثیر بگذارد.

مدلی که در این مطالعه ارایه شد با ادغام یافته‌های تجربی و تحلیل SWOT، تلاش کرد تا یک چارچوب مفهومی واقع‌بینانه و کاربردی برای توسعه زیرسطحی شهری طراحی کند. این مدل نه‌تنها به دنبال حل مسایل موجود در توسعه زیرسطحی است بلکه با بهره‌گیری از تجربه‌های جهانی، یک رویکرد نوآورانه برای ایجاد زیرساخت‌های شهری پایدار ارایه می‌دهد. این چارچوب از پیش‌نیازهای زیربنایی چون تحلیل زمین‌شناسی و نیازسنجی اجتماعی آغاز شد و به طور پیوسته با تحلیل داده‌های محیطی و استفاده از فنّاوری‌های نوین در طراحی و اجرا، به بهبود مستمر طرح‌های زیرسطحی پرداخت. پس از این مرحله، با تعریف عناصر کلیدی مانند شبکه‌های حمل و نقل زیرسطحی و فضاهای تجاری یکپارچه، وارد فاز اجرایی توسعه تدریجی، ارزیابی مستمر و استراتژی‌های اجرای بلندمدت شد. این چارچوب به‌ویژه با توجه به تجربیات موفق در شهرهای پیشرو، مزیت‌هایی چون انعطاف‌پذیری در مواجهه با چالش‌های آینده، پاسخ‌گویی به نیازهای متغیر و متنوع شهری، و تلفیق پایداری محیطی و اقتصادی را دارا بود.

در واقع، تحلیل تطبیقی تجربیات ده شهر پیشرو در توسعه زیرسطحی نشان داد که موفقیت این طرح‌ها مستلزم توجه همزمان به پنج بُعد کلیدی است. این ابعاد شامل پیش‌نیازهای زیرساختی، یکپارچگی عملکردی، ارزیابی و بازبینی مستمر، مدیریت ریسک و ایجاد هماهنگی نهادی بودند. پیش‌نیازهای طرح‌ریزی در مونترال و هلسینکی ثابت کرده که تحلیل جامع زمین‌شناسی و نیازسنجی اجتماعی پایه‌ای اساسی برای توسعه پایدار است. به‌ویژه مطالعات میدانی در مونترال نشان داده که ارزیابی دقیق لایه‌های خاک و آب‌های زیرزمینی قبل از اجرا، هزینه‌های اجرایی را تا ۳۵٪ کاهش داده است [Canadian Infrastructure Report, 2019]. این نشان‌دهنده اهمیت برنامه‌ریزی دقیق و استفاده از داده‌های علمی در مراحل ابتدایی طرح است که می‌تواند در کاهش هزینه‌ها و افزایش کارآیی طرح‌های زیرسطحی نقش بسزایی ایفا کند.

عناصر اصلی مدل در شهرهایی مانند سنگاپور و تورنتو بر اهمیت یکپارچگی عملکردی تاکید دارد. در این شهرها، فضاهای تجاری متصل به شبکه‌های حمل و نقل زیرزمینی با توجه به دسترسی آسان‌تر به نقاط مختلف شهر و کاهش ترافیک شهری، به طور قابل توجهی از بهره‌وری اقتصادی بیشتری برخوردار بوده‌اند. داده‌های سنگاپور نشان می‌دهد فضاهای تجاری متصل به شبکه مترو ٤٠٪ بازدهی اقتصادی بیشتری نسبت به واحدهای مستقل دارند [Fesselmeyer & Liu, 2018]. این یافته‌ها موید آن است که طراحی چندعملکردی فضاهای زیرسطحی نه‌تنها کارآیی اقتصادی را افزایش می‌دهد، بلکه موجب کاهش ۲۰٪ تا ۳۰٪ سفرهای درون‌شهری می‌شود. این تغییرات باعث بهبود کارآیی سیستم حمل و نقل عمومی و کاهش آلودگی درون‌شهری می‌شود که از اهداف کلیدی توسعه پایدار است.

فرآیند اجرایی در طرح‌های موفق از الگوی توسعه تدریجی پیروی کرده‌اند که باعث می‌شود ریسک‌ها و چالش‌های پیش‌بینی نشده، از جمله تغییرات اقلیمی یا کشف آثار باستانی، به طور موثری مدیریت شوند. تجربه مادرید در انتقال بزرگراه به زیرزمین نشان می‌دهد که تقسیم طرح به فازهای پنج‌ساله و ارزیابی مستمر بین هر فاز، ریسک‌های فنّی را تا ۵۰٪ کاهش داده است. این رویکرد به‌ویژه در مواجهه با چالش‌های پیش‌بینی نشده مانند تغییرات آب و هوایی یا کشف آثار باستانی کارآیی خود را ثابت کرده است [Von Winterfeldt *et al.*, 2010]. این رویکرد تدریجی به برنامه‌ریزان اجازه می‌دهد تا با استفاده از بازخوردهای هر فاز، اصلاحات لازم را در فازهای بعدی اعمال کنند و از این طریق، بازدهی طرح را افزایش دهند.

این یافته‌ها به‌وضوح نشان داد که توسعه زیرسطحی موفق نیازمند رویکردی سیستماتیک است که پیوند ارگانیک بین الزامات فنّی، اقتصادی و اجتماعی برقرار کند. تجربه شهرهای مورد مطالعه ثابت کرده که غفلت از هر یک از این ابعاد می‌تواند به شکست طرح یا کاهش شدید بازدهی سرمایه‌گذاری‌ها منجر شود. به طور خاص، چالش‌های اجتماعی و فرهنگی در برخی از طرح‌ها ممکن است به‌ویژه در شهرهای بزرگ و متنوع، ایجاد موانعی برای پذیرش این طرح‌ها توسط ساکنان محلی کند.

برای مطالعات آینده، سه حوزه نیاز به بررسی عمیق‌تر دارد: اولاً مطالعه تاثیر فنّاوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی در بهینه‌سازی طراحی فضاهای زیرسطحی؛ ثانیاً تحلیل اقتصادی بلندمدت طرح‌های توسعه زیرسطحی با درنظرگرفتن هزینه‌های عمرانی و منافع اجتماعی؛ و ثالثاً بررسی راهکارهای کاهش مقاومت اجتماعی در برابر طرح‌های توسعه زیرسطحی. از منظر کاربردی، پیشنهاد می‌شود شهرها با ایجاد بانک اطلاعاتی یکپارچه از تجربیات جهانی، از تکرار اشتباهات گذشته اجتناب کنند. همچنین تشکیل تیم‌های چندرشته‌ای متشکل از مهندسان، برنامه‌ریزان شهری و جامعه‌شناسان می‌تواند به طراحی فضاهای زیرسطحی کمک کند که هم از نظر فنی قابل اجرا و هم از نظر اجتماعی پذیرفتنی باشند.

این مدل با ارایه چارچوبی نظام‌مند و آزموده‌شده در شهرهای پیشرو، می‌تواند راهنمای عملی برای شهرهایی باشد که قصد توسعه فضای زیرسطحی را دارند. تجربیات نشان می‌دهد که موفقیت چنین طرح‌هایی در گرو توجه همزمان به ابعاد فنّی، اقتصادی و اجتماعی است. غفلت از هر یک از این جنبه‌ها می‌تواند به شکست طرح یا کاهش شدید بازدهی سرمایه‌گذاری منجر شود. همچنین، نیاز به

یک استراتژی جامع برای مدیریت ریسک‌ها، ارزیابی مداوم و استفاده از داده‌های علمی به طور مستمر، از عوامل کلیدی در موفقیت طرح‌های توسعه زیرسطحی است.

## نتیجه‌گیری

توسعه زیرسطحی در شهرهای جهان به عنوان رویکردی چندبُعدی، همزمان ظرفیت‌های کلان در بهینه‌سازی فضا، پایداری زیست‌محیطی و تاب‌آوری زیرساختی را آشکار کرده و هم چالش‌هایی مانند هزینه‌های بالا، ملاحظات حقوقی و پیچیدگی‌های فنّی را نمایان ساخته است.

**تشکر و قدردانی:** موردی وجود ندارد.

**تاییدیه اخلاقی:** موردی وجود ندارد.

**تعارض منافع:** این مقاله برگرفته از رساله نویسنده اول است. هیچ‌گونه تعارض منافعی در راستای نگارش و چاپ این مقاله وجود ندارد.

**سهم نویسندگان:** مرجانه هوشمند (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/نگارنده بحث/روش‌شناس (۳۰٪)؛ زهرا سادات سعیده زرآبادی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ حمید ماجدی (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/نگارنده بحث (۲۰٪)؛ سید علی نوری (نویسنده چهارم)، نگارنده بحث/روش‌شناس (۲۰٪)

**منابع مالی:** موردی وجود ندارد.

## منابع

- Admiraal H, Cornaro A (2016). Why underground space should be included in urban planning policy-And how this will enhance an urban underground future. Tunnelling and Underground Space Technology. 55:214-220.
- Bélanger P (2007). Underground landscape: The urbanism and infrastructure of Toronto's downtown pedestrian network. Tunnelling and Underground Space Technology. 22(3):272-292.
- Beneventi DA (2012). Montreal underground. Journal of Canadian Studies. 46(3):263-286.
- Besner J (2016). Underground space needs an interdisciplinary approach. Tunnelling and Underground Space Technology. 55:224-228.
- Bobylev N, Sterling R (2016). Urban underground space: A growing imperative. Perspectives and current research in planning and design for underground space use. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research. 55:1-4.
- Canadian Infrastructure Report (2019). Monitoring the State of Canada's core public infrastructure. Canada: The Canadian Infrastructure Report Card.
- Chow R (2023). Planning the future of the underground: Taking Toronto's PATH to the next level [dissertation]. Canada: York University.
- Cui J, Broere W, Lin D (2021). Underground space utilisation for urban renewal. Tunnelling and Underground Space Technology. 108:103726.
- Das D, Kalbar PP, Velaga NR (2021). Framework for comparative evaluation of car-sharing alternatives for urban and suburban regions: Case study of Mumbai, India. Journal of Urban Planning and Development. 147(3):05021022.
- Demers C (2016). Over & underground spaces & networks integrations a case study: The international district of Montreal. Procedia Engineering. 165:726-729.
- Fesselmeyer E, Liu H (2018). How much do users value a network expansion? Evidence from the public transit system in Singapore. Regional Science and Urban Economics. 71:46-61.
- Guohua Z, Zhili T (2022). Connotation, path and suggestion of integrated development of urban underground space. Chinese Journal of Underground Space and Engineering. 18(3):701-713. [Chinese]
- Kishii T (2015). Utilization of underground space in Japan. Tunnelling and Underground Space Technology. 55:320-323.
- Lee HS, Zho Y (2018). Status and issues for underground space development in Singapore. Tunnel and Underground Space. 28(4):304-324. [Korean]
- Li S, Hong Z, Xue X, Liu X, Shi W (2023). Comprehensive evaluation of the underground space resources in Xianyang city. Scientific Reports. 13(1):17348.
- Nishi J, Tanaka T, Seiki T, Ito H, Okuyama K (2010). Estimation of the value of the internal and external environment in underground space use. Tunnelling and Underground Space Technology. 15(1):79-89.
- Raposo DM, Carlos L (2021). The implementation of network governance for sustainable urban underground usage, a comparative analysis of the case studies of the cities of Rio de Janeiro, Brazil and Helsinki, Finland. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 703(1):012017.
- Richter M, Heinemann K, Meiser N, Dickhaut W (2024). Trees in sponge cities-a systematic review of trees as a component of blue-green infrastructure, vegetation engineering principles, and Stormwater management. Water. 16(5):655.
- Ronka K, Ritola J, Rauhala K (1998). Underground space in land-use planning. Tunnelling & Underground Technology. 13(1):39-49.
- Shirlaw N, Zhao J, Krishnan R (2001). Underground space for sustainable urban development. Proceedings of the 30th ITA-AITES World Tunnel Congress. Singapore: Tunnelling and Underground Space Technology.
- Sterling RL, Admiraal H, Bobylev N, Parker H, Godard JP, Vähäaho I, et al (2012). Sustainability issues for underground space in urban areas. Urban Design and Planning. 165(4):241-254.
- Sterling RL, Carmody J (1993). Underground space design: Part 1: Overview of subsurface space utilization Part 2: Design for people in underground facilities. Hoboken: Wily.
- Vähäaho I (2016). An introduction to the development for urban underground space in Helsinki. Tunnelling and Underground Space Technology. 55:324-328.
- Von Der Tann L, Metje N, Admiraal H, Collins B (2018). The hidden role of the subsurface for cities. Civil Engineering. 171(6):31-37.
- Von Winterfeldt D, Prager F, Asay GB, Lee B, Fasolo B, Ni Z, et al (2010). Estimating behavioral changes for transportation modes after terrorist attacks in London, Madrid, and Tokyo. Los Angeles: METRANS.
- Wang G, Gang AJ, Lu D, Du X (2023). Low-carbon development strategy of urban underground infrastructure. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering. 25(1):30-37.
- Wang J, Duan H, Chen K, Chan I, Xue F, Zhang N, et al (2025). Role of urban underground-space development in

- Zhang P, Jin T, Wang M, Zhou N, Jia X (2025). Evaluation of the suitability of urban underground space development based on multi-criteria decision-making and geographic information systems. Applied Sciences. 15(2):543.
- Zhou Y, Zhao J (2016). Assessment and planning of underground space use in Singapore. Tunnelling and Underground Space Technology. 55:249-256.
- Zongchao G, Toshihiro O, Wei L (2019). Simulating pedestrians' spatio-temporal distribution in underground spaces. Sustainable Cities and Society. 48:101552.
achieving carbon neutrality: A national-level analysis in China. Engineering. 45:212-221.
- Xiaobo Z, Kai L, Peng J, Wuhui J (2023). Geological suitability evaluation of underground space development in the Nanshan District of Shenzhen based on constraint conditions. Hydrogeology & Engineering Geology. 50(4):213-224.
- Xu Z, Zhou S, Zhang C, Yang M, Jiang M (2023). A Bayesian network model for suitability evaluation of underground space development in urban areas: The case of Changsha, China. Journal of Cleaner Production. 418:138135.