

Physical Development Planning

Spring (2026) Vol.13(1).(series41):15-30

DOI: [10.30473/psp.2026.77866.2812](https://doi.org/10.30473/psp.2026.77866.2812)

E-ISSN: 2645-548X

P-ISSN: 2645-5471

Assessment and prediction of land use/land cover changes using satellite images and CA-Markov model (Case study: District 22 of Tehran Municipality)

Parvaneh Sobhani^{*1}, Afshin Daneshkar²

1. Assistant Professor,
Department of Environmental
Science, Natural Resources
Faculty, Lorestan. University,
Khorramabad, Iran.

2. Professor, Department of
Environmental Science, Natural
Resources Faculty, University of
Tehran, Karaj, Iran.

*Correspondence

Parvaneh Sobhani

E-mail: sobhani.pa@lu.ac.ir

Received: 28/Apr/2026

Accepted: 14/Jun/2026

How to cite

Sobhani, P., & Daneshkar, A. (2026).
Assessment and prediction of land
use/land cover changes using satellite
images and CA-Markov model (Case
study: District 22 of Tehran
Municipality). *Physical Development
Planning*, 13 (1), 41, 15-30.

(DOI:

[10.30473/psp.2026.77866.2812](https://doi.org/10.30473/psp.2026.77866.2812))

ABSTRACT

Introduction

Land use changes driven by the expansion of human activities are among the most significant threats to urban areas.

Methodology

Accordingly, this study investigated the spatiotemporal dynamics of land cover/land use (LULC) changes in Tehran Municipality District 22 during 1995–2025 and predicted future change patterns up to 2041 using the integrated Cellular Automata–Markov (CA–Markov) model. LULC maps were produced for 1995 and 2025, and temporal changes in different land-use classes were analyzed. The CA–Markov model was then applied to simulate future land-use changes, and its performance was evaluated using the Kappa coefficient.

Results

The results indicated that built-up areas exhibited the greatest increase, expanding from 2,572.11 ha in 1995 to 2,827.46 ha in 2025. In contrast, bare areas declined from 2,780.52 ha to 2,391.80 ha during the same period. Water areas and vegetation cover showed increasing trends, whereas agricultural areas continuously decreased throughout the study period. A Kappa coefficient of 0.88 confirmed the high predictive accuracy of the CA–Markov model. According to the simulation results, built-up areas are projected to increase to 2,890.40 ha by 2041, while bare areas are expected to decline to 2,287 ha.

Discussion and Conclusion

These findings indicate the continued expansion of built-up areas, increasing pressure on land resources due to population growth and the concentration of economic and urban development activities. Therefore, mitigating the adverse impacts of LULC change requires effective planning, integrated land management, and sustainable resource utilization. The findings provide a scientific basis for decision-making and urban management strategies to support sustainable urban development.

KEYWORDS

Spatial-temporal changes, Land use/ land cover, Remote sensing data, Modeling and prediction, District 22 of Tehran Municipality.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Land Use/Land Cover (LULC) change represents one of the most critical urban transformation trends confronting the contemporary world, carrying profound environmental consequences. Driven by both direct and indirect human interventions, LULC changes threaten to severely degrade nearly half of the Earth's ice-free land surface. The escalating pressure of anthropogenic activities—frequently manifested as unplanned land conversions aimed at short-term economic and commercial gains—underscores the urgent need for integrated planning and management across all governance levels to safeguard landscapes and valuable ecological resources. In developing nations, the adverse impacts of rapid urbanization typically include the depletion of agricultural land, physical and socio-economic challenges, and excessive, fragmented urban sprawl. These processes impose irreversible and costly burdens on natural ecosystems. This unbridled expansion of economic activities, coupled with the immediate livelihood dependence of a vast portion of the growing global population on land resources, has placed the natural environment under severe stress. Empirical evidence suggests that human development has altered one-third to one-half of the global land surface, directly driving climate change, global warming, biodiversity loss, water resource depletion, and threats to food security.

In recent years, spatio-temporal modeling and forecasting of LULC variations within urban environments have attracted significant scholarly interest. Within this context, District 22 of Tehran Municipality stands out as one of the capital's most rapidly transforming sectors, having experienced accelerated population growth and construction booms over the past two decades. Situated in western Tehran, this district was strategically designated as a primary zone for residential and service expansion. Consequently, the conversion of agricultural and barren lands into built-up residential, commercial, and administrative areas has occurred at an unprecedented pace and continues unabated. Because the vast majority of previous studies have focused on broad LULC trends across the entire Tehran metropolis—thereby missing the long-term micro-level dynamics and future projections for individual municipal districts—the present study addresses this gap. This research evaluates LULC transformation trends within District 22 over a 30-year period (1995–2025) and projects future spatial patterns.

Methodology

This study is applied in terms of objective and descriptive-analytical in nature, utilizing a quantitative approach to assess the spatio-temporal dynamics of District 22, Tehran Municipality. To capture long-term LULC trends and compile a 30-year spatial-temporal series, multi-spectral imagery was acquired from the Landsat 5 Thematic Mapper (TM) sensor for the year 1995 (30-meter spatial resolution) and the Sentinel-2A MSI sensor for the year 2025 (10-meter spatial resolution). This specific multi-decadal temporal framework was selected due to its alignment with significant population expansion, rising tourism demands, intensifying anthropogenic footprints, and the historical inception of formalized environmental impact assessments in Iran. Images from the month of May (Ordibehesht in the solar Hijri calendar) were selected to ensure consistency, corresponding with peak vegetative vigor and the blooming period of local plant species.

Image classification was executed using the Random Forest (RF) machine learning algorithm. The RF classifier has demonstrated superior accuracy in processing satellite imagery across varying spatial resolutions compared to traditional methods such as Support Vector Machines (SVM) and Artificial Neural Networks (ANN), making it a benchmark technique for ensemble classification. All data processing and computational workflows were deployed within the cloud-based Google Earth Engine (GEE) environment. To enhance the spectral separability of water bodies and vegetation patches—the two primary ecological features of the study area—

the Normalized Difference Water Index (NDWI) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) were calculated and integrated into the classification models. Training and validation sampling was conducted via visual interpretation within GEE, generating 1,500 randomized points. Of these, 800 samples were allocated to train the RF algorithm, while the remaining 700 samples were reserved for post-classification accuracy testing. The landscape was partitioned into five distinct LULC classes: water bodies, agricultural land, vegetation cover, barren land, and built-up (anthropogenic) areas. Finally, a coupled Cellular Automata-Markov Chain (CA-Markov) model utilizing a 5×5 contiguity filter within the Idrisi TerrSet 2020 software was employed to simulate and forecast LULC configurations for the year 2041. Model calibration and validation were rigorously executed by simulating the 2025 LULC map based on 1995 baselines and statistically comparing it against the empirical 2025 classification.

Results

The empirical results indicate that built-up areas experienced the most substantial expansion over the study period, increasing from 2,572.11 hectares (41.48%) in 1995 to 2,827.46 hectares (45.60%) in 2025. Conversely, barren (unvegetated) land exhibited a significant decline, contracting from 2,780.52 hectares (44.84%) in 1995 to 2,391.8 hectares (38.57%) in 2025. The analysis also revealed a net increase in both water bodies and vegetation cover, juxtaposed against a steady reduction in agricultural parcels. These findings indicate that barren lands have served as the primary spatial repository supplying urban growth in District 22. Crucially, rather than deteriorating, vegetation cover expanded over the three-decade period. This specific trend suggests that District 22 has largely evaded the "synergistic ecological crisis" characterized by the simultaneous degradation of all natural land classes, a phenomenon commonly observed in other municipal districts of Tehran. This concurrent rise in both built-up areas and vegetative cover points to a deliberate urban greening policy executed alongside infrastructure development, exemplified by the establishment of major parks, urban woodlots, and the green belt around Chitgar. Cultivated forestry and landscape restoration projects have gradually converted previously exposed, unvegetated plots into functional green spaces. Nevertheless, the shrinkage of barren land from 44.84% to 38.57%, concurrent with the growth of built-up areas, signals a fundamental transition in the district's spatial structure from an open, undeveloped perimeter to a dense urban matrix. While this trajectory is expected in developing zones, the rate of conversion poses a long-term risk to residual barren lands, which fulfill critical ecological roles such as groundwater recharge and localized biodiversity support.

The CA-Markov predictive simulation for the horizon year 2041 indicates that built-up surfaces will continue their upward trajectory, reaching 2,890.4 hectares (46.61%), whereas barren lands will experience the sharpest decline, falling to 2,287 hectares (36.88%). Although anthropogenic expansion persists, a vital insight derived from the model is the noticeable deceleration in the annual growth rate. Built-up surfaces expanded at an average rate of 8.5 hectares per year during the 1995–2025 period; however, this rate is projected to decrease to approximately 3.9 hectares per year between 2025 and 2041. This deceleration strongly implies that the district is approaching its physical development limits and moving toward spatial saturation, as the inventory of developable barren land depletes. Furthermore, the forecasted minor increment in water bodies (from 2.33% to 2.42%) and the sustained growth of vegetation cover (reaching 13.9%) by 2041 corroborate that high-profile environmental infrastructure projects, such as Chitgar Lake, have successfully mitigated some of the adverse externalities of rapid urbanization. While these percentage increases are small, maintaining and marginally expanding natural and semi-natural land uses within a rapidly densifying urban district represents a noteworthy planning achievement.

Discussion and Conclusion

In alignment with the empirical findings and institutional frameworks such as the *Tehran Province Spatial Planning Document* (2009) and the *Tehran Metropolitan Area Master Plan* (1999), land resource utilization within District 22 must be strictly calibrated against the landscape's carrying capacity and ecological suitability. Key mandates for regional planners include optimizing environmental resource management (particularly water), minimizing ecological degradation, enacting adaptive natural resource management, and improving conservation indices during decision-making. A recognized limitation of this research is the reliance on medium-resolution satellite imagery (Landsat 30-meter pixels) necessitated by the historical depth of the long-term analysis. This pixel size lacks the capacity to detect fine-grained, fragmented spatial changes occurring at individual land-parcel scales or within minor developmental phases. Additionally, the model did not categorize vegetation into distinct structural types or assess qualitative biomass density.

Based on the insights gained, three strategic planning recommendations are proposed:

- 1) Establish a strict conservation priority map for remaining barren lands, zoning them into "developable," "restorable," and "protected" categories to preserve ecologically valuable terrains:
- 2) Institutionalize the "green-embedded development" model as a legally binding mandate within the district's detailed urban design codes, requiring a minimum of 0.3 hectares of new green infrastructure for every hectare of new physical development, alongside the creation of contiguous ecological corridors:
- 3) Shift the urban growth paradigm from horizontal sprawl to vertical, infill development while applying stringent regulatory penalties for unauthorized LULC conversions. The findings of this study offer a valuable tool for decision-makers to implement sustainable urban growth controls. Essential future tasks include formulating an integrated management plan mapped to bio-capacity thresholds, managing anthropogenic pressures (pollution controls and resource degradation mitigations), and proactively mapping environmental hazards such as subsidence, localized flooding, landslides, and dust storms. Achieving these targets will depend heavily on elevating inter-agency coordination, empowering environmental non-governmental organizations (NGOs), and fostering active stewardship among local communities to mitigate the systemic impacts of human development in this vital district.

Keywords: Spatial-temporal changes, Land use/ land cover, Remote sensing data, Modeling and prediction, District 22 of Tehran Municipality.

Author Contributions

All authors participated actively in the conceptualization, drafting, and critical revision of this manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Ethical considerations

The authors have strictly adhered to ethical principles regarding the execution and publication of this scientific research.

Funding/Acknowledgements

This article was supported by the Directorate General of Environment and Sustainable Development and the Tehran Municipality Beautification Organization, derived from the research project titled " *Design of Green Corridors and Formulation of an Integrated Environmental Management Plan for District 22 of Tehran Municipality* ", conducted in cooperation with the Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

(Notification No. 1408165/615). The authors express their gratitude to these supporting institutions for their assistance.

Conflict of interest

The authors declare that they have no competing or conflicts of interest associated with this work.

ارزیابی و پیش‌بینی تغییرات پوشش/کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل CA-Markov (مورد مطالعه: منطقه ۲۲ شهرداری تهران)

پروانه سبحانی^{۱*}، افشین دانه کار^۲

چکیده

تغییرات کاربری اراضی ناشی از توسعه فعالیت‌های انسانی یکی از مهم‌ترین تهدیدهای مناطق شهری به شمار می‌رود. از این رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی منطقه ۲۲ شهرداری تهران طی دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۵ و پیش‌بینی الگوی تغییرات تا سال ۲۰۴۱ با استفاده از مدل ترکیبی CA-Markov انجام شد. ابتدا نقشه‌های پوشش/کاربری اراضی برای سال‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۲۵ تهیه و روند تغییرات کلاس‌های مختلف اراضی تحلیل شد. سپس با بکارگیری مدل CA-Markov، تغییرات آینده شبیه‌سازی و اعتبار مدل با استفاده از ضریب کاپا ارزیابی شد. نتایج نشان داد اراضی انسان‌ساخت از ۲۵۷۲/۱۱ هکتار در سال ۱۹۹۵ به ۲۸۲۷/۴۶ هکتار در سال ۲۰۲۵ افزایش یافته و بیشترین روند افزایشی را داشته است. در مقابل، اراضی بایر از ۲۷۸۰/۵۲ به ۲۳۹۱/۸ هکتار کاهش یافته است. همچنین، منابع آبی و پوشش‌های گیاهی روندی افزایشی و اراضی کشاورزی روند کاهشی را طی دوره مطالعه نشان می‌دهد. ضریب کاپای ۰/۸۸ نیز دقت مطلوب مدل را در پیش‌بینی تغییرات تأیید می‌کند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، اراضی انسان‌ساخت تا سال ۲۰۴۱ به ۲۸۹۰/۴ هکتار افزایش یافته و اراضی بایر به ۲۲۸۷ هکتار کاهش خواهد یافت. این روند بیانگر تداوم گسترش کاربری‌های انسان‌ساخت در سال‌های آینده و تشدید فشار بر منابع سرزمینی در اثر رشد جمعیت و تمرکز فعالیت‌های اقتصادی و کالبدی است. از این رو، کاهش پیامدهای نامطلوب تغییرات پوشش/کاربری اراضی مستلزم برنامه‌ریزی کارآمد، مدیریت یکپارچه و بهره‌برداری پایدار از منابع سرزمینی است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌گیری، کنترل توسعه فعالیت‌های انسانی و تدوین راهبردهای مدیریت شهری در راستای تحقق توسعه پایدار باشد.

واژگان کلیدی

تغییرات مکانی-زمانی، پوشش/کاربری اراضی، داده‌های سنجش از دوری، مدل‌سازی و پیش‌بینی، منطقه ۲۲ شهرداری تهران.

۱. استادیار، گروه محیط زیست، دانشگاه لرستان، دانشکده منابع طبیعی، خرم‌آباد، ایران.

۲. استاد، گروه محیط زیست، دانشگاه تهران، دانشکده منابع طبیعی، کرج، ایران.

نویسنده مسئول: پروانه سبحانی
رایانامه: sobhani.pa@lu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۴

استناد به این مقاله:

سبحانی، پروانه و دانه کار، افشین (۱۴۰۵). ارزیابی و پیش‌بینی تغییرات پوشش/کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل CA-Markov (مورد مطالعه: منطقه ۲۲ شهرداری تهران). *برنامه‌ریزی توسعه کالبدی*، ۱۱ (۱)، ۴۱-۳۰.

(DOI: [10.30473/psp.2026.77866.2812](https://doi.org/10.30473/psp.2026.77866.2812))

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. © ۱۴۰۳. ناشر این مقاله، دانشگاه پیام نور است.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.

This is an open access article under the CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



مقدمه

یکی از مهمترین روندها تحولات و تغییرات شهری که امروزه جهان با آن روبه‌رو است، روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی می‌باشد، که این تغییرات با پیامدهای محیط زیستی بسیاری همراه است (Bikis et al., 2025; Setiawan et al., 2024). تغییرات پوشش/کاربری اراضی که شامل دخالت‌های مستقیم و غیرمستقیم انسان می‌شود، می‌تواند حدود نیمی از سطح خشکی‌های زمین را تحت تأثیر تهدیدات جدی قرار دهد (Gabisa et al., 2025; Rana & Sarkar, 2021; Sobhani & Danehkar, 2025). فشار فزاینده فعالیت‌های انسانی همچون تغییرات پوشش/کاربری اراضی، بهره‌وری بدون برنامه‌ریزی به‌منظور دستیابی به منافع اقتصادی و تجاری، نیاز به برنامه‌ریزی و مدیریتی یکپارچه در تمامی سطوح دارد تا به حفاظت از سرزمین و منابع با ارزش زیستی بپردازد (Kalfas et al., 2023; Saik et al., 2024). پیامدهای منفی رشد شهرنشینی شامل از بین رفتن زمین‌های کشاورزی و مشکلات کالبدی، اجتماعی، اقتصادی و توسعه فضایی بیش از حد و پراکنده در کشورهای در حال توسعه می‌باشد، که منجر به افزایش هزینه‌های غیرقابل جبرانی بر محیط زیست و منابع طبیعی شده است (Raihan & Tuspekova, 2022; Khan & Sobhani, 2024). توسعه بی‌رویه فعالیت‌های اقتصادی انسان از یک سو و اتکالی بی‌واسطه و وابستگی معیشتی بخش کثیری از جمعیت رو به رشد جهان به سرزمین از سوی دیگر، روز به روز محیط طبیعی را با چالش‌های متعددی مواجه کرده است (Lidicker et al., 2020; Awewomom et al., 2024). شواهد حاکی از آن است که توسعه انسانی یک سوم تا نیمی از سطح زمین را دگرگون کرده است (Sobhani & Danehkar, 2026)، که از مهمترین تأثیرات آن می‌توان به روند تغییرات آب و هوا و گرم شدن جهانی، نابودی تنوع زیستی، کاهش سطح منابع آب و تهدید امنیت غذایی اشاره نمود (Saleem et al., 2025; Shivanna, 2022; Tal et al., 2025).

با توجه به اهمیت این موضوع، بسیاری از مطالعات اخیر سعی در بررسی و پیش‌بینی مدل‌های تغییرات پوشش/کاربری اراضی برای تعیین اثرات بالقوه این تغییرات در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف داشته‌اند که در مطالعه حاضر، به برخی از این منابع اشاره شده است. قدوسی و همکاران (۱۴۰۴)، به بررسی تغییرات کاربری اراضی و شبیه‌سازی رشد و توسعه شهری در شهر اردبیل پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که اراضی ساخته شده دارای روند افزایشی بوده است و این تغییرات مطابق پیش‌بینی‌ها در سال ۲۰۳۸ نیز ادامه خواهد داشت. در مطالعه‌ای دیگر، خزایی و همکاران (۱۴۰۲)، به بررسی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی کلانشهر تهران با استفاده از تکنولوژی سنجش از دور پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰، این منطقه با گسترش مناطق مسکونی، رشد مناطق شهری و کاهش فضاهای سبز شامل باغات، درختزارها و پارک‌ها همراه بوده است. همچنین بررسی نقشه‌های آینده حاکی از تداوم روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی در این منطقه شهری می‌باشد. دوان و همکاران (۲۰۲۵) نیز تحلیل و پیش‌بینی روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی در منطقه اوکارا پاکستان را با استفاده تصاویر سنجش از دور و مدل ترکیبی CA-Markov مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که پوشش گیاهی از ۹۲/۶۸٪ به ۸۸/۱۶٪ درصد کاهش یافته است، در حالی که مساحت مناطق مسکونی از ۱/۶۹٪ به ۸/۴۳٪ افزایش یافته است. زمین‌های بایر نیز از ۴/۹٪ درصد به ۲/۷۱٪ درصد کاهش یافته است و وسعت منابع آبی نسبتاً ثابت باقی مانده‌اند. هانگ و همکاران (۲۰۲۲)، در مطالعه‌ای به شبیه‌سازی رشد شهری تحت تأثیر سیاست‌های ملی و تغییرات سطح زمین در ووهان چین پرداختند. مطابق نتایج پیش‌بینی‌های صورت گرفته، زمین‌های شهری در سال ۲۰۳۵ به میزان ۵۳۹/۷۳ کیلومتر مربع رشد خواهند کرد و به مساحت ۷۱۹/۷۶ کیلومترمربع خواهند رسید. بنابراین، لازم است روش‌های متعددی برای جمع‌آوری پیشنهادات در برنامه‌ریزی شهری لحاظ شود و عامل مرجع سیاست‌گذاری نیز در پیش‌بینی تغییرات آینده مورد توجه قرار گیرد.

مطابق مطالعات انجام شده، در طی سال‌های اخیر تغییرات پوشش/کاربری اراضی و پیش‌بینی و مدل‌سازی مکانی-زمانی این تغییرات در مناطق شهری، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. منطقه ۲۲ شهرداری تهران نیز یکی از سریع‌ترین مناطق در حال تحول پایتخت است. این منطقه که در غرب تهران واقع شده، طی دو دهه اخیر رشد جمعیتی و ساخت‌وساز شتابانی را تجربه کرده است. این منطقه طی دهه‌های اخیر به عنوان یکی از مناطق هدف برای توسعه مسکونی و خدماتی تعریف شده، و

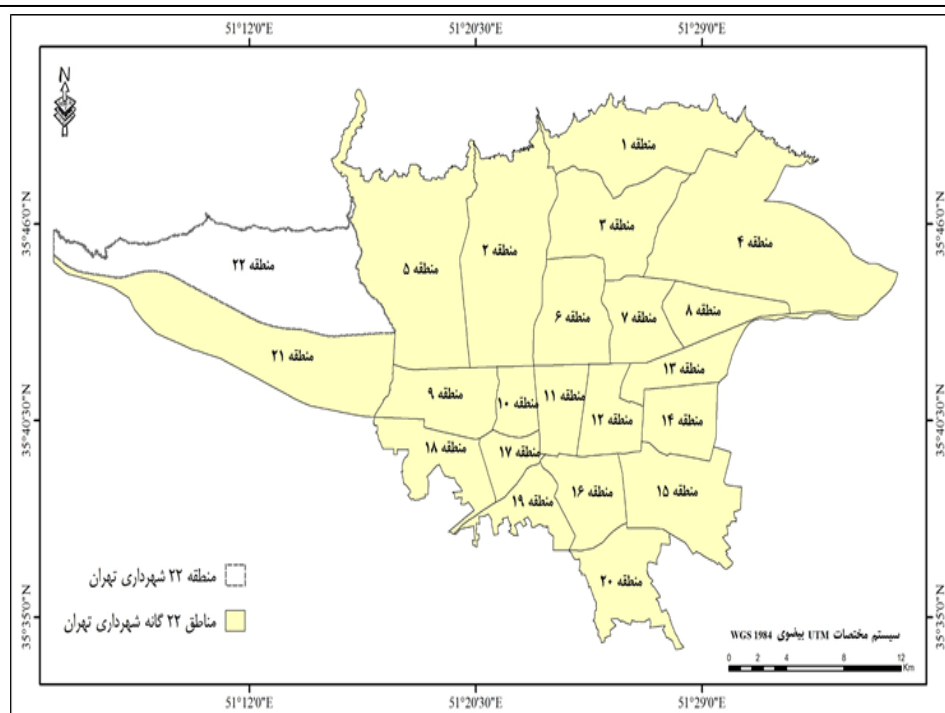
تغییر کاربری اراضی کشاورزی و بایر به مناطق مسکونی، تجاری و خدماتی در این منطقه با سرعت بالایی رخ داده و همچنان ادامه دارد.

تاکنون در اکثر مطالعات صورت گرفته، به بررسی روند کلی تغییرات در کلانشهر تهران پرداخته شده است و جزئیات این تغییرات در بلندمدت و پیش‌بینی آن برای هریک از مناطق ۲۲ گانه شهرداری تهران مورد تحلیل قرار نگرفته است. از این رو در مطالعه حاضر، به بررسی روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی در منطقه ۲۲ شهرداری تهران طی دوره‌ای ۳۰ ساله (۱۹۹۵-۲۰۲۵) پرداخته شد. در ادامه روند این تغییرات با استفاده از مدل ترکیبی CA-Markov مورد شبیه‌سازی و پیش‌بینی تا سال ۲۰۴۱ قرار گرفت. بررسی تغییرات پوشش/کاربری اراضی منطقه ۲۲ و پیش‌بینی آن نه تنها از منظر علمی با اهمیت است، بلکه از جنبه کاربردی می‌تواند به عنوان ابزاری برای تصمیم‌گیری هوشمندانه شهری در شورای شهر، شهرداری منطقه و سازمان حفاظت از محیط زیست عمل کند. همچنین نتایج این مطالعه می‌تواند به عنوان سیستمی پشتیبان جهت تصمیم‌گیری به برنامه‌ریزان شهری برای مدیریت بهتر و کنترل تغییرات پوشش/کاربری اراضی کمک نماید.

منطقه ۲۲ شهرداری تهران واقع در شمال غربی شهر تهران، به دلیل ویژگی‌های خاص طبیعی و موقعیت خود در پهنه پایتخت، به عنوان منطقه مستعد توسعه گردشگری شناخته شده و چشم‌انداز آینده آن بر این اساس استوار شده است. این منطقه به لحاظ دارا بودن امکانات بالقوه و بالفعل محیط زیستی و تنوع ساختار زمین در پهنه‌های حساس اکولوژیک از جمله "دریاچه شهدای خلیج فارس" و "جنگل‌های چیتگر"، و بکر بودن قسمت اعظم آن از سوی دیگر، از دیرباز مورد توجه شهرسازان و کارشناسان امور شهری قرار گرفته است. با این حال، منطقه ۲۲ شهرداری تهران، با توجه به روند رشد جمعیت و توسعه سریع شهرنشینی در طی دهه‌های اخیر، با تغییرات قابل ملاحظه‌ای در طبقات پوشش/کاربری اراضی مواجه شده است، از این رو در مطالعه حاضر، با هدف تحلیل روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی در یک بازه زمانی بلندمدت (۱۹۹۵-۲۰۲۵) و همچنین پیش‌بینی و مدل‌سازی این تغییرات در آینده، به بررسی مکانی-زمانی طبقات پوشش/کاربری اراضی منطقه ۲۲ شهرداری تهران با استفاده از تصاویر سنجنش از دوری و مدل CA-Markov پرداخته شد. در این راستا، عمده‌ترین سوالات تحقیق عبارتند از: (۱) روند تغییرات طبقات پوشش/کاربری اراضی منطقه ۲۲ شهرداری تهران در طی سال‌های ۱۹۹۵-۲۰۲۵ از چه وضعیتی برخوردار است؟ (۲) کدامیک از کاربری‌ها بیشترین روند تغییرات را به خود اختصاص داده‌اند؟ (۳) روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی تا سال ۲۰۴۱ چگونه خواهد بود؟

داده‌ها و روش کار

منطقه ۲۲ شهرداری تهران با مساحت شهری ۶۲۰۰ هکتار در طول شرقی ۵۱ درجه، ۵ دقیقه و ۱۰ ثانیه تا ۵۱ درجه، ۲۰ دقیقه و ۴۰ ثانیه و عرض شمالی ۳۵ درجه، ۳۲ دقیقه و ۱۶ ثانیه تا ۳۵ درجه، ۵۷ دقیقه و ۱۹ ثانیه در قسمت شمال غربی شهر تهران و در پایین دست حوضه آبریز رودخانه کن و وردیج قرار دارد (شکل ۱). این منطقه از شمال با کوهستان البرز مرکزی، در شرق با حریم رودخانه کن، در جنوب با آزادراه تهران - کرج و در غرب به محدوده جنگل‌های دست کاشت وردآورد محدود می‌شود. مسیر رودخانه کن در شرق منطقه ۲۲ و از شمال به جنوب جریان دارد. رودخانه وردآورد نیز در امتداد شمالی جنوبی و به موازات رودخانه کن در جریان است و در قسمت شمالی در غرب منطقه میانی امتداد یافته و حد غربی محدوده را تشکیل می‌دهد (Parizadi et al., 2024). مقایسه سطح منطقه ۲۲ با سطح مناطق ۲۲ گانه شهرداری تهران (۷۰۷۵۰ هکتار) نشان می‌دهد که این منطقه، حدود ۸/۴ درصد از مساحت محدوده خدماتی شهر تهران را به خود اختصاص داده است و از جایگاه مهمی در ساختار کالبدی تهران آینده، بویژه در حوزه غربی آن برخوردار است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

در مطالعه حاضر به منظور بررسی روند تغییرات مکانی-زمانی منطقه ۲۲ شهرداری تهران، از تصاویر چندطیفی مجموعه لندست (L5-TM: سال ۱۹۹۵ با اندازه پیکسل ۳۰ متر) و سنتینل ۲ (Sentinel-2A: سال ۲۰۲۵ با اندازه پیکسل ۱۰ متر)، به ترتیب در بازه‌های زمانی ۱۹۹۵ و ۲۰۲۵ (یک دوره ۳۰ ساله) برای نشان دادن سری مکانی-زمانی تغییرات بلندمدت پوشش/کاربری اراضی و همچنین نقشه طبقات کاربری اراضی در این منطقه استفاده شد. لازم به ذکر است که دلیل بررسی بازه‌های زمانی مذکور، با توجه به رشد جمعیت، افزایش تقاضای گردشگری، گسترده شدن فعالیت‌های انسانی در یک دوره بلندمدت و شروع مطالعات محیط‌زیستی در کشور می‌باشد، از این‌رو تصاویر طی سال‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۲۵ مورد انتخاب و بررسی قرار گرفتند. همچنین ماه تهیه تصاویر، مربوط به اردیبهشت ماه به دلیل پوشش سبز غالب و زمان گلدهی پوشش‌های گیاهی در این بازه زمانی است.

برای طبقه‌بندی تصاویر، روش الگوریتم جنگل تصادفی به کار گرفته شد. این الگوریتم، که اغلب به منظور طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای در توان تفکیک‌های مکانی کاربرد دارد، در مقایسه با الگوریتم‌های متداول طبقه‌بندی به روش ماشین بردار پشتیبانی و شبکه‌های عصبی، نتایج چشم‌گیری داشته و معرف روش‌های جدید طبقه‌بندی ترکیبی است (Zhang et al., 2019; Ao et al., 2018). روش جنگل تصادفی شیوه طبقه‌بندی نظارت شده‌ای است که در آن مجموعه‌ای از درخت‌ها در تصمیم‌گیری و طبقه‌بندی استفاده می‌شود. در این روش ابتدا تعدادی درخت تصمیم‌گیری که از هم بیشترین تمایز را دارند تشکیل و در مورد هر یک از این درخت‌ها، روند مربوط به تصمیم‌گیری به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته می‌شود. جنگل تصادفی یکی از روش‌های یادگیری ماشین است که به دلیل سرعت بالای آن در مورد داده‌هایی با حجم بالا و عدم نیاز به داده‌های آموزشی، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است (Fischer et al., 2023). در این شیوه ابتدا پارامترهای شبکه، شامل تعداد درخت‌ها و گره‌های مربوط به هر درخت، مشخص می‌شود. سپس در هر درخت، تعدادی از داده‌های ورودی به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. پس از عملیات تصمیم‌گیری در هر یک از این درخت‌ها، نتایج با هم تلفیق می‌شوند (خروجی طبقه‌بندی بر اساس یک رأی اکثریت از پیش‌بینی تک درخت‌های آموزش دیده ایجاد می‌شود). دقت این روش طبق توان درختان، به صورت جداگانه و میزان همبستگی در بین آن‌ها مشخص می‌شود، بدین معنی که هر چه درختان انتخابی قابلیت تصمیم‌گیری بهتری داشته و میزان همبستگی آن‌ها کمتر باشد، دقت نهایی نیز بیشتر خواهد شد. در مطالعه حاضر ۱۰ درخت تصمیم‌گیری با توجه به داده‌های آموزشی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه به پایش تغییرات و ارزیابی دقت تصاویر پرداخته شد. بارزسازی و پایش تغییرات، در حقیقت کشف تغییرات به وجود آمده

در یک مکان است که در فرآیند سنجش از دور، با استفاده از تصاویر دو یا چندزمانه انجام می‌شود (Liu et al., 2007; Munthali et al., 2020). در مطالعه حاضر نیز، علاوه بر بررسی ماتریس خطا دقت طبقه‌بندی بر اساس شاخص کاپا و صحت کلی مورد بررسی قرار گرفت.

برای پردازش داده‌ها و اطلاعات از محیط گوگل ارث انجین (GEE)^۱ استفاده شد. در این مطالعه به منظور تمایز و تفکیک بالاتر آب و پوشش گیاهی به عنوان دو عنصر اصلی در طبقات پوشش/کاربری اراضی منطقه، به ترتیب از دو شاخص طیفی از جمله شاخص نرمال شده تفاوت پهنه‌های آبی (NDWI)^۲ و شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)^۳ استفاده شد. در NDWI از باند سبز مرئی و باند مادون قرمز نزدیک برای بارزسازی پهنه‌های آبی و حذف پوشش‌های گیاهی و خاک استفاده گردید. دامنه تغییرات این شاخص بین +۱ و -۱ قرار دارد که هر چه ارزش پیکسل به +۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده وجود پهنه‌های آبی و هر چه به -۱ نزدیک‌تر باشد، حاکی از وجود پهنه‌های غیرآبی است (Sagar et al., 2017). برای محاسبه این شاخص می‌توان از رابطه ۱، استفاده نمود. در نقشه‌های تهیه شده کلاس پهنه‌های آبی با کد صفر و کلاس‌های غیرآبی با کد یک به نمایش گذاشته شد.

$$NDWI = \frac{(G - NIR)}{(G + NIR)} \quad \text{رابطه ۱}$$

همچنین از NDVI برای تهیه پوشش‌های گیاهی از سایر طبقات پوشش/کاربری، مطابق رابطه ۲، استفاده شد. این شاخص، یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها بر روی داده‌های سنجش از راه دور می‌باشد که در این رابطه، R و NIR به ترتیب طول موج‌های قرمز مرئی و مادون قرمز نزدیک هستند (Shimu et al., 2019). NDVI مقادیر نرمال شده بین -۱ و +۱ را شامل می‌شود، به‌طوری که مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم به دلیل انعکاس نسبتاً بالایی در محدوده مادون قرمز نزدیک و انعکاس کم در محدوده قرمز مرئی، مقادیر بالای NDVI را دارند.

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad \text{رابطه ۲}$$

نمونه‌برداری یکی از مهم‌ترین مراحل طبقه‌بندی تصاویر است که در کیفیت و دقت طبقه‌بندی تأثیر به‌سزایی دارد (Waśniewski et al., 2023). در این مطالعه نقاط نمونه‌برداری در سامانه تحت وب GEE به صورت بصری، به تعداد مورد نظر و تصادفی انتخاب شدند. در واقع حداکثر ۱۵۰۰ نمونه انتخاب شد که از این مجموع، ۸۰۰ نمونه برای آموزش الگوریتم و ۷۰۰ نمونه برای آزمایش طبقه‌بندی انتخاب شد. سپس به طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای و تهیه نقشه‌های پوشش-کاربری اراضی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی، مطابق توضیحات فوق پرداخته شد. براین اساس، طبقات پوشش/کاربری اراضی در محدوده مورد مطالعه شامل منابع آبی، اراضی کشاورزی، پوشش‌های گیاهی، اراضی بایر و اراضی انسان‌ساخت می‌باشند.

امروزه تغییرات و تبدیل پوشش/کاربری اراضی به عنوان عاملی تهدیدکننده در مناطق شهری شناخته شده است (سبجانی و دانه کار، ۱۴۰۳). ازاین‌رو، پایش این تغییرات از طریق تصاویر ماهواره‌ای و پیش‌بینی و ارزیابی پتانسیل آن‌ها از طریق مدل‌سازی می‌تواند به برنامه‌ریزان و مدیران برای تصمیمات آگاهانه‌تر کمک نماید (Sobhani et al., 2021). براین اساس در مطالعه حاضر به منظور فراهم‌سازی این اطلاعات با توجه به مرور منابع مرتبط و بررسی‌های انجام شده، با استفاده از مدل CA-Markov به پیش‌بینی روند تغییرات آبی پوشش/کاربری اراضی موجود در محدوده مورد مطالعه برای سال ۲۰۴۱ اقدام شد. زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار به عنوان ابزاری به توصیف تغییرات و فرآیندهای بوم‌سازگان طبیعی در آینده می‌پردازد. همچنین این مدل تغییرات کاربری‌ها را از یک دوره به دوره دیگر مورد تفسیر قرار می‌دهد و از آن به عنوان مبنایی در نقشه‌سازی تغییرات آینده استفاده می‌نماید که این فرآیند با استفاده از یک ماتریس احتمال انتقال، از زمان ۱ به زمان ۲ صورت می‌گیرد (Ibarra-Bonilla

^۱ -Google Earth Engine

^۲ -Normalized Difference Water Index

^۳ - Normalized Difference Vegetation Index

(et al., 2021). بدین ترتیب در این مطالعه، پس از پایش روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی از طریق تصاویر ماهواره‌ای طی سال‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۲۵، نقشه‌های پوشش/کاربری اراضی هر یک تهیه شد. در ادامه به منظور پیش‌بینی روند تغییرات احتمالی در سال ۲۰۴۱ از آنالیز زنجیره مارکوف به‌منظور تعیین احتمال تغییر هر طبقه کاربری به دیگر طبقات کاربری موجود با استفاده از نرم‌افزار Idrisi TerrSet ۲۰۲۰ اقدام گردید. اجرای آنالیز زنجیره مارکوف در این مطالعه به دو منظور صورت گرفت: ۱) تهیه ماتریس اول (ماتریس احتمال انتقال) جهت کالیبراسیون مدل از طریق شبیه‌سازی نقشه پوشش-کاربری اراضی سال ۲۰۲۵ با استفاده از نقشه سال ۱۹۹۵ و ۲) تهیه ماتریس دوم به‌منظور پیش‌بینی نقشه تغییرات پوشش/کاربری اراضی در سال ۲۰۴۱ از طریق نقشه شبیه‌سازی شده در سال ۲۰۲۵ است. همچنین از فیلتر همسایگی 5×5 به منظور ایجاد قوانین انتقال برای پیش‌بینی تغییرات آینده استفاده از زمین به کار رفت (Gharaibeh et al., 2020). علاوه‌براین، به‌منظور سنجش صحت مدل‌سازی به مقایسه نقشه شبیه‌سازی شده ۲۰۲۵ با نقشه واقعی آن اقدام شد. از آنجایی که معمول‌ترین پارامترهای برآورد دقت، صحت کلی و ضریب کاپا می‌باشد (Zafar et al., 2024)، از این‌رو، در این مطالعه سنجش صحت اطلاعات از طریق صحت کلی و ضریب کاپا مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت نقشه شبیه‌سازی شده پوشش/کاربری اراضی با استفاده از مدل CA-Markov در سال ۲۰۴۱ با توجه به صحت اطلاعات بررسی شده حاصل شد. همچنین با استفاده از Google Earth و آنالیز CrossTab در نرم‌افزار TerrSet نیز دقت طبقه‌بندی نقشه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

مطابق با احتمال فرمول نیز، به منظور پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در مدل زنجیره مارکوف از رابطه ۳ استفاده شد (Taloor et al., 2024).

$$S_{(t+1)} = P_{ij} * S_{(t)} \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه $S_{(t)}$ و $S_{(t+1)}$ حالت‌های سیستم در زمان t و $t+1$ می‌باشند و P_{ij} ماتریس احتمال انتقال در این حالت‌ها می‌باشد که از طریق رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$\begin{pmatrix} P_{11} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & \dots & P_{nn} \end{pmatrix} P_{ij} \geq 0, \sum_{j=1}^n P_{ij} = 1, j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۴}$$

در ادامه از مدل سلول‌های خودکار استفاده شد که در این مدل، فضا به‌صورت یک شبکه تعریف می‌گردد که به هر خانه یک سلول گفته می‌شود. سلول‌های خودکار در زمان‌های گسسته به‌طور هم‌زمان و بر طبق یک قانون محلی به‌هنگام می‌شوند که مقدار هر سلول بر اساس مقادیر سلول‌های همسایه و خود آن سلول تعیین می‌گردد (Aslami et al., 2015). از این‌رو مدل سلول‌های خودکار را می‌توان از رابطه ۵ محاسبه نمود (Sang et al., 2011).

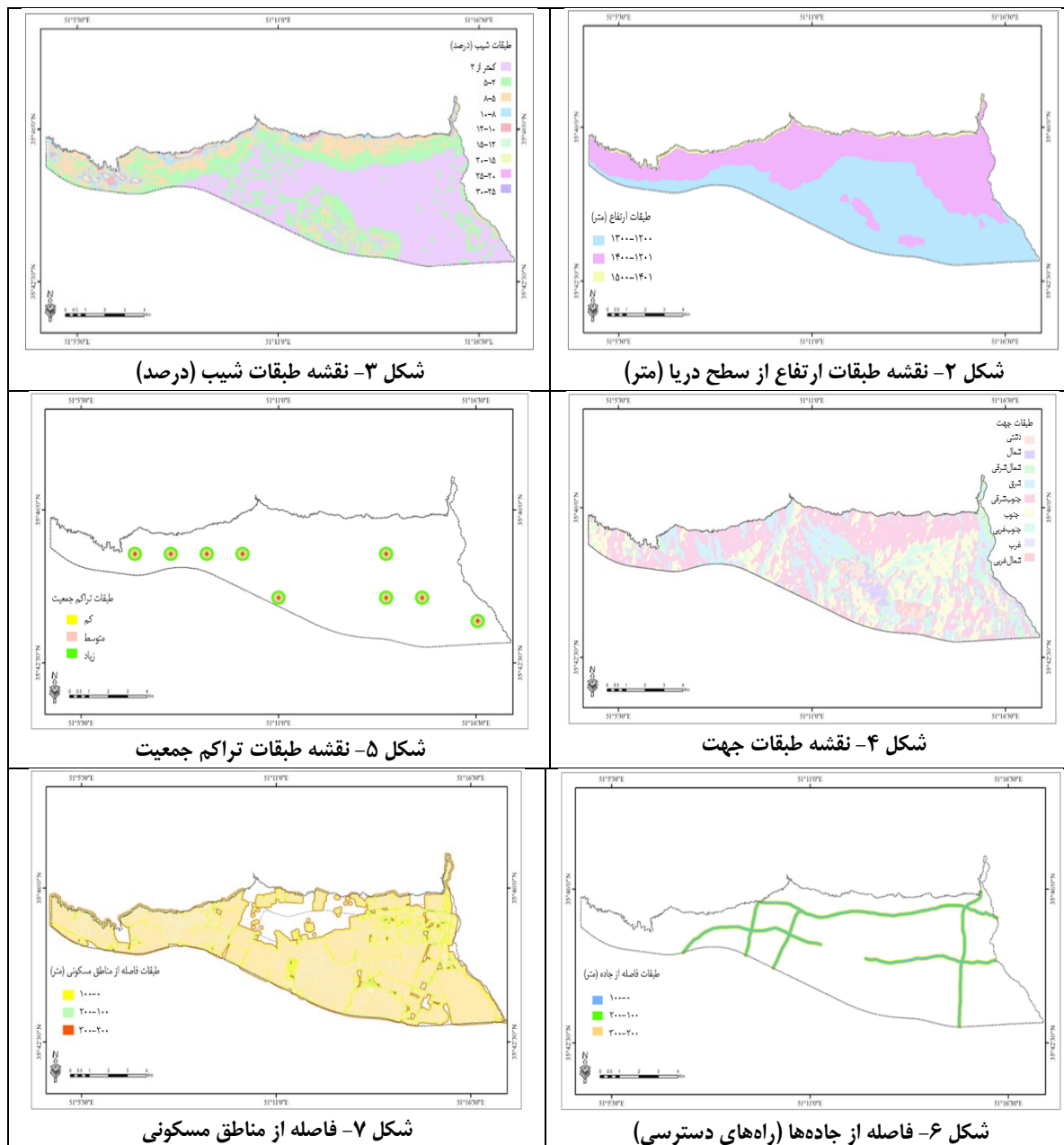
$$S(t, t+1) = f(S(t), N) \quad \text{رابطه ۵}$$

در این رابطه S مجموعه‌ای از حالت‌های سلولی، N زمینه سلولی، t و $t+1$ نشان‌دهنده تغییرات حالت در زمان‌های مختلف و f یک تابع انتقال را در حالت‌های سلولی و فضای محلی نشان می‌دهد. همچنین محاسبه احتمالات انتقال از طریق رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$P_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum A_{ij}} \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن A_{ij} مساحت یا تعداد پیکسل‌های تبدیل شده از کاربری i به j در دوره کالیبراسیون است.

در ادامه به منظور نمایش نقشه‌های تناسب متغیرهایی همچون ارتفاع، شیب، جهت، تراکم جمعیت، فاصله از جاده‌ها (راه‌های دسترسی) و فاصله از مناطق مسکونی نیز به عنوان عوامل محرک تغییر بر اساس شرایط منطقه و نظر متخصصان مورد بررسی قرار گرفت و نقشه‌های هر یک به شرح زیر در شکل‌های ۲ تا ۷ نمایش داده شده است.



شرح و تفسیر نتایج

نتایج ارزیابی دقت تصاویر بررسی شده، حاکی از آن است که مقادیر به دست آمده از مطلوبیت بالایی برخوردار بوده و در سطح قابل قبولی است (جدول ۱). مطابق نتایج از بین کاربری‌های موجود در محدوده مورد مطالعه، اراضی انسان‌ساخت با مساحت ۲۸۲۷/۴۶ هکتار (۴۵/۶۰ درصد) در سال ۲۰۲۵ در مقایسه با سال ۱۹۹۵ با مساحت ۲۵۷۲/۱۱ هکتار (۴۱/۴۸ درصد) از بیشترین روند افزایشی برخوردار بوده است (جدول ۲). در حالی که اراضی بایر (لخت) با مساحت ۲۳۹۱/۸ هکتار (۳۸/۵۷ درصد) در سال ۲۰۲۵ به نسبت سال ۱۹۹۵ با مساحت ۲۷۸۰/۵۲ هکتار (۴۴/۸۴ درصد) روند کاهشی داشته است. این نتایج نشان می‌دهد که منبع اصلی توسعه

شهری در این منطقه، اراضی بایر (لخت) بوده است و برخلاف بسیاری از مناطق شهری که توسعه به قیمت از بین رفتن زمین‌های کشاورزی تمام می‌شود، در منطقه ۲۲ به نظر می‌رسد که "دست‌نخورده‌ترین" اراضی یعنی زمین‌های بایر سهم اصلی تبدیل را به خود اختصاص داده‌اند و ۳۸۹ هکتار از این اراضی به سایر کاربری‌ها تبدیل شده‌اند که سهم عمده آن به ساخت‌وساز اختصاص یافته است.

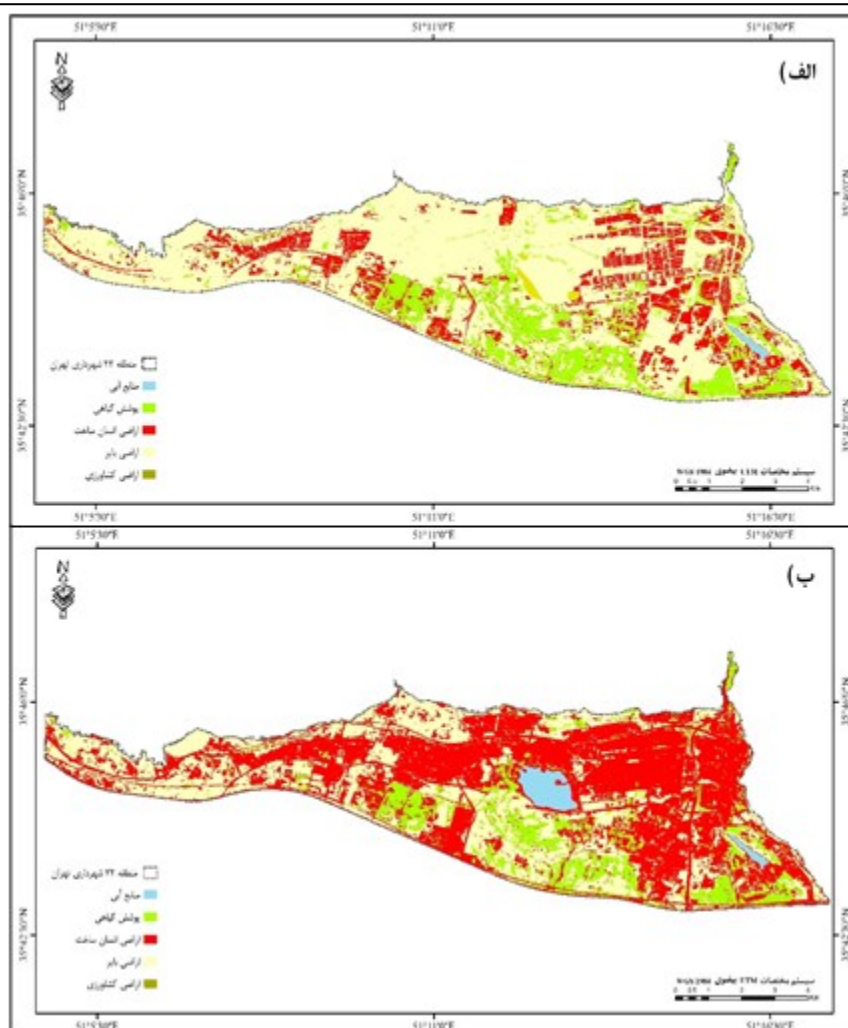
اراضی کشاورزی نیز با مساحت ۱۵/۱۲ هکتار (۰/۲۴ درصد) در سال ۲۰۲۵ در مقایسه با سال ۱۹۹۵ با مساحت ۳۸/۱ هکتار (۰/۶۱ درصد) روند کاهشی داشته است. با اینکه اراضی کشاورزی سهم ناچیزی از منطقه را تشکیل می‌دهند (از ۰/۶٪ به ۰/۲٪)، کاهش این اراضی نشانه‌ای از تغییر ساختار اقتصادی منطقه است و گذار از فعالیت‌های کشاورزی حاشیه‌ای به اقتصاد شهری می‌باشد. همچنین منابع آبی با مساحت ۱۴۴/۷۵ هکتار (۲/۳۳ درصد) در سال ۲۰۲۵ روند کاهشی را نسبت به سال ۱۹۹۵ با مساحت ۹۸/۵۶ هکتار (۱/۵۸) نشان می‌دهد. پوشش‌های گیاهی نیز با مساحت ۸۲۰/۷۵ هکتار (۱۳/۲۳ درصد) در سال ۲۰۲۵ به نسبت سال ۱۹۹۵ با مساحت ۷۱۰/۷۱ هکتار (۱۱/۴۶ درصد) افزایش یافته است. بدین ترتیب ایجاد فضاهای سبز شهری و پارک‌ها در کنار توسعه مسکونی، به‌ویژه پروژه‌های بزرگ مانند بوستان‌های اطراف دریاچه چیتگر و کمربند سبز غرب تهران و احیای پوشش گیاهی در اراضی بایر که پیش‌تر فاقد پوشش بوده‌اند، حاکی از آن است که در منطقه ۲۲، برخلاف بسیاری از شهرهای در حال توسعه، توسعه شهری لزوماً با تخریب پوشش گیاهی همراه نبوده و بخشی از برنامه‌ریزی شهری به ارتقای سرانه فضای سبز اختصاص داشته است. در شکل ۸، روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی در محدوده مورد مطالعه طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۵ نمایش داده شده است.

جدول ۱- ارزیابی دقت تصاویر بر اساس صحت کلی و ضریب کاپا طی سال‌های ۱۹۹۵ - ۲۰۲۵

تصاویر ماهواره‌ای	سال	صحت کلی (درصد)	ضریب کاپا (درصد)
L5-TM	۱۹۹۵	۰/۹۵	۰/۹۰
Sentinel-2A	۲۰۲۵	۰/۹۸	۰/۹۴

جدول ۲- روند تغییرات پوشش-کاربری اراضی در محدوده مورد مطالعه طی سال‌های ۱۹۹۵ - ۲۰۲۵

ردیف	کاربری اراضی	سال		۱۹۹۵		۲۰۲۵		اختلاف روند تغییرات ۲۰۲۵-۱۹۹۵		روند کاهشی/ افزایشی
		مساحت		مساحت		مساحت		مساحت		
		هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	
۱	منابع آبی	۹۸/۵۶	۱/۵۸	۱۴۴/۷۵	۲/۳۳	۴۶/۱۹	۰/۷۵	+		
۲	اراضی کشاورزی	۳۸/۱	۰/۶۱	۱۵/۱۲	۰/۲۴	-۲۲/۹۸	-۰/۳۷	-		
۳	پوشش‌های گیاهی	۷۱۰/۷۱	۱۱/۴۶	۸۲۰/۷۵	۱۳/۲۳	۱۱۰/۰۴	۱/۷۷	+		
۴	اراضی بایر (لخت)	۲۷۸۰/۵۲	۴۴/۸۴	۲۳۹۱/۸	۳۸/۵۷	-۳۸۸/۷۲	-۶/۲۷	-		
۵	اراضی انسان‌ساخت	۲۵۷۲/۱۱	۴۱/۴۸	۲۸۲۷/۴۶	۴۵/۶۰	۲۵۵/۳۵	۴/۱۲	+		
جمع کل		۶۲۰۰	۱۰۰	۶۲۰۰	۱۰۰	-	-	-		



شکل ۸- روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی در محدوده مورد مطالعه: الف) ۱۹۹۵، ب) ۲۰۲۵

پس از بررسی روند تغییرات طبقات پوشش/کاربری اراضی از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۵، به پیش‌بینی و شبیه‌سازی روند تغییرات احتمالی در سال ۲۰۴۱ با استفاده از مدل CA-Markov پرداخته شد (جدول ۳). در این مطالعه اعتبارسنجی مدل از طریق مقایسه نقشه شبیه‌سازی شده در سال ۲۰۲۵ با نقشه واقعی تهیه شده برای همان سال صورت گرفت. همچنین، دقت تغییرات پیش‌بینی شده از طریق تجزیه و تحلیل تفاوت بین نقشه‌های پوشش/کاربری اراضی پیش‌بینی شده و واقعی در سال ۲۰۲۵ و استفاده از ضریب کاپا به عنوان ابزاری معتبر جهت ارزیابی نقشه‌های تهیه شده محاسبه گردید. مطابق نتایج، ضریب کاپا به دست آمده برابر با ۰/۸۸ می‌باشد که صحت مدل در این مطالعه را تأیید می‌نماید. همان‌طور که نتایج نشان داد، اراضی انسان‌ساخت با مساحت ۲۸۹۰/۴ هکتار (۴۶/۶۱ درصد) در سال ۲۰۴۱ در مقایسه با سال ۲۰۲۵ با مساحت ۲۸۲۷/۴۶ هکتار (۴۵/۶۰ درصد) بیشترین روند افزایشی را دارا می‌باشد. در حالی که اراضی باغ (لخت) با مساحت ۲۲۸۷ هکتار (۳۶/۸۸ درصد) در سال ۲۰۴۱ در مقایسه با سال ۲۰۲۵ با مساحت ۲۳۹۱/۸ هکتار (۳۸/۵۷ درصد) بیشترین روند کاهشی را داشته است. در مقابل منابع آبی با مساحت ۱۵۰/۲۲ هکتار (۲/۴۲ درصد) در سال ۲۰۴۱ در مقایسه با سال ۲۰۲۵ با مساحت ۱۴۴/۷۵ هکتار (۲/۳۳ درصد) از روند افزایشی برخوردار است. پوشش‌های گیاهی نیز با مساحت ۸۶۰/۴ هکتار (۱۳/۸۷ درصد) در سال ۲۰۴۱ در مقایسه با سال ۲۰۲۵ با مساحت ۸۲۰/۷۵ هکتار (۱۳/۲۳ درصد) روند افزایشی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، اراضی کشاورزی در این منطقه، با مساحت ۱۲/۰۱ هکتار (۰/۱۹ درصد) در سال ۲۰۴۱ در مقایسه با سال ۲۰۲۵ با مساحت ۱۵/۱۲ هکتار (۰/۲۴ درصد) روند کاهشی خواهد داشت. در جدول ۴، ماتریس انتقال طبقات پوشش/کاربری اراضی در محدوده مورد مطالعه نمایش داده شده است.

مطابق نتایج، پیش‌بینی کاهش اراضی بایر (در حدود ۱۰۵ هکتار) در کنار افزایش اراضی انسان‌ساخت (حدود ۶۳ هکتار) نشان می‌دهد که الگوی تغذیه توسعه شهری از ذخایر اراضی بایر همچنان ادامه دارد و نکته قابل توجه، کاهش نرخ تغییرات است. در دوره ۱۹۹۵-۲۰۲۵، سالانه حدود ۱۳ هکتار به اراضی انسان‌ساخت اضافه شده است. در حالی که در دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۱، این نرخ به حدود ۴ هکتار در سال کاهش می‌یابد. این کُند شدن سرعت توسعه می‌تواند ناشی از محدودیت فیزیکی اراضی بایر قابل تبدیل و همچنین بلوغ نسبی و رشد توسعه شهری در این منطقه باشد. افزایش پوشش گیاهی (حدود ۴۰ هکتار اضافه) در دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۱، در ادامه روند تغییرات پیشین، نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی شهری در منطقه ۲۲ مؤلفه "سبزی‌نگی" و توسعه پوشش‌های دست کاشت را در اولویت قرار داده است. بدین ترتیب با تداوم این روند، منطقه ۲۲ شهرداری تهران، می‌تواند به یکی از معدود مناطقی از شهر تهران تبدیل شود که همزمان با توسعه مسکونی، سرانه فضای سبز نیز افزایش یافته است. در شکل ۹، نیز نقشه پیش‌بینی تغییرات پوشش/کاربری اراضی در محدوده مورد مطالعه طی سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۴۱ نمایش داده شده است.

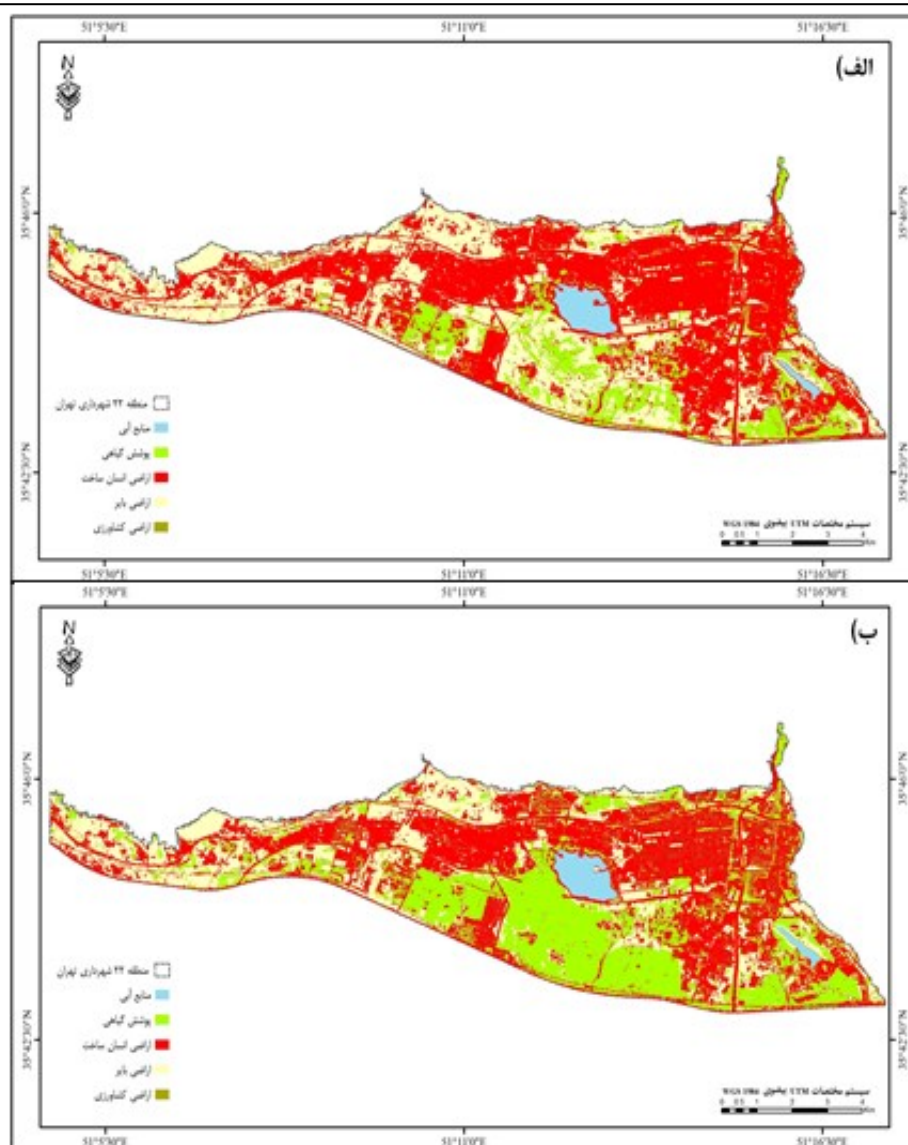
جدول ۳- پیش‌بینی روند تغییرات پوشش-کاربری اراضی با استفاده از مدل CA-Markov طی سال‌های ۲۰۲۵-۲۰۴۱

ردیف	سال	مساحت واقعی پوشش/کاربری اراضی ۲۰۲۵		مساحت شبیه‌سازی شده پوشش/کاربری اراضی ۲۰۲۵		مساحت پیش‌بینی شده پوشش/کاربری اراضی ۲۰۴۱		اختلاف روند تغییرات ۲۰۲۵-۲۰۴۱		روند کاهشی/افزایشی
		هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	
۱	منابع آبی	۱۴۴/۷۵	۲/۳۳	۱۴۴/۸۷	۲/۳۳	۱۵۰/۲۲	۲/۴۲	۵/۴۷	۰/۰۹	+
۲	اراضی کشاورزی	۱۵/۱۲	۰/۲۴	۱۵/۶۷	۰/۲۵	۱۲/۰۱	۰/۱۹	-۳/۱۱	-۰/۰۵	-
۳	پوشش‌های گیاهی	۸۲۰/۷۵	۱۳/۲۳	۸۲۰/۰۶	۱۳/۲۳	۸۶۰/۴	۱۳/۸۷	۳۹/۶۵	۰/۶۴	+
۴	اراضی بایر (لخت)	۲۳۹۱/۸	۳۸/۵۷	۲۳۹۱/۱۱	۳۸/۵۶	۲۲۸۷	۳۶/۸۸	-۱۰۴/۸	-۱/۸۷	-
۵	اراضی انسان‌ساخت	۲۸۲۷/۴۶	۴۵/۶۰	۲۸۲۷/۷۷	۴۵/۶۰	۲۸۹۰/۴	۴۶/۶۱	۶۲/۹۴	۱/۰۱	+
مجموع		۶۲۰۰	۱۰۰	۶۲۰۰	۱۰۰	۶۲۰۰	۱۰۰	-	-	-

جدول ۴- ماتریس احتمال انتقال پیش‌بینی طبقات پوشش/کاربری اراضی برای سال ۲۰۴۱

بر اساس طبقه‌بندی ۲۰۲۵ (درصد)

طبقات پوشش/کاربری اراضی	منابع آبی	اراضی کشاورزی	پوشش‌های گیاهی	اراضی بایر (لخت)	انسان‌ساخت
منابع آبی	۰	۱۲/۸	۱۶/۲	۱/۴	۰/۵
اراضی کشاورزی	۰	۱۸/۹	۲۷/۸	۱۴/۲	۰/۷
پوشش‌های گیاهی	۰	۰/۶	۷۲/۸	۱/۸	۲۳/۱۵
اراضی بایر (لخت)	۰	۱۷/۲	۴۵/۳۱	۳۶/۷۲	۲۶/۷
اراضی انسان‌ساخت	۰	۱۰/۶	۵۰/۲	۳۳/۷	۵۶/۳



شکل ۹- نقشه پیش‌بینی تغییرات پوشش/کاربری اراضی در محدوده مورد مطالعه:

الف) ۲۰۲۵، ب) ۲۰۴۱

بحث و نتیجه گیری

رشد روزافزون جمعیت و تحولات گسترده اقتصادی بازتابی گسترده در تحولات کالبدی شهر تهران ایجاد نموده است، که یکی از پیامدهای آن نحوه شکل‌گیری منطقه ۲۲ شهرداری تهران است که بدون تردید بزرگترین و وسیع‌ترین توسعه شهری متصل به تهران می‌باشد. در مطالعه حاضر، به بررسی روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی در منطقه ۲۲ شهرداری تهران طی یک دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۵-۲۰۲۵) پرداخته شد. در ادامه روند این تغییرات با استفاده از مدل ترکیبی CA-Markov مورد شبیه‌سازی و پیش‌بینی تا سال ۲۰۴۱ قرار گرفت.

مطابق نتایج، اراضی انسان‌ساخت با مساحت ۲۸۲۷/۴۶ هکتار (۴۵/۶۰ درصد) در سال ۲۰۲۵ در مقایسه با سال ۱۹۹۵ با مساحت ۲۵۷۲/۱۱ هکتار (۴۱/۴۸ درصد) از بیشترین روند افزایشی برخوردار بوده است. در مقابل اراضی بایر (لخت) با مساحت ۲۳۹۱/۸ هکتار (۳۸/۵۷ درصد) در سال ۲۰۲۵ به نسبت سال ۱۹۹۵ با مساحت ۲۷۸۰/۵۲ هکتار (۴۴/۸۴ درصد) روند کاهشی داشته است. همچنین نتایج به‌دست آمده حاکی از روند افزایشی منابع آبی و پوشش‌های گیاهی، و روند کاهشی اراضی کشاورزی در طی سال‌های مورد مطالعه می‌باشد. در راستای نتایج به‌دست آمده، مطالعه ستاری و همکاران (۱۴۰۲)، نشان داد که در کلانشهر تهران،

اراضی ساخته شده بیشترین روند رشد تغییرات کاربری‌های اراضی را به خود اختصاص داده است که نشان‌دهنده شدت بحران‌های محیط زیستی در این منطقه است. در مطالعه‌ای دیگر، فروتن و همکاران (۱۳۹۹) بیان کردند که روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی در منطقه شهری تهران منجر به تبدیل زمین‌های بایر، کشاورزی و فضاهای سبز شهری به زمین‌های ساخته شده و مسکونی شده است.

یافته‌های به‌دست آمده در این پژوهش حاکی از آن است که در منطقه ۲۲ منبع اصلی تأمین زمین برای توسعه، اراضی بایر می‌باشند، و پوشش گیاهی نه تنها کاهش نیافته، بلکه روند افزایشی داشته است. این الگو نشان می‌دهد که منطقه ۲۲ تا حدودی از "بحران هم‌جهت" و تخریب همزمان همه کاربری‌های طبیعی، در مقایسه با سایر مناطق شهری تهران که با آن مواجه هستند، فاصله دارد. یکی از یافته‌های برجسته دیگر این پژوهش، افزایش همزمان اراضی انسان‌ساخت و پوشش‌های گیاهی است که نشان‌دهنده برنامه‌ریزی فضای سبز متناسب با توسعه و احداث پارک‌ها، بوستان‌ها و کمربندهای سبز در کنار پروژه‌های مسکونی و خدماتی در این منطقه می‌باشد همچنین با توجه به احیا و توسعه پوشش‌های گیاهی دست کاشت، بخشی از اراضی لخت که پیش‌تر فاقد پوشش بوده‌اند، به مرور به پوشش گیاهی تبدیل شده‌اند. علاوه بر این، کاهش نسبت اراضی بایر از ۴۴/۸٪ به ۳۸/۶٪ در کنار افزایش اراضی ساخته‌شده از ۴۱/۵ درصد به ۴۵/۶ درصد نشان‌دهنده تغییر در ساختار فضایی منطقه از یک پهنه باز و توسعه‌نیافته به سمت بافت شهری متراکم‌تر است. این روند هرچند طبیعی و مورد انتظار است، اما نرخ آن زنگ هشدار است برای باقیمانده اراضی بایر که کارکردهای اکولوژیک مهمی از جمله تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و حفظ تنوع زیستی تحت تأثیر قرار می‌دهد.

نتایج تحلیل پیش‌بینی روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی در محدوده مورد مطالعه نیز نشان داد که اراضی انسان‌ساخت با مساحت ۲۸۹۰/۴ هکتار (۴۶/۶۱ درصد) در سال ۲۰۴۱ در مقایسه با سال ۲۰۲۵ با مساحت ۲۸۲۷/۴۶ هکتار (۴۵/۶۰ درصد) بیشترین روند افزایشی را دارا می‌باشد. در حالی که اراضی بایر با مساحت ۲۲۸۷ هکتار (۳۶/۸۸ درصد) در سال ۲۰۴۱ در مقایسه با سال ۲۰۲۵ با مساحت ۲۳۹۱/۸ هکتار (۳۸/۵۷ درصد) بیشترین روند کاهشی را داشته است. بدین ترتیب نتایج به‌دست آمده حاکی از تداوم افزایشی روند تغییرات در سال‌های آتی می‌باشد، که از عمده‌ترین دلایل آن می‌توان به رشد سریع جمعیت و تمرکزگرایی فعالیت‌های فیزیکی و اقتصادی انسان در این منطقه اشاره نمود. نتایج مطالعه سبجانی (۲۰۲۴) نشان داد که رشد شهرنشینی و توسعه فعالیت‌های انسانی از عمده‌ترین عوامل تغییرات پوشش/کاربری اراضی در مناطق شهری است که منجر به تبدیل پوشش‌های سبز به اراضی انسان‌ساخت شده است. یافته‌های این مطالعه با پژوهش حاضر در سطح جهانی همخوانی دارد، اما تمایز مهم منطقه ۲۲ را نیز آشکار می‌سازد. در بسیاری از مناطق شهری جهان، رشد شهرنشینی با تخریب پوشش‌های سبز همراه است، اما در منطقه ۲۲، پوشش گیاهی روند افزایشی داشته است. این امر نشان می‌دهد که توسعه شهری لزوماً با تخریب محیط زیست هم‌ارز نیست و برنامه‌ریزی آگاهانه می‌تواند مسیر توسعه را به سمت الگوهای پایدارتر هدایت کند. با این حال، کاهش نرخ رشد اراضی ساخته‌شده فرصتی برای تغییر پارادایم از توسعه افقی به توسعه درون‌افزا و افزایش تراکم در اراضی ساخته شده موجود است. این رویکرد می‌تواند فشار بر اراضی باقی‌مانده بایر و کشاورزی را کاهش داده و با اصول توسعه پایدار شهری هماهنگ باشد. در مطالعه‌ای دیگر، قدوسی و همکاران (۱۴۰۴) به تداوم روند تغییرات و تبدیل پوشش/کاربری اراضی شهر تهران در طی سال‌های آتی اشاره کردند. آن‌ها بیان کردند که گسترش بدون برنامه‌ریزی و خارج از توان و ظرفیت منابع موجود، می‌تواند منجر به از بین رفتن اراضی و منابع با ارزش زیستی و توسعه اراضی ساخته شده در این منطقه شوند.

مطابق یافته‌های به‌دست آمده، گرچه نتایج از تداوم روند افزایشی اراضی انسان‌ساخت حکایت دارد، اما نکته مهم کاهش نرخ رشد است. در دوره ۱۹۹۵-۲۰۲۵، میانگین رشد سالانه اراضی ساخته‌شده حدود ۸/۵ هکتار بوده، در حالی که در دوره پیش‌بینی ۲۰۲۵-۲۰۴۱ این نرخ به حدود ۳/۹ هکتار در سال کاهش یافته است. این کاهش سرعت را می‌توان نشانه‌ای از نزدیک شدن منطقه به محدودیت‌های فیزیکی توسعه تفسیر کرد. به بیان دیگر، ذخیره اراضی بایر به‌عنوان "منبع" اصلی توسعه در حال اتمام است و منطقه به تدریج به سمت اشباع فضایی حرکت می‌کند.

علاوه بر این، پیش‌بینی افزایش جزئی منابع آبی (از ۲/۳۳ درصد به ۲/۴۲ درصد) و تداوم رشد پوشش گیاهی (از ۱۳/۲ درصد به ۱۳/۹ درصد) در سال ۲۰۴۱ مؤید آن است که پروژه‌های محیط زیستی منطقه نظیر دریاچه چیتگر و کمربند سبز توانسته‌اند

اثرات منفی توسعه را تا حدی کنترل کنند. هرچند این افزایش‌ها از نظر عددی کوچک به نظر می‌رسند، اما در چارچوب یک منطقه شهری در حال توسعه، حفظ و بهبود جزئی این کاربری‌ها دستاوردی قابل توجه محسوب می‌شود.

در راستای نتایج به‌دست آمده و مطابق طرح آمایش استان تهران (۱۳۸۸)، به‌منظور تحقق مدیریت مطلوب منطقه، بهره‌برداری از منابع طبیعی باید متناسب با ظرفیت‌ها و توان محیطی صورت گیرد. همچنین بر اساس طرح مجموعه شهری تهران (۱۳۷۸)، در این منطقه باید ملاحظات از جمله مدیریت بهینه منابع محیطی به‌ویژه آب، کاهش آسیب‌های بوم‌شناختی، مدیریت یکپارچه و سازشی منابع طبیعی و بهبود شاخص‌های حفاظت از محیط زیست در برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری مورد توجه قرار گیرد. براین اساس، کاهش اثرات نامطلوب ناشی از تغییرات کاربری اراضی در این منطقه، نیازمند برنامه‌ریزی مناسب و مدیریتی یکپارچه در بهره‌وری صحیح از منابع سرزمینی است.

از محدودیت‌های این مطالعه می‌توان به از استفاده تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک متوسط (نظیر لندست با قدرت تفکیک ۳۰ متر) با توجه به مقیاس زمانی بلندمدت و عدم دسترسی به تصاویری با توان تفکیک بالاتر اشاره نمود که این قدرت تفکیک برای تشخیص تغییرات ریزدانه و قطعه‌قطعه مانند تغییرات در مقیاس قطعه‌ای زمین یا یک فاز توسعه کوچک از دقت کافی برخوردار نیست. همچنین عدم تفکیک پوشش گیاهی به انواع و اندازه‌گیری کیفیت و تراکم آن‌ها از دیگر عوامل محدودکننده است. در راستای نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، پیشنهادات مدیریتی به‌شرح زیر می‌باشد:

با توجه به اینکه اراضی بایر منبع اصلی تأمین زمین برای توسعه بوده‌اند، ضروری است نقشه‌ای از اولویت‌های حفاظتی برای اراضی بایر تهیه شود و تفکیک این اراضی به سه دسته "قابل توسعه"، "مستعد احیا" و "مستعد حفاظت" می‌تواند به بهره‌وری صحیح از پهنه‌های ارزشمند کمک کند. همچنین تثبیت و تقویت الگوی "توسعه همراه با فضای سبز" به عنوان خط مشی الزام‌آور در طرح‌های تفصیلی منطقه لحاظ شود و به ازای هر هکتار توسعه جدید، حداقل ۰/۳ هکتار فضای سبز جدید ایجاد گردد. همچنین ایجاد کریدورهای سبز متصل‌کننده فضاهای سبز موجود می‌تواند کارکرد اکولوژیک آن‌ها را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. تغییر سیاست توسعه از افقی به عمودی و درون‌افزا تغییر یابد و همزمان محدودیت‌های سخت‌گیرانه‌تری برای تغییر و تبدیل پوشش/کاربری اراضی در منطقه اعمال گردد.

یافته‌های این مطالعه می‌تواند به تصمیم‌گیران در ایجاد فرصتی برای برنامه‌ریزی مناسب و کنترل توسعه فعالیت‌های انسانی، در راستای توسعه پایدار شهری کمک نماید. بنابراین مأموریت‌های ضروری برای تحقق این هدف می‌تواند دربرگیرنده تدوین برنامه مدیریت یکپارچه در چارچوب ظرفیت‌شناسی منابع زیستی، مدیریت تهدیدات (کنترل آلاینده‌ها، تخریب و کاهش منابع) و پیش‌بینی مخاطرات محیطی (ریسک رانش، لغزش، سیل، فرونشست و طوفان)، ارتقاء سطح همکاری و هماهنگی بین سازمان‌های ذربط، ساماندهی، توانمندسازی و تقویت مشارکت فعالان محیط زیستی، جوامع محلی و نهادهای غیردولتی، برنامه‌ریزی حفاظتی در راستای توسعه مشارکت، انسجام سازمانی و کنترل و مدیریت پیامدهای توسعه فعالیت‌های انسانی در این منطقه باشد.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در جمع‌آوری داده‌ها، تهیه گزارش پژوهش و تحلیل داده‌ها مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی / سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی "طراحی کریدور سبز و تهیه طرح مدیریت یکپارچه محیط زیستی در منطقه ۲۲ شهرداری تهران"، در اداره کل محیط زیست و توسعه پایدار و سازمان زیباسازی شهر تهران با دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه

تهران (ابلاغیه شماره ۱۴۰۸۱۶۵/۱۵۶) است. نویسندگان این مقاله همچنین بر خود لازم می‌دانند از مساعدت این سازمان‌ها کمال تشکر را داشته باشند.

References

- Aslami, F., Ghorbani, A., Sobhani, B. & Panahandeh, M. (2015). Comparing artificial neural network, support vector machine and object-based methods in preparation land use/cover maps using landSat-8 images, *Journal of RS and GIS Techniques in Natural Resources*, 6(3), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s44274-024-00008-6>
- Awewomom, J., Dzeble, F., Takyi, Y. D., Ashie, W. B., Ettey, E. N. Y. O., Afua, P. E., & Akoto, O. (2024). Addressing global environmental pollution using environmental control techniques: a focus on environmental policy and preventive environmental management. *Discover Environment*, 2(1), 8. <https://doi.org/10.1024/32274-674-0079-10>
- Bikis, A., Engdaw, M., Pandey, D., & Pandey, B. K. (2025). The impact of urbanization on land use land cover change using geographic information system and remote sensing: a case of Mizan Aman City Southwest Ethiopia. *Scientific Reports*, 15(1), 12014. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96639-1>
- Danehkar, A., & Sobhani, P. (2024). Ecological potential evaluation and balance measurement of macro-land use in the urban set of Tehran-Alborz. *Geographical planning of space quarterly journal*, 14(4), 37-57. (In Persian). <https://doi.org/10.30488/gps.2024.466071.3759>
- Duan, X., Haseeb, M., Tahir, Z., Mahmood, S. A., & Tariq, A. (2025). Analyzing and predicting land use and land cover dynamics using multispectral high-resolution imagery and hybrid CA-Markov modeling. *Land use policy*, 157, 107655. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2025.107655>
- Forotan, S., Shariat, M., Kheir Khah Zarkesh, M. M., & Sarvar, R. (2020). Investigating the trend of land use changes in Rey city using remote sensing data. *Research and Technology of Environment*, 5(7), 55–65. (In Persian) <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2025.107655>
- Gabisa, M., Kabite, G., & Mammo, S. (2025). Land use and land cover change trends, drivers and its impacts on ecosystem services in burayu sub city, Ethiopia. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1557000. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1557000>
- Ghodousi, V., Nazam Far, H., & Rahmati, M. (2025). Land use changes and simulation of urban growth and development (Case study: Ardabil city). *Journal of Sustainable Urban and Regional Development Studies*, 6(3), 168–185. (In Persian) https://www.srds.ir/article_215756.html?lang=en
- Huang, X., Wang, H., & Xiao, F. (2022). Simulating urban growth affected by national and regional land use policies: Case study from Wuhan, China. *Land use policy: The International Journal Covering All Aspects of Land Use*, (112), 71. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105850>
- Ibarra-Bonilla, J. S., Villarreal-Guerrero, F., Prieto-Amparán, J. A., Santellano-Estrada, E., & Pinedo-Alvarez, A. (2021). Characterizing the impact of Land-Use/Land-Cover changes on a Temperate Forest using the Markov model. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3), 1013-1022. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.08.003>
- Kalfas, D., Kalogiannidis, S., Chatzitheodoridis, F., & Toska, E. (2023). Urbanization and land use planning for achieving the sustainable development goals (SDGs): A case study of Greece. *Urban Science*, 7(2), 43. <https://doi.org/10.3390/urbansci7020043>
- Khan, A. R., Khan, A., Masud, S., & Rahman, R. M. (2021). Analyzing the Land Cover Change and Degradation in Sundarbans Mangrove Forest Using Machine Learning and Remote Sensing Technique. In *Advances in Computational Intelligence: 16th International Work-Conference on Artificial Neural Networks, IWANN 2021, Virtual Event, June 16–18, 2021, Proceedings, Part II* 16 (pp. 429-438). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85099-9_35
- Khazai, A., Abbaspour, M., BabeiKafaki, S., Taghavi, L., & Rashidi, Y. (2023). Investigating and predicting land use changes in the metropolis of Tehran using remote sensing technology. *New Environmental Sciences*, 21(2), 121–138. (In Persian) <https://doi.org/10.48308/ENVS.2022.1226>
- Lidicker Jr, W. Z. (2020). A Scientist's Warning to humanity on human population growth. *Global Ecology and Conservation*, 24, e01232. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01232>

- Parizadi, T., Shamaei, A., & Khodabakhshi, S. F. (2024). Analyzing the structural-spatial transformations of Tehran's hinterland and its future (Case study: Hinterland of District 22 of Tehran Municipality). *Researches in Applied Geographical Sciences*, 75(24), 330–352. (In Persian) <https://doi.org/10.61186/jgs.24.75.24>
- Planning and Compilation of Provincial Spatial Planning Project. (2009). *Tehran Province Planning Deputy*. 1–73. (In Persian)
- Raihan, A., & Tuspekova, A. (2022). Dynamic impacts of economic growth, energy use, urbanization, agricultural productivity, and forested area on carbon emissions: New insights from Kazakhstan. *World Development Sustainability*, 1, 100019. <https://doi.org/10.1016/j.wds.2022.100019>
- Rana, M. S., & Sarkar, S. (2021). Prediction of urban expansion by using land cover change detection approach. *Heliyon*, 7(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08202>
- Saik, P., Koshkalda, I., Bezuhla, L., Stoiko, N., & Riasnianska, A. (2024). Achieving land degradation neutrality: land-use planning and ecosystem approach. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1446056. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1446056>
- Saleem, A., Anwar, S., Nawaz, T., Fahad, S., Saud, S., Ur Rahman, T., & Nawaz, T. (2025). Securing a sustainable future: the climate change threat to agriculture, food security, and sustainable development goals. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 11(3), 595-611. <https://doi.org/10.1007/s43994-025-00112-5>
- Sang, L., Zhang, C., Yang, J., Zhu, D. & Yun, W. (2011). Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model, *Mathematical and Computer Modelling*, 54(4), 938-943. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.11.019>
- Satari, M. H., Sarvar, R., & Mahdavi, M. (2023). Analysis and evaluation of environmental impacts of urban land use changes in the Tehran metropolis region. *Journal of Geographical Studies of Arid Regions*, 14(15), 60–81. (In Persian) <https://doi.org/10.22034/jargs.2023.376032.1001>
- Setiawan, O., Rahayu, A. A. D., Samawandana, G., Tata, H. L., Dharmawan, I. W. S., Rachmat, H. H., & Khotimah, H. (2024). Unraveling land use land cover change, their driving factors, and implication on carbon storage through an integrated modelling approach. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 27(4), 615-627. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2024.09.005>
- Shivanna, K. R. (2022). Climate change and its impact on biodiversity and human welfare. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 88(2), 160-171. <https://doi.org/10.1007/s43538-022-00073-6>
- Sobhani, P. (2024). Urban development impacts on natural ecosystems in urban protected areas of Tehran province, Iran. *Heliyon*, 10 (2024) e40572. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40572>
- Sobhani, P., & Danehkar, A. (2024). Modeling and predicting land use changes using the hybrid CA-ANN model in the mangrove forests of Khamir and Qeshm. *Iranian Remote Sensing and GIS*, 16(4), 95–114. (In Persian). <https://doi.org/10.48308/GISJ.2024.233850.1189>
- Sobhani, P., & Danehkar, A. (2025). Analysis of the Ecological Network Structure and Continuity of Biological Function in the Tehran-Alborz Urban Complex. *Quarterly Journal of Urban and Regional Development Planning*, 10(33), 217-241. (In Persian). <https://doi.org/10.22054/urdp.2025.83888.1685>
- Sobhani, P., & Danehkar, A. (2026). Urban Sustainable Development Strategies in the Tehran-Alborz Region. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 7(3), 52-71. (In Persian). https://www.srds.ir/article_243680_en.html
- Sobhani, P., Esmailzadeh, H., & Mostafavi, H. (2021). Simulation and impact assessment of future land use and land cover changes in two protected areas in Tehran, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103296. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103296>
- Tal, A. (2025). The environmental impacts of overpopulation. *Encyclopedia*, 5(2), 45. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia5020045>
- Taloor, A. K., Sharma, S., Parsad, G., & Jasrotia, R. (2024). Land use land cover simulations using integrated CA-Markov model in the Tawi Basin of Jammu and Kashmir India. *Geosystems and Geoenvironment*, 3(2), 100268. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2024.100268>
- Tehran Metropolitan Area and Surrounding Cities Project. (1999). *Center for Urban and Architectural Studies and Research*. 1–89. (In Persian)

- Waśniewski, A., Hościło, A., & Aune-Lundberg, L. (2023). The impact of selection of reference samples and DEM on the accuracy of land cover classification based on Sentinel-2 data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 32, 101035. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101035>
- Zafar, Z., Zubair, M., Zha, Y., Fahd, S., & Nadeem, A. A. (2024). Performance assessment of machine learning algorithms for mapping of land use/land cover using remote sensing data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 27(2), 216-226. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2024.02.004>