https://gep.ui.ac.ir/?lang=fa
Geography and Environmental Planning
E-ISSN: 2252- 0910
Document Type: Research Paper
Vol. 37, Issue 2, No.102, 2026, pp. 93- 124
Received: 21/01/2026 Accepted: 02/09/2026

Integrating GIS and 3D Urban Modeling in Accessibility Analysis and Urban Park Management: A Case Study of District 3, Tehran

Mahnaz Vaez Livari *
Ph.D. student, Department of Geography and Urban Planning, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran
mahnazvaez@znu.ac.ir

Mohsen Ahadnejad Reveshty
professor,Department of Geography and Urban Planning, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran
ahadnejad@znu.ac.ir

Mohamad Taghi Heydari
Associate professor, Department of Geography and Urban Planning, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran
Mt.heydari@znu.ac.ir

Abstract

Urban green spaces significantly contribute to the physical, psychological, and social well-being of citizens and equitable access to these spaces is a fundamental pillar of sustainable urban development and spatial justice. Consequently, assessing the accessibility of urban parks has become a central concern in contemporary urban planning. This study evaluated the spatial distribution of park accessibility and identified underserved areas beyond service catchments in District 3 of Tehran by integrating Geographic Information Systems (GIS), network analysis, and three-dimensional (3D) urban modeling. Adopting an applied, descriptive–analytical approach, the research utilized spatial datasets—including street networks, park locations, and population distribution—obtained from official sources and processed within the ArcGIS environment. Pedestrian accessibility was assessed by generating park service catchment areas at 5-, 10-, and 15-minute walking thresholds using the Network Analyst extension. The resulting spatial analyses were then visualized and examined through procedural 3D urban modeling in CityEngine, providing a foundational framework for the future development of urban digital twins in green space planning, monitoring, and management. The findings revealed a substantial mismatch between the distribution of urban parks and population density across District 3. For example, Neighborhood 3, which had the highest population density, recorded the lowest per capita green space provision (0.3 m² per capita), whereas Neighborhood 4 with a moderate population level enjoyed the highest provision (9.6 m² per capita). Moreover, the accessibility analysis identified several urban blocks with

*Corresponding Author
Vaez Livari, M., Ahadnejad Reveshty, M. and Heydari, M. T. (2026). Integrating GIS and 3D Urban Modeling in Accessibility Analysis and Urban Park Management: A Case Study of District 3, Tehran. Geography and Environmental Planning, 37(2), 93–124.

2252-0910 © University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0).

10.22108/gep.2026.148125.1770

limited or no effective park access, a condition that disproportionately affected vulnerable groups, particularly children and the elderly. The results indicated that achieving spatial justice in green space access could not be realized solely by increasing the overall quantity of parks. Instead, it necessitated a more balanced spatial distribution of park facilities, improvements to pedestrian networks, and integration of advanced spatial analytical tools and 3D urban modeling into urban decision-making processes. The proposed framework can serve as an initial infrastructure for future digital twin applications, supporting scenario evaluation and data-driven decision-making in urban park management.

Keywords*:* Spatial Justice, Urban Park Accessibility, Network Analysis, 3D Urban Modeling.

Introduction

Rapid acceleration of urbanization coupled with unprecedented increases in population density within metropolitan regions has rendered equitable access to urban green spaces a critical challenge for contemporary urban planning and governance. Tehran as the largest and most densely populated city in Iran has experienced sustained demographic growth and physical expansion over recent decades. Nevertheless, distribution of public services—particularly green spaces and urban parks—has persistently failed to align with prevailing population distribution patterns. Although District 3 of Tehran Municipality exhibits a relatively high per capita green space compared to other districts, it suffers from pronounced spatial unevenness and unequal accessibility at the subdistrict and neighborhood levels. This disparity poses serious implications for quality of life, public health, and spatial justice. Urban parks, beyond their environmental functions—such as mitigating air pollution and alleviating the urban heat island effect—play an indisputable role in promoting physical and mental health, as well as fostering social interaction among citizens. However, an adequate per capita green space at the district level does not guarantee equal access for all residents. Factors including the spatial configuration of parks, street network permeability, physical barriers, and demographic characteristics can generate considerable discrepancies in the actual benefits that residents derive from these spaces.

In recent years, advances in Geographic Information Systems (GIS), network analysis, and three-dimensional (3D) urban modeling have facilitated more precise assessments of accessibility patterns. Nonetheless, the majority of existing studies continue to rely on two-dimensional, static indicators—such as per capita measures—with limited integration of dynamic network analysis and data-driven 3D representation. The urban digital twin as an emerging paradigm in urban management necessitates foundational information infrastructures and baseline 3D models—a foundational step that the present study sought to undertake. Accordingly, this research conducted a spatial and network-based analysis of access to urban parks, identified areas of spatial deprivation, and investigated the potential of integrating spatial analysis with procedural 3D modeling as a basis for future urban digital twin development in District 3 of Tehran. The study addressed the following primary questions: How is the spatial distribution of park access across the six subdistricts of District 3 and which subdistricts and demographic groups are most exposed to accessibility inequalities? Furthermore, to what extent can a network-based 3D model effectively identify accessibility gaps and support the evaluation of urban intervention scenarios?

Materials & Methods

This research was applied in objective and descriptive-analytical in method, combining quantitative spatial analysis with procedural modeling. The study area was District 3 of Tehran Municipality, covering 2,950 hectares in the central-northern part of the city and comprising 6 subdistricts and 12 neighborhoods. Spatial data—street network, park locations, census block boundaries, and land use—were collected from the spatial database of Tehran Municipality and its ICT Organization (FAVA). Demographic data, including total population, children under 6, and elderly over 65 years at the census block level, were extracted from Iran's 2016 National Population and Housing Census.

To measure pedestrian accessibility, the street network was modeled as a graph of nodes and edges in ArcGIS Pro, with parks as service facilities and intersections as nodes. Realistic walking time was calculated by using the Tobler Hiking Function, which modeled the non-linear relationship between terrain slope and walking speed based on a flat-terrain speed of 1.4 m/s and a 10-meter Digital Elevation Model. Correction factors were applied for children (0.5), the elderly (0.7), and adults (1.0) to simulate each group's walking speed independently. Service areas (isochrones) for 5-, 10-, and 15-minute thresholds were calculated by using Network Analyst with highways treated as barriers. Population within each service area was estimated

via Areal Interpolation, given the mismatch between census block boundaries and isochrones. Two indicators were computed for each demographic group: area coverage ratio and population coverage ratio. A 3D urban model based on spatial and demographic data was then developed in CityEngine using procedural modeling: CGA rules set building heights according to child population density across 4 classes (6, 12, 18, and 25 meters), and block color was classified into 5 accessibility levels from green (excellent) to red (none). Finally, an intervention scenario—constructing a new park in underserved Subdistrict 3—was designed and evaluated with the same framework.

Research Findings

Although District 3 enjoyed a relatively favorable overall per capita green space (approximately 9.4% of its total area), the spatial distribution of these spaces and actual accessibility across the six subdistricts was far from being uniform. Subdistrict 4 with 9.6 m² per capita had the highest provision, while Subdistrict 3 with a population exceeding 74,974 had only 0.3 m² per capita—indicating a severe deficit. However, network-based accessibility analysis revealed that Subdistrict 2, not Subdistrict 4, had the highest accessibility across all time thresholds. This paradox highlighted the decisive role of street-network structure and park distribution: the large parks in Subdistrict 4 had not translated into commensurate accessibility due to network connectivity constraints and physical barriers.

Vulnerable groups were disproportionately affected. Within the 5-minute threshold, only 43% of children in Subdistrict 1 and 39% in Subdistrict 5 had park access respectively improving to 77 and 71% at 15 minutes though a significant share remained outside adequate access. The 3D model clearly visualized these patterns with red (no-access) blocks concentrated in Subdistricts 3 and 5 and blue (high-access) blocks mainly in Subdistrict 2 and parts of Subdistrict 4. The intervention scenario showed that a new park in Subdistrict 3 could reduce inaccessible blocks for children from 90 to 46 (a 49% reduction) and for the elderly from 70 to 45 (a 36% reduction), directly benefiting over 20,000 adults and nearly 5,000 children.

Discussion of Results & Conclusion

The results indicated that achieving spatial justice in access to urban parks was not possible merely through quantitative increases in per capita green space; rather, it required balanced and intelligent distribution of services, improved permeability of pedestrian networks, attention to vulnerable demographic groups, and the use of advanced analytical and simulation tools in decision-making. The integration of GIS-based network analysis with procedural 3D modeling in CityEngine operated beyond mere visualization, functioning as an analytical-descriptive framework that could aid in the rapid identification of crisis hotspots, evaluation of development scenarios, and prioritization of urban interventions.

Although the model developed here—due to the absence of dynamic, real-time data and a bi-directional link with the physical environment—did not yet constitute a fully operational urban digital twin, it can serve as a robust data-driven infrastructure for subsequent steps toward digital twin development in green space management, land-use planning, and evidence-based decision support. Transitioning from traditional, static-map approaches toward dynamic, interactive, data-driven approaches that place spatial justice and universal accessibility at their core is therefore not a choice but a necessity for the efficient and sustainable management of metropolises like Tehran in the era of smart cities and digital transformation.

جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی
سال ۳۷، پیاپی ۱۰۲، شماره ۲، ۱۴۰۵، ص ۱۲۴– ۹۳
وصـول: ۱۴۰۴/۱۱/۱ پـذیرش: ۱۴۰۵/۶/۱۱

مقاله پژوهشی

تلفیق GIS و مدل‌سازی سه‌بعدی شهری در تحلیل دسترسی و مدیریت پارک‌های شهری: مطالعه موردی منطقه ۳ تهران

مهناز واعظ لیواری *، دانشجوی دکتری گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
mahnazvaez@znu.ac.ir
محسن احدنژاد روشتی، استاد گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
ahadnejad@znu.ac.ir
محمدتقی حیدری، دانشیار گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
Mt.heydari@znu.ac.ir

چکیده

با توجه به نقش فضاهای سبز شهری در ارتقای سلامت جسمی، روانی و اجتماعی شهروندان و اهمیت عدالت فضایی در توزیع خدمات شهری، ارزیابی میزان دسترسی ساکنان به پارک‌های شهری از موضوعات اساسی برنامه‌ریزی شهری محسوب می‌شود. هدف این پژوهش، تحلیل الگوی فضایی دسترسی به پارک‌های شهری و شناسایی نواحی کم‌برخوردار در منطقه ۳ شهر تهران با بهره‌گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) تحلیل شبکه و مدل‌سازی سه‌بعدی شهری است. پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش، توصیفی‌تحلیلی است. داده‌های مکانی شامل شبکه معابر، موقعیت پارک‌ها و اطلاعات جمعیتی از منابع رسمی گردآوری و در محیط ArcGIS پردازش شدند. به‌منظور سنجش دسترسی پیاده‌محور، محدوده‌های خدمت‌رسانی پارک‌ها در بازه‌های زمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه با استفاده از ابزار Network Analystمحاسبه شد. سپس نتایج تحلیل فضایی با بهره‌گیری از نرم‌افزار CityEngine و رویکرد مدل‌سازی رویه‌ای (Procedural Modeling)در قالب یک مدل سه‌بعدی شهری تجسم و تحلیل شد. که به‌عنوان بستری اولیه برای توسعه دوقلوی دیجیتال شهری در حوزه برنامه‌ریزی، پایش و مدیریت فضاهای سبز شهری قابل استفاده است. یافته‌ها نشان می‌دهد توزیع پارک‌های شهری در منطقه ۳ تهران با الگوی توزیع جمعیت همخوانی ندارد؛ به‌طوری‌که ناحیه ۳ با بیشترین تراکم جمعیتی، کمترین سرانه فضای سبز (۰.۳ مترمربع به ازای هر نفر) را داراست؛ درحالی‌که ناحیه ۴ با سرانه ۹.۶ مترمربع به ازای هر نفر از وضعیت مطلوب‌تری برخوردار است. همچنین نتایج تحلیل دسترسی بیانگر وجود بلوک‌های شهری با دسترسی بسیار محدود یا فاقد دسترسی مناسب به پارک‌ها است؛ وضعیتی که برای گروه‌های آسیب‌پذیر از جمله کودکان و سالمندان شدت بیشتری دارد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد تحقق عدالت فضایی در دسترسی به فضاهای سبز صرفاً از طریق افزایش کمّی پارک‌ها امکان‌پذیر نیست؛ بلکه نیازمند توزیع متوازن خدمات، بهبود شبکه‌های پیاده‌روی و بهره‌گیری از ابزارهای تحلیلی و مدل‌های سه‌بعدی شهری در فرآیند تصمیم‌گیری است. همچنین چارچوب پیشنهادی پژوهش می‌تواند به‌عنوان زیرساخت اولیه توسعه دوقلوهای دیجیتال شهری برای ارزیابی سناریوهای توسعه و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مبتنی بر داده در مدیریت شهری استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: عدالت فضایی، دسترسی‌پذیری، پارک‌های شهری، تحلیل شبکه، مدل‌سازی سه‌بعدی شهری

*نویسنده مسئول

واعظ، مهناز، احدنژاد، محسن و حیدری، محمدتقی . (۱۴۰۵). تلفیق GIS و مدل‌سازی سه‌بعدی شهری در تحلیل دسترسی و مدیریت پارک‌های شهری: مطالعه موردی منطقه ۳ تهران، *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۷ (۲)، ۱۲۴– ۹۳ .

2252-0910 © University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0).

10.22108/gep.2026.148125.1770

مقدمه

فضاهای سبز شهری، به‌ویژه پارک‌ها، نقش مهمی در ارتقای سلامت جسمی، روانی و اجتماعی شهروندان ایفا می‌کنند و امکان رهایی از فشارهای زندگی روزمره و تقویت تعاملات اجتماعی را فراهم می‌آورند (Hand et al., 2017). این فضاها علاوه بر بهبود کیفیت هوا، ارتقای کیفیت بصری محیط و تعدیل شرایط اقلیمی شهری، در افزایش کیفیت زندگی، کاهش مصرف انرژی و ارتقای پایداری شهری نیز نقش مؤثری دارند (Cetin, 2015; Haq, 2011)؛ همچنین پارک‌های شهری محیطی مناسب برای فعالیت‌های تفریحی، تعاملات اجتماعی و رشد شناختی و روانی کودکان فراهم می‌کنند و فرصت تماس مستقیم شهروندان با عناصر طبیعی را در محیط‌های متراکم شهری مهیا می‌سازند (Amoly et al., 2014)؛ ازاین‌رو، دسترسی عادلانه به فضاهای سبز شهری به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم عدالت فضایی و توسعه پایدار شهری مورد توجه پژوهشگران و برنامه‌ریزان شهری قرار گرفته است.

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که دسترسی مناسب به پارک‌ها و فضاهای سبز می‌تواند آثار مثبتی بر سلامت عمومی، کاهش تنش‌های روانی و ارتقای رفاه اجتماعی داشته باشد؛ درنتیجه، شناخت الگوهای توزیع فضایی پارک‌ها و ارزیابی میزان دسترسی گروه‌های مختلف جمعیتی به این فضاها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در سال‌های اخیر، توسعه سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و ابزارهای تحلیل شبکه، امکان سنجش دقیق‌تر دسترسی به خدمات شهری و تحلیل روابط فضایی را فراهم کرده است (Roberts, 2017). با وجود این، بخش درخور توجهی از مطالعات دسترسی همچنان بر نمایش‌های دوبعدی و تحلیل‌های ایستا متکی هستند و توان محدودی در نمایش همزمان پیچیدگی‌های کالبدی و فضایی محیط‌های شهری دارند.

همزمان با تحول فناوری‌های دیجیتال و گسترش رویکردهای داده‌محور در مدیریت شهری، استفاده از مدل‌های سه‌بعدی شهری و فناوری‌های نوین تجسم فضایی به‌سرعت در حال گسترش است. این فناوری‌ها امکان نمایش، تحلیل و ارزیابی پدیده‌های شهری را در محیطی واقع‌گرایانه‌تر فراهم کرده و به تصمیم‌گیران کمک می‌کنند تا آثار مداخلات مختلف را بهتر درک و ارزیابی کنند. در این میان، مدل‌سازی سه‌بعدی رویه‌ای (Procedural 3D Modeling) یکی از رویکردهای مؤثر در تولید مدل‌های شهری، امکان ایجاد مدل‌های دقیق، مقیاس‌پذیر و مبتنی بر داده را فراهم می‌کند. چنین مدل‌هایی امروزه به‌عنوان یکی از زیرساخت‌های اصلی توسعه دوقلوهای دیجیتال شهری شناخته می‌شوند و زمینه را برای پایش، تحلیل و مدیریت هوشمند شهرها فراهم می‌سازند (Qian et al., 2022).

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در مطالعات مبتنی برGIS ، هنوز تعداد محدودی از پژوهش‌ها به تلفیق تحلیل دسترسی با مدل‌سازی سه‌بعدی شهری پرداخته‌اند و شکاف درخور توجهی در بهره‌گیری از ظرفیت مدل‌های سه‌بعدی به‌عنوان زیرساخت توسعه دوقلوهای دیجیتال شهری در حوزه خدمات عمومی وجود دارد. این موضوع به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه و در زمینه مدیریت فضاهای سبز شهری کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

شهر تهران به‌عنوان بزرگ‌ترین کلان‌شهر ایران با چالش‌های متعددی در زمینه توزیع فضایی خدمات شهری مواجه است. اگرچه منطقه ۳ تهران به دلیل وجود پارک‌های بزرگ‌مقیاس از سرانه نسبتاً مطلوب فضای سبز برخوردار است، توزیع فضایی این فضاها و میزان دسترسی ساکنان محلات مختلف به آنها یکسان نیست و احتمال وجود نابرابری‌های

فضایی در دسترسی به پارک‌ها وجود دارد؛ ازاین‌رو، شناخت دقیق الگوهای دسترسی و شناسایی نواحی کم‌برخوردار می‌تواند به بهبود فرآیند برنامه‌ریزی و مدیریت شهری کمک کند.

بر این اساس، هدف پژوهش حاضر تحلیل دسترسی به پارک‌های شهری در منطقه ۳ تهران از طریق تلفیق تحلیل شبکه در محیط GIS و مدل‌سازی سه‌بعدی رویه‌ای در نرم‌افزار CityEngine است. در این پژوهش، یک مدل سه‌بعدی شهری مبتنی بر داده‌های مکانی و جمعیتی ایجاد می‌شود که علاوه بر تجسم و تحلیل الگوهای دسترسی، می‌تواند به‌عنوان بستری اولیه برای توسعه دوقلوهای دیجیتال شهری در حوزه برنامه‌ریزی، پایش و مدیریت فضاهای سبز استفاده شود.

ادبیات تحقیق

تحول دیجیتال، حکمروایی شهری و بهبود دسترسی به خدمات

تحول دیجیتال در دهه‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین محرک‌های تغییر در برنامه‌ریزی، مدیریت و حکمروایی شهری تبدیل شده است. گسترش فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات (ICT)، کلان‌داده‌ها، هوش مصنوعی و سامانه‌های هوشمند، زمینه شکل‌گیری نسل جدیدی از شهرها را فراهم کرده است که با عنوان شهرهای هوشمند و دیجیتال شناخته می‌شوند. شهر هوشمند را می‌توان شهری دانست که در آن از فناوری‌های دیجیتال، داده‌های شهری و زیرساخت‌های ارتباطی برای ارتقای کیفیت زندگی شهروندان، افزایش بهره‌وری خدمات عمومی و بهبود فرآیندهای تصمیم‌گیری استفاده می‌شود (Praharaj & Han, 2019). در چنین رویکردی، فناوری نه‌تنها ابزاری برای مدیریت شهری، بستری برای تحقق توسعه پایدار و افزایش کارآمدی خدمات عمومی محسوب می‌شود (Batty, 2012).

با گسترش انقلاب صنعتی چهارم و نفوذ فناوری‌های دیجیتال در مدیریت شهری، رویکردهای سنتی برنامه‌ریزی و ارائه خدمات عمومی نیز دستخوش تغییر شده‌اند. دیجیتالی‌سازی داده‌ها و فرایندهای شهری امکان جمع‌آوری، پردازش و تحلیل حجم گسترده‌ای از اطلاعات را فراهم می‌سازد و به مدیران شهری اجازه می‌دهد تصمیمات خود را بر پایه شواهد و داده‌های واقعی اتخاذ کنند (Yigitcanlar et al., 2024). در این چارچوب، استفاده از فناوری‌های نوین می‌تواند به بهبود تخصیص منابع، افزایش بهره‌وری زیرساخت‌ها و ارتقای کیفیت خدمات شهری منجر شود.

مطالعات مختلف نشان می‌دهد که تحول دیجیتال می‌تواند فرایند ارائه خدمات عمومی را تسهیل کرده، شفافیت و پاسخگویی را افزایش دهد و زمینه تصمیم‌گیری هوشمند را فراهم آورد (Teixeira et al., 2021). همچنین شهرها از طریق بهره‌گیری از فناوری‌های دیجیتال قادر خواهند بود طیف گسترده‌ای از خدمات عمومی را به‌صورت کارآمدتر مدیریت کرده و سطح رفاه شهروندان را ارتقا دهند (Fil'a et al., 2015). در این میان، نقش دولت‌های محلی در بهره‌گیری از فناوری‌های دیجیتال بسیار حائز اهمیت است؛ زیرا این فناوری‌ها می‌توانند به‌عنوان ابزاری برای تقویت زیرساخت‌های شهری، بهبود ارائه خدمات و ارتقای حکمروایی شهری عمل کنند (Das, 2024). دولت‌های محلی و مدیران شهری همواره در تلاش‌اند تا با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، خدمات شهری را متناسب با نیازها و انتظارات شهروندان ارائه کنند (Orselli et al., 2017).

درمجموع، تحول دیجیتال بستری مناسب برای توسعه رویکردهای نوین مدیریت شهری فراهم ساخته است. استفاده از ابزارهای داده‌محور، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، مدل‌های سه‌بعدی شهری و سایر فناوری‌های دیجیتال،

امکان تحلیل دقیق‌تر الگوهای فضایی، شناسایی نابرابری‌های موجود در دسترسی به خدمات و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های شهری را فراهم می‌آورد؛ ازاین‌رو، بهره‌گیری از این فناوری‌ها می‌تواند نقش مهمی در تحقق عدالت فضایی و بهبود دسترسی شهروندان به خدمات عمومی ایفا کند.

کاربرد GIS و تحلیل شبکه در ارزیابی دسترسی

سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) در دهه‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین ابزارهای تحلیل فضایی در برنامه‌ریزی و مدیریت شهری تبدیل شده‌اند. این سامانه‌ها با فراهم‌کردن امکان ذخیره‌سازی، مدیریت، تحلیل و نمایش داده‌های مکانی، زمینه بررسی روابط فضایی میان فعالیت‌ها، کاربری‌ها و خدمات شهری را فراهم می‌کنند. توسعه فناوری‌های مکانی و افزایش دسترسی به داده‌های جغرافیایی موجب شده است که GIS نقش مهمی در تحلیل الگوهای توسعه شهری، ارزیابی توزیع خدمات عمومی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های شهری ایفا کند (Roberts, 2017).

یکی از مهم‌ترین کاربردهای GIS در برنامه‌ریزی شهری، تحلیل دسترسی‌پذیری خدمات عمومی است. دسترسی‌پذیری بیانگر میزان سهولت دسترسی افراد به فرصت‌ها، فعالیت‌ها و خدمات مورد نیاز در محیط شهری است و یکی از شاخص‌های مهم عدالت فضایی محسوب می‌شود. در این چارچوب، ارزیابی دسترسی به خدمات شهری نظیر مراکز آموزشی، درمانی، حمل‌ونقل عمومی و فضاهای سبز، اطلاعات ارزشمندی را برای شناسایی نابرابری‌های فضایی و برنامه‌ریزی کارآمدتر فراهم می‌کند (AlFanatseh & Saqallah, 2021).

پژوهش‌های متعددی از تحلیل شبکه برای ارزیابی عدالت فضایی و توزیع خدمات شهری استفاده کرده‌اند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که وجود یک خدمت در یک منطقه لزوماً به معنای دسترسی برابر تمامی شهروندان به آن نیست و ویژگی‌های شبکه معابر، تراکم جمعیت، موانع فیزیکی و الگوی استقرار خدمات می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر میزان بهره‌مندی ساکنان از خدمات شهری داشته باشند (Roberts, 2017)؛ ازاین‌رو، تحلیل شبکه به یکی از ابزارهای اصلی در ارزیابی دسترسی و شناسایی مناطق کم‌برخوردار تبدیل شده است. یکی از قابلیت‌های مهم تحلیل شبکه، تعیین محدوده‌های خدمت‌رسانی[1] است. این قابلیت امکان شناسایی نواحی تحت پوشش یک خدمت را بر اساس زمان یا فاصله دسترسی فراهم می‌کند و به برنامه‌ریزان شهری کمک می‌کند تا میزان بهره‌مندی ساکنان از خدمات مختلف را ارزیابی نمایند. در مطالعات مرتبط با فضاهای سبز شهری، محدوده‌های دسترسی پیاده‌محور معمولاً براساس بازه‌های زمانی مشخص نظیر ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه محاسبه می‌شوند تا وضعیت دسترسی شهروندان به پارک‌ها و فضاهای عمومی بررسی شود.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در کاربرد GIS و تحلیل شبکه، بخش عمده مطالعات همچنان به نمایش دوبعدی نتایج محدود بوده‌اند؛ درحالی‌که مدل‌های سه‌بعدی شهری می‌توانند درک بهتری از الگوهای فضایی و نابرابری‌های موجود در دسترسی به خدمات ارائه دهند و امکان تجسم مؤثرتر نتایج را فراهم سازند. ازاین‌رو، تلفیق تحلیل شبکه مبتنی بر GIS با مدل‌سازی سه‌بعدی شهری می‌تواند رویکردی نوین برای تحلیل و نمایش دسترسی خدمات شهری فراهم کند و زمینه توسعه ابزارهای پیشرفته‌تر برنامه‌ریزی و مدیریت شهری را مهیا سازد.

[1] Service Catchment Areas

مدل‌سازی سه‌بعدی شهری و مدل‌سازی رویه‌ای

مدل‌سازی سه‌بعدی دیجیتال به‌طور گسترده در طراحی‌های شهری، تجزیه‌وتحلیل محیط ساخته‌شده و مطالعات کالبدی استفاده می‌شود (Zhang et al., 2021). یکی از مهم‌ترین اهداف مدل‌های سه‌بعدی شهری، تجسم و بصری‌سازی محیط شهری است (Smelik et al., 2014). این مدل‌ها با فراهم‌ساختن امکان شبیه‌سازی و پیش‌بینی، زمینه ارزیابی تأثیر عوامل مختلف محیطی و کالبدی بر شهر و شهروندان را فراهم می‌کنند. هرچند مدل‌سازی دستی عناصر شهری نظیر ساختمان‌ها، خیابان‌ها، پل‌ها و فضاهای سبز فرآیندی زمان‌بر و پرهزینه است؛ اما توسعه فناوری‌های دیجیتال و روش‌های نوین مدل‌سازی، امکان تولید مدل‌های سه‌بعدی گسترده و دقیق را در مقیاس شهری فراهم ساخته است؛ ازاین‌رو، استفاده از مدل‌های سه‌بعدی در تحلیل و کاوش محیط‌های شهری، شهر هوشمند، گردشگری شهری، بررسی تغییرات کالبدی در طول زمان و حتی تولید محتوای بصری و رسانه‌ای به‌عنوان یکی از رویکردهای نوین توسعه شهرهای مجازی سه‌بعدی مطرح شده است (Lipp et al., 2019).

در سال‌های اخیر، مدل‌سازی رویه‌ای به‌عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های تولید مدل‌های سه‌بعدی شهری مورد توجه قرار گرفته است. در این رویکرد، عناصر شهری از طریق مجموعه‌ای از قواعد و الگوریتم‌های از پیش تعریف شده تولید می‌شوند و امکان ایجاد مدل‌های گسترده شهری با سرعت و دقت بالا فراهم می‌شود. استفاده از مدل‌سازی رویه‌ای در مقیاس شهری این امکان را فراهم می‌کند که چیدمان بلوک‌های شهری، ساختمان‌ها، خیابان‌ها، فضاهای سبز و سایر عناصر کالبدی شهر به‌صورت خودکار تولید و تحلیل شوند و زمینه لازم برای طراحی مولد[1] در برنامه‌ریزی و طراحی شهری فراهم شود (Müller et al., 2007).

علاوه بر قابلیت‌های بصری، مدل‌های سه‌بعدی شهری امکان تلفیق داده‌های مکانی و توصیفی را نیز فراهم می‌کنند و می‌توانند در تحلیل شاخص‌هایی نظیر تراکم جمعیت، توزیع خدمات شهری، دسترسی‌پذیری و الگوهای توسعه فضایی مورد استفاده قرار گیرند. در این میان، نرم‌افزار CityEngine به‌عنوان یکی از شناخته‌شده‌ترین بسترهای مدل‌سازی رویه‌ای، امکان تلفیق داده‌های GIS با مدل‌های سه‌بعدی را فراهم ساخته و بستری مناسب برای تحلیل و تجسم پدیده‌های شهری در مقیاس‌های مختلف ارائه می‌دهد.

اگرچه پژوهش‌های مرتبط با دوقلوی دیجیتال شهری هنوز در مراحل اولیه توسعه قرار دارند، مطالعات مختلف نشان می‌دهد که همتای دیجیتال شهر می‌تواند درک، مدیریت و نگهداری سیستم‌های شهری را تسهیل کرده و افق‌های جدیدی را در توسعه شهرهای هوشمند ایجاد کند (Shahat et al., 2021). دوقلوهای دیجیتال شهری به‌عنوان یکی از رویکردهای نوین مبتنی بر داده، قابلیت پشتیبانی از تصمیم‌گیری، مدیریت منابع و تحلیل مسائل پیچیده شهری از جمله رشد جمعیت، توسعه کالبدی و محدودیت منابع را دارا هستند (Peris-Ortiz et al., 2017). به‌طور کلی، دوقلوهای دیجیتال چشم‌انداز جدیدی برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی شهری فراهم می‌کنند و به‌عنوان یکی از زیرساخت‌های فناورانه توسعه شهرهای هوشمند شناخته می‌شوند (Buyukdemircioglu & Kocaman, 2020).

[1] Generative Design

دوقلوی دیجیتال شهری و زیرساخت‌های توسعه آن

در سال‌های اخیر، مفهوم دوقلوی دیجیتال (Digital Twin) به یکی از مهم‌ترین فناوری‌های نوظهور در حوزه شهرهای هوشمند و مدیریت شهری تبدیل شده است. دوقلوی دیجیتال را می‌توان به‌عنوان یک بازنمایی دیجیتالی از یک شیء، سامانه یا محیط فیزیکی تعریف کرد که از طریق یکپارچه‌سازی داده‌های مکانی، اطلاعات توصیفی و در موارد پیشرفته داده‌های لحظه‌ای، امکان پایش، تحلیل و پشتیبانی از تصمیم‌گیری را فراهم می‌آورد (El Saddik, 2018). این مفهوم نخستین بار در صنایع هوافضا و تولید پیشرفته مطرح شد و به‌تدریج در حوزه‌های مختلف از جمله مدیریت زیرساخت‌ها، حمل‌ونقل، انرژی و برنامه‌ریزی شهری توسعه یافت (White et al., 2021).

گسترش فناوری‌های دیجیتال، اینترنت اشیا (IoT)، سامانه‌های سنجش هوشمند و زیرساخت‌های کلان‌داده موجب شده است که دوقلوهای دیجیتال به ابزاری کارآمد برای درک بهتر فرآیندهای پیچیده شهری تبدیل شوند. این فناوری با ایجاد ارتباط میان محیط واقعی و بازنمایی دیجیتال آن، امکان پایش مستمر، ارزیابی سناریوهای مختلف و پیش‌بینی پیامدهای تصمیمات مدیریتی را فراهم می‌کند (Redelinghuys et al., 2020). به همین دلیل، دوقلوهای دیجیتال به‌عنوان یکی از ارکان اصلی نسل جدید شهرهای هوشمند شناخته می‌شوند و می‌توانند در بهینه‌سازی خدمات شهری، مدیریت زیرساخت‌ها و ارتقای پایداری شهری نقش مؤثری ایفا کنند (White et al., 2021).

با وجود گسترش مطالعات مرتبط با دوقلوی دیجیتال شهری، توسعه چنین سامانه‌هایی مستلزم فراهم بودن مجموعه‌ای از زیرساخت‌های اطلاعاتی و فنی است. در این میان، وجود مدل‌های سه‌بعدی دقیق از محیط شهری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پیش‌نیازهای ایجاد دوقلوهای دیجیتال شناخته می‌شود. مدل‌های سه‌بعدی شهری امکان نمایش ساختار کالبدی شهر، ساختمان‌ها، معابر، فضاهای عمومی و سایر عناصر محیط ساخته‌شده را فراهم و به‌عنوان بستر اصلی تجمیع داده‌های مکانی و توصیفی عمل می‌کنند (Shirowzhan et al., 2020).

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که داده‌های حاصل از مدل‌های ارتفاعی رقومی (DEM)[1]، مدل‌های ساختمان شهری، تصاویر هوایی، فتوگرامتری، اسکن لیزری و پهپادها می‌توانند در تولید مدل‌های سه‌بعدی دقیق شهری استفاده شوند (Deng et al., 2021; Levine & Spencer, 2022). همچنین پیشرفت فناوری‌های تصویربرداری و مدل‌سازی سه‌بعدی موجب شده است که امکان ایجاد بازنمایی‌های دقیق از محیط شهری با هزینه و زمان کمتر فراهم شود (Mihoković & Zalovic, 2020). این مدل‌ها ضمن فراهم کردن قابلیت تجسم محیط شهری، بستر لازم برای توسعه کاربردهای پیشرفته‌تر نظیر شبیه‌سازی، تحلیل فضایی و توسعه دوقلوهای دیجیتال را نیز ایجاد می‌کنند (Mohammadi et al., 2021).

از سوی دیگر، مدل‌های سه‌بعدی شهری امکان نمایش همزمان اطلاعات مکانی و زمانی را فراهم می‌سازند و به برنامه‌ریزان اجازه می‌دهند پیامدهای احتمالی مداخلات شهری را پیش از اجرا ارزیابی کنند (White et al., 2021). پژوهشگران معتقدند که ترکیب مدل‌های سه‌بعدی با داده‌های مکانی و سامانه‌های تحلیلی می‌تواند زمینه لازم برای توسعه نسل جدید ابزارهای برنامه‌ریزی شهری مبتنی بر دوقلوی دیجیتال را فراهم سازد (Schrotter & Hürzeler,

[1] DEM

(2020. در این چارچوب، مدل‌سازی سه‌بعدی نه‌تنها ابزاری برای تجسم محیط شهری محسوب می‌شود، به‌عنوان یکی از زیرساخت‌های کلیدی توسعه دوقلوهای دیجیتال نیز شناخته می‌شود.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در این حوزه، بسیاری از پژوهش‌های شهری هنوز در مرحله ایجاد مدل‌های سه‌بعدی پایه قرار دارند و به سطح دوقلوی دیجیتال کامل که مستلزم ارتباط دوسویه و به‌روزرسانی مستمر داده‌ها است، نرسیده‌اند (White et al., 2021)؛ ازاین‌رو، می‌توان مدل‌های سه‌بعدی رویه‌ای و داده‌محور را به‌عنوان گامی اساسی در مسیر توسعه دوقلوهای دیجیتال شهری تلقی کرد. بر همین اساس، پژوهش حاضر نیز با بهره‌گیری از تحلیل‌های مکانی GIS و مدل‌سازی سه‌بعدی رویه‌ای در محیط CityEngine، به تولید یک مدل کالبدی دیجیتال از منطقه ۳ تهران می‌پردازد که می‌تواند به‌عنوان بستری برای توسعه کاربردهای آتی دوقلوی دیجیتال در حوزه مدیریت فضاهای سبز و خدمات شهری استفاده شود.

پارک‌های شهری، فضاهای سبز و ضرورت تحلیل دسترسی

رشد سریع شهرنشینی و گسترش محیط‌های ساخته‌شده در دهه‌های اخیر، موجب کاهش ارتباط شهروندان با طبیعت و افزایش فشارهای زیست‌محیطی در شهرها شده است. در چنین شرایطی، فضاهای سبز شهری و به‌ویژه پارک‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های ارتقای کیفیت زندگی، سلامت عمومی و پایداری محیط شهری شناخته می‌شوند. سازمان ملل متحد در چارچوب هدف یازدهم توسعه پایدار بر توسعه شهرها و سکونتگاه‌های انسانی فراگیر، ایمن، تاب‌آور و پایدار تأکید کرده و دسترسی عادلانه شهروندان به فضاهای عمومی و سبز را از الزامات تحقق این هدف دانسته است (Klaufus et al., 2017).

فضاهای سبز شهری علاوه بر نقش تفریحی و فراغتی، کارکردهای متعددی در بهبود شرایط محیطی و اجتماعی شهرها دارند. این فضاها از طریق کاهش آلودگی هوا، تعدیل دمای محیط، کاهش اثر جزیره حرارتی شهری، بهبود کیفیت منظر شهری و افزایش تعاملات اجتماعی، نقش مهمی در ارتقای رفاه و سلامت شهروندان ایفا می‌کنند (; Bowler et al., 2010Escobedo et al., 2011).

همچنین، وجود پارک‌ها و فضاهای باز شهری فرصت مناسبی برای فعالیت‌های بدنی، تفریح، تعاملات اجتماعی و تقویت سلامت روان فراهم می‌آورد که به‌ویژه در کلان‌شهرهای متراکم از اهمیت بیشتری برخوردار است (Kothencz et al., 2017).

با وجود اهمیت فضاهای سبز شهری، توزیع مکانی پارک‌ها در بسیاری از شهرها همواره با الگوی توزیع جمعیت و نیازهای ساکنان همخوانی ندارد. تمرکز برخی از پارک‌های بزرگ در بخش‌های خاص شهر و کمبود فضاهای سبز در برخی دیگر از نواحی، می‌تواند به شکل‌گیری نابرابری‌های فضایی در بهره‌مندی از این خدمات منجر شود؛ درنتیجه، صرف وجود فضاهای سبز در سطح شهر نمی‌تواند تضمین‌کننده دسترسی برابر شهروندان به این خدمات باشد، بلکه نحوه استقرار، پراکنش فضایی و قابلیت دسترسی به آنها نیز از اهمیت بالایی برخوردار است.

در ادبیات برنامه‌ریزی شهری، دسترسی‌پذیری یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عدالت فضایی محسوب می‌شود. دسترسی مناسب به پارک‌ها و فضاهای سبز می‌تواند فرصت‌های برابر برای بهره‌مندی از مزایای زیست‌محیطی، اجتماعی و سلامت‌محور را برای گروه‌های مختلف جمعیتی فراهم سازد. در مقابل، ضعف در دسترسی به این فضاها می‌تواند کیفیت زندگی شهروندان را تحت تأثیر قرار دهد و زمینه بروز نابرابری‌های اجتماعی و فضایی را فراهم کند. این موضوع به‌ویژه برای گروه‌های آسیب‌پذیر نظیر کودکان، سالمندان و افراد دارای محدودیت‌های حرکتی اهمیت بیشتری دارد؛ زیرا دامنه تحرک این گروه‌ها نسبت به سایر شهروندان محدودتر است.

در سال‌های اخیر، توسعه فناوری‌های مکانی و ابزارهای تحلیل فضایی امکان ارزیابی دقیق‌تر الگوهای دسترسی به فضاهای سبز شهری را فراهم کرده است. استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، تحلیل شبکه و مدل‌های سه‌بعدی شهری این امکان را به برنامه‌ریزان می‌دهد که علاوه بر شناسایی مناطق برخوردار و کم‌برخوردار، اثرات احتمالی سیاست‌ها و مداخلات شهری را نیز ارزیابی کنند. در این میان، مدل‌سازی سه‌بعدی شهری می‌تواند درک بهتری از وضعیت موجود و نحوه توزیع خدمات در محیط شهری فراهم کرده و زمینه لازم برای توسعه سامانه‌های هوشمند و داده‌محور در مدیریت فضاهای سبز را ایجاد کند.

با وجود انجام مطالعات متعدد در زمینه دسترسی به فضاهای سبز، بسیاری از پژوهش‌ها همچنان به تحلیل‌های دوبعدی محدود بوده و کمتر به ظرفیت مدل‌های سه‌بعدی در تجسم و تحلیل الگوهای دسترسی پرداخته‌اند؛ ازاین‌رو، بهره‌گیری از تحلیل شبکه در محیط GIS و تلفیق آن با مدل‌سازی سه‌بعدی رویه‌ای می‌تواند رویکردی نوین برای ارزیابی دسترسی پارک‌های شهری فراهم آورد. چنین رویکردی ضمن ارائه تصویری دقیق‌تر از وضعیت دسترسی شهروندان، می‌تواند به‌عنوان بستری برای توسعه ابزارهای پیشرفته‌تر مدیریت شهری و کاربردهای آتی دوقلوی دیجیتال در حوزه فضاهای سبز مورد استفاده قرار گیرد (جدول ۱).

جدول شماره ۱: مرور مفاهیم و مطالعات پیشین

Table 1: A Review of Concepts and Previous Research

پژوهشگر	موضوع پژوهش	روش	مهم‌ترین یافته	محدودیت
Roberts (2017)	تحلیل دسترسی خدمات شهری	GISو تحلیل شبکه	ارزیابی دقیق دسترسی	فاقد مدل سه‌بعدی
Schrotter & Hürzeler (2020)	مدل‌های سه‌بعدی شهری	مدل‌سازی سه‌بعدی	بهبود تجسم محیط شهری	فاقد تحلیل دسترسی
White et al. (2021)	دوقلوی دیجیتال شهری	Digital Twin	پایش و شبیه‌سازی شهری	نیازمند داده‌های پویا
Shirowzhan et al. (2020)	زیرساخت دوقلوی دیجیتال	مدل سه‌بعدی شهری	مدل سه‌بعدی به‌عنوان پایهDT	تمرکز محدود بر خدمات شهری
پژوهش حاضر	دسترسی پارک‌های شهری منطقه ۳ تهران	GISتحلیل شبکه + CityEngine	تحلیل دسترسی و تجسم سه‌بعدی	بسترسازی توسعه آتی DT

منبع: نگارندگان

روش تحقیق

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش، توصیفی‌تحلیلی است. هدف اصلی آن ارزیابی دسترسی شهروندان به پارک‌های شهری در منطقه ۳ شهرداری تهران و بازنمایی فضایی نتایج در قالب مدل سه‌بعدی شهری است. برای این منظور از تحلیل شبکه در محیط ArcGIS و مدل‌سازی سه‌بعدی رویه‌ای در نرم‌افزار CityEngine استفاده شده است. چارچوب پژوهش مبتنی بر تلفیق تحلیل‌های مکانی و مدل‌سازی سه‌بعدی بوده و مدل تولیدشده به‌عنوان بستری برای توسعه کاربردهای آتی دوقلوی دیجیتال شهری در نظر گرفته شده است.

داده‌ها و منابع اطلاعاتی

داده‌های استفاده‌شده در این پژوهش از منابع مختلف گردآوری شده است. لایه‌های مکانی شامل شبکه معابر، محدوده محلات، بلوک‌های آماری و موقعیت پارک‌های شهری از شهرداری تهران و پایگاه داده مکانی منطقه ۳ تهیه شد. همچنین اطلاعات جمعیتی شامل جمعیت کل، تعداد خانوار، جمعیت سالمندان و کودکان از بلوک‌های آماری سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ مرکز آمار ایران استخراج شد[۱]

بلوک‌های آماری به عنوان کوچک‌ترین واحد فضایی دارای اطلاعات جمعیتی در نظام سرشماری کشور انتخاب شدند. پس از اتصال داده‌های جمعیتی به لایه مکانی بلوک‌ها در محیط GIS، امکان تحلیل همزمان شاخص‌های جمعیتی و نتایج دسترسی فراهم شد.

تحلیل شبکه و محاسبه دسترسی به پارک‌های شهری

برای ارزیابی دسترسی شهروندان به پارک‌های شهری از ابزار Network Analyst در محیط ArcGIS استفاده شد. در این روش، شبکه معابر شهری به‌صورت یک گراف شامل گره‌ها و یال‌ها مدل‌سازی شد. پارک‌های شهری به‌عنوان مراکز خدماتی (Facilities)، تقاطع‌های معابر به عنوان گره‌های شبکه و مسیرهای ارتباطی به‌عنوان یال‌های شبکه تعریف شدند.

در این پژوهش، به‌منظور محاسبه زمان واقعی پیاده‌روی براساس شیب معابر، از تابع Tobler Hiking Function استفاده شده است که رابطه غیرخطی بین شیب زمین و سرعت حرکت پیاده را مدل‌سازی می‌کند.

فرمول پایه به شرح زیر است:

$$v = W \times (6 \times exp(-3.5 \times |tan(\theta) + 0.05|)) \div 3.6$$

۱با توجه به عدم انتشار عمومی داده‌های بلوک‌های آماری سرشماری‌های بعدی در مقیاس خرد شهری، داده‌های سرشماری ۱۳۹۵ همچنان معتبرترین و دقیق‌ترین منبع در دسترس برای تحلیل‌های فضایی جمعیت در سطح بلوک‌های آماری در ایران محسوب می‌شود و در بسیاری از پژوهش‌های برنامه‌ریزی شهری استفاده می‌شود. در این پژوهش، داده‌های جمعیت کل، کودکان و سالمندان مستقیماً در سطح بلوک‌های آماری مورد استفاده قرار گرفتند و پس از اتصال به لایه مکانی بلوک‌ها در محیط GIS تحلیل شدند؛ بنابراین، هیچ‌گونه بازتوزیع فضایی جمعیت، درون‌یابی مکانی یا روش‌هایی نظیر Dasymetric Mapping به کار گرفته نشده است.

که در آن v سرعت پیاده‌روی (متر بر ثانیه)، θ زاویه شیب معبر (رادیان)، و W ضریب اصلاحی وابسته به گروه جمعیتی است. مقدار پایه تابع Tobler (بدون اعمال ضریب W) برای زمین مسطح معادل ۱.۴ متر بر ثانیه است.

ضرایب اصلاحی برای گروه‌های جمعیتی

با توجه به تفاوت توان جسمانی گروه‌های مختلف، ضرایب اصلاحی متمایزی برای هر گروه تعریف شد (جدول ۲)

جدول شماره ۲: ضریب سرعت حرکت گروه‌های مختلف

Table 2: Walking Speed Coefficient for Different Pedestrian Groups

–	سرعت مسطح (m/s)	ضریب W	گروه جمعیتی
سالمندان به‌طور میانگین ۳۰٪ کندتر از بزرگسالان حرکت می‌کنند	≈۰.۹۸	۰.۷	بالای ۶۵ سال
کودکان زیر ۵ سال با سرپرست پیاده می‌روند؛ سرعت حرکت گروه ۵۰٪ کمتر از بزرگسالان برآورد شده است	≈۰.۷	۰.۵	کودکان (زیر ۵ سال)
سرعت استاندارد پیاده‌روی براساس تابع Tobler اصلی، بدون ضریب کاهشی	≈۱.۴	۱.۰	بزرگسالان (۵ تا ۶۴ سال)

منابع: نگارندگان

محاسبه زمان عبور در شبکه معابر

برای هر سیگمنت از شبکه معابر، شیب میانگین[1] از مدل رقومی ارتفاع با تفکیک مکانی ۱۰ متر استخراج شد. سپس زمان عبور از هر سیگمنت به‌صورت زیر محاسبه شد:

$$t = L \div v(\theta, W)$$

که در آن t زمان عبور (ثانیه)، L طول segment (متر)، و $v(\theta, W)$ سرعت پیاده‌روی محاسبه‌شده است. این مقدار به‌عنوان Impedance در Network Dataset در محیط ArcGIS Pro تعریف و برای محاسبه ایزوکرون‌های زمانی ۵ دقیقه (۳۰۰ ثانیه)، ۱۰ دقیقه (۶۰۰ ثانیه)، و ۱۵ دقیقه (۹۰۰ ثانیه) به‌کار گرفته شد. همچنین معابر بزرگراهی به‌عنوان محدودیت تعریف شدند.

یکی از چالش‌های اساسی در تحلیل‌های فضایی جمعیتی، مسئله واحد فضایی قابل تعدیل (MAUP) است که زمانی بروز می‌کند که مرزهای بلوک‌های آماری با مرزهای ایزوکرون‌های دسترسی‌پذیری انطباق ندارند. در این پژوهش برای غلبه بر این مشکل، از روش نقشه‌سازی دازیمتریک مبتنی بر مساحت (Areal Interpolation Dasymetric Mapping) استفاده شده است. این روش بر فرض توزیع یکنواخت جمعیت در داخل هر بلوک آماری استوار است و جمعیت هر بلوک به نسبت مساحت همپوشانی با ایزوکرون تخصیص می‌یابد:

$$P_i = P_total \times (A_intersect \div A_original)$$

[1] AVG_SLOPE

که در آن P_i جمعیت تخصیص‌یافته، P_total کل جمعیت بلوک، A_intersect مساحت همپوشانی، و A_original مساحت کل بلوک است.

شاخص‌های ارزیابی دسترسی

برای ارزیابی میزان پوشش خدمات پارک‌های شهری از دو شاخص اصلی استفاده شد:

الف) نسبت محدوده سرویس‌دهی (Service Area Coverage Ratio)

این شاخص بیانگر نسبت مساحت واقع در محدوده خدمت‌رسانی پارک‌ها به کل مساحت محدوده مطالعه است:

$$\frac{served, A}{total, A} \times 100 = SSR$$

که در آن:

SSR = نسبت سرویس‌دهی به مساحت (Service Area Coverage Ratio) به درصد

served, A = مساحت محدوده‌ای که داخل ایزوکرون‌های دسترسی پارک قرار دارد (مساحت تحت پوشش)

total, A = مساحت کل محدوده مطالعه

نسبت جمعیت تحت پوشش (Population Service Ratio)

این شاخص درصد جمعیتی را نشان می‌دهد که در محدوده دسترسی پارک‌ها قرار دارند:

$$\frac{served, P}{total, P} \times 100 = PSR$$

که در آن:

Served, P= جمعیت واقع‌شده در محدودهٔ سرویس‌دهی پارک‌ها (به‌طور مثال، در داخل ایزوکرون ۵، ۱۰ یا ۱۵ دقیقه)

total, P= جمعیت کل محدودهٔ مطالعه

PSR= درصد جمعیتی که دسترسی مؤثر به پارک دارند

مدل‌سازی سه‌بعدی رویه‌ای در CityEngine

به‌منظور بازنمایی سه‌بعدی نتایج تحلیل دسترسی، از نرم‌افزار CityEngine و رویکرد مدل‌سازی رویه‌ای (Procedural Modeling) استفاده شد. پس از استخراج محدوده‌های دسترسی در محیط ArcGIS لایه بلوک‌های آماری به همراه فیلدهای نسبت دسترسی و جمعیت وزن‌دار کودکان سالمندان و بزرگسالان و سطح دسترسی زمانی به نرم‌افزار منتقل شد.

قواعد CGA به گونه‌ای تعریف شدند که رفتار هر بلوک مستقیماً از داده‌های جمعیتی و شاخص دسترسی تبعیت کند: ارتفاع هر بلوک با تابع پلکانی غیرخطی براساس جمعیت کودکان (چهار کلاس: ۶، ۱۲، ۱۸، و ۲۵ متر) و رنگ آن براساس پنج کلاس شاخص دسترسی تعیین شد. بلوک‌های فاقد دسترسی با رنگ قرمز و ارتفاع ثابت ۴ متر نمایش داده شدند.

بر این اساس، بلوک‌های دارای دسترسی بیشتر با ارتفاع بالاتر و بلوک‌های دارای دسترسی کمتر با ارتفاع پایین‌تر نمایش داده شدند. علاوه بر این، طیف رنگی مشخصی برای نمایش سطوح مختلف دسترسی تعریف شد تا امکان تشخیص سریع الگوهای فضایی دسترسی در محیط سه‌بعدی فراهم شود.

مدل سه‌بعدی حاصل، یک مدل کالبدی داده‌محور مبتنی بر تحلیل‌های GIS است که می‌تواند به‌عنوان زیرساخت اولیه و بستری برای توسعه سامانه‌های دوقلوی دیجیتال شهری در مطالعات آینده استفاده شود.

داده‌های مکانی و جمعیتی

↓

ArcGIS (Network Analysis)

↓

اتصال به بلوک‌های آماری

↓

Export GIS Layers

↓

CityEngine

↓

CGA Rules

↓

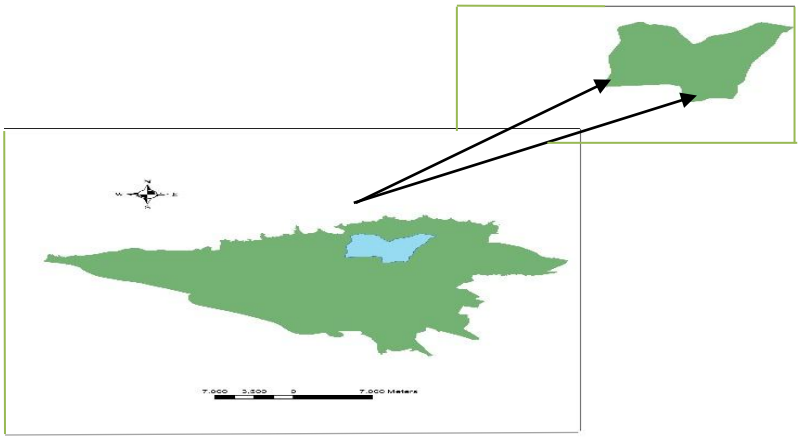
3D Urban Accessibility Model

↓

پشتیبانی از توسعه آتی Urban Digital Twin

محدوده مورد مطالعه

منطقه ۳ یکی از مناطق ۲۲گانه شهر تهران است که در بخش مرکزی – شمالی شهر قرار دارد. این منطقه با وسعتی حدود ۲۹۵۰ هکتار شامل ۶ ناحیه و ۱۲ محله بوده و از شمال به بزرگراه شهید همت، از جنوب به خیابان شهید مطهری، از غرب به بزرگراه شهید چمران و از شرق به بزرگراه شهید مدرس محدود می‌شود (شهرداری تهران، ۱۴۰۲). موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل شماره ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه ۳

Figure 1: Geographic Location of District 3

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

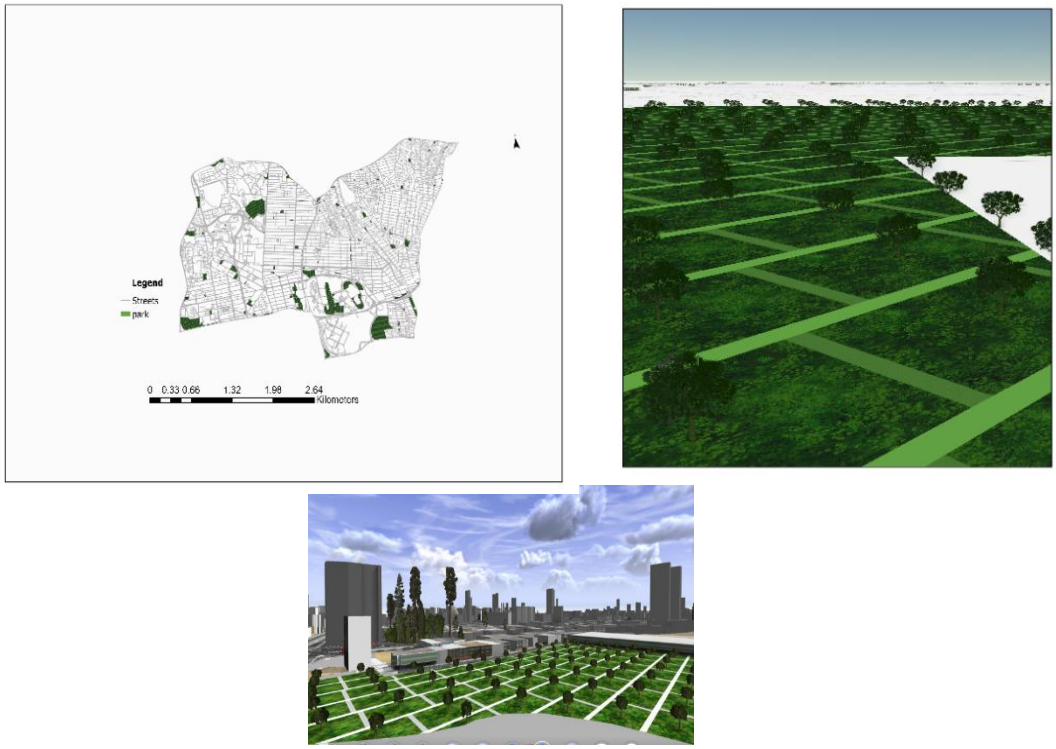
منطقه ۳ به دلیل تمرکز کاربری‌های مسکونی، اداری و تجاری، تراکم جمعیتی قابل توجه و برخورداری از مجموعه‌ای از پارک‌های مهم شهری، از مناطق شاخص تهران در حوزه فضاهای سبز محسوب می‌شود. با وجود سرانه نسبتاً مناسب فضای سبز، پراکنش فضایی پارک‌ها، ساختار شبکه معابر و توزیع جمعیت در سطح محلات می‌تواند منجر به تفاوت در میزان دسترسی ساکنان به این خدمات شود؛ ازاین‌رو، این منطقه به عنوان نمونه‌ای مناسب برای ارزیابی عدالت فضایی در دسترسی به پارک‌های شهری انتخاب شد. نتایج این مطالعه می‌تواند در شناسایی نواحی کم‌برخوردار و پشتیبانی از برنامه‌ریزی و مدیریت فضاهای سبز شهری استفاده شود.

یافته‌های تحقیق

وضعیت توزیع فضایی پارک‌های شهری در منطقه ۳

بررسی داده‌های کاربری اراضی نشان می‌دهد حدود ۹.۴ درصد از مساحت منطقه ۳ شهرداری تهران به فضاهای سبز و پارک‌های شهری اختصاص یافته است؛ با این حال، توزیع این فضاها در سطح نواحی شش‌گانه منطقه یکنواخت نیست. مطابق جدول (۳)، ناحیه ۴ با سرانه ۹.۶ مترمربع برای هر نفر بیشترین میزان برخورداری از پارک‌های شهری را

داراست؛ درحالی‌که ناحیه ۳ با وجود جمعیت بالا (۷۴,۹۷۴ نفر) تنها ۰.۳ مترمربع سرانه فضای سبز برای هر نفر دارد که بیانگر کمبود فضای سبز در این ناحیه است. همچنین ناحیه ۵ با سرانه ۰.۹ مترمربع در وضعیت نامطلوبی قرار دارد. این نتایج نشان می‌دهد توزیع فضایی پارک‌ها متناسب با توزیع جمعیت نیست و نابرابری فضایی درخور توجهی در سطح منطقه وجود دارد.



شکل ۲: نمایش دوقولوی دیجیتال پارک‌های شهری منطقه ۳

Figure 2: Digital Twin Visualization of Urban Parks in District 3

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

مدل‌سازی سه‌بعدی پارک‌های شهری در محیط CityEngine

به‌منظور ایجاد دوقلوی دیجیتال پارک‌های شهری منطقه ۳، داده‌های مکانی شامل شبکه معابر، کاربری اراضی و محدوده پارک‌ها وارد محیط CityEngine شد. سپس با استفاده از مدل‌سازی رویه‌ای (Procedural Modeling) و قواعد پارامتریک، ساختار فضایی پارک‌ها بازسازی شد.

شکل (۲) نمونه‌ای از دوقلوی دیجیتال تولیدشده را نشان می‌دهد. در این مدل، پوشش گیاهی، مسیرهای حرکتی، فضای سبز و عناصر محیطی به‌صورت سه‌بعدی بازنمایی شده‌اند. این بازنمایی امکان مشاهده و تحلیل همزمان ویژگی‌های کالبدی پارک‌ها و ارتباط آنها با بافت پیرامونی را فراهم می‌کند و زمینه لازم برای ارزیابی سناریوهای مختلف توسعه فضای سبز را مهیا می‌سازد.

تحلیل توزیع سرانه پارک‌های شهری

جدول شماره ۳: سرانه پارک‌های شهری به‌ازی هر نفر متر مربع در نواحی ۶ گانه

Table 3: Per Capita Urban Park Area (m^2 per person) in the Six Zones

نواحی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
مساحت ناحیه (متر مربع)	۵۸۸۲۲۸۴	۲۸۴۱۲۳۵	۲۵۴۱۹۱۱	۴۶۳۲۵۸۱	۳۱۴۸۴۹۶	۲۵۶۷۰۰۴
جمعیت	۳۹۹۶۲	۶۶۵۵۵	۷۴۹۷۴	۵۶۰۳۹	۷۱۸۴۸	۲۰۶۲۶
مساحت پارک (متر مربع)	۲۷۴۸۷۶.۲	۲۸۰۷۱۹.۷	۲۹۸۷۸.۶	۵۴۲۰۱۳.۷	۶۶۰۲۲.۶	۹۶۹۷۳
سرانه پارک‌های شهری (نفر)	۶.۸	۴.۲	۰.۳	۹.۶	۰.۹	۴.۷

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود توزیع سرانه پارک‌های شهری در نواحی مختلف منطقه ۳ یکنواخت نیست و اختلاف درخور توجهی میان نواحی وجود دارد. بیشترین سرانه فضای سبز متعلق به ناحیه ۴ با ۹.۶ مترمربع به‌ازای هر نفر است. این ناحیه با وجود جمعیتی حدود ۵۶ هزار نفر، از مساحت درخور توجهی از پارک‌های شهری برخوردار است که نشان‌دهنده وضعیت مطلوب آن از نظر برخورداری از فضای سبز است. در مقابل، ناحیه ۳ با جمعیتی حدود ۷۴,۹۷۴ نفر تنها ۰.۳ مترمربع سرانه فضای سبز دارد که کمترین مقدار در میان نواحی منطقه محسوب می‌شود. این وضعیت بیانگر عدم تناسب میان جمعیت و میزان فضای سبز موجود در این ناحیه است و می‌تواند منجر به کاهش کیفیت دسترسی ساکنان به فضاهای باز شهری شود. همچنین ناحیه ۵ با سرانه ۰.۹ مترمربع در وضعیت نامناسبی قرار دارد. با توجه به جمعیت نسبتاً زیاد این ناحیه (حدود ۷۱ هزار نفر)، میزان فضای سبز موجود پاسخگوی نیاز جمعیتی آن نیست. در مقابل، نواحی ۱، ۲ و ۶ به ترتیب با سرانه‌های ۶.۸، ۴.۲ و ۴.۷ مترمربع در وضعیت متوسط قرار دارند.

اختلاف زیاد میان بیشترین و کمترین سرانه (۹.۶ در ناحیه ۴ در برابر ۰.۳ در ناحیه ۳) نشان می‌دهد که توزیع فضایی پارک‌های شهری در منطقه ۳ از الگوی متعادلی پیروی نمی‌کند. این موضوع بیانگر وجود نابرابری فضایی در توزیع فضاهای سبز شهری است؛ به‌گونه‌ای که برخی نواحی با وجود جمعیت بالا از فضای سبز بسیار محدودی برخوردارند؛ درحالی‌که برخی نواحی دیگر از سطح بالاتری از خدمات فضای سبز بهره‌مند هستند.

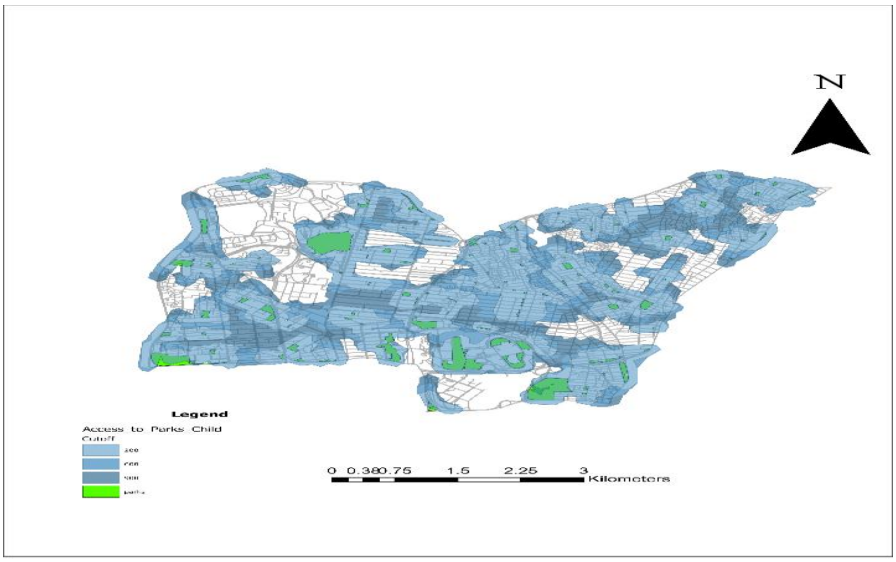
این نتایج ضرورت انجام تحلیل دسترسی مبتنی بر شبکه را نشان می‌دهد؛ زیرا سرانه فضای سبز به تنهایی بیانگر میزان دسترسی واقعی شهروندان نیست؛ برای مثال، ممکن است ناحیه‌ای دارای سرانه نسبتاً بالا باشد؛ اما به دلیل پراکنش نامناسب پارک‌ها یا ساختار شبکه معابر، همه ساکنان آن از دسترسی مناسب برخوردار نباشند؛ بنابراین تحلیل شبکه می‌تواند تصویر دقیق‌تری از عدالت فضایی در دسترسی به پارک‌های شهری ارائه دهد.

مطابق شکل (۳)، پهنه‌های دسترسی ۵ دقیقه‌ای عمدتاً در اطراف پارک‌های موجود متمرکز شده‌اند و بخش‌هایی از منطقه، به‌ویژه در نواحی ۳ و ۵، خارج از محدوده خدمت قرار دارند. نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد:

ناحیه ۲ با بهترین وضعیت دسترسی را دارد و ناحیه ۳ و ۵ کمترین میزان دسترسی را دارا هستند.

حدود ۴۰ درصد جمعیت برخی نواحی برای دسترسی به پارک نیازمند پیمودن مسافتی بیش از ۵ دقیقه هستند.

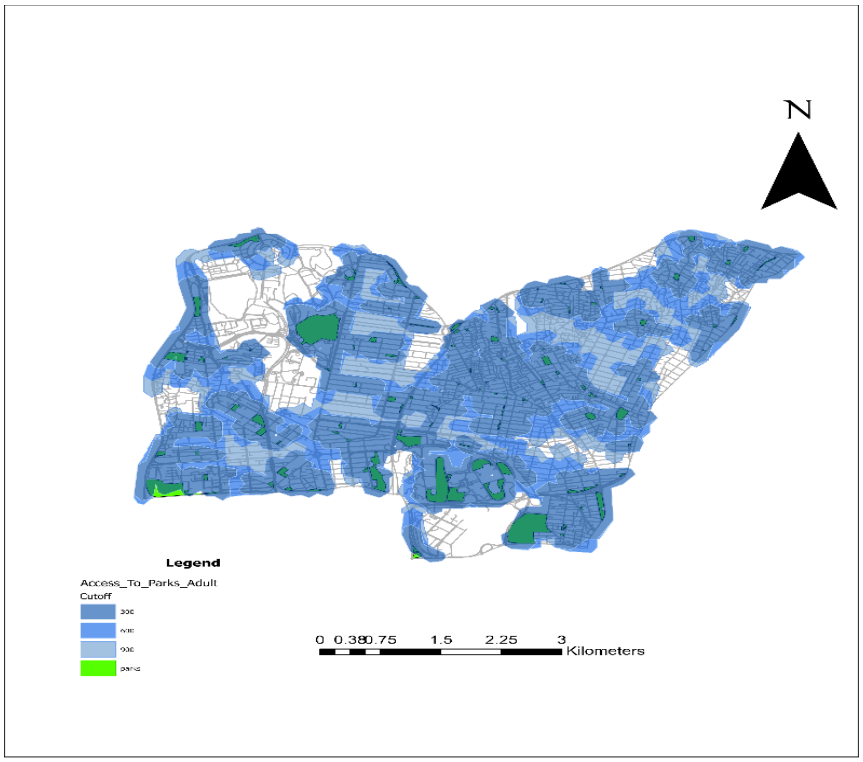
این وضعیت نشان‌دهنده وجود شکاف‌های دسترسی در مقیاس محله‌ای است.



شکل شماره ۳: دسترسی کودکان به پارک‌های شهری

Figure 3: Children's Accessibility to Urban Parks

منبع: نگارندگان: ۱۴۰۴

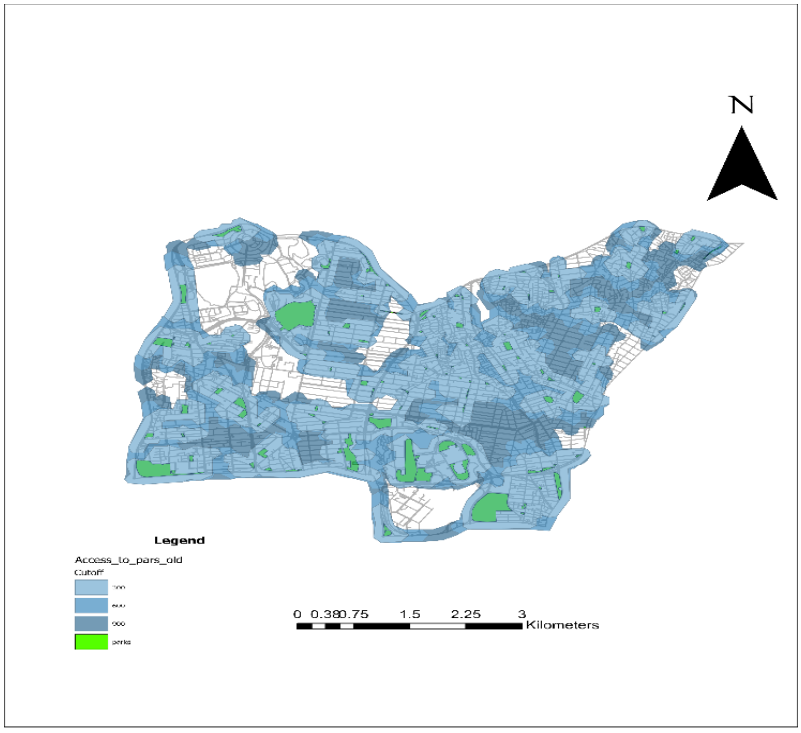


شکل شماره ۴: دسترسی گروه‌های ۶ تا ۶۵ سال به پارک‌های شهری

Figure 4: Accessibility to Urban Parks for the 6–65 Age Groups

منبع: نگارندگان ۱۴۰۴

با افزایش زمان دسترسی به ۱۰ دقیقه (شکل ۴)، پوشش فضایی پارک‌ها به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد. میزان دسترسی کل جمعیت در نواحی مختلف بین ۶۹ تا ۸۵ درصد متغیر است. ناحیه ۲ همچنان بهترین وضعیت را حفظ می‌کند و ناحیه ۳ کمترین میزان دسترسی را نشان می‌دهد.



شکل شماره ۵: دسترسی گروه‌های بالای ۶۵ سال به پارک‌های شهری

Figure 5: Accessibility to Urban Parks for the 65+ Age Group

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

نتایج شکل (۵) نشان می‌دهد که در شعاع ۱۵ دقیقه پیاده‌روی، بخش عمده منطقه تحت پوشش پارک‌ها قرار می‌گیرد. در این حالت میزان دسترسی کل جمعیت در نواحی مختلف بین ۷۷ تا ۹۷ درصد قرار دارد. با وجود این، همچنان بخش‌هایی از نواحی ۱، ۳ و ۵ خارج از محدوده خدمت باقی می‌مانند.

تحلیل دسترسی گروه‌های جمعیتی

بررسی وضعیت دسترسی کودکان زیر ۶ سال و سالمندان بالای ۶۵ سال به پارک‌های شهری نشان می‌دهد که الگوی دسترسی این دو گروه تا حد زیادی مشابه الگوی دسترسی کل جمعیت است. همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود ناحیه ۲ در تمامی آستانه‌های زمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه‌ای بالاترین سطح دسترسی را برای کودکان و سالمندان داراست. این موضوع بیانگر توزیع مناسب‌تر پارک‌ها و ارتباط بهتر آنها با شبکه معابر در این ناحیه است.

در مقابل، ناحیه ۳ نیز در بیشتر شاخص‌ها عملکردی پایین‌تر از میانگین منطقه دارد و بخشی از جمعیت آسیب‌پذیر آن از دسترسی مناسب به فضاهای سبز محروم هستند. با افزایش آستانه زمانی از ۵ به ۱۵ دقیقه، میزان پوشش جمعیتی در تمامی نواحی افزایش می‌یابد؛ اما تفاوت میان نواحی همچنان پابرجاست. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش شعاع دسترسی اگرچه بخشی از کمبودها را جبران می‌کند، قادر به رفع کامل نابرابری‌های فضایی موجود نیست.

جدول شماره ۴: دسترسی گروه‌های مختلف به پارک‌های شهری بر حسب تحلیل شبکه

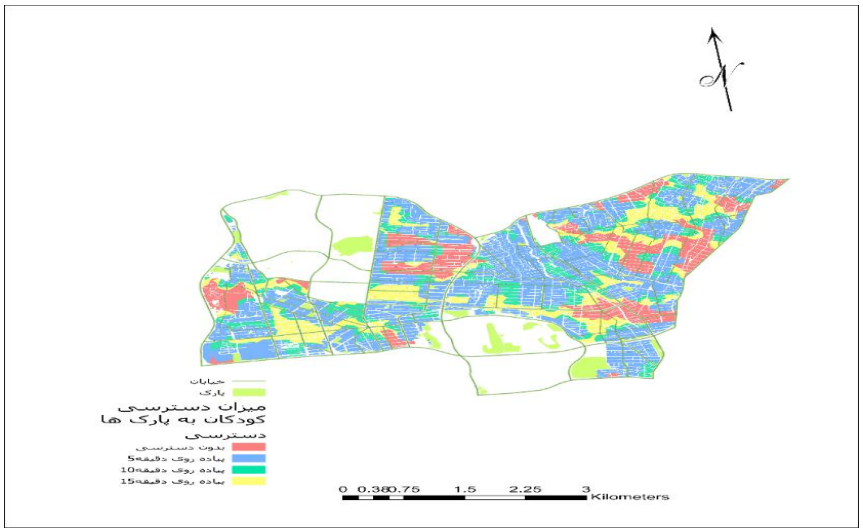
Table 4: Accessibility of Various Groups to Urban Parks Based on Network Analysis

زمان	۵دقیقه			۱۰دقیقه			۱۵دقیقه		
نواحی	۵-۶۵ سال	کودکان بین ۵ سال	بالای ۶۵ سال	۵-۶۵ سال	کودکان بین ۵ سال	بالای ۶۵ سال	۵-۶۵ سال	کودکان بین ۵ سال	بالای ۶۵ سال
۱	۵۱	۴۳	۵۳	۷۳	۶۰	۷۶	۸۷	۷۷	۹۵
۲	۷۶	۷۱	۶۵	۸۴	۸۵	۷۸	۹۵	۸۹	۹۲
۳	۵۴	۴۷	۴۱	۷۴	۶۳	۶۲	۹۱	۸۴	۷۰
۴	۶۵	۵۹	۵۹	۸۶	۷۵	۷۲	۹۵	۹۲	۸۰
۵	۵۰	۳۹	۴۸	۷۱	۵۷	۷۰	۹۴	۷۱	۹۲
۶	۶۲	۴۲	۵۹	۷۴	۶۳	۶۹	۹۷	۷۴	۸۲

نتایج همچنین بیانگر آن است که گروه‌های حساس جمعیتی، به‌ویژه کودکان و سالمندان، بیش از سایر گروه‌ها تحت تأثیر الگوی توزیع فضایی پارک‌ها قرار دارند؛ زیرا محدودیت‌های حرکتی این گروه‌ها سبب می‌شود وابستگی بیشتری به فضاهای سبز نزدیک محل سکونت داشته باشند؛ بنابراین، بهبود دسترسی این گروه‌ها می‌تواند به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم عدالت فضایی و برنامه‌ریزی شهری پایدار مورد توجه مدیران شهری قرار گیرد. همچنین ناحیه ۱ در بازه زمانی ۵ دقیقه‌ای کمترین میزان دسترسی را نشان می‌دهد.

بازنمایی سه‌بعدی الگوی دسترسی در محیط CityEngine

به‌منظور نمایش بصری نتایج تحلیل شبکه، داده‌های حاصل از GIS به محیط CityEngine منتقل شد و با استفاده از قواعد CGA به مدل سه‌بعدی شهری تبدیل شد. در این فرآیند، میزان دسترسی هر بلوک آماری به پارک‌های شهری به‌عنوان یکی از ویژگی‌های توصیفی مدل تعریف شد و ارتفاع و رنگ بلوک‌ها متناسب با سطح دسترسی تنظیم شد.

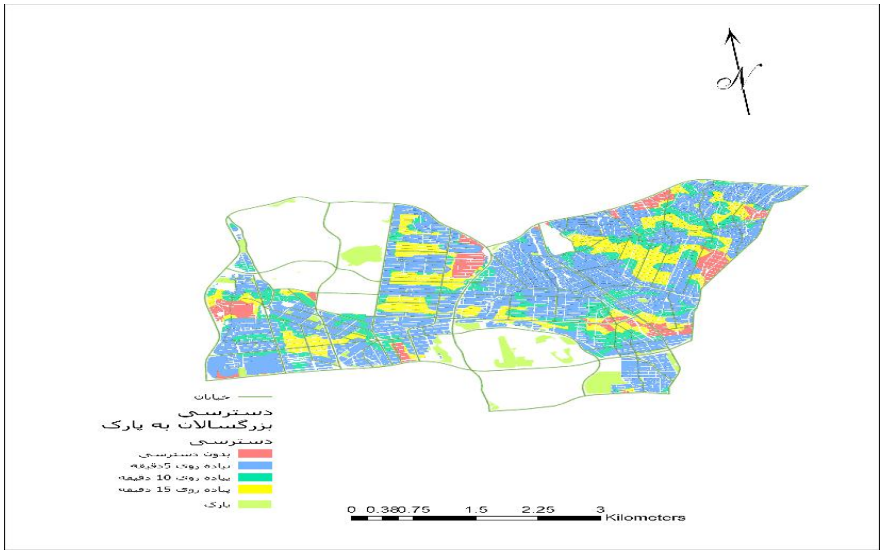


شکل شماره ۶: نمایش سه بعدی دسترسی کودکان به پارک

Figure 6: 3D Visualization of Children's Accessibility to Urban Parks"

منبع: نگارندگان: ۱۴۰۴

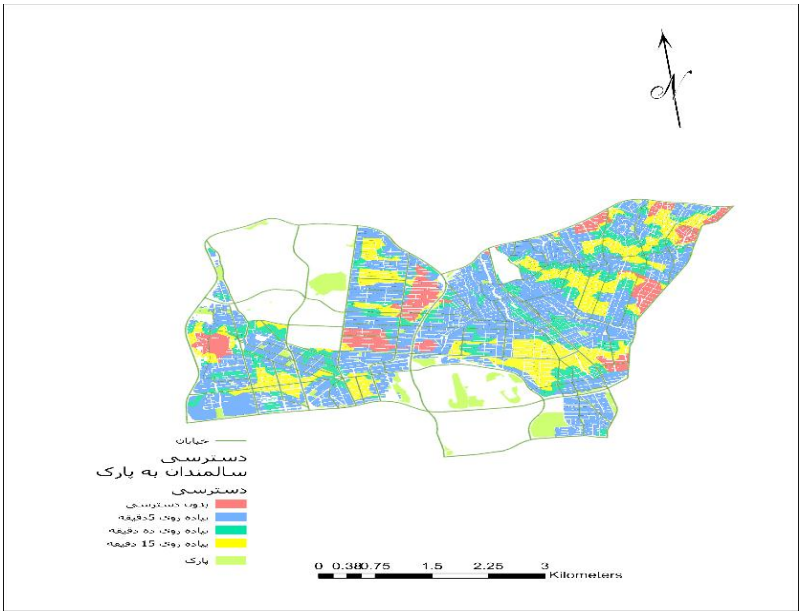
مطابق شکل‌های ۶، ۷ و ۸، بلوک‌های دارای سطح دسترسی بالاتر با ارتفاع بیشتر و رنگ آبی نمایش داده شده‌اند؛ درحالی‌که بلوک‌های دارای دسترسی محدود یا فاقد پوشش مناسب با ارتفاع کمتر و طیف رنگی قرمز مشخص شده‌اند. این شیوه بازنمایی امکان درک سریع الگوهای فضایی دسترسی را فراهم می‌کند و نواحی برخوردار و کم‌برخوردار را به‌صورت همزمان در محیط سه‌بعدی نمایش می‌دهد.



شکل شماره ۷: نمایش سه‌بعدی دسترسی بزرگسالان به پارک

Figure 7: 3D Visualization of Adults' Accessibility to Urban Parks

منبع: نگارندگان: ۱۴۰۴



شکل شماره ۸: نمایش سه‌بعدی دسترسی سالمندان به پارک

Figure 8: 3D Visualization of Elderly Accessibility to Urban Parks

منبع: نگارندگان: ۱۴۰۴

نتایج حاصل از مدل سه‌بعدی با یافته‌های جدول ۱ و تحلیل‌های شبکه همخوانی چشمگیری دارد؛ به‌گونه‌ای که نواحی دارای سرانه بالاتر فضای سبز و دسترسی مناسب‌تر، در مدل سه‌بعدی به‌صورت خوشه‌هایی از بلوک‌های مرتفع و با رنگ‌های مطلوب‌تر مشاهده می‌شوند. در مقابل، بخش‌هایی از نواحی ۳ و ۵ که دارای سرانه پایین فضای سبز و پوشش دسترسی محدود هستند، به‌صورت بلوک‌های کوتاه‌تر و با رنگ‌های هشداردهنده نمایان شده‌اند. این الگو بیانگر تمرکز نسبی کمبود دسترسی در برخی بخش‌های منطقه و وجود نابرابری فضایی در بهره‌مندی از پارک‌های شهری است.

همچنین مقایسه مدل‌های سه‌بعدی مربوط به آستانه‌های زمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه نشان می‌دهد که با افزایش زمان دسترسی، گستره بلوک‌های برخوردار به‌تدریج افزایش می‌یابد و از میزان نواحی محروم کاسته می‌شود؛ با این حال، حتی در بازه ۱۵ دقیقه‌ای نیز برخی خوشه‌های کم‌برخوردار در بخش‌هایی از منطقه قابل مشاهده هستند که نشان می‌دهد افزایش شعاع دسترسی به‌تنهایی قادر به رفع کامل نابرابری‌های فضایی نیست.

یکی از یافته‌های شایان توجه مدل سه‌بعدی آن است که نواحی دارای بیشترین سرانه فضای سبز الزاماً بالاترین سطح دسترسی را نشان نمی‌دهند. این موضوع بیانگر آن است که ساختار شبکه معابر، نحوه پراکنش پارک‌ها و موقعیت استقرار آنها در کنار میزان فضای سبز موجود، نقش تعیین‌کننده‌ای در دسترسی واقعی شهروندان دارند؛ ازاین‌رو، بازنمایی سه‌بعدی نه‌تنها ابزاری برای تجسم نتایج محسوب می‌شود، امکان شناسایی کانون‌های محرومیت فضایی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در زمینه توسعه فضاهای سبز شهری را نیز فراهم می‌کند.

درمجموع، مدل سه‌بعدی تولیدشده تصویری جامع از وضعیت دسترسی به پارک‌های شهری در منطقه ۳ تهران ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که تلفیق تحلیل شبکه در محیط GIS با مدل‌سازی رویه‌ای در CityEngine می‌تواند بستری مناسب برای توسعه سامانه‌های پیشرفته‌تر مدیریت شهری و گامی اولیه در مسیر توسعه دوقلوی دیجیتال شهری باشد.

ارزیابی سناریوی مداخله و احداث پارک جدید

پس از شناسایی نواحی کم‌برخوردار، یک سناریوی مداخله شامل احداث پارک جدید در ناحیه ۳ به شرح زیرطراحی و ارزیابی شد.

برای تعیین مکان بهینه پارک جدید از روش نقطه مرکزی بلوک‌های های فاقد دسترسی در ناحیه‌ای کم‌برخوردار استفاده شد با این روش مرکز هندسی وزن‌دار بلوک‌های بدون دسترسی محاسبه می‌شود و نقطه‌ای را مشخص می‌کند که بیشترین تقاضای برآوردنشده در اطراف آن متمرکز است. نقطه حاصل در مجاورت یک بلوک با کاربری باغ و کشاورزی بود که از منظر امکان تبدیل کاربری و هزینه اجرایی مناسب‌ترین گزینه تشخیص داده شد.

با استفاده از تحلیل شبکه ایزوکرن های جدید با اضافه‌کردن ورودی‌های پارک پیشنهادی به مجموعه پارک‌های موجود محاسبه شد. سرعت پیاده‌روی گروه‌های مختلف کودکان و بزرگسالان و سالمندان برحسب جدول ۲ لحاظ شده است.

با استفاده از تحلیل سناریو اثربخشی احداث پارک جدید برگروهای مختلف جمعیتی ارزیابی شده که نتایج آن در جدول زیر ارائه شده‌اند.

مقایسه شکل (۹) (وضعیت موجود) و شکل (۱۰) (سناریوی مداخله) نشان می‌دهد که پس از استقرار پارک جدید، محدوده‌های فاقد دسترسی به‌طور محسوسی کاهش یافته و حوزه‌های خدمت گسترش یافته‌اند.

نتایج جدول (۵) نیز این بهبود را تأیید می‌کند:

جدول شماره ۵: میزان دسترسی گروه‌های مختلف شهری بعد از سناریوی مداخله

Table 5: Level of Accessibility for Different Urban Groups Following the Intervention Scenario

گروه جمعیتی	بلوک فاقد دسترسی (قبل)	بلوک فاقد دسترسی (بعد)	کاهش تعداد بلوک	درصد کاهش	جمعیت بهره‌مند نفر
کودکان	۹۰	۴۶	۴۴	۴۹	۵۱۸۵
سالمندان	۷۰	۴۵	۴۷	۳۷	۹۴۷۰
بزرگسالان	۸۰	۴۵	۴۴	۴۴	۲۰۰۷۰

منبع: نگارندگان: ۱۴۰۴

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد اگرچه منطقه ۳ تهران از نظر سرانه کلی فضای سبز در وضعیت نسبتاً مناسبی قرار دارد، توزیع فضایی پارک‌ها و سطح دسترسی شهروندان در نواحی مختلف یکسان نیست. تحلیل شبکه وجود شکاف‌های دسترسی به‌ویژه در نواحی ۳ و ۵ را آشکار کرد. نتایج همچنین نشان داد که تلفیق تحلیل شبکه GIS با

دوقلوی دیجیتال مبتنی بر CityEngine امکان شناسایی دقیق مناطق کم‌برخوردار، ارزیابی سناریوهای توسعه و سنجش آثار مداخلات شهری را فراهم می‌کند. سناریوی احداث پارک جدید نیز نشان داد که حتی یک مداخله موضعی می‌تواند به بهبود قابل توجه عدالت فضایی و افزایش دسترسی گروه‌های مختلف جمعیتی به فضاهای سبز شهری منجر شود.

نتایج نشان می‌دهد که احداث پارک پیشنهادی بیشترین تأثیر را بر کودکان داشته است. همچنین ۴۵ بلوک آماری در هر سه گروه جمعیتی با احداث پارک جدید فاقد دسترسی هستند که این امر نشان‌دهنده نیاز به توسعه بیشتر زیرساخت‌های پارک در سایر نقاط ناحیه است.

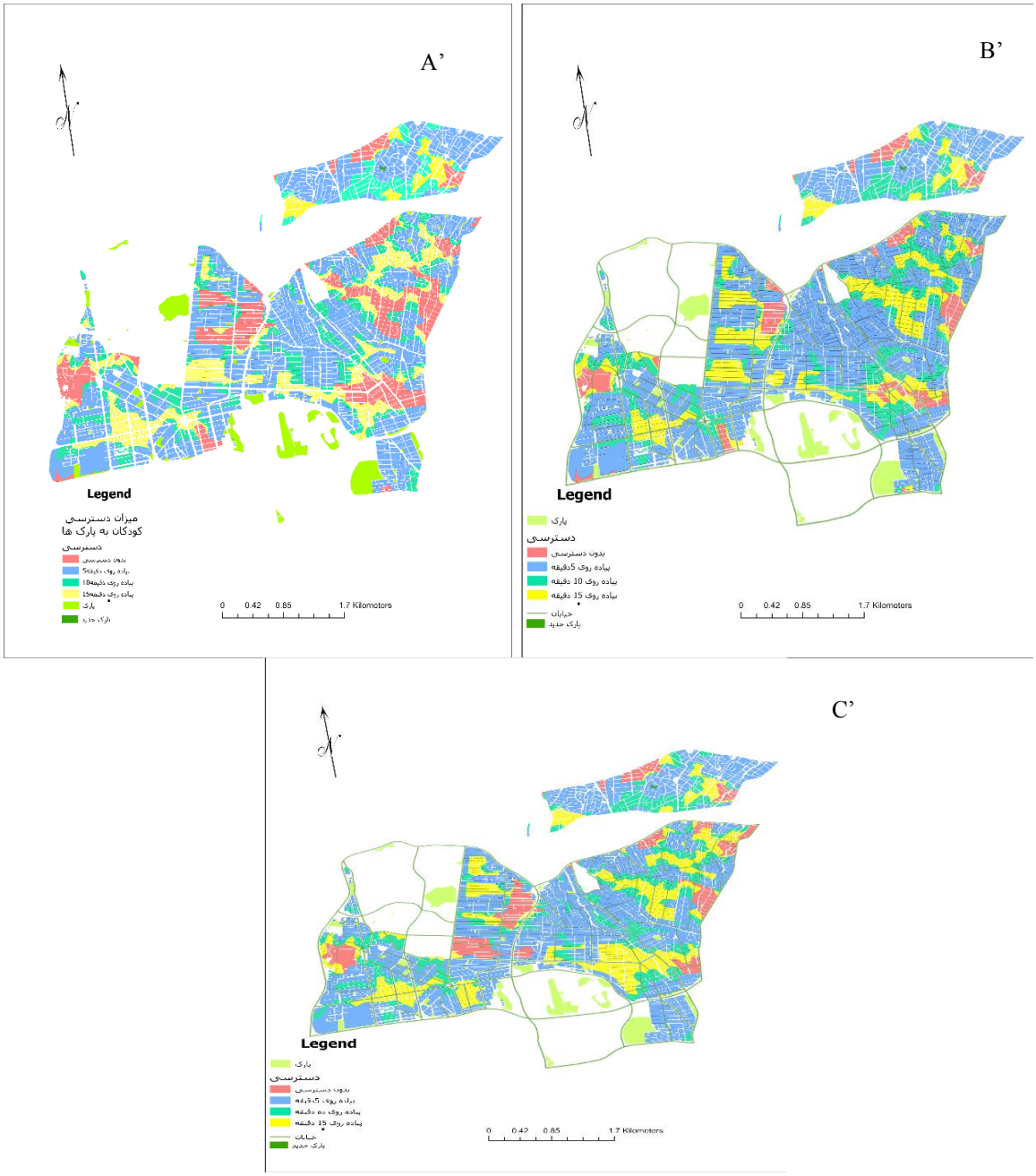


(A)= وضعیت دسترسی بلوک‌های شهری بعد از ۵ دقیقه پیاده‌روی (B)= وضعیت دسترسی بلوک‌های شهری بعد از ۱۰ دقیقه پیاده‌روی (C)= وضعیت دسترسی بلوک‌های شهری بعد از ۱۵ دقیقه پیاده‌روی

شکل شماره ۹: نمایش سه‌بعدی دسترسی بلوک‌های شهری به پارک در وضع موجود

Figure 9: 3D Visualization of Urban Blocks' Access to Parks in the Existing Condition

منبع: نگارندگان: ۱۴۰۴



(A’)= سناریوی دسترسی کودکان به پارک‌های شهری قبل و بعد از احداث پارک جدید (B’)= سناریوی دسترسی بزرگسالان به پارک‌های شهری قبل و بعد از احداث پارک جدید (C’)= سناریوی دسترسی سالمندان به پارک‌های شهری قبل و بعد از احداث پارک جدید

شکل شماره ۱۰: نمایش سه‌بعدی دسترسی بلوک‌های شهری به پارک بعد از احداث پارک پیشنهادی

Figure 10: 3D Visualization of Urban Blocks' Access to Parks After the Construction of the Proposed Park

منبع: نگارندگان: ۱۴۰۴

بحث و بررسی

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که اگرچه منطقه ۳ شهرداری تهران از نظر سرانه کلی فضای سبز در مقایسه با بسیاری از مناطق شهری از وضعیت نسبتاً مناسبی برخوردار است، توزیع فضایی پارک‌ها و میزان دسترسی شهروندان به آنها در سطح نواحی مختلف یکسان نیست. یافته‌ها بیانگر آن است که وجود پارک‌های بزرگ‌مقیاس و منطقه‌ای لزوماً به معنای دسترسی عادلانه تمامی ساکنان به فضای سبز نیست و در برخی نواحی، باوجود برخورداری از فضای سبز قابل توجه، بخش‌هایی از جمعیت برای دسترسی به پارک‌ها ناچار به طی مسافت بیشتری هستند. این موضوع نشان می‌دهد که ارزیابی عدالت فضایی صرفاً براساس شاخص سرانه فضای سبز نمی‌تواند تصویر دقیقی از میزان بهره‌مندی شهروندان ارائه دهد و تحلیل دسترسی مبتنی بر شبکه معابر، معیار مناسب‌تری برای سنجش کارایی توزیع خدمات شهری محسوب می‌شود (Geurs & van Wee, 2004).

بررسی سرانه فضای سبز و الگوی توزیع پارک‌ها نشان داد که نواحی مختلف منطقه ۳ از نظر برخورداری از فضای سبز با تفاوت‌های درخور توجهی مواجه‌اند؛ به‌ویژه ناحیه ۳ با وجود بیشترین جمعیت، کمترین سرانه پارک شهری را داراست؛ درحالی‌که ناحیه ۴ از بیشترین سرانه فضای سبز برخوردار است؛ با این حال، نتایج تحلیل دسترسی نشان داد که بالاترین سطح دسترسی به پارک‌ها متعلق به ناحیه ۲ است و نه ناحیه ۴. این یافته نشان می‌دهد که بیشترین سرانه فضای سبز الزاماً به معنای بهترین دسترسی نیست و نحوه پراکنش پارک‌ها، موقعیت استقرار آنها و ارتباط با شبکه معابر نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان بهره‌مندی واقعی شهروندان از فضاهای سبز دارد. این نتیجه اهمیت استفاده هم‌زمان از شاخص‌های سرانه و تحلیل شبکه را در ارزیابی عدالت فضایی تأیید می‌کند.

نتایج تحلیل شبکه مبتنی بر زمان پیاده‌روی نیز نشان داد که نواحی ۳ و ۵ نسبت به سایر نواحی منطقه از سطح دسترسی پایین‌تری برخوردارند. در بازه زمانی ۵ دقیقه‌ای، بخش درخور توجهی از جمعیت این نواحی در خارج از حوزه‌های خدمت پارک‌ها قرار می‌گیرند و تنها با افزایش زمان دسترسی به ۱۰ و ۱۵ دقیقه، میزان پوشش جمعیتی بهبود می‌یابد. این موضوع بیانگر آن است که اگرچه بخشی از کمبود دسترسی از طریق افزایش زمان سفر جبران می‌شود، دسترسی سریع و روزمره به فضای سبز همچنان با محدودیت مواجه است. از دیدگاه برنامه‌ریزی شهری، دسترسی کوتاه‌مدت به پارک‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا میزان استفاده روزانه شهروندان از فضاهای سبز تا حد زیادی تحت تأثیر فاصله و زمان دسترسی قرار می‌گیرد.

یافته‌های پژوهش همچنین نشان داد که کودکان و سالمندان بیش از سایر گروه‌های جمعیتی تحت تأثیر الگوی استقرار پارک‌ها قرار دارند. این گروه‌ها به دلیل وابستگی بیشتر به دسترسی پیاده و محدودیت‌های حرکتی، بیش از سایرین نیازمند برخورداری از فضاهای سبز در فاصله نزدیک به محل سکونت هستند. نتایج حاصل از تحلیل جمعیتی نشان داد که در برخی بلوک‌های شهری، میزان دسترسی این گروه‌ها به پارک‌های شهری بسیار محدود بوده است. این یافته با نتایج پژوهش‌های پیشین در زمینه نقش فضاهای سبز در سلامت جسمی، روانی و اجتماعی گروه‌های حساس جامعه همخوانی دارد (Amoly et al., 2014Hand et al., 2017 ;).

مطالعات انجام‌شده در شهرهایی مانند لندن، بارسلونا، ملبورن و سنگاپور نیز نشان داده‌اند که برخورداری از سرانه مناسب فضای سبز الزاماً به معنای دسترسی عادلانه شهروندان به این خدمات نیست و الگوی توزیع فضایی، ساختار شبکه معابر و موقعیت استقرار فضاهای سبز نقش تعیین‌کننده‌ای در بهره‌مندی واقعی ساکنان دارند؛ ازاین‌رو، مسئله عدالت فضایی در دسترسی به فضاهای سبز به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی برنامه‌ریزی شهری پایدار در کلان‌شهرهای معاصر شناخته می‌شود و نتایج پژوهش حاضر نیز در همین چارچوب قابل تفسیر است.

یکی از دستاوردهای مهم پژوهش حاضر، تلفیق تحلیل شبکه مبتنی بر GIS با مدل‌سازی سه‌بعدی رویه‌ای در محیط CityEngine بود. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که نتایج را صرفاً در قالب نقشه‌های دوبعدی ارائه می‌کنند، در این پژوهش الگوهای دسترسی در قالب یک مدل سه‌بعدی داده‌محور بازنمایی شد. این رویکرد امکان مشاهده هم‌زمان الگوهای دسترسی، ساختار کالبدی محدوده و پراکنش فضایی نواحی برخوردار و کم‌برخوردار را فراهم ساخت و به شناسایی سریع کانون‌های محرومیت فضایی کمک کرد. همچنین نتایج نشان داد که مدل‌های سه‌بعدی می‌توانند به‌عنوان زیرساختی مناسب برای توسعه سامانه‌های پیشرفته‌تر مدیریت شهری و دوقلوهای دیجیتال شهری استفاده شوند(Schrotter & Hürzeler, 2020; White et al., 2021) .

از دیگر یافته‌های مهم پژوهش، ارزیابی سناریوی احداث پارک جدید در ناحیه ۳ بود. نتایج نشان داد که این مداخله فضایی توانسته است میزان دسترسی جمعیت را به‌طور محسوسی افزایش دهد. این موضوع نشان می‌دهد که مکان‌یابی هدفمند خدمات شهری می‌تواند با هزینه‌ای نسبتاً محدود، تأثیر درخور توجهی بر ارتقای عدالت فضایی داشته باشد؛ بنابراین، استفاده از تحلیل شبکه و مدل‌های سه‌بعدی می‌تواند ابزار مؤثری برای ارزیابی سناریوهای مختلف توسعه شهری و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد باشد.

در مجموع، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که تحقق عدالت فضایی در دسترسی به پارک‌های شهری صرفاً از طریق افزایش کمّی سرانه فضای سبز امکان‌پذیر نیست؛ بلکه مستلزم توزیع متوازن پارک‌ها، بهبود نفوذپذیری شبکه معابر و توجه به نیازهای گروه‌های مختلف جمعیتی است. همچنین یافته‌ها نشان داد که تلفیق تحلیل شبکه با مدل‌سازی سه‌بعدی شهری می‌تواند بستری مناسب برای توسعه سامانه‌های داده‌محور و کاربردهای آتی دوقلوی دیجیتال شهری فراهم آورد.

از منظر فناوری‌های نوین شهری، اهمیت اصلی این پژوهش صرفاً در محاسبه شاخص‌های دسترسی نیست؛ بلکه در ایجاد پیوند میان تحلیل‌های مکانی و بازنمایی سه‌بعدی داده‌محور نهفته است. این رویکرد امکان ارزیابی سناریوهای توسعه شهری، شناسایی سریع نواحی کم‌برخوردار و تولید مدل‌های پایه برای سامانه‌های هوشمند شهری را فراهم می‌کند. در سال‌های اخیر، بسیاری از کلان‌شهرهای جهان به سمت توسعه پلتفرم‌های Digital Twin حرکت کرده‌اند و نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدل‌سازی رویه‌ای مبتنی بر GIS می‌تواند یکی از گام‌های اولیه در این مسیر باشد.

محدودیت‌های پژوهش

این پژوهش با چند محدودیت همراه بوده است؛ نخست، تحلیل‌های جمعیتی براساس داده‌های سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ و اطلاعات موجود در پایگاه داده شهرداری انجام شده است؛ بنابراین، تغییرات جمعیتی سال‌های اخیر

در نتایج منعکس نشده است. همچنین، مدل سه‌بعدی توسعه‌یافته در این پژوهش یک مدل کالبدی داده‌محور مبتنی بر GIS محسوب می‌شود و هنوز به سطح یک دوقلوی دیجیتال کامل که مستلزم ارتباط دوسویه و به‌روزرسانی مستمر داده‌ها است، نرسیده است؛ ازاین‌رو، نتایج پژوهش را باید گامی اولیه در مسیر توسعه کاربردهای دوقلوی دیجیتال شهری تلقی کرد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تحلیل دسترسی به پارک‌های شهری در منطقه ۳ شهرداری تهران و بررسی ظرفیت تلفیق GIS و مدل‌سازی سه‌بعدی شهری به‌عنوان بستری برای توسعه دوقلوی دیجیتال انجام شد. نتایج نشان داد که باوجود برخورداری منطقه از سرانه نسبتاً مناسب فضای سبز، توزیع فضایی پارک‌ها و میزان دسترسی شهروندان به آنها در سطح نواحی مختلف یکسان نیست و نابرابری‌های فضایی درخور توجهی در بهره‌مندی از فضاهای سبز وجود دارد.

تحلیل شبکه نشان داد که نواحی ۳ و ۵ از پایین‌ترین سطح دسترسی برخوردارند؛ درحالی‌که ناحیه ۲ بهترین وضعیت دسترسی را داراست. همچنین نتایج بیانگر آن بود که بیشترین سرانه فضای سبز الزاماً به معنای بیشترین دسترسی نیست و نحوه پراکنش پارک‌ها و ارتباط آنها با شبکه معابر نقش مهم‌تری در بهره‌مندی واقعی شهروندان ایفا می‌کند. علاوه بر این، کودکان و سالمندان بیش از سایر گروه‌های جمعیتی تحت تأثیر نابرابری‌های فضایی موجود قرار دارند.

نتایج سناریوی احداث پارک جدید نیز نشان داد که مداخلات هدفمند و مبتنی بر تحلیل فضایی می‌توانند موجب افزایش محسوس سطح دسترسی و کاهش نواحی کم‌برخوردار شوند. این موضوع اهمیت استفاده از روش‌های داده‌محور و ابزارهای تحلیل شبکه در مکان‌یابی خدمات شهری را تأیید می‌کند.

از منظر فناورانه، پژوهش حاضر نشان داد که تلفیق تحلیل‌های مکانی GIS با مدل‌سازی سه‌بعدی رویه‌ای در محیط CityEngine می‌تواند بستری مناسب برای تجسم، تحلیل و ارزیابی الگوهای دسترسی فراهم آورد. اگرچه مدل توسعه‌یافته هنوز یک دوقلوی دیجیتال کامل محسوب نمی‌شود، می‌تواند به‌عنوان زیرساخت اولیه توسعه سامانه‌های دوقلوی دیجیتال شهری در حوزه برنامه‌ریزی، مدیریت فضاهای سبز و پشتیبانی از تصمیم‌گیری استفاده شود. در مجموع، حرکت به سوی شهرهای هوشمند و پایدار مستلزم گذار از رویکرد مبتنی بر سرانه خدمات به سمت رویکرد مبتنی بر دسترسی عادلانه، تحلیل فضایی و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین دیجیتال است.

منابع

شهرداری تهران (۱۴۰۲). *گزارش آمار و اطلاعات منطقه ۳*. معاونت برنامه‌ریزی و توسعه شهری.

References

AlFanatseh, A., & Saqallah, S. (2021). Evaluation of accessibility to public services in the city of Aqaba using geographic information systems. *Journal of Geography and Geology, 13*(2), 17. https://doi.org/10.5539/jgg.v13n2p17

Amoly, E., Dadvand, P., Forns, J., López-Vicente, M., Basagaña, X., Julvez, J., Alvarez-Pedrerol, M., Nieuwenhuijsen, M. J., & Sunyer, J. (2014). Green and blue spaces and behavioral development in Barcelona schoolchildren: The BREATHE Project. *Environmental Health Perspectives, 122*(12), 1351–1358. https://doi.org/10.1289/ehp.1408215

Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., Ouzounis, G., & Portugali, Y. (2012). Smart cities of the future. *The European Physical Journal Special Topics, 214*(1), 481–518. https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3

Bowler, D. E., Buyung-Ali, L. M., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). A systematic review of evidence for the added benefits to health of exposure to natural environments. *BMC Public Health, 10*, 456. https://doi.org/10.1186/1471-2458-10-456

Buyukdemircioglu, M., & Kocaman, S. (2020). Reconstruction and efficient visualization of heterogeneous 3D city models. *Remote Sensing, 12*(13), 2128. https://doi.org/10.3390/rs12132128

Cetin, M. (2015). Determining the bioclimatic comfort in Kastamonu City. *Environmental Monitoring and Assessment, 187*(10), 640. https://doi.org/10.1007/s10661-015-4861-3

Das, D. K. (2024). Exploring the symbiotic relationship between digital transformation, infrastructure, service delivery, and governance for smart sustainable cities. *Smart Cities, 7*(2), 806–835. https://doi.org/10.3390/smartcities7020034

Deng, T., Zhang, K., & Shen, Z.-J. M. (2021). A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities. *Journal of Management Science and Engineering, 6*(2), 125–134. https://doi.org/10.1016/j.jmse.2021.03.003

El Saddik, A. (2018). Digital twins: The convergence of multimedia technologies. *IEEE MultiMedia, 25*(2), 87–92. https://doi.org/10.1109/MMUL.2018.023121167

Escobedo, F. J., Kroeger, T., & Wagner, J. E. (2011). Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution, 159*(8–9), 2078–2087. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.010

Fiľa, M., Schwarczová, L., & Mura, L. (2015). Citizen satisfaction survey as a tool of citizen relationship management of local government in Slovakia. *Serbian Journal of Management, 10*(1), 117–129. https://doi.org/10.5937/sjm10-714

Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. *Journal of Transport Geography, 12*(2), 127–140. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005

Hand, K. L., Freeman, C., Seddon, P. J., Recio, M. R., Stein, A., & van Heezik, Y. (2017). The importance of urban gardens in supporting children's biophilia. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 114*(2), 274–279. https://doi.org/10.1073/pnas.1609588114

Haq, S. M. A. (2011). Urban green spaces and an integrative approach to sustainable environment. *Journal of Environmental Protection, 2*(5), 601–608. https://doi.org/10.4236/jep.2011.25069

Klaufus, C., van Lindert, P., van Noorloos, F., & Steel, G. (2017). All-inclusiveness versus exclusion: Urban project development in Latin America and Africa. *Sustainability, 9*(11), 2038. https://doi.org/10.3390/su9112038

Kothencz, G., Kolcsár, R., Cabrera-Barona, P., & Szilassi, P. (2017). Urban green space perception and its contribution to well-being. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 14*(7), 766. https://doi.org/10.3390/ijerph14070766

Levine, N. M., & Spencer, B. F., Jr. (2022). Post-earthquake building evaluation using UAVs: A BIM-based digital twin framework. *Sensors, 22*(3), 873. https://doi.org/10.3390/s22030873

Lipp, M., Specht, M., Lau, C., Wonka, P., & Müller, P. (2019). Local editing of procedural models. *Computer Graphics Forum, 38*(2), 13–25. https://doi.org/10.1111/cgf.13627

Mihoković, V., & Zalovic, V. (2020). Establishing the utility charges spatial database using digital twin technology. In *2020 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)* (pp. 437-441). IEEE. https://doi.org/10.23919/MIPRO48935.2020.9245407

Mohammadi, M., Rashidi, M., Mousavi, V., Karami, A., Yu, Y., & Samali, B. (2021). Quality evaluation of digital twins generated based on UAV photogrammetry and TLS: Bridge case study. *Remote Sensing, 13*(17), 3499. https://doi.org/10.3390/rs13173499

Müller, P., Zeng, G., Wonka, P., & Van Gool, L. (2007). *Image-based procedural modeling of facades*. *ACM Transactions on Graphics, 26*(3), 85. https://doi.org/10.1145/1276377.1276484

Orselli, E., Bayrakci, E., & Kahraman, S. (2017). Citizen satisfaction with municipal services: The case of Konya. *Global Journal of Sociology: Current Issues, 7*(1), 24–33. https://doi.org/10.18844/gjs.v7i1.2366

Peris-Ortiz, M., Bennett, D. R., & Pérez-Bustamante Yábar, D. (Eds.). (2017). *Sustainable smart cities: creating spaces for technological, social and business development*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40895-8

Praharaj, S., & Han, H. (2019). Cutting through the clutter of smart city definitions: A reading into the smart city perceptions in India. *City, Culture and Society, 18*, 100289. https://doi.org/10.1016/j.ccs.2019.05.005

Qian, C., Liu, X., Ripley, C., Qian, M., Liang, F., & Yu, W. (2022). Digital twin—Cyber replica of physical things: Architecture, applications and future research directions. *Future Internet, 14*(2), 64. https://doi.org/10.3390/fi14020064

Redelinghuys, A. J. H., Basson, A. H., & Kruger, K. (2020). A six-layer architecture for the digital twin: A manufacturing case study implementation. *Journal of Intelligent Manufacturing, 31*(6), 1383–1402. https://doi.org/10.1007/s10845-019-01516-6

Roberts, H. V. (2017). Using Twitter data in urban green space research: A case study and critical evaluation. *Applied Geography, 81*, 13–20. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.02.008

Schrotter, G., & Hürzeler, C. (2020). The digital twin of the city of Zurich for urban planning. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, 88*(1), 99–112. https://doi.org/10.1007/s41064-020-00092-2

Shahat, E., Hyun, C. T., & Yeom, C. (2021). City digital twin potentials: A review and research agenda. *Sustainability, 13*(6), 3386. https://doi.org/10.3390/su13063386

Shirowzhan, S., Tan, W., & Sepasgozar, S. M. E. (2020). Digital twin and CyberGIS for improving connectivity and measuring the impact of infrastructure construction planning in smart cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 9*(4), 240. https://doi.org/10.3390/ijgi9040240

Smelik, R. M., Tutenel, T., Bidarra, R., & Beneš, B. (2014). A survey on procedural modelling for virtual worlds. *Computer Graphics Forum, 33*(6), 31–50. https://doi.org/10.1111/cgf.12276

Tehran Municipality (1402). *Report on statistics and information for Region 3*. Deputy for Urban Planning and Development. https://www.tehran.ir [In Persian]

Teixeira, A. F., Gonçalves, M. J. A., & Taylor, M. de L. M. (2021). How higher education institutions are driving to digital transformation: A case study. *Education Sciences, 11*(10), 636. https://doi.org/10.3390/educsci11100636

White, G., Zink, A., Codecá, L., & Clarke, S. (2021). A digital twin smart city for citizen feedback. *Cities, 110*, 103064. https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103064

Yigitcanlar, T., Xia, B., Cortese, T. T. P., & Sabatini-Marques, J. (2024). City 4.0: Digital transformation of urban settlements. *Sustainability, 16*(2), 671. https://doi.org/10.3390/su16020671

Zhang, X., Shehata, A., Benes, B., & Aliaga, D. G. (2021). Automatic deep inference of procedural cities from global-scale spatial data. *ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems, 7*(2), 1–28. https://doi.org/10.1145/3423422