

Review and Optimization of the Best Land-use Arrangement from an Urban Transportation Perspective Using Metaheuristic Algorithms in a Traffic Simulation Model: A study Area the Central Area of Tabriz City

Abolfazl Ghanbari ¹ , Abolfazl Namni ² 

1. (Corresponding Author) *Department of RS & GIS, Faculty of Planning & Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran*
Email: a_ghanbari@tabrizu.ac.ir

2. *Geomorphology and Climatology Department, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran*

Email: abolfazlnameni73@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article History:

Received:

27 December 2025

Received in revised form:

5 March 2026

Accepted:

29 March 2026

Available online:

11 May 2026

Keywords:

Land-use Optimization,
Traffic Congestion,
Genetic Algorithm,
Particle Swarm
Optimization,
Tabriz City.

ABSTRACT

The continuous increase in intra-urban travel demand and the concentration of commercial, service, and administrative activities has intensified traffic congestion in city centers, reduced road network efficiency, and exacerbated environmental impacts. Under such conditions, revising land-use allocation patterns and employing advanced optimization techniques can play a crucial role in improving urban transportation system performance. This study aims to develop an optimized model for reducing traffic congestion through land-use management in the central district of Tabriz, Iran. This area is characterized by high population density, a strong concentration of commercial and administrative functions, and a strategic position within the city's spatial structure, making it one of the most critical traffic hotspots in Tabriz. In this research, the VISSIM microsimulation platform was used to model and evaluate urban transportation network performance under different land-use scenarios. In addition, metaheuristic algorithms, including Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO), were applied to identify optimal land-use allocation and spatial configuration patterns. The evaluation of the results was conducted utilizing key performance indicators such as travel time, delay, and the level of service (LOS) of road segments. The findings indicate that the proposed model significantly improves transportation network performance and reduces traffic congestion compared to the existing situation. Moreover, the employed algorithms demonstrated strong convergence capability and stability, providing efficient and reliable solutions. Overall, the results suggest that integrating spatial data, traffic microsimulation, and optimization algorithms can provide an effective framework for integrated land-use and transportation management and support the achievement of sustainable urban development goals.

Cite this article: Ghanbari, A., & Namni, A. (2026). Review and Optimization of the Best Land-use Arrangement from an Urban Transportation Perspective Using Metaheuristic Algorithms in a Traffic Simulation Model: A study Area the Central Area of Tabriz City. *Geographical Urban Planning Research Quarterly*, 14 (1), 135-154.
<http://doi.org/10.22059/jurbangeo.2025.394085.2059>



© The Author (s)

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Rapid urbanization and continuous population growth in cities over recent decades have created increasingly complex challenges for urban planners, particularly in the fields of land-use allocation and transportation system management. These challenges are especially pronounced in developing countries, where unplanned urban expansion, poor infrastructure coordination, and rapid motorization have resulted in severe traffic congestion, longer travel times, environmental degradation, and declining urban livability (Norouzi, 2022). Consequently, the integration of land-use planning and transportation systems has become a critical requirement for achieving sustainable urban development (Verma et al., 2016).

Land is one of the most fundamental components of urban systems, playing a decisive role in shaping ecological balance, economic productivity, and social interactions (Koko et al., 2023). However, accelerated urban expansion and uncontrolled spatial development have significantly reduced available land resources and intensified competition among different land uses (Phan et al., 2020; Long, 2022; Besser & Hamed, 2021). According to global projections, approximately 68% of the world's population will reside in urban areas by 2050 (United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2019), which will further intensify pressure on urban infrastructure and transportation systems.

These demographic and spatial transformations have led to substantial changes in land use/land cover (LULC) patterns, making it essential to continuously monitor, model, and predict these dynamics employing advanced analytical tools (Xu et al., 2022; Munthali et al., 2020). In this regard, modern geospatial technologies such as Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing have provided unprecedented capabilities for analyzing spatial patterns and guiding urban development strategies. Furthermore, emerging mobility datasets derived from digital platforms such as SafeGraph and CARTO enable researchers to capture real-world travel behavior and integrate it into urban modeling frameworks.

In parallel with data-driven approaches, optimization techniques have gained increasing attention in urban studies. These methods allow researchers to identify efficient land-use spatial configurations that minimize negative transportation outcomes while improving accessibility and network performance (Coello & Montes, 2002). Among these techniques, metaheuristic algorithms inspired by biological, physical, and evolutionary processes have proven highly effective in solving complex, nonlinear, and high-dimensional urban optimization problems (Mirjalili et al., 2014).

Metaheuristic approaches such as Genetic Algorithms (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Ant Colony Optimization, and other swarm intelligence methods are widely used in urban planning due to their flexibility and robustness in exploring large solution spaces (Mehrabian & Lucas, 2006). These algorithms are particularly useful for land-use optimization problems, where multiple conflicting objectives such as minimizing congestion, reducing travel distance, and improving service accessibility should be simultaneously addressed.

In this study, a hybrid optimization framework is developed to optimize land-use distribution in the central district of Tabriz, Iran. The model integrates spatial land-use data with microscopic traffic simulation outputs to evaluate the impact of different land-use configurations on urban transportation performance. The primary objective is to identify an optimal or near-optimal spatial arrangement of land uses that minimizes traffic congestion and improves overall network efficiency.

The proposed framework is designed to capture the bidirectional relationship between land-use patterns and transportation flows. While land use influences travel demand, transportation accessibility also shapes land-use development patterns. Therefore, an integrated modeling approach is necessary to accurately represent urban dynamics. The results aim to contribute to sustainable urban planning policies and provide decision-makers with a robust analytical tool for managing urban growth.

Methodology

This research is classified as applied research in terms of purpose and is based on computational modeling, simulation, and optimization techniques. The study adopts a quantitative and descriptive approach that integrates spatial data analysis, traffic simulation, and metaheuristic optimization techniques.

Study Area and Data Collection

The study focuses on Tabriz's District 8, which represents one of the most congested and strategically significant urban areas due to its concentration of commercial, administrative, and historical land uses. The area is characterized by high population density and intense traffic demand.

Spatial datasets used in this study include land-use maps obtained from the Municipality of Tabriz and road network data extracted from OpenStreetMap (OSM). These datasets were processed and integrated into a GIS environment for further analysis and modeling.

Traffic Simulation Model

The VISSIM microscopic traffic simulation software was employed to evaluate transportation performance under different land-use scenarios. Microscopic simulation allows detailed modeling of individual vehicle behavior, including acceleration, lane-changing, car-following, and route-choice decisions.

The simulation model incorporates three levels of traffic representation: macroscopic, mesoscopic, and microscopic. Among these, microscopic simulation is selected due to its high accuracy in representing real-world traffic dynamics.

Vehicles are categorized into private and public transportation types, including taxis, buses, and emergency vehicles. Additionally, traffic demand is classified into high, medium, and low intensity groups. Peak-hour traffic conditions (morning and evening peaks) are also incorporated to ensure realistic modeling.

The performance of the transportation system is evaluated utilizing two key indicators: Vehicle Miles Traveled (VMT) and Vehicle Hours Traveled (VHT). These indicators provide quantitative measures of travel efficiency and system performance (Hillier, 1996).

Optimization Framework

In this study, two metaheuristic algorithms—Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO)—are employed to optimize land-use allocation. The optimization problem is formulated as a multi-objective system with the following purposes:

- minimizing traffic congestion,
- reducing vehicle miles traveled (VMT),
- improving the level of service (LOS),
- Optimizing the spatial distribution of trips,

In the GA framework, the urban land-use structure is encoded as chromosomes, where each gene represents a land-use parcel. An initial population is generated randomly, and each individual is evaluated using the traffic simulation model.

The fitness function is defined based on VMT and VHT values obtained from simulation outputs. The best-performing individuals are selected as parents, and genetic operators such as crossover and mutation are applied to generate new solutions. The evolutionary process continues until convergence criteria are satisfied.

Stopping Criteria

The algorithm terminates when stability in the objective function is observed. Specifically, after 100 iterations, the objective function values from the final 25 iterations are compared to assess stability. If no significant improvement is detected, the algorithm is stopped and the best solution is selected as the final output.

Results and Discussion

The simulation results indicate that the proposed optimization model significantly improves urban transportation performance in the study area. The integration of land-use data with microscopic traffic simulation enables a detailed analysis of spatial and temporal traffic patterns.

The optimized land-use configuration leads to a noticeable reduction in travel distances and traffic congestion levels. The results indicate that residential, commercial, and industrial land uses play the most influential role in shaping traffic demand patterns, with commercial land uses generating the highest level of trip attraction.

The GA-based optimization process demonstrates strong convergence behavior, improving system performance from approximately 35% in the initial state to around 85% in the optimized state. This indicates the robustness and efficiency of the proposed model in handling complex spatial optimization problems.

In early iterations, significant modifications are observed in land-use allocation, reflecting the exploratory nature of the algorithm. However, in later iterations, the system gradually stabilizes, indicating convergence toward an optimal or near-optimal solution. Residential and commercial land uses exhibit the highest frequency of relocation, confirming their strong influence on traffic generation.

A comparison with previous studies (e.g., Litman, 2011; Zegras, 2004) confirms that spatial land-use configuration has a significant impact on travel behavior and transportation efficiency. Similar to findings reported by Nasiri et al. (2019) and Scott & Rajabifard (2017), the results demonstrate that integrated land-use transportation models can substantially improve urban system performance.

Unlike many previous studies that rely on macro-level modeling approaches, this research employs microscopic traffic simulation, which provides higher accuracy and more realistic behavioral representation. Furthermore, the combined use of GA and PSO improves convergence speed and solution quality compared to single-algorithm approaches.

Conclusion

This study demonstrates that metaheuristic optimization techniques, particularly Genetic Algorithms and Particle Swarm Optimization, can significantly enhance urban land-use planning and transportation efficiency. The proposed model successfully reduces travel distances and improves traffic flow performance in the central district of Tabriz.

The results confirm that spatial reconfiguration of land-use patterns can lead to substantial improvements in transportation system efficiency. The optimization process achieved a performance improvement from approximately 35% to 85%, demonstrating strong convergence and model effectiveness.

However, the effectiveness of the model is influenced by the quality of input data and existing urban infrastructure conditions. In developing cities such as Tabriz, non-standardized infrastructure may limit the full realization of optimal land-use configurations. Despite these limitations, the proposed model remains robust and adaptable to different urban contexts.

Future research should focus on integrating machine learning techniques with metaheuristic optimization methods to enhance predictive accuracy and model adaptability. Additionally, incorporating socio-economic variables and long-term temporal dynamics could further improve the robustness of urban planning models.

Overall, the findings provide a comprehensive framework for integrating land-use planning and transportation modeling, contributing to sustainable urban development and improved decision-making processes.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

The authors contributed to this manuscript in clearly defined and distinct roles. The first author was responsible for research design, data collection, data analysis, and drafting the initial version of the manuscript. The second author contributed to strengthening the theoretical framework, interpreting the results, conducting the scientific review, and performing the final editing of the manuscript.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors state that no financial support was received from any individual or organization for conducting this research.

بررسی و ایجاد بهترین چینش کاربری اراضی از دید حمل‌ونقل شهری با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری در شبیه‌سازی ترافیکی در منطقه مرکزی شهر تبریز

ابوالفضل قنبری^۱ ✉، ابوالفضل نامنی^۲ 

۱- نویسنده مسئول، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: a_ghanbari@tabrizu.ac.ir
۲- گروه ژئومورفولوژی و آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. رایانامه: abolfazlnameni73@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	افزایش مستمر سفرهای درون‌شهری و تمرکز فعالیت‌های تجاری، خدماتی و اداری در هسته‌های مرکزی شهرها، موجب تشدید تراکم ترافیک، کاهش کارایی شبکه معابر و افزایش پیامدهای زیست‌محیطی شده است. در چنین شرایطی، بازنگری در الگوی استقرار کاربری اراضی و بهره‌گیری از روش‌های نوین بهینه‌سازی می‌تواند نقش مؤثری در بهبود عملکرد سیستم حمل‌ونقل شهری ایفا کند. پژوهش حاضر با هدف ارائه یک مدل بهینه برای کاهش تراکم ترافیک از طریق ساماندهی کاربری اراضی، در منطقه مرکزی شهر تبریز انجام شده است. این محدوده به دلیل تراکم بالای جمعیت، تمرکز مراکز تجاری و اداری و جایگاه راهبردی خود در ساختار فضایی شهر، از مهم‌ترین کانون‌های ترافیکی تبریز محسوب می‌شود. در این تحقیق، به‌منظور شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد شبکه حمل‌ونقل، از نرم‌افزار VISSIM استفاده شد و سناریوهای مختلف مدیریت و توزیع کاربری اراضی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک (GA) و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای یافتن بهترین الگوی تخصیص و استقرار کاربری‌ها به کار گرفته شدند. ارزیابی نتایج بر اساس شاخص‌هایی نظیر زمان سفر، میزان تأخیر و سطح سرویس معابر انجام شد. یافته‌ها نشان داد که مدل پیشنهادی در مقایسه با وضعیت موجود، موجب بهبود معنادار عملکرد شبکه حمل‌ونقل و کاهش تراکم ترافیکی شده است. علاوه بر این، الگوریتم‌های به‌کاررفته از توان همگرایی و پایداری مناسبی برخوردار بوده و راه‌حل‌های کارآمدی ارائه داده‌اند. نتایج پژوهش بیانگر آن است که تلفیق داده‌های مکانی، شبیه‌سازی ترافیکی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌تواند چارچوبی مؤثر برای مدیریت یکپارچه کاربری زمین و حمل‌ونقل و تحقق اهداف توسعه پایدار شهری فراهم سازد.
واژگان کلیدی: بهینه‌سازی کاربری اراضی، تراکم ترافیک، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات، شهر تبریز.	

استناد: قنبری، ابوالفضل و نامنی، ابوالفضل. (۱۴۰۵). بررسی و ایجاد بهترین چینش کاربری اراضی از دید حمل‌ونقل شهری با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری در شبیه‌سازی ترافیکی در منطقه مرکزی شهر تبریز. *پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری*، ۱۴ (۱)، ۱۵۴-۱۳۵.

<http://doi.org/10.22059/jurbangeo.2025.394085.2059>

مقدمه

رشد پرشتاب شهرنشینی و افزایش جمعیت شهری در دهه‌های اخیر، پیچیدگی‌های متعددی را در زمینه‌ی برنامه‌ریزی کاربری اراضی و مدیریت سیستم‌های حمل‌ونقل در شهرها به‌وجود آورده است. این تحولات، به ویژه در کشورهای در حال توسعه همچون ایران، چالش‌های متعددی نظیر افزایش بار ترافیکی، طولانی شدن زمان سفر، کاهش کیفیت زندگی و تشدید آلودگی هوا را در پی داشته‌اند (Norouzi, 2022). در چنین شرایطی، مدیریت یکپارچه‌ی کاربری اراضی و حمل و نقل، به مثابه ضرورتی حیاتی، باید در دستور کار سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری قرار گیرد (Verma et al., 2016).

زمین، به عنوان یکی از ارکان بنیادین نظام طبیعی، نقشی کلیدی در فرآیند توسعه‌ی اکولوژیکی و زندگی انسانی ایفا می‌کند (Koko et al., 2023). با این حال، در پی افزایش بی‌سابقه‌ی جمعیت شهری و گسترش فیزیکی شهرها، منابع زمینی به طرز چشم‌گیری محدود شده‌اند (Phan et al., 2020; Long, 2022; Besser & Hamed, 2021). برآوردها نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰ بیش از ۶۸ درصد جمعیت جهان در نواحی شهری ساکن خواهند شد (دپارتمان امور اقتصادی و اجتماعی سازمان ملل متحد، ۲۰۱۹). روندی که تغییرات عمده‌ای در الگوهای فضایی-زمانی کاربری زمین (LULC) ایجاد کرده و لزوم پایش و تحلیل این پویایی‌ها را دوچندان ساخته است (Xu et al., 2020; Munthali et al., 2020).

در این راستا، فناوری‌های نوین نظیر سنجش از دور و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، ابزارهای قدرتمندی را در اختیار برنامه‌ریزان قرار داده‌اند تا بتوانند توزیع کاربری‌ها را با دقت بالا رصد و هدایت کنند (Norouzi, 2022). هم‌زمان، داده‌های حرکتی کاربران که از طریق تلفن‌های همراه و منابعی مانند SafeGraph و Carto در دسترس قرار گرفته‌اند، امکان تحلیل الگوهای سفر در مقیاس‌های کلان را فراهم ساخته‌اند. این داده‌ها ظرفیت مناسبی برای همگام‌سازی الگوهای توسعه فضایی با جریان‌های واقعی ترافیکی به شمار می‌آیند.

در کنار این داده‌های عملیاتی، رویکردهای مدل‌سازی و بهینه‌سازی نیز نقش فزاینده‌ای در تحلیل ساختار فضایی شهرها ایفا می‌کنند. مدل‌های بهینه‌سازی، با بهره‌گیری از داده‌های واقع‌گرایانه و الگوریتم‌های محاسباتی، می‌توانند توزیع بهینه‌ی کاربری اراضی را شناسایی کرده و اثرات آن را بر سیستم حمل‌ونقل شهری به صورت نظام‌مند بررسی نمایند (Coello & Montes, 2002).

در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های فراابتکاری-الهام‌گرفته از رفتارهای طبیعی، زیستی یا تکاملی- به عنوان روشی کارآمد برای حل مسائل پیچیده‌ی شهری شناخته شده‌اند (Mirjalili et al., 2014). این الگوریتم‌ها با شبیه‌سازی منطق جست‌وجوی هوشمند در فضای مسئله، توانایی یافتن راه‌حل‌های نزدیک به بهینه برای مسائل با ابعاد و متغیرهای متعدد را دارند. یکی از کاربردهای برجسته‌ی این الگوریتم‌ها، بهینه‌سازی چینش فضایی کاربری‌ها به‌منظور کاهش ازدحام، تأخیر و افزایش سطح سرویس در شبکه‌های حمل‌ونقل شهری است (Moran, 2023; Mehrabian & Lucas, 2006).

در پژوهش حاضر، یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم فراابتکاری توسعه یافته که هدف آن بازآرایی فضایی کاربری اراضی در منطقه‌ی مرکزی شهر تبریز با رویکرد حمل‌ونقل‌محور است. در این مدل، ارتباط دوسویه‌ی میان الگوی کاربری‌ها و جریان‌های ترافیکی لحاظ شده و اثرات تغییر آرایش فضایی بر تراکم، تأخیر و سطح سرویس معابر مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌منظور آزمون کارایی مدل پیشنهادی، خروجی‌ها در یک شبیه‌ساز ترافیکی پیاده‌سازی شده‌اند تا میزان اثربخشی آن در کاهش گره‌های ترافیکی و بهبود کیفیت حرکت در شبکه بررسی شود. نتایج این تحقیق

می‌تواند به تدوین سیاست‌های بهینه در حوزه‌ی توسعه فضایی و حمل‌ونقل پایدار شهری کمک شایانی نماید و مبنایی برای تصمیم‌سازی در سطوح محلی و منطقه‌ای فراهم سازد.

در حال حاضر، خودروهای شخصی همچنان سهم عمده‌ای از سفرهای شهری را به خود اختصاص می‌دهند. مطابق پژوهش‌های انجام‌شده، تعداد سفرهای خودرویی در سال ۲۰۲۵ نسبت به سال ۲۰۰۵، دو برابر شده است؛ روندی که به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه با سرعت بیشتری تحقق یافته است (Verma et al., 2016). در این شرایط، مدیریت کاربری اراضی شهری به عنوان یکی از الزامات اساسی برای مقابله با پیامدهای ناشی از افزایش تقاضای حمل‌ونقل مطرح است.

شهر به عنوان یک سیستم یکپارچه، تحت تأثیر ارتباطات متقابل اجزای آن قرار دارد؛ از این‌رو، هرگونه تغییر در ساختار کاربری اراضی می‌تواند تأثیر مستقیم بر الگوهای سفر و جریان ترافیک داشته باشد. با این حال، توسعه شهری متراکم ضمن تشدید تراکم ترافیک، آلودگی هوا را نیز افزایش می‌دهد. بنابراین، برنامه‌ریزی کاربری زمین باید در هماهنگی با برنامه‌ریزی حمل‌ونقل صورت گیرد تا از بروز مشکلات جدی در شبکه معابر جلوگیری شود (Anderson et al., 2017). مطالعات نشان داده‌اند که تغییرات در مکان‌یابی کاربری‌ها و نحوه توزیع فضایی آن‌ها، تأثیر مستقیمی بر میزان سفر، وسیله سفر انتخابی و مدت‌زمان آن دارد (Scott & Rajabifard, 2017; Nasiri et al., 2019). الگوی پراکنده توسعه، با تکیه بر خودروهای شخصی، منجر به افزایش وابستگی به حمل‌ونقل خصوصی شده، درحالی‌که توسعه یکپارچه می‌تواند باعث تقویت حمل‌ونقل عمومی و کاهش تقاضای سفر خودرویی شود (Soltani, 2017).

در شهر تبریز، تمرکز فعالیت‌های تجاری در بافت تاریخی و ضعف عملکردی شبکه معابر منجر به بروز مشکلات شدید ترافیکی شده است. چیدمان نامناسب کاربری‌های جاذب سفر، نظیر کاربری‌های تجاری، بار ترافیکی فراتر از ظرفیت شبکه را تحمیل کرده است. در این پژوهش، با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، بهینه‌ترین الگوی توزیع کاربری اراضی با هدف کاهش تراکم ترافیک و بهبود ساختار حمل‌ونقل شهری شبیه‌سازی خواهد شد.

رشد بی‌رویه استفاده از وسایل نقلیه موتوری، به‌ویژه خودروهای شخصی، یکی از چالش‌های اساسی شهرهای امروزی است که موجب افزایش تراکم ترافیک، آلودگی هوا و آلودگی صوتی شده و در نهایت به کاهش سطح سلامت عمومی و افت کیفیت زندگی شهروندان می‌انجامد. در گذشته، افزایش ظرفیت شبکه‌های ترافیکی به عنوان راهکاری برای کنترل تراکم پیشنهاد می‌شد، اما این روش، علی‌رغم کاهش موقتی بار ترافیکی، در بلندمدت موجب افزایش تمایل به استفاده از خودروهای شخصی و در نتیجه، تشدید مشکلات حمل‌ونقل شهری شده است (Roscia, 2013).

در فرایندهای نوین برنامه‌ریزی شهری و تهیه طرح‌های کاربری زمین، ارزیابی الگوی فضایی شهر به عنوان یکی از مراحل اساسی در اصلاح ساختار شهری و کاهش خطاهای برنامه‌ریزی مورد توجه قرار گرفته است. این ارزیابی‌ها موجب انطباق هرچه بیشتر برنامه‌ها و طرح‌ها با شرایط زمانی و مکانی شده و نقش مهمی در مدیریت شهری ایفا می‌کنند (پوراحمد و همکاران، ۱۳۹۳). بررسی نسبت کاربری‌های شهری و نحوه تغییرات آن‌ها در گذر زمان، امکان پیش‌بینی روندهای آتی را فراهم ساخته و اقدامات مقتضی را برای جلوگیری از بحران‌های احتمالی امکان‌پذیر می‌سازد. از آنجاکه تغییرات کاربری‌های شهری بیانگر نحوه تعامل انسان با محیط است، مدل‌سازی آن می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های کلان و برنامه‌ریزی‌های شهری نقش مؤثری داشته باشد.

با توجه به اهمیت نحوه توزیع کاربری‌ها در مدیریت ترافیک شهری، بهینه‌سازی کاربری اراضی به عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش حجم ترافیک، ارتقای کیفیت زندگی و بهبود سلامت عمومی مطرح می‌شود. از این‌رو، پژوهش حاضر با

تأکید بر رابطه بین کاربری اراضی و وضعیت حمل‌ونقل و ترافیک شهری، به بررسی الگوهای بهینه در منطقه مورد مطالعه پرداخته و راهکارهایی برای بهبود وضعیت ترافیکی ارائه می‌دهد.

هدف اصلی این پژوهش، «ارائه یک مدل بهینه برای چینش کاربری اراضی شهری با تأکید بر کاهش اثرات منفی حمل‌ونقل» است. در راستای این هدف، اهداف فرعی زیر دنبال می‌شود:

- توسعه یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم فراابتکاری برای چینش کاربری‌ها؛
 - تحلیل تأثیرات مدل پیشنهادی بر کاهش تراکم ترافیکی و بهبود شاخص‌های حمل‌ونقل.
- این پژوهش در تلاش است تا به سؤالات زیر پاسخ دهد:

(۱) آیا مدل پیشنهادی قادر به کاهش تراکم ترافیکی در مناطق پرتراکم شهری است؟

(۲) الگوریتم فراابتکاری مورد استفاده چه مزایایی نسبت به روش‌های سنتی دارد؟

(۳) تأثیر بهینه‌سازی کاربری اراضی بر شاخص‌هایی مانند زمان سفر، حجم تردد و سطح سرویس معابر چگونه است؟

بررسی پیشینه تحقیق، به عنوان بخشی بنیادین از فرآیند پژوهش، زمینه‌ساز درک جایگاه نظری تحقیق حاضر و تبیین تمایز آن با مطالعات پیشین است. تحلیل مطالعات داخلی و بین‌المللی در سه محور اصلی قابل طبقه‌بندی است: (۱) مدل‌سازی کاربری اراضی و حمل‌ونقل، (۲) استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی مکانی، و (۳) تلفیق الگوریتم‌های هوشمند با داده‌های مکانی.

در حوزه تحلیل رابطه کاربری زمین و حمل‌ونقل، مومنی (۱۳۹۵) با بهره‌گیری از برنامه‌ریزی خطی و شاخص ضریب بتا، تأثیر ساختار کاربری زمین بر کیفیت حمل‌ونقل در شهر کرمان را بررسی کرده و ضریب ۰.۴۰۱ را به عنوان شاخصی معنادار گزارش داده است. عزیزیان (۱۳۹۵) نیز با استفاده از مدل AHP، نشان داده است که پیوند یکپارچه میان سیستم حمل‌ونقل و الگوی کاربری زمین، نقش کلیدی در توزیع فعالیت‌های اقتصادی و ارتقاء دسترسی به خدمات شهری ایفا می‌کند. در همین راستا، کاظم‌السعیدی (۱۳۹۶) در شهر مشهد، از طریق برنامه‌ریزی خطی، به این نتیجه رسیده است که عوامل فرهنگی و تاریخی نیز بر نرخ ترافیک تأثیرگذارند، موضوعی که در بسیاری از مدل‌های کمی رایج، مورد غفلت قرار می‌گیرد. پژوهش غلامی بيمرغ و همکاران (۱۳۹۸) با بهره‌گیری از مدل تحلیل شبکه در محیط ArcGIS، نشان داده است که در شهر کاشان، تمرکز بالای کاربری‌ها در مناطق مرکزی منجر به افزایش تراکم ترافیکی شده است.

مطالعات بین‌المللی نیز یافته‌هایی هم‌راستا ارائه کرده‌اند. گاجانجا (۲۰۱۰) در شهر استانبول، با استفاده از مدل چهارمرحله‌ای FMS، بر ضرورت همگام‌سازی توسعه حمل‌ونقل و کاربری زمین تأکید کرده است. لیتمن (۲۰۱۱، ۲۰۱۷) با رویکرد مدل‌سازی سیستمی مبتنی بر GIS، نشان داده است که تغییرات در ساختار کاربری، مستقیماً بر رفتار سفر شهروندان و الگوی جابجایی تأثیر دارد. این مطالعات گواه آن است که تحلیل‌های مکانی و حمل‌ونقلی باید به صورت یکپارچه طراحی و اجرا شوند تا به راهکارهای اجرایی مؤثر منتهی گردند.

در بُعد روش‌شناختی، مطالعاتی چون فهمیا و همکاران (۲۰۱۹)، ممبر و همکاران (۲۰۱۹) و زلینیسکا و همکاران (۲۰۲۰)، بر استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه، به‌ویژه الگوریتم ژنتیک (GA) و روش‌های تخصیص منابع در بهینه‌سازی حمل‌ونقل شهری تأکید کرده‌اند. این پژوهش‌ها، ضمن بهره‌گیری از ابزارهای هوش مصنوعی، تلاش کرده‌اند با طراحی ساختارهای محاسباتی پیچیده، به تخصیص بهینه زمین شهری و کاهش فشار ترافیکی دست یابند. وجه مشترک بیشتر این مطالعات، تمرکز بر معیارهایی چون دسترسی‌پذیری، فاصله، کارایی تخصیص منابع و قابلیت اجرای مدل در محیط GIS بوده است.

همچنین در مطالعه‌ای جامع بر استان ژجیانگ چین، روند تغییرات کاربری زمین در بازه زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۰ تحلیل و برای دو دهه آتی پیش‌بینی‌هایی صورت گرفته است. در این راستا، کوکو (۲۰۲۳) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، طبقه‌بندی شش‌گانه کاربری اراضی و ابزارهای نرم‌افزاری چون TerrSet و مدل PLUS، تغییرات فضایی-زمانی را مدل‌سازی کرده و نشان داده است که سیاست‌های اصلاحی دولت چین از سال ۱۹۷۹، نقش کلیدی در رشد مناطق ساخته‌شده داشته‌اند. تحلیل‌های انجام‌شده در این تحقیق، ترکیبی از عوامل طبیعی (شیب، ارتفاع) و انسانی (جمعیت، GDP، فاصله از مراکز اداری) را به عنوان عوامل مؤثر بر تغییرات فضایی شناسایی کرده‌اند.

جمع‌بندی یافته‌های مطالعات پیشین حاکی از آن است که یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی حمل و نقل و کاربری زمین، به همراه بهره‌گیری از مدل‌های تحلیل مکانی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود کیفیت زندگی شهری، ارتقاء بهره‌وری زیرساخت‌ها و کاهش مشکلات ترافیکی ایفا کند. علاوه بر این، مطالعات مزبور بر متغیرهایی چون تراکم، اختلاط کاربری‌ها، دسترسی، ساختار شبکه ارتباطی و طراحی شهری به عنوان مؤلفه‌های کلیدی در تحلیل رابطه کاربری زمین و ترافیک شهری تأکید دارند.

پژوهش حاضر، ضمن بهره‌گیری از دستاوردهای نظری پیشین، تلاشی است در راستای پاسخ به یکی از شکاف‌های موجود در ادبیات موضوع؛ جایی که تحلیل صرفاً توصیفی روابط فضایی پاسخگوی پیچیدگی‌های واقعی نظام شهری نیست. نوآوری اصلی این تحقیق در سه محور قابل شناسایی است: نخست، استفاده ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم PSO با ساختار ویژه و وزن‌دهی پویا؛ دوم، اعمال مدل به صورت مستقیم در محیط GIS با لحاظ کردن محدودیت‌های سخت برای کاربری‌های غیرقابل جابجایی؛ و سوم، هدف‌گذاری بر کمینه‌سازی مسافت سفر خودروها در سطح شهر، نه صرفاً توزیع کاربری‌ها.

بنابراین، اگرچه پژوهش حاضر نیز مانند مطالعات مشابه، به بررسی رابطه بین ساختار فضایی کاربری اراضی و رفتار ترافیکی می‌پردازد، اما تمایز آن در رویکرد الگوریتمی، سطح تحلیل و ساختار مدل اجرایی آن نهفته است که آن را به ابزاری کاربردی در مدیریت شهری و تصمیم‌سازی برنامه‌ریزان بدل می‌سازد.

از منظر نوآوری، پژوهش حاضر در سه سطح با مطالعات پیشین تمایز دارد:

نخست، ساختار ترکیبی الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات (GA-PSO) به کار رفته در این مطالعه، از یک منطق وزن‌دهی پویا به توابع هدف بهره می‌گیرد که در بسیاری از مدل‌های مشابه اعمال نشده است؛ دوم، برخلاف رویکردهای صرفاً انتزاعی، مدل ارائه‌شده به صورت مستقیم در محیط GIS و بر پایه داده‌های واقعی مکانی - ترافیکی پیاده‌سازی شده است؛

و سوم، محدودیت‌های سخت برای جابجایی‌ناپذیری برخی کاربری‌ها (نظیر خدمات اضطراری و تأسیسات حیاتی)، سناریوهای پیشنهادی مدل را به تصمیمات قابل اجرا و واقع‌گرایانه نزدیک کرده است. این عناصر موجب شده تا الگوریتم توسعه‌یافته، فراتر از شبیه‌سازی صرف، در قالب یک ابزار تصمیم‌یار هوشمند برای بهینه‌سازی ساختار فضایی شهر در راستای کاهش ترافیک، عمل کند.

مبانی نظری

رابطه میان کاربری اراضی و حمل و نقل از موضوعات اساسی در برنامه‌ریزی شهری است که مورد توجه نظریه‌پردازان متعددی قرار گرفته است. مدل‌های کلاسیکی همچون مدل مکان مرکزی کریستالر، مدل حلقوی بورجس و مدل قطاعی هویت، تأثیرات الگوهای توسعه شهری بر توزیع سفرها را بررسی کرده‌اند (Litman, 2011). این مدل‌ها نشان می‌دهند

که تمرکز بالای کاربری‌های تجاری و اداری در یک منطقه می‌تواند موجب افزایش حجم سفرهای درون‌شهری شده و فشار مضاعفی بر شبکه حمل‌ونقل تحمیل کند (Banister, 2005).

در دهه‌های اخیر، پژوهش‌ها بر اهمیت هماهنگی میان برنامه‌ریزی کاربری اراضی و راهبردهای حمل‌ونقل پایدار تأکید کرده‌اند. مطالعاتی مانند زگراس^۱ (۲۰۰۴)، نشان داده‌اند که ادغام این دو حوزه می‌تواند به بهبود پایداری شهری و کاهش تقاضای سفر منجر شود. علاوه بر این، بارسلو^۲ (۲۰۱۰) بر ضرورت توسعه یکپارچه سیستم‌های حمل‌ونقل و توزیع کاربری اراضی تأکید داشته و بیان کرده است که اجرای سیاست‌هایی نظیر توسعه مبتنی بر حمل‌ونقل همگانی^۳ و افزایش تراکم در مراکز شهری می‌تواند نقش مؤثری در کاهش ازدحام ترافیکی ایفا کند.

در حوزه بهینه‌سازی کاربری اراضی، مدل‌های مختلفی برای حل این مسئله ارائه شده‌اند. مدل‌های سنتی نظیر مدل‌های تخصیص زمین مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی و مدل‌های جاذبه‌ای، هرچند در برخی شرایط کاربرد دارند، اما به دلیل عدم لحاظ تعاملات پیچیده میان متغیرهای شهری، در بسیاری از موارد کارایی محدودی از خود نشان می‌دهند (Liang et al., 2018). در مقابل، روش‌های نوین مبتنی بر الگوریتم‌های هوش مصنوعی و فراابتکاری به عنوان رویکردهای جایگزین مورد توجه قرار گرفته‌اند. مطالعات محرابیان و لوکاس^۴ (۲۰۰۶) نشان داده‌اند که استفاده از این الگوریتم‌ها می‌تواند موجب بهبود سطح سرویس معابر و کاهش تأخیر سفر شود. همچنین، پژوهش‌های میرجلیلی^۵ و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر این الگوریتم‌ها را در بهینه‌سازی کاربری اراضی تأیید کرده‌اند.

در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های فراابتکاری مختلفی برای حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی شهری توسعه یافته‌اند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به الگوریتم ژنتیک (Holland, 1977)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (Kennedy & Eberhart, 1995)، الگوریتم مورچگان (Dorigo & Stützle, 2019) و الگوریتم گرگ خاکستری (Mirjalili et al., 2014) اشاره کرد. این الگوریتم‌ها، با الهام از فرایندهای طبیعی مانند انتخاب طبیعی، رفتار گروهی ذرات، مسیریابی مورچه‌ها و شکار گروهی گرگ‌ها، در جستجوی راه‌حل‌های بهینه برای مسائل پیچیده به کار گرفته می‌شوند. یافته‌های مطالعات مختلف نشان داده‌اند که استفاده از این الگوریتم‌ها در بهینه‌سازی کاربری اراضی شهری، می‌تواند به کاهش حجم ترافیک و افزایش کارایی شبکه حمل‌ونقل منجر شود (Mehrabian & Lucas, 2006).

بر این اساس، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از ترکیب این الگوریتم‌ها و شبیه‌سازی ترافیکی، به ارائه چارچوبی علمی برای بهینه‌سازی چینش کاربری اراضی در مناطق پرتراکم شهری می‌پردازد. هدف این مطالعه، دستیابی به یک الگوی بهینه جهت کاهش اثرات منفی حمل‌ونقل و ارتقای پایداری شهری است. در این راستا، متغیرهای پژوهش که چارچوب کلی و مبنای این مطالعه را تشکیل می‌دهند، به صورت دیاگرام در شکل (۱) ارائه شده‌اند.

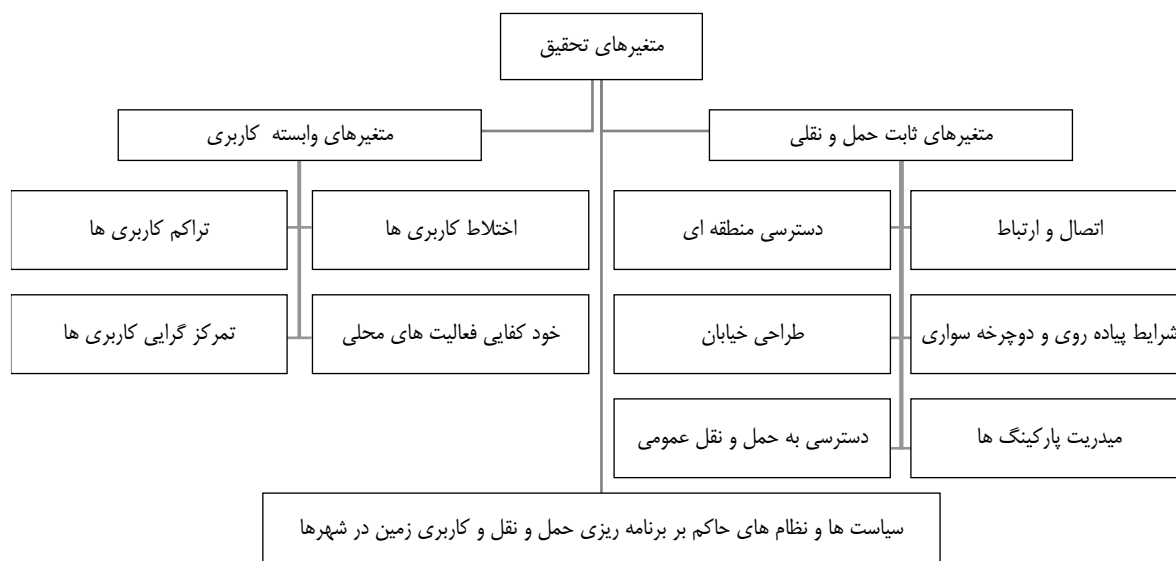
1. Zegras

2. Barceló

3 TOD

4. Mehrabian & Lucas

5. Mirjalili



شکل ۱. متغیرهای تحقیق

روش پژوهش

این پژوهش به لحاظ هدف، در دسته مطالعات کاربردی قرار می‌گیرد و از نظر روش اجرا، مبتنی بر مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی است. در این راستا، برای بهینه‌سازی چینش کاربری اراضی، از الگوریتم‌های فراابتکاری بهره گرفته شده و جهت ارزیابی اثرات مدل پیشنهادی، شبیه‌سازی ترافیکی مورد استفاده قرار گرفته است.

این پژوهش با رویکردی کمی و توصیفی انجام شده و روش گردآوری اطلاعات، با توجه به ماهیت تحقیق، کتابخانه‌ای است. از آنجا که هر روش خود شامل مجموعه‌ای از ابزارها و رویکردهای مختلف می‌باشد، در مراحل مختلف تحقیق، بسته به نیاز و ماهیت پژوهش، از ترکیبی از روش‌ها استفاده شده است. در گام نخست، برای درک عمیق‌تر موضوع، استخراج متغیرها و شاخص‌ها، منابع علمی شامل کتب، مقالات و پژوهش‌های مرتبط مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، داده‌های مربوط به خیابان‌ها و کاربری اراضی منطقه ۸ تبریز، به عنوان داده‌های پایه، گردآوری شد. داده‌های خیابان نیز از پایگاه داده OSM و اطلاعات مربوط به کاربری اراضی از شهرداری تبریز دریافت شده است.

جهت بررسی تأثیرات مدل پیشنهادی، نرم‌افزار شبیه‌سازی ترافیکی VISSIM مورد استفاده قرار گرفته و تغییرات در شاخص‌هایی نظیر زمان سفر^۱، تأخیر شبکه^۲ و سطح سرویس معابر^۳ تحلیل شده است. شبیه‌سازی ترافیک از طریق مدل‌سازی ریاضی مسیرها، شبکه‌های شهری و سیستم‌های حمل و نقل، امکان تحلیل رفتار ترافیکی و اثرات متغیرهای مختلف را فراهم می‌آورد. این روش از حدود چهار دهه پیش توسعه یافته و شامل مدل‌های میکروسکوپی، مزوسکوپی و میکروسکوپی است. با پیشرفت توان پردازشی رایانه‌ها، مدل‌های میکروسکوپی به دلیل دقت بالاتر در شبیه‌سازی رفتار جزئی وسایل نقلیه، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

شبیه‌سازی ترافیکی مبتنی بر مدل‌سازی میکروسکوپی، داده‌های ورودی خود را از طریق تولید تصادفی وسایل نقلیه، تعیین مسیر و تصمیم‌گیری‌های رانندگان دریافت می‌کند. خروجی این مدل‌ها شامل نمایش‌های متحرک و داده‌های عددی است که به تحلیلگران اجازه می‌دهد تا عملکرد شبکه را بررسی و تفسیر کنند. در این پژوهش نیز شبیه‌ساز

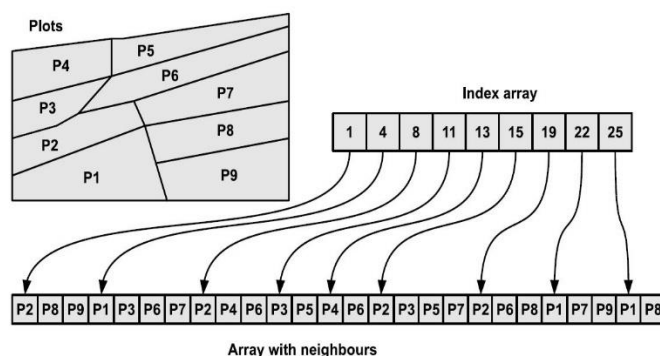
1. Travel Time
2. Network Delay
3. LOS

توسعه‌یافته، یک مدل ترافیکی میکروسکوپی مبتنی بر کاربری اراضی است که عناصر اصلی آن شامل راه‌ها، پارسل‌های کاربری اراضی و وسایل نقلیه است. این مدل، وضعیت ترافیک شهر تبریز و تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر آن را شبیه‌سازی می‌کند. علاوه بر نمایش گرافیکی جریان ترافیکی، موقعیت مکانی وسایل نقلیه در هر لحظه ثبت شده و تحلیل‌های دقیق‌تری را امکان‌پذیر می‌کند. این شبیه‌ساز با دریافت داده‌های شیپ‌فایل کاربری اراضی و جاده‌ها، الگوی رفت‌وآمد را بر اساس نوع کاربری زمین و میزان جذب و تولید سفر مدل‌سازی کرده و مسیرهای بهینه را تعیین می‌کند. در پژوهش حاضر، وسایل نقلیه به دو دسته کلی شخصی و غیرشخصی (تاکسی، اتوبوس، آمبولانس و ...) تقسیم شده و هرکدام بر اساس میزان تردد، در سه گروه پرتردد، متوسط تردد و کم‌تردد طبقه‌بندی می‌شوند. همچنین، ساعات اوج ترافیک در صبح و عصر نیز در شبیه‌سازی لحاظ شده است. برای ارزیابی عملکرد مدل، از دو شاخص میزان مایل‌های پیموده شده توسط وسیله نقلیه (VMT) و میزان ساعت‌های وسیله نقلیه در حال سفر (VHT) استفاده شده که این شاخص‌ها، تأثیر تغییرات کاربری اراضی را در مقیاس خرد تحلیل می‌کنند (Hillier, 1996). برنامه‌نویسی این شبیه‌ساز نیز در محیط متلب انجام شده است.

بهینه‌سازی تخصیص زمین همواره به عنوان یک چالش در برنامه‌ریزی شهری مطرح بوده است، زیرا انتخاب بهینه‌ی فعالیت‌ها در مکان‌های مناسب می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش طول سفرها، کاهش تقاضای سفرهای درون‌شهری و در نهایت کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل داشته باشد. در پژوهش حاضر، به منظور بهینه‌سازی چپ‌نش کاربری اراضی، از دو الگوریتم ژنتیک (GA) و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) استفاده شده است. در فرآیند بهینه‌سازی، توابع هدف شامل کمینه‌سازی تراکم ترافیکی، بهینه‌سازی سطح سرویس معابر شهری و افزایش کارایی توزیع سفرها بوده است.

در این روش، وضعیت موجود شهر به صورت ژن و کروموزوم مدل‌سازی شده و بر اساس آن، جمعیت‌های اولیه‌ای ایجاد شده است. این جمعیت‌ها در تابع هدف که همان شبیه‌ساز ترافیکی است، ارزیابی شده‌اند. با استفاده از شاخص VMT، کیفیت هر جمعیت مشخص شده و بهترین نمونه‌ها به عنوان والدین نسل بعدی انتخاب شده‌اند. سپس، با اعمال عملگرهای تقاطع، جهش و انتخاب، نسل جدیدی از کروموزوم‌ها تولید شده و فرآیند ارزیابی و بهینه‌سازی ادامه یافته است. این روند تا زمانی تکرار شده که بهبود معناداری در نسل‌های جدید مشاهده نشود. با توجه به تعداد بالای پارسل‌های شهری و حجم وسیع وسایل نقلیه و زمان بر و پیچیده بودن این محاسبات، شرط خاتمه الگوریتم بسیار مهم و حایز اهمیت است زیرا اگر درست تعریف نشود باعث می‌شود مدت‌زمان اجرای الگوریتم بسیار طولانی شود. برای شرط خاتمه این الگوریتم پس از ۱۰۰ تکرار، ۲۵ تکرار آخر را باهم مقایسه می‌کنیم در صورتی که مقادیر بهینه تغییری نکرده باشد، شرط خاتمه الگوریتم فعال شده و الگوریتم متوقف می‌شود و در نهایت الگوریتم مقادیر بهینه را نمایش می‌دهد.

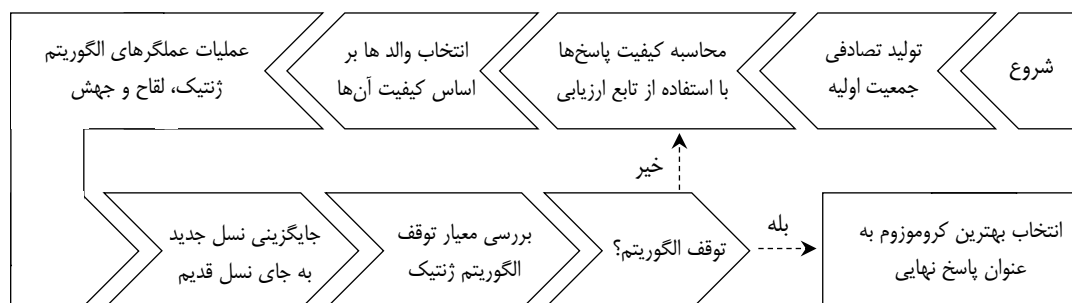
در این تحقیق، کروموزوم به صورت مجموعه‌ای از سلول‌ها تعریف شده است که هرکدام یک ژن هستند و در فضای مسأله همان واحدهای کاربری اراضی را نمایش می‌دهند. به عبارت دیگر یک کروموزوم لیستی منظم از کاربری‌های تخصیص‌یافته به پارسل‌های شماره‌بندی شده است. این روش در مطالعات صورت گرفته در زمینه کاربرد الگوریتم‌های تکاملی در آنالیزهای مکانی به دفعات استفاده شده است. در شکل ۲، نحوه تعریف ژن و ایجاد کروموزوم از کاربری‌های اراضی نشان داده شده است.



شکل ۲. نحوه تعریف ژن و ایجاد کروموزوم از کاربری‌های اراضی

همان‌طور که بیان شد، این پژوهش با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، به‌ویژه الگوریتم ژنتیک، به تعیین بهینه‌ترین الگوی تخصیص کاربری اراضی از منظر ترافیکی پرداخته است. برای پیاده‌سازی این فرآیند، از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. در مرحله نخست، تابع هدف به نرم‌افزار معرفی شده و کیفیت پاسخ‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس، برترین جمعیت‌ها به عنوان والدین منتخب تعیین شده و فرآیند تکامل ژنتیکی از طریق اعمال عملگرهای مختلف بر روی این والدین اجرا شده است. این فرآیند تا رسیدن به نسل بهینه ادامه یافته است.

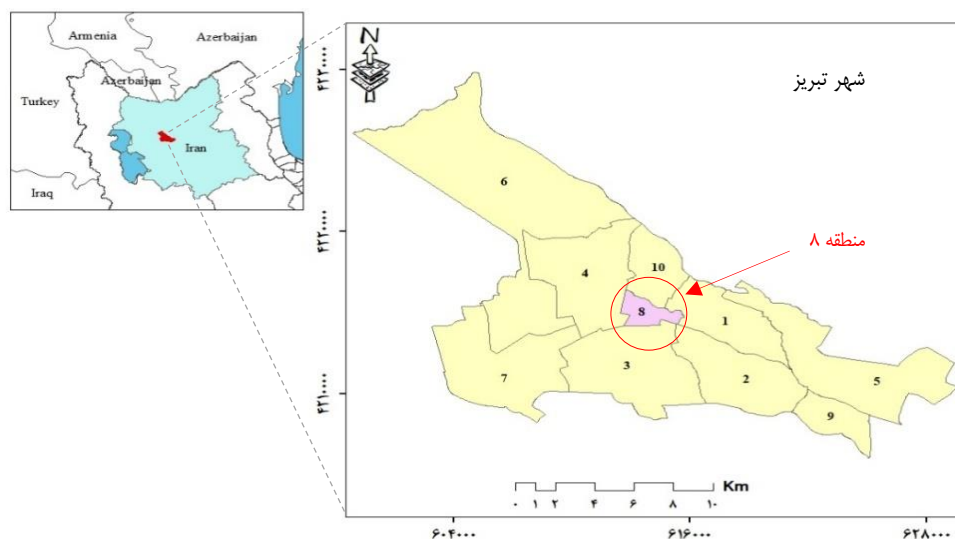
در الگوریتم‌هایی که جمعیت اولیه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود، ممکن است نتایج در اجراهای مختلف، متفاوت باشد؛ بنابراین لازم است آزمون‌هایی بر روی این الگوریتم‌ها انجام شود تا ثبات الگوریتم بررسی شود. در پژوهش حاضر نیز برای ارزیابی دقت و اعتبار نتایج، دو آزمون تکرارپذیری و همگرایی الگوریتم مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت، شکل ۳ مدل مفهومی پژوهش را نشان می‌دهد که ساختار کلی این فرآیند را تبیین می‌کند.



شکل ۳. نمودار جریان روش تحقیق و مراحل اجرای مدل

محدوده مورد مطالعه

منطقه مرکزی شهر تبریز به عنوان یکی از پرجمعیت‌ترین و پویاترین بخش‌های این کلان‌شهر شناخته می‌شود. این محدوده شامل مناطق با تراکم بالای فعالیت‌های تجاری، اداری و مسکونی بوده و از سمت شمال به خیابان‌های مهمی مانند امام خمینی و از سمت جنوب به مناطق قدیمی شهر محدود می‌شود. همچنین، این محدوده دارای موقعیت استراتژیک در ساختار فضایی تبریز است و به عنوان قطب اصلی اقتصادی و خدماتی شهر شناخته می‌شود. شکل ۴ موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

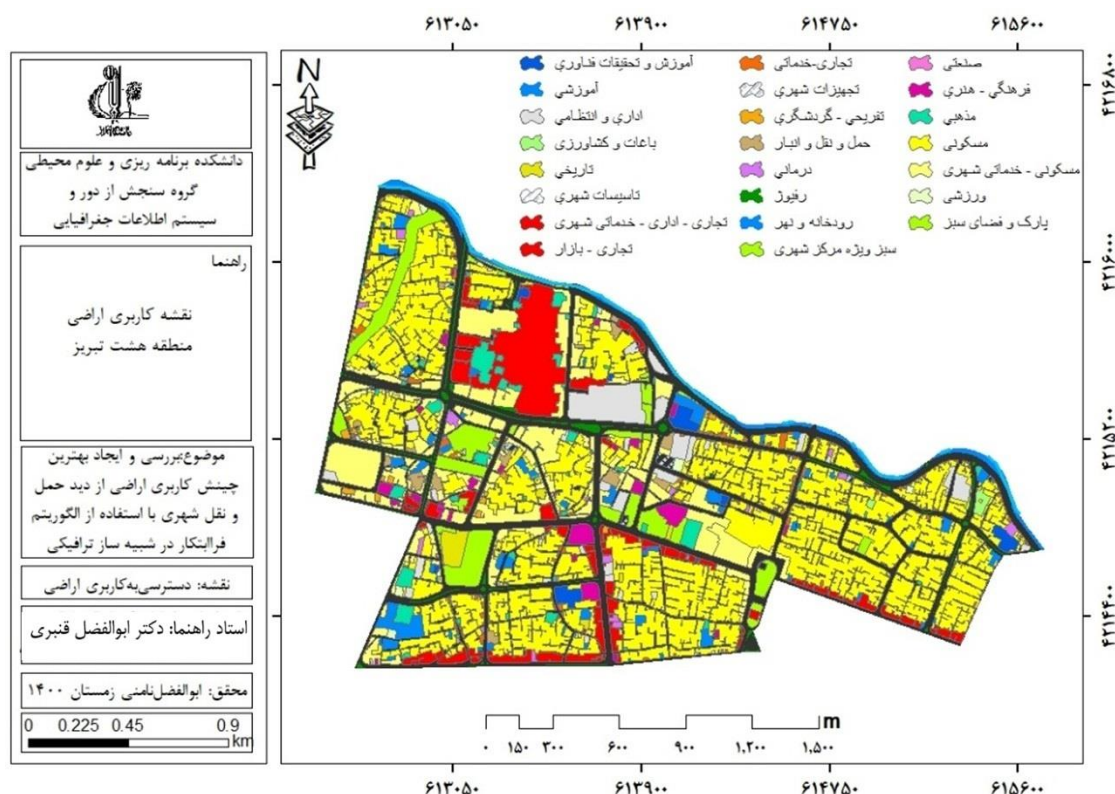


شکل ۴. موقعیت منطقه ۸ تبریز

این منطقه، دربرگیرنده هسته میانی شهری می‌باشد که با مساحتی حدود ۳۸۶ هکتار، جمعیتی معادل ۳۴۲۳۱ نفر را در سال ۱۳۹۵ درخود جای داده است. این امر بیانگر تراکم ناخالص جمعیتی ۸۹ نفر در هکتار می‌باشد. مساحت کاربری مسکونی در این منطقه ۱۵۱ هکتار بوده و بدین واسطه تراکم خالص ۳۳۶۲ تراکم‌های جمعیتی را جمعیتی در این منطقه برابر ۲۳۰ نفر در هکتار است. شکل ۵ ساختار کاربری اراضی منطقه را نمایش می‌دهد که حاکی از تراکم بالای فعالیت‌های تجاری و اداری در این محدوده است. ساختار کاربری اراضی در منطقه مرکزی تبریز شامل ترکیبی از کاربری‌های تجاری، اداری، مسکونی و فضاهای عمومی است که هر یک نقش مهمی در پویایی و عملکرد شهری ایفا می‌کنند. تمرکز بالای مراکز تجاری، از جمله بازار تبریز و مراکز خرید بزرگ، منجر به جذب حجم بالایی از سفرهای روزانه شده است. علاوه بر این، حضور ادارات و نهادهای دولتی باعث افزایش تردهای کاری و اداری، به‌ویژه در ساعات اوج ترافیک، می‌شود. همچنین، بافت مسکونی متراکم در کنار کاربری‌های تجاری و اداری، فشار مضاعفی بر شبکه حمل‌ونقل شهری وارد کرده و چالش‌های متعددی را در مدیریت ترافیک ایجاد کرده است.

این منطقه، به دلیل نقش کلیدی خود در ساختار شهری تبریز، با مشکلات ترافیکی متعددی مواجه است. حجم بالای تردد خودروهای شخصی و وسایل نقلیه عمومی در ساعات اوج، یکی از عوامل اصلی تراکم ترافیکی محسوب می‌شود. کمبود فضای پارکینگ و اشغال حاشیه خیابان‌ها نیز ظرفیت معابر را کاهش داده و موجب افزایش ازدحام می‌گردد. از سوی دیگر، وجود تقاطع‌های پرتراکم و مشکلات مدیریتی در کنترل جریان ترافیک، تأخیرهای قابل‌توجهی را در شبکه حمل‌ونقل ایجاد کرده و سطح سرویس معابر را کاهش داده است.

با توجه به این چالش‌ها، بهینه‌سازی چینه کاربری اراضی می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش تراکم ترافیکی و بهبود عملکرد شبکه حمل‌ونقل داشته باشد. اجرای مدل پیشنهادی در این پژوهش، به عنوان یک راهکار مؤثر، می‌تواند به افزایش بهره‌وری فضایی و کاهش اثرات منفی ناشی از تردهای شهری در این محدوده منجر شود.

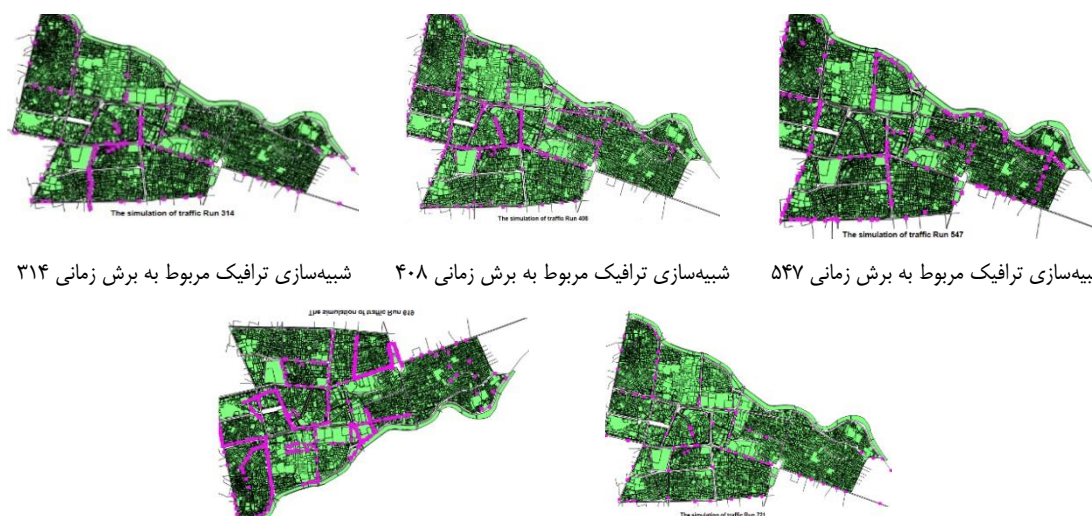


شکل ۵. نقشه کاربری اراضی منطقه مطالعه

یافته‌ها

نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته در نرم‌افزار VISSIM حاکی از آن است که مدل پیشنهادی اثرات مثبتی بر شاخص‌های کلیدی حمل و نقل شهری در شهر تبریز داشته است. شبیه‌ساز توسعه‌یافته در این پژوهش، ضمن مدل‌سازی وضعیت ترافیکی موجود و تحلیل تأثیر تغییرات کاربری اراضی در سطح مناطق مختلف شهری، قابلیت نمایش گرافیکی جریان وسایل نقلیه و استخراج مختصات لحظه‌ای آن‌ها را نیز فراهم می‌سازد. این سیستم با بهره‌گیری از داده‌های مکانی مربوط به پارسل‌ها، معابر و وسایل نقلیه، امکان توسعه و ارتقاء تحلیل‌ها را دارا می‌باشد. ساختار اصلی مدل مبتنی بر شبیه‌سازی میکروسکوپی بوده و روند عملکرد آن به صورت خلاصه عبارت است از:

- دریافت داده‌های مرتبط با شیب زمین، کاربری اراضی، معابر و نقاط ترافیکی شهر تبریز به عنوان ورودی؛
 - تولید حرکت‌های تصادفی بین مبدأ و مقصد بر اساس نوع کاربری هر پارسل؛
 - محاسبه‌ی مسیر پیموده‌شده توسط هر وسیله نقلیه؛
 - تحلیل زمان سفر با لحاظ کردن حجم ترافیک هر خیابان و چرخه‌ی زمانی چراغ‌های راهنمایی در تقاطع‌ها.
- وسایل نقلیه تعریف‌شده نیز در مدل شامل دو دسته شخصی و غیر شخصی (تاکسی، اتوبوس، آمبولانس و...) هستند که هر کدام بر اساس میزان تردد در سه گروه پرتردد، متوسط و کم‌تردد طبقه‌بندی شده‌اند. فرآیند شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار متلب و با بهره‌گیری از یک کد اصلی و ۶۳ تابع مرتبط پیاده‌سازی شده است. شبیه‌سازی به مدت ۲۴ ساعت و با گام‌های زمانی یک دقیقه‌ای اجرا شده و در هر گام، توزیع مکانی وسایل نقلیه در شبکه معابر استخراج شده است. تصویر ۶، شبیه‌سازی ترافیک در محدوده مورد مطالعه و پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک به منظور تعیین کاربری بهینه اراضی با رویکرد کاهش ترافیک را نشان می‌دهد.



شبیه‌سازی ترافیک مربوط به برش زمانی ۵۴۷ شبیه‌سازی ترافیک مربوط به برش زمانی ۴۰۸ شبیه‌سازی ترافیک مربوط به برش زمانی ۳۱۴

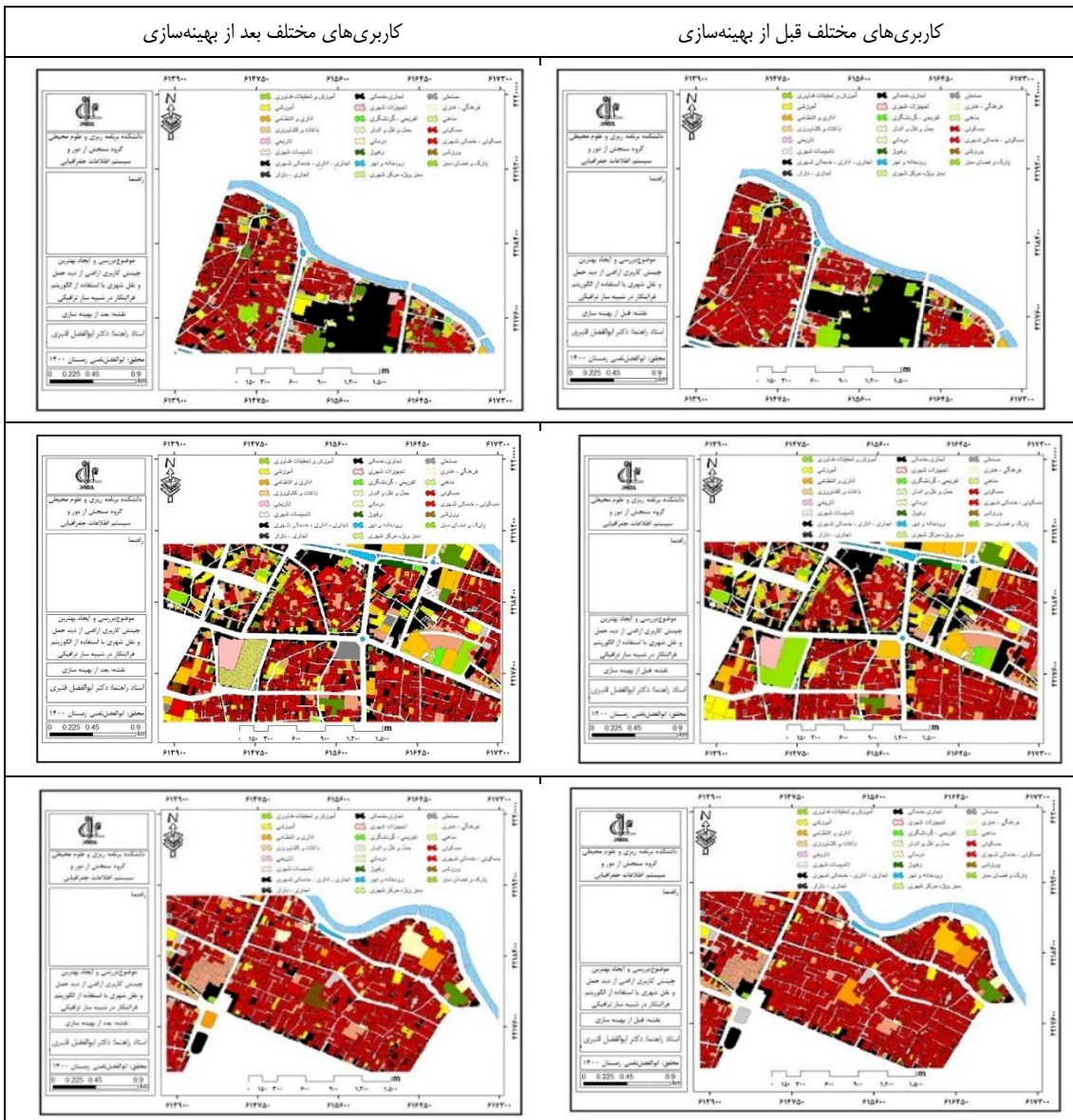
شبیه‌سازی ترافیک مربوط به برش زمانی ۷۲۱ شبیه‌سازی ترافیک مربوط به برش زمانی ۶۱۹

شکل ۶. پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک به منظور تعیین کاربری بهینه اراضی با رویکرد کاهش ترافیک

در این پژوهش، الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه‌سازی الگوی کاربری اراضی و کاهش تأثیرات نامطلوب بر شبکه ترافیکی منطقه مورد مطالعه پیاده‌سازی شده است. فرآیند اجرای الگوریتم تا زمان دستیابی به همگرایی مطلوب و تثبیت تغییرات کاربری‌ها تکرار شده است. با توجه به اینکه برخی از مسایل بهینه‌سازی دارای شرایطی هستند که مسأله بایستی در حضور آن‌ها حل شود تا به جواب‌های قابل قبولی در فضای جستجو دست یافت، در این تحقیق شرط مسأله عدم تغییر تعداد هر کدام از کاربری‌های اراضی است. بدین صورت که به عنوان مثال تعداد کاربری‌های مسکونی هیچ تغییری نخواهد کند. شرط دیگر این مسأله عدم تغییر کاربری، زمین‌های بایر است. به این دلیل که با توجه به عدم تغییر تعداد کاربری‌ها اگر الگوریتم کاربری غیر از زمین‌های بایر به کاربری بایر تغییر کند می‌بایست آن ساختمان را تخریب و زمین را به کاربری بایر تبدیل کرد که این در واقعیت امکان‌ناپذیر است از این رو محل زمین‌های بایر تغییر کاربری نخواهیم داشت.

بدین ترتیب در گام نخست، کاربری‌های اولیه به عنوان ورودی وارد شبیه‌ساز ترافیکی شده و مدت زمان سفر و مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه محاسبه شد. سپس، این داده‌ها به الگوریتم ژنتیک منتقل شده و بر اساس آن، کاربری‌های جدید برای پارسل‌های شهری پیشنهاد گردید. این کاربری‌های اصلاح شده مجدداً وارد فرآیند شبیه‌سازی ترافیکی شده و تغییرات جدید در الگوی ترافیک شهری مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه، داده‌های به دست آمده از این مرحله بار دیگر وارد الگوریتم ژنتیک شده و تنظیمات کاربری‌های اراضی اصلاح شد. این چرخه تا زمانی ادامه یافت که تغییرات کاربری‌ها در تکرارهای پایانی به حداقل ممکن رسید.

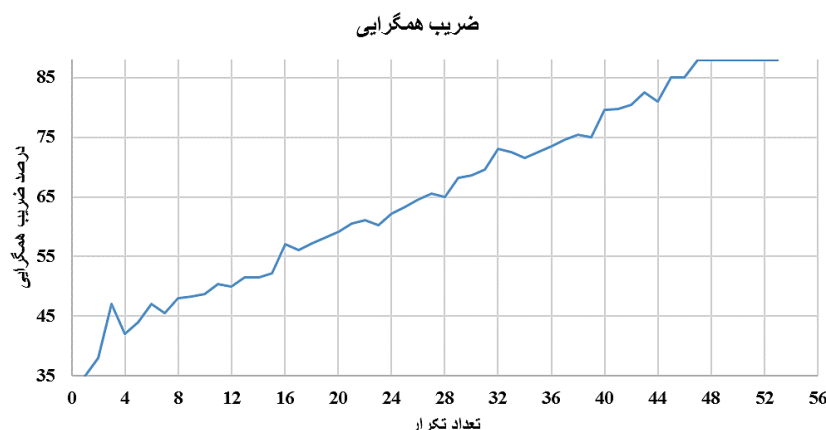
نتایج نهایی نشان می‌دهد که در هر تکرار، برخی از کاربری‌ها جابه‌جا شده و به موقعیت‌های بهینه‌تری انتقال یافته‌اند. در مراحل پایانی، تغییرات کروموزوم‌ها (رشته‌های معرف کاربری‌های اراضی) کاهش یافته و به یک وضعیت پایدار دست یافته‌اند. برای تحلیل دقیق‌تر، منطقه مورد مطالعه به سه بخش تقسیم شده و تغییرات کاربری‌ها در هر بخش به طور جداگانه نمایش داده شده است. این روش نمایش، به دلیل تعداد زیاد پارسل‌ها، امکان بررسی دقیق‌تر تغییرات و تحلیل تأثیرات آن بر شبکه ترافیکی را فراهم کرده است. شکل ۷، کاربری‌های موجود در منطقه مورد مطالعه را برای داده‌های اولیه و نتیجه پایانی نشان می‌دهد.



شکل ۷. کاربری‌های موجود در منطقه مورد مطالعه قبل و بعد از بهینه سازی

بحث

همانطور که ذکر گردید، الگوریتم ژنتیک تا جایی فرآیند تغییر کاربری‌ها را اجرا می‌کند که در نهایت هیچ رشته کروموزومی تغییر نکند. در واقع این الگوریتم آن قدر تکرار می‌شود که همگرایی تابع هدف، به یک مقدار پایدار و البته قابل قبولی برسد. برای درک بهتر این موضوع، شکل ۸، همگرایی الگوریتم ژنتیک در تکرارهای متوالی را نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌بینیم در تکرار ۴۷ الگوریتم به سطح ثابتی از همگرایی می‌رسد. با توجه به این موضوع، تکرار چهل و هشتم و کروموزوم‌های تشکیل شده در آن (که تفاوتی با کروموزوم‌های تکرار چهل و هفتم ندارد) به عنوان خروجی اعلام می‌شود.



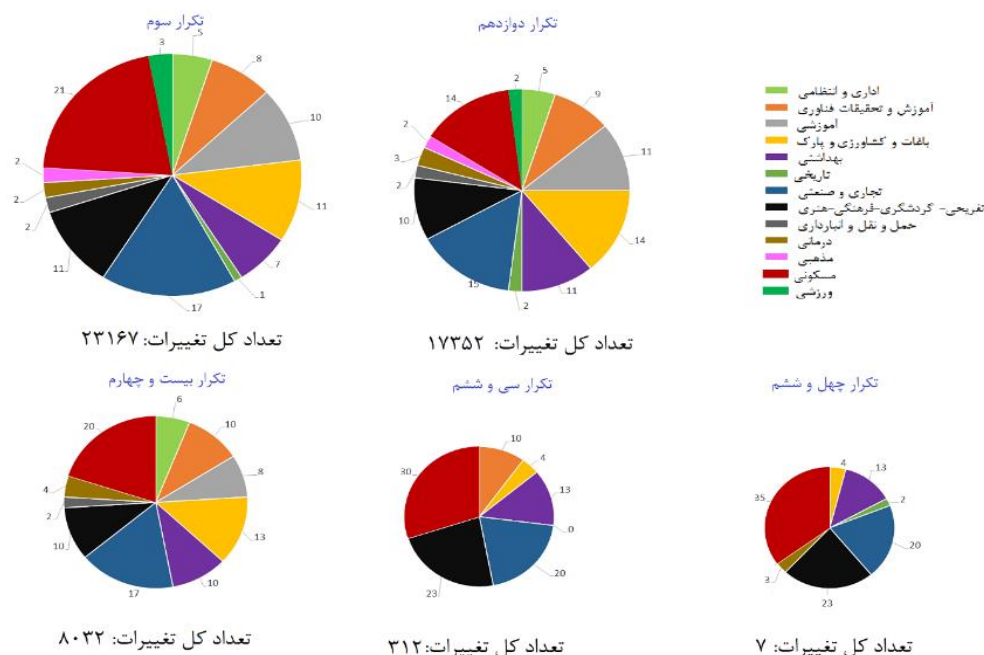
شکل ۸. ضریب همگرایی مختلف در تکرارهای مختلف در قالب آزمون همگرایی

الگوریتم ژنتیک بر اساس پولیگون‌های موجود در نقشه شهری و ویژگی‌های آن پلیگون‌ها، شامل تعداد افرادی که در یک ساختمان مشخص سکونت دارند، نوع کاربری اراضی، تعداد ماشین‌های موجود در هر ساختمان و ... به انتخاب بهترین چینش می‌پردازد. در این الگوریتم به ظرفیت شبکه معابر، با توجه به شبیه‌سازی ترافیکی که در بخش اول الگوریتم صورت می‌گیرد، نیز پرداخته خواهد شد. ذکر این مورد الزامی است که در رابطه با روش‌های فراابتکاری که نتیجه آن‌ها، شبیه‌سازی از تغییرات وضع موجود است و عموماً قابل پیاده‌سازی و مقایسه با شرایط واقعی نیست، روش مورد استفاده برای ارزیابی نتایج کمی تغییر می‌کند. در مورد روش الگوریتم ژنتیک استفاده از ضریب همگرایی یکی از مناسب‌ترین و دقیق‌ترین آمارها برای بیان دقت یک الگوریتم است. در این الگوریتم‌ها، پس از تعریف تابع هزینه، همگرایی الگوریتم در اجرا و رسیدن به تابع هدف، به عنوان دقت در نظر گرفته می‌شود. با توجه به آنچه توضیح داده شده است، هر چه الگوریتم بهتر بتواند همگرا شود و اصولاً به همراهی حد آستانه تعریف شده برسد، می‌توان گفت که آن الگوریتم دقیق بوده است. با توجه به نتایج ارائه داده شده در بالا، الگوریتم طراحی شده قادر است که همگرایی را از ۳۵٪ به ۸۵٪ برساند و این موضوع دقت روش را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل (۸) می‌توان دریافت کرد، در تمامی طول اجرا و پیاده‌سازی الگوریتم، درصد ضریب همگرایی سیر صعودی را در پیش می‌گیرد؛ اما لازم است به این نکته نیز توجه شود که در برخی از مطالعات استفاده از این الگوریتم جهت تعیین کاربری بهینه، زمانی که الگوریتم چندین مرتبه تکرار می‌شود ضریب همگرایی کاهش می‌یابد و یا در عدد کمی رو به همگرایی پیدا می‌کند.

می‌توان گفت که علت تغییرات همگرایی در تکرارهای مختلف، تغییر کردن کروموزوم‌های در آن تکرارها و جانشینی کروموزوم‌هایی است که دارای ویژگی‌های برتری نسبت به والدین خود هستند و عملاً شرایط را برای تحقق تابع هدف مسأله، مناسب‌تر می‌کنند. کروموزوم‌ها در این مسأله، همان کاربری‌ها هستند.

بحث در مورد این که در هر کدام از تکرارها و در کل جریان بهینه‌سازی کاربری اراضی به منظور شبکه ترافیکی مناسب، هر کدام از کاربری‌ها چقدر تغییر خواهند کرد، از شکل (۹) استفاده کرده‌ایم. در این شکل، تغییرات کاربری در ۵ تکرار مختلف ۳، ۱۲، ۲۴، ۳۶ و ۴۶ نمایش داده شده است.



اندازه دایره‌های آماری، رابطه مستقیمی با تعداد تغییرات انجام‌شده در هر کدام از تکرارها دارد. اندازه دایره‌های آماری نشان‌دهنده تعداد کل تغییرات ایجادشده در هر تکرار است. با توجه به شکل (۹)، در تکرارهای اول بیشترین تعداد تغییرات کاربری را داریم و هر چه به تکرارهای پایانی نزدیک می‌شویم، این تغییرات کاهش می‌یابد طوری که در تکرار آخر، تغییرات به ۷ پارسل می‌رسد. در تکرار سوم، ۲۳۱۶۷ تغییر در کاربری‌ها ایجاد شده و در تکرار دوازدهم، این عدد به ۱۷۳۵۲ عدد رسیده است. این تغییرات کمتر و کمتر می‌شود تا به ۷ عدد در تکرار چهل و ششم می‌رسد.

مورد دیگری که در این تغییرات می‌توان به آن‌ها اشاره کرد، فراوانی نسبی تغییرات هر کدام از کاربری‌ها است. از این رو از فراوانی نسبی استفاده شده است، چون تعداد پارسل‌های موجود در کاربری‌های مختلف، با هم برابر نبوده است. در این شکل می‌توان دید که تقریباً در تمامی تکرارها، کاربری مسکونی بیشترین تغییر را نسبت به کاربری‌های دیگر داشته‌اند. ذکر این مورد الزامی است که در این الگوریتم، کاربری‌هایی همچون رودخانه، فیوز، تأسیسات و زیرساخت‌های شهری، زمین‌های بایر و... تغییر پیدا نکرده‌اند. همان‌طور که در شکل ۹ می‌توان دید، در برخی از تکرارها، برخی از کاربری‌ها اصلاً تغییر نمی‌کند و فراوانی تغییر در آن‌ها به ۰٪ می‌رسد. در هر حال در بسیاری از تکرارها، کاربری‌های تجاری و صنعتی و کاربری مسکونی بیشترین مقدار تغییر را دارد. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت چینش این کاربری‌ها در فضای شهر و تأثیر آن بر ترافیک‌های شهری است.

به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی در برنامه‌ریزی شهری و حمل‌ونقل می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش مشکلات ترافیکی داشته باشد. اعمال تغییرات در الگوی کاربری اراضی، همراه با تحلیل اثرات آن بر سیستم حمل‌ونقل، موجب بهبود شاخص‌های عملکردی شبکه معابر، کاهش ازدحام و افزایش کارایی کلی سیستم حمل‌ونقل شهری شده است. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند به عنوان یک چارچوب علمی و عملی برای برنامه‌ریزان شهری و سیاست‌گذاران در راستای بهینه‌سازی توسعه شهری مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که به کارگیری الگوریتم ژنتیک در ساماندهی و بهینه‌سازی کاربری اراضی شهری می‌تواند به کاهش معنادار مسافت‌های پیمایش‌شده توسط وسایل نقلیه منجر شود. بر اساس تحلیل‌های صورت‌گرفته و همان‌گونه که در شکل (۷) نیز قابل‌رؤیت است، تغییرات در سراسر کاربری‌ها (به‌جز مواردی که در شروط الگوریتم مشخص‌شده‌اند) انجام شده است؛ به عنوان مثال بسیاری از کاربری‌های اراضی به آموزشی و تجاری و یا برعکس تبدیل شده‌اند. با این تغییرات در الگوریتم ژنتیک، شرایط ترافیکی شهر طوری خواهد شد که هر ماشین در هر بازه ای از روز، برای سفر خود، کمترین مسافت را طی کند. هر چند که این تغییرات کاملاً وابسته به انتخاب‌های اولیه کروموزوم‌ها، روش‌های انتخابی برای جهش و تقاطع، شرط خاتمه الگوریتم، تعداد اتومبیل‌ها و نقاط ترافیکی شهر است، اما تا حد زیادی می‌تواند در تمامی شرایط، به بهبود وضعیت ترافیکی و به‌طور ریاضی، به همگرا شدن هرچه بیشتر مسأله مورد بررسی کمک کند.

واضح است که با بازآرایی موقعیت مکانی برخی کاربری‌ها، امکان بهینه‌سازی شبکه ترافیکی شهری فراهم شده است؛ به گونه‌ای که هر وسیله نقلیه در هر بازه زمانی از روز، مسیر کوتاه‌تری را برای دستیابی به مقصد طی می‌کند. این بهبود ترافیکی از طریق همگرایی الگوریتم از حدود ۳۵ درصد به ۸۵ درصد نیز مورد تأیید قرار گرفت. بدین صورت که اگر رده مراتب ترافیکی در پیدایش اولیه یک شهر و توسعه آتی آن در نظر گرفته شده باشد، بهترین چپش کاربری، چپشی خواهد بود که در آن، اتومبیل‌ها با کمترین مسافت طی شده در روز، مسافرت کنند. این مهم نیازمند نزدیکی محل کار افراد ساکن در شهر به منازل مسکونی، عدم تمرکز شهر در یک نقطه به عنوان مرکز، امکان مسافرت پیاده در شهر، وسعت کافی زیرساخت‌ها نسبت به جمعیت و وسعت شهر و ... می‌باشد. لذا، اگر شهر (به لحاظ زیرساختی) استاندارد باشد، کاربری‌های چیده شده در شبکه عصبی که در آن کمترین مسافت را خواهیم داشت، همان سناریوی بهینه و متجانس با بافت شهر خواهد بود؛ اما این موضوع در این پژوهش کمی دچار ابهام می‌شود. علت این ابهام، شرایط زیرساختی شهر تبریز، مانند تمام شهرهای در حال توسعه ایران است. شهر تبریز از جمله شهرهای پویا، در حال توسعه و دارای جریان نفوذ بافت شهر به حریم شهر است. هرچند مدیریت شهرسازی در این شهر، یکی از بهترین و مثال‌زدنی‌ترین مدیریت‌های موجود است، اما ساخت غیراستاندارد زیرساخت‌ها در برخی محلات در حال توسعه، امکان در نظر گرفتن این شهر به عنوان شهری که دارای سلسله‌مراتب شبکه‌ای است، کمی دشوار است. این مسأله در مورد تمامی شهرهای ایران کم و بیش قابل رؤیت است. لذا این احتمال وجود دارد که با توجه به عدم استاندارد زیرساخت‌های شهری، شکل‌گیری چیدمان جدید شهری نیز، همسو با استانداردهای سلسله‌مراتبی ترافیکی نباشد؛ اما همچنان باید به این نکته توجه داشت که از آن‌جا که چیدمان فضایی کاربری‌ها در الگوریتم ژنتیک تحت تأثیر مؤلفه‌هایی چون انتخاب اولیه کروموزوم‌ها، نرخ جهش و تقاطع، شرط خاتمه الگوریتم، تعداد وسایل نقلیه و موقعیت گره‌های ترافیکی است، این الگوریتم در مواجهه با ساختارهای مختلف شهری انعطاف‌پذیری بالایی از خود نشان داده و به ویژه در بافت‌های غیرایده‌آل شهری نیز عملکرد قابل قبولی داشته است.

در این تحقیق، با تعریف تابع هدف بر مبنای کمینه‌سازی مسافت پیموده‌شده توسط خودروها و با لحاظ نمودن برخی کاربری‌ها به عنوان شروط ثابت و غیرقابل تغییر (نظیر زیرساخت‌های حیاتی، خدمات اضطراری و برخی عناصر کالبدی)، تلاش شده است تا با حداقل جابه‌جایی در بافت موجود، حداکثر بهینگی حاصل شود. از جمله دلایل عدم لحاظ سایر توابع هدف مانند زمان سفر یا شدت ترافیک، محدودیت در امکان تغییر ساختارهای کالبدی شهر بوده است؛ امری که در بسیاری از مناطق شهری کشور به دلیل عدم استاندارد بودن زیرساخت‌ها مشهود است.

نتایج حاصل از اجرای مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک با رویکرد کمینه‌سازی مسافت طی‌شده، توانسته است با بازآرایی فضایی کاربری‌ها در سطح منطقه مرکزی تبریز، عملکرد شبکه ترافیکی را به صورت مؤثری بهبود بخشد. این یافته در امتداد مطالعات پیشین نظیر Litman (۲۰۱۷) و عزیزیان (۱۳۹۵) قرار دارد که بر نقش تعیین‌کننده الگوی فضایی کاربری زمین در شکل‌گیری رفتارهای سفر شهری تأکید کرده‌اند.

مشابه با رویکرد Zielinska et al (۲۰۲۰) و Fahmia et al (۲۰۱۹)، در این پژوهش نیز از الگوریتم‌های فراابتکاری به‌منظور بهینه‌سازی کاربری زمین استفاده شده، با این تفاوت که در مدل حاضر، ترکیب دو الگوریتم GA و PSO به صورت هم‌زمان به کار گرفته شده است که موجب افزایش نرخ همگرایی از حدود ۳۵٪ به ۸۵٪ شده است؛ این سطح از همگرایی در اغلب مطالعات پیشین صراحتاً گزارش نشده و از جمله ویژگی‌های تمایز این پژوهش محسوب می‌شود.

در قیاس با تحقیقاتی مانند Gaćanja (۲۰۱۰) که عمدتاً مبتنی بر شبیه‌سازی کلان و مدل‌های سنتی حمل‌ونقل بوده‌اند، در این پژوهش استفاده از داده‌های میکروسکوپی در محیط VISSIM و تعریف دقیق تابع هدف، موجب افزایش دقت پیش‌بینی‌پذیری مدل شده است. همچنین، برخلاف برخی مطالعات خارجی که بر روی کلان‌شهرهای دارای زیرساخت استاندارد تمرکز دارند، در این تحقیق بافت شهری غیراستاندارد و توسعه‌یافته تبریز مدنظر قرار گرفته است. این موضوع، اگرچه چالش‌هایی در اجرای مدل ایجاد کرده، اما اعتبار بیرونی نتایج را برای کاربرد در بافت‌های واقعی شهرهای درحال توسعه تقویت می‌کند.

از سوی دیگر، در حالی که بسیاری از مطالعات پیشین تلاش کرده‌اند تا بهینه‌سازی را بر اساس ترکیبی از پارامترهای زمان، تأخیر و تراکم انجام دهند، در این پژوهش با تمرکز بر کمینه‌سازی مسافت، سادگی مدل افزایش یافته، اما همچنان خروجی بهینه و قابل‌دفاع به‌دست آمده است. این امر نشان می‌دهد که در صورت طراحی مناسب مدل و انتخاب پارامترهای کلیدی، حتی با توابع هدف حداقلی نیز می‌توان به نتایج بااهمیت در بهبود الگوی سفر شهری دست یافت. با وجود دستاوردهای ارزشمند، این پژوهش نیز با محدودیت‌هایی همراه بوده است. از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به وابستگی نتایج مدل به کیفیت و دقت داده‌های ورودی اشاره کرد. فقدان داده‌های به‌روز از جریان‌های ترافیکی و موقعیت مکانی دقیق کاربری‌ها، یکی از عوامل کاهش دقت مدل‌سازی بوده است. همچنین، در این پژوهش تنها از دو الگوریتم فراابتکاری استفاده شده است؛ حال آن‌که مقایسه عملکرد سایر الگوریتم‌ها، از جمله الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری ماشین یا ترکیبی از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، می‌تواند در پژوهش‌های آتی مسیرهای جدیدی را در بهینه‌سازی شهری بگشاید.

پیشنهاد می‌شود که در آینده، مطالعاتی با تمرکز بر تحلیل‌های چندزمانه و مقایسه روندهای بلندمدت تغییرات کاربری اراضی، همچنین اثرات اجتماعی و اقتصادی این تغییرات بر کیفیت زندگی شهروندان انجام گیرد. استفاده ترکیبی از مدل‌های یادگیری ماشین و الگوریتم‌های فراابتکاری، علاوه بر افزایش دقت و انعطاف‌پذیری، می‌تواند امکان طراحی سیستم‌های هوشمند تصمیم‌یار برای مدیران شهری را نیز فراهم سازد. همچنین، تحلیل دقیق‌تری از الگوهای جابه‌جایی سفر و همپوشانی آن‌ها با الگوی فضایی کاربری‌ها می‌تواند به تکمیل مدل‌های ارائه‌شده در این حوزه کمک کند. در مجموع، یافته‌های این پژوهش می‌تواند به عنوان یک چارچوب علمی-کاربردی جهت ارتقاء برنامه‌ریزی کاربری اراضی، بهینه‌سازی شبکه حمل‌ونقل شهری و سیاست‌گذاری‌های توسعه پایدار شهری مورد بهره‌برداری قرار گیرند.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تهیه این مقاله نقش‌های مشخص و متمایزی داشته‌اند. نویسنده اول مسئول طراحی پژوهش، گردآوری داده‌ها، انجام تحلیل‌ها و نگارش پیش‌نویس اولیه مقاله بوده است. نویسنده دوم در بهبود چارچوب نظری، تحلیل نتایج، بازبینی علمی و ویرایش نهایی مقاله مشارکت داشته است.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از هیچ فرد یا سازمانی برای انجام این پژوهش حمایت مالی دریافت نکرده‌اند.

منابع

- پوراحمد، احمد؛ حاتمی‌نژاد، حسین؛ زیاری، کرامت‌الله؛ فرجی سبکبار، حسین و وفایی، الهام. (۱۳۹۳). بررسی و ارزیابی کاربری اراضی شهری از منظر عدالت اجتماعی (مورد مطالعه: کاشان). *آمایش سرزمین*، (۲) ۶، ۲۰۸-۱۷۹.
- غلامی بيمرغ، يوسف؛ حسینی، سيد احمد؛ شاطریان، محمد؛ محمدی، احمد و دهقان جزی، اصغر. (۱۳۹۸). ارزیابی تأثیرات کاربری اراضی شهری در ایجاد حجم ترافیک جهت ساماندهی و بازتوزیع فضایی آن‌ها (مطالعه موردی: بافت مرکزی کاشان). *اطلاعات جغرافیایی*، (۱۰۹) ۲۰۸، ۱۶۶-۱۴۷.
- عزیزیان، محمد. (۱۳۹۵). کاربری اراضی و حمل‌ونقل شهری و ارتباط آن با کاربری اراضی (نمونه موردی: میدان آرژانتین تهران). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، تهران: دانشگاه تربیت مدرس.
- کاظم‌السعیدی، یاسر ناصر. (۱۳۹۶). بررسی تأثیرات کاربری‌های شهری بر شبکه حمل‌ونقل در محیط مطالعه موردی شهر مشهد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد.
- مومنی آزاد، طاهره. (۱۳۹۵). برنامه‌ریزی کاربری اراضی در شبکه حمل‌ونقل درون‌شهری: مطالعه موردی مناطق چهارگانه شهر کرمان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، کرمان: دانشگاه شهید باهنر کرمان.

References

- Anderson, S. F., Kelley, K., & Maxwell, S. E. (2017). Sample-size planning for more accurate statistical power: A method adjusting sample effect sizes for publication bias and uncertainty. *Psychological Science*, 28(11), 1547–1562. <https://doi.org/10.1177/0956797617713035>
- Azizian, M. (2016). Urban land use and transportation and its relationship with land use (Case study: Argentina Square, Tehran). Master's thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Persian).
- Azizian, M. (2016). Urban land use and transportation with land use (Case study: Argentina Square, Tehran). Master's thesis, Tarbiat Modares University. (In Persian).
- Barceló, J. (2010). Fundamentals of Traffic Simulation. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6142-6>
- Besser, H., & Hamed, Y. (2021). Environmental impacts of land management on the sustainability of natural resources in Oriental Erg Tunisia, North Africa. *Environmental Development and Sustainability*, 23, 11677–11705. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-01135-9>
- CARTO. (2022). Spatial analysis for the modern analytics stack.
- Coello Coello, C. A., & Montes, E. M. (2002). Constraint-handling in genetic algorithms through the use of dominance-based tournament selection. *Advanced Engineering Informatics*, 16, 193–203. [https://doi.org/10.1016/S1474-0346\(02\)00011-3](https://doi.org/10.1016/S1474-0346(02)00011-3)
- Dorigo, M., & Stützle, T. (2019). Ant colony optimization: Overview and recent advances. In *Ant Colony Optimization* (pp. 311–351). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91086-4_10

- Fahamiya, N., Farzana, M. U. Z. N., & Shiffa, M. S. M. (2019). Awareness and practice of folic acid intake for neural tube defect prevention at antenatal clinic Rajamalwatta, Sri Lanka. *Research & Reviews: Journal of Nursing and Health Sciences*. <https://doi.org/10.37591/rjjon.v7i1.966>
- Gachanja, N. J. (2010). Toward integrated land use and transport modeling: Evaluating accuracy of the four-step transport model. Master's thesis.
- Gholami Bimargh, Y., Hoseini, S. A., Shaterian, M., Aghamohammadi, A., & Dehghan Jazi, A. (2019). Evaluating the effects of urban land use on traffic volume with the aim of organizing and redistributing them: Case study of the central texture of Kashan. *Geographical Data*, 28(109), 147–166. (In Persian).
- Gholami Bimargh, Y., Hosseini, S. A., Shaterian, M., Mohammadi, A., & Dehghan Jazi, A. (2019). Evaluation of the impacts of urban land use on traffic volume for organizing and spatial redistribution (Case study: Central texture of Kashan). *Geographical Information*, 28(109), 147–166. (In Persian).
- Holland, P. C. (1977). Conditioned stimulus as a determinant of the form of the Pavlovian conditioned response. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 3(1), 77–90. <https://doi.org/10.1037/0097-7403.3.1.77>
- Kazem Al-Saedi, Y. N. (2017). Investigating the impacts of urban land uses on the transportation network: A case study of Mashhad city. Master's thesis.
- Kazem Al-Saedi, Y. N. (2017). Investigation of the impacts of urban land uses on the transportation network: Case study of Mashhad city. Master's thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (In Persian).
- Koko, A. F., Han, Z., Wu, Y., Zhang, S., Ding, N., & Luo, J. (2023). Spatiotemporal analysis and prediction of urban land use/land cover changes using a cellular automata and novel patch-generating land use simulation model: A study of Zhejiang Province, China. *Land*, 12(8), 1525. <https://doi.org/10.3390/land12081525>
- Liang, X., Liu, X., Li, D., Zhao, H., & Chen, G. (2018). Urban growth simulation by incorporating planning policies into a CA-based future land-use simulation model. *International Journal of Geographical Information Science*, 32(11), 2294–2316. <https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1502441>
- Litman, T. (2011). Land use impacts on transport: How land use factors affect travel behavior.
- Long, H. (2022). Theorizing land use transitions: A human geography perspective. *Habitat International*, 128, 102669. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2022.102669>
- Megiddo, N., & Supowit, K. J. (1984). On the complexity of some common geometric location problems. *SIAM Journal on Computing*, 13(1), 182–196. <https://doi.org/10.1137/0213014>
- Mehrabian, A. R., & Lucas, C. (2006). A novel numerical optimization algorithm inspired by weed colonization. *Ecological Informatics*, 1(4), 355–366. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2006.07.003>
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46–61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
- Momeni Azad, T. (2016). Land use planning in the intra-urban transportation network: A case study of the four regions of Kerman City. Master's thesis.
- Momeni Azad, T. (2016). Urban land use planning in intra-urban transportation networks: Case study of the four regions of Kerman City. Master's thesis, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. (In Persian).
- Moran, S., Easterday, S., & Grossman, E. (2023). Current research in phonological typology. *Linguistic Typology*, 27(2), 223–243. <https://doi.org/10.1515/lingty-2022-0069>
- Munthali, M. G., Mustak, S., Adeola, A., Botai, J., Singh, S. K., & Davis, N. (2020). Modelling land use and land cover dynamics of Dedza District of Malawi using hybrid cellular automata and Markov model. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 17, 100276. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100276>
- Nasiri, V., Darvishsefat, A. A., Rafiee, R., Shirvany, A., & Hemat, M. A. (2019). Land use change modeling through an integrated multi-layer perceptron neural network and Markov chain analysis (Case study: Arasbaran region, Iran). *Journal of Forestry Research*, 30, 943–957. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0659-9>

- Norouzi, Y. (2023). Measuring land use changes and quantifying urban expansion using remote sensing and GIS techniques: A case study of Qom. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4/W1, 609–615. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-609-2023>
- Phan, T. N., Kuch, V., & Lehnert, L. W. (2020). Land cover classification using Google Earth Engine and Random Forest classifier: The role of image composition. *Remote Sensing*, 12, 2411. <https://doi.org/10.3390/rs12152411>
- Poorahmad, A., Hataminejad, H., Ziari, K., Farajisabokbar, H., & Vafaii, A. (2014). The evaluation and revising of urban land use from the point of view of social justice (Case study: Kashan). *Town and Country Planning*, 6(2), 179–208. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jtcp.2014.53203>
- Poorahmad, A., Hataminejad, H., Ziari, K., Farajisabokbar, H., & Vafaei, A. (2014). Evaluation and assessment of urban land use from the perspective of social justice (Case study: Kashan). *Urban and Regional Planning*, 6(2), 179–208. (In Persian).
- Roscia, M., Longo, M., & Lazaroiu, G. C. (2013). Smart city by multi-agent systems. In 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) (pp. 371–376). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2013.6749783>
- SafeGraph. (2022). Understand consumer behavior with precise foot traffic data. <https://www.safegraph.com/products/patterns>
- Scott, G., & Rajabifard, A. (2017). Sustainable development and geospatial information: A strategic framework for integrating a global policy agenda into national geospatial capabilities. *Geo-Spatial Information Science*, 20(2), 59–76. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1325594>
- Soltani, A. (2017). Social and urban form determinants of vehicle ownership: Evidence from a developing country. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 96, 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.12.010>
- United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2019). World Urbanization Prospects 2018: Highlights.
- Verma, V., Ravindran, P., & Kumar, P. P. (2016). Plant hormone-mediated regulation of stress responses. *BMC Plant Biology*, 16, 86. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0771-y>
- Wei, M., Yang, F.-T., & Cao, Z.-Q. (2003). A review of development and study on the traffic simulation. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 8.
- Xu, D., Zhang, K., Cao, L., Guan, X., & Zhang, H. (2022). Driving forces and prediction of urban land use change based on the Geodetector and CA-Markov model: A case study of Zhengzhou, China. *International Journal of Digital Earth*, 15, 2246–2267. <https://doi.org/10.1080/17538947.2022.2147229>
- Yang, F. (2009). If 'smart' is 'sustainable': An analysis of smart growth policies and its successful practices.
- Zegras, C. P. (2004). Influence of land use on travel behavior in Santiago, Chile. *Transportation Research Record*, 1898, 21–29. <https://doi.org/10.3141/1898-21>
- Zielińska, A. (2020). A comparative analysis of reverse logistics implementation for waste management in Poland and other European Union countries. *Journal of International Studies*, 13(4), 171–183. <https://doi.org/10.14254/2071-8330.2020/13-4/12>