Human Geography Research Quarterly

Online ISSN: 2423-7736

Journal Homepage: jphgr.ut.ac.ir

Simulating Urban Growth via LTM and Modeling Ecological Capacity to Measure Land Suitability for Urban Development Using WLC in 2046: the case study of Isfahan

Aboozar Bakhshi [1], Jamal Mohammadi Seyed Ahmadiani [2]

1. *Department of geography and urban planning, Faculty of geographical sciences and planning, Isfahan University, Isfahan, Iran*
Email: aboozar.bakhshi@gmail.com
2. (Corresponding Author) *Department of of geography and urban planning, Faculty of geographical sciences and planning, Isfahan University, Isfahan, Iran*
Email: j.mohammadi@geo.ui.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article History:
Received:
23 June 2024
Received in revised form:
28 September 2024
Accepted:
4 November 2024
Available online:
12 December 2024

Keywords:
Land use change,
Urban growth modeling,
LTM,
WLC,
Scenario,
Isfahan.

ABSTRACT

A precise understanding of urban expansion patterns using urban growth models contributes to efficient urban management and planning. The present study aims to model the optimal urban growth of Isfahan by presenting the optimal scenario of its physical-spatial development. The study area covers Isfahan city with an area of 55218 hectares. The “applied” study employed a combined data collection method via "historical, case study, survey research, post-hoc, and action research" methods. Using the classification of Landsat TM satellite imagery related to the years 1986, 1998, and 2016, the trend of urban distribution and land-use changes and factors affecting the spatial-physical development of the city during 30 years were investigated. Then, to predict Isfahan urban development using LTM, the future growth for 2046 was examined, simulated, and evaluated. Land use changes were predicted as a "trend scenario" during the next three decades (2016-2046) based on the proposed LTM model. To achieve the "optimal scenario", modeling the ecological power zoning of urban development for 2046 using WLC was presented. The results of land use changes during the period 1986-2016 show a 178% increase in built-up lands and a decrease in agricultural (-13%), tree-covered (-75%), and pasture land uses (-28%). The results obtained from the methods of forecasting the future development of Isfahan for 2046 with the LTM model demonstrate the spatial expansion in the coming years as a spiral and the conversion of other uses into built-up areas to the extent that in the year of the horizon, the area of the built-up areas of the city increases 33% (5918 hectares) will reach 23781 hectares in 2046 from 17863 hectares in 2016. The zoning results modeling the ecological potential of Isfahan urban development to identify and measure land suitability of development in 2046 via WLC also indicate that the total area of lands with high and medium suitability for urban development covers 5712 hectares.

Cite this article: Bakhshi, A., & Mohammadi, J. (2024). Simulating Urban Growth via LTM and Modeling Ecological Capacity to Measure Land Suitability for Urban Development Using WLC in 2046: the case study of Isfahan. *Human Geography Research Quarterly*, *56*(4), 159-190.
http://doi.org/10.22059/jhgr.2023.366087.1008638

© The Author (s)

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

The present study aims to present an analytical framework for the effect of urban sprawl on land use changes in Isfahan City, to predict the trend of land development and land use developments until 2046, and finally, to find a suitable and scientific framework to identify suitable places for the development of human settlements. The first goal is to determine the spatial-physical development process of Isfahan city and its effect on agricultural, tree-covered, pasture, and water surface land uses. The second goal is to use LTM to predict land use developments in the next three decades (2046). The third goal is to identify and measure land suitability for Isfahan development in 2046 by modeling urban development's ecological potential zoning using WLC. The questions answered in this research are: 1- What is the spatial-physical development pattern of Isfahan city, and what effect has it had on its expansion? 2- Based on the "trend" and "optimal situation" scenarios, what will be the modeling of land use changes and growth and spatial-physical development of Isfahan City in 2046?

Methodology

The applied study employed a combination of "documentary, descriptive, analytical, causal, and survey research" methods due to the dependence of the dependent variable of Isfahan urban growth on the independent variables effective in Isfahan development. Data analysis methods were four methods proposed by Tsai (agglomeration grade, equal distribution grade, density, and metropolis size), LTM, and WLC.

Results and discussion

Isfahan's physical growth and land use changes were simulated using LTM. First, land use maps of the city were prepared, and changes in land uses and urban growth areas were examined during the 30 years from 1986 to 2016. LTM was employed to train, test, simulate, and predict the possible development of the city on the horizon of 2046; on this basis, the "trend scenario" was compiled. The results of the LTM model show a decrease in the extent of wastelands, agricultural land uses, pastures, and tree-covered land uses. In contrast, it offers an increase in residential areas. The area of built land will increase to 23,781 hectares in this period, which will increase by 5,918 hectares (33%) compared to the base year (2016), with an area of 17,863 hectares. To formulate the "optimal situation scenario", WLC was used to model the ecological capacity of urban development to identify suitable lands for the development of Isfahan City in 2046. The WLC results method indicate that suitable lands for Isfahan's future development are mainly located on the city westerly, northwesterly, northerly, easterly, and northeasterly.

Conclusion

The research results can be employed as a model for choosing suitable areas for urban development. Therefore, via the proper methods, it is possible to prevent urban growth and development in the direction of inappropriate areas.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved thecontent of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای انسانی
شاپا الکترونیکی: 2423-7736
Journal Homepage: jphgr.ut.ac.ir

شبیه‌سازی رشد شهری با استفاده از مدل LTM و مدل‌سازی توان اکولوژیک به‌منظور سنجش تناسب اراضی برای توسعه شهری با روش WLC در چشم‌انداز سال ۱۴۲۵، مطالعه موردی: شهر اصفهان*

ابوذر بخشی [۱]، جمال محمدی سید احمدیانی [۲]

۱- گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: aboozar.bakhshi@gmail.com
۲- نویسنده مسئول، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: j.mohammadi@geo.ui.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۰۴/۰۳
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۳/۰۷/۰۷
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۸/۱۴
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۹/۲۲

واژگان کلیدی:
تغییرات کاربری اراضی، مدل‌سازی رشد شهری، مدل تبدیل اراضی (LTM)، ترکیب خطی وزن‌دار (WLC)، سناریو، شهر اصفهان.

چکیده

درک دقیق الگوهای گسترش شهری با استفاده از مدل‌های رشد شهری به مدیریت و برنامه‌ریزی شهری کارآمد کمک می‌کند. هدف پژوهش حاضر، مدل‌سازی رشد بهینه شهری اصفهان با ارائه سناریوی وضع مطلوب توسعه فضایی-کالبدی آن است. محدوده موردمطالعه، پهنه محدوده و حریم شهر اصفهان به مساحت ۵۵۲۱۸ هکتار می‌باشد. نوع تحقیق بر مبنای هدف، «کاربردی» و از نظر ماهیت، روش و نحوه گردآوری اطلاعات، ترکیبی از روش‌های «تاریخی، موردی، پیمایشی، پس رویدادی و عمل‌نگر» است. با استفاده از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای سنجنده TM لندست مربوط به سال‌های ۱۳۶۵، ۱۳۷۷ و ۱۳۹۵ روند پراکنش شهری و تغییرات کاربری اراضی و عوامل مؤثر بر توسعه فضایی-کالبدی شهر طی دوره ۳۰ ساله بررسی‌شده است. سپس برای پیش‌بینی توسعه شهری اصفهان با استفاده از مدل LTM توسعه آینده برای سال ۱۴۲۵ موردبررسی، شبیه‌سازی و ارزیابی قرارگرفته است. بر اساس الگوی احتمالی مدل LTM، تغییرات کاربری اراضی در قالب «سناریوی روند» در طی سه دهه آتی (۱۴۲۵-۱۳۹۵) پیش‌بینی گردیده است. برای دستیابی به «سناریوی مطلوب»، مدل‌سازی پهنه‌بندی توان اکولوژیک توسعه شهری برای سال ۱۴۲۵ با استفاده از روش wlc ارائه‌شده است. نتایج حاصل از تغییرات کاربری اراضی طی دوره ۱۳۹۵-۱۳۶۵ نشان‌دهنده افزایش ۱۷۸ درصدی اراضی ساخته‌شده و کاهش اراضی کشاورزی (۱۳-٪)، پوشش درختی (۷۵-٪) و مراتع (۲۸-٪) می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های پیش‌بینی توسعه آینده شهر اصفهان برای سال ۱۴۲۵ با مدل LTM نشان‌دهنده گسترش فضایی در سال‌های آتی به‌صورت اسپرال و تبدیل کاربری‌های دیگر به زمین‌های ساخته‌شده است؛ تا حدی که در سال افق، مساحت نواحی ساخته‌شده شهر با افزایش ۳۳ درصد (۵۹۱۸ هکتار) از ۱۷۸۶۳ هکتار در سال ۱۳۹۵ به ۲۳۷۸۱ هکتار در سال ۱۴۲۵ خواهد رسید. نتایج مدل‌سازی پهنه‌بندی توان اکولوژیک توسعه شهری اصفهان به‌منظور شناسایی و سنجش تناسب اراضی برای توسعه در سال ۱۴۲۵ با استفاده از روش wlc نیز بیانگر این است که مجموع مساحت مناطق دارای تناسب‌های *بالا* و *متوسط* برای توسعه شهری ۵۷۱۲ هکتار است.

استناد: بخشی، ابوذر و محمدی سید احمدیانی، جمال. (۱۴۰۳). شبیه‌سازی رشد شهری با استفاده از مدل LTM و مدل‌سازی توان اکولوژیک به‌منظور سنجش تناسب اراضی برای توسعه شهری با روش WLC در چشم‌انداز سال ۱۴۲۵، مطالعه موردی: شهر اصفهان. *فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای انسانی*، ۵۶ (۴)، ۱۹۰-۱۵۹.

http://doi.org/10.22059/jhgr.2023.366087.1008638

© نویسندگان
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

*. این مقاله برگرفته از رساله دکتری آقای ابوذر بخشی در رشته جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری با راهنمایی نویسنده دوم در دانشگاه اصفهان است.

مقدمه

رشد و گسترش شهری به‌عنوان یک پدیده جغرافیایی پیچیده که از تکامل پویای مورفولوژی بیرونی و وضعیت توسعه ساختار و عملکرد درونی شهر تشکیل‌شده (Liu et al., 2022)، در سراسر دنیا محیط جهانی را به‌شدت تغییر داده است. شهرنشینی سریع منجر به تغییرات پویای منظر بیرونی شهری می‌شود و الگوهای رشد شهری متفاوتی را شکل می‌دهد که به‌نوبه خود بر سطح توسعه عملکردهای داخلی شهری نیز تأثیر می‌گذارد (He et al., 2023). لذا پیش‌بینی‌های توسعه شهری و اثرات زیست‌محیطی مرتبط در مطالعات تغییر جهانی ضروری شده‌اند. سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری نیز به‌طور فزاینده‌ای رشد شهری آینده را در مرحله برنامه‌ریزی در نظر می‌گیرند و پیش‌بینی‌های رشد شهری را برای برنامه‌ریزی شهریِ درازمدت ضروری می‌سازند (Zhang et al., 2021). ازاین‌رو، یک گام اساسی جهت مدیریت و برنامه‌ریزی توسعه شهری و همچنین ارزیابی اثرات تجمعی آن، از یکسو بررسی و شبیه‌سازی توسعه فیزیکی شهر و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و از سوی دیگر، تحلیل تناسب زمین برای توسعهٔ شهری و شناسایی اراضی مناسب و اولویت‌دار برای توسعه کالبدی–فضایی می‌باشد.

ازآنجایی‌که بررسی روند تغییرات کاربری‌های مختلف اراضی به کاربری شهری و شناسایی پارامترهایی که در این تغییرات مؤثر می‌باشند، نقش اساسی در تصمیم‌گیری‌ها و برنامه‌ریزی‌های بلندمدت ایفا می‌کنند، لذا کشف قوانین و روابط مؤثر در تغییر کاربری‌های شهری و همچنین پیش‌بینی روند توسعه شهرها در آینده با روش‌های دقیق و کارآمد بیش‌ازپیش ضرورت دارد. بنابراین ارزیابی قابلیت استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز در مناطق مختلف می‌تواند گام مهمی در جهت توسعه آن‌ها باشد (امامی، ۱۳۹۶: ۳). بر مبنای شبیه‌سازی و مدل‌سازی کاربری اراضی و با کاربست دیگر ابزارها و روش‌های تحلیلی، می‌توان به جهت‌دهی توسعه و گسترش شهری و منطقه‌ای دست‌یافت (داداش‌پور، ۱۳۹۴: ۱۴۶). همچنین به دلیل اینکه جزئیات فضایی نقش مهمی در فرآیند تغییر کاربری اراضی دارند، مدل‌سازی فضایی مناسب‌ترین روش به‌منظور مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی است (Chen et al., 2002: 163).

مدل‌های رشد شهری[1]ابزار اصلی برای تولید پیش‌بینی‌های رشد شهری هستند. آن‌ها می‌توانند مکانیسم‌های سیستم‌های شهری موجود را شبیه‌سازی نموده و تکامل گسترش شهری را پیش‌بینی کنند (Wang et al., 2022). محققان و برنامه‌ریزان از آن‌ها برای پیش‌بینی میزان و توزیع فضایی رشد شهری تحت سناریوهای مختلف توسعه استفاده می‌کنند (Aburas et al., 2016: 380). از میان مدل‌های مختلف ارائه‌شده به‌منظور پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و شبیه‌سازی رشد شهری، مدل تبدیل اراضی (LTM[2]) به دلیل داشتن خصوصیات منحصربه‌فرد و همچنین ساختاری ساده در مدل‌سازی عوارض طبیعی و فیزیکی سطح زمین، کاربرد نسبتاً وسیعی در پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و نیز توسعه اراضی شهری یافته است. در این مدل با استفاده از داده‌های موجود در زمان گذشته و بررسی وضعیت توسعه اراضی در آن زمان می‌توان پارامترهای تأثیرگذار در رشد اراضی را شناسایی و از آن‌ها برای پیش‌بینی روند توسعه در آینده استفاده نمود. محققین مسائل شهری با تعریف مدل LTM بر اساس پارامترهای موردنظر خود و اجرای آن در بستر زمان قادر خواهند بود گسترش فضایی اراضی شهری در آینده را پیش‌بینی کرده و به درجه نسبتاً مطلوبی از انطباق با واقعیت دست یابند.

در ایران کلان‌شهر اصفهان به‌عنوان بزرگ‌ترین مرکز شهری در مرکز کشور ایران، جمعیتش از ۲۵۴۷۰۸ نفر در سال ۱۳۳۵ به ۱۹۶۱۲۶۰ نفر در سال ۱۳۹۵ رسیده، یعنی طی ۶۰ سال حدود ۸ برابر افزایش جمعیت داشته است (آمارنامه شهر اصفهان،۱۳۹۶). همچنین مساحت آن از ۲۰۵۸ هکتار در سال ۱۳۳۵ به ۲۰۸۸۴ هکتار در سال ۱۳۹۵ رسیده است (مهندسین

1. UGMs
2. Land Transformation Model

مشاور نقش‌جهان پارس، ۱۳۹۷). شهر اصفهان در دهه‌های اخیر با شدت فزاینده‌ای با توسعه افقی مواجه بوده و در فرایند توسعه، علیرغم وجود قوانین بازدارنده (ازجمله، قانون تعاریف محدوده و حریم شهر، قانون حفظ کاربری اراضی زراعی و باغ‌ها، قانون حفظ و گسترش فضای سبز در شهرها، قانون منع فروش و واگذاری اراضی فاقد کاربری مسکونی برای امر مسکن) در روند گسترش، پیامدهای نامناسبی برای محیط داشته و منابع طبیعی سبز شهر که شامل انواع باغ‌ها و زمین‌های کشاورزی و مزارع بوده‌اند، در اثر رشد نامنظم و پراکنده شهری ازدست‌رفته‌اند و بسیاری از روستاها در بافت شهری ادغام‌شده‌اند (۲۲ روستا). توسعه مداوم مجموعه‌های سکونتگاهی سپاهان شهر در جنوب، ولیعصر در جنوب غرب، شهید کشوری در جنوب شرق، اطشاران، امام زمان و گل نرگس در شرق، نگین در شمال شهر با وجود مخاطرات طبیعی همچون خطر زمین‌لرزه در جهات شمال شرق و جنوب شهر و خطر فرونشست و زمین‌لغزش در اطراف رودخانه زاینده‌رود، در دهه‌های اخیر صورت گرفته و در حال حاضر نیز ادامه دارد و باعث تغییرات اکولوژیکی و تهدید توسعه پایدار شهری شده است.

با عنایت به این روند، مدل‌سازی رشد شهری شهر اصفهان برای جلوگیری از رشد پراکنده شهری و تخریب اراضی مرغوب کشاورزی، باغات و مراتع، کاهش هزینه‌های زیرساختی و خدماتی، ایجاد تعادل اکولوژیکی، توجه به پتانسیل‌های موجود در محدوده شهر به‌منظور ساماندهی فضایی آن از طریق بهسازی و نوسازی بافت‌های نامناسب شهری، پالایش کاربری‌های شهری، استفاده مجدد از اراضی رهاشده و تثبیت گسترش این شهر، بیش‌ازپیش احساس می‌شود. ازاین‌رو، شبیه‌سازی پویایی شهر اصفهان جهت مدیریت و برنامه‌ریزی توسعه شهری اهمیت دارد و برنامه‌ریزان را در پیش‌بینی نیازهای آینده شهر یاری می‌کند.

در این راستا پژوهش حاضر در پی ارائه چارچوب تحلیلی از تأثیر توسعه پراکنده شهری بر تغییر کاربری اراضی در شهر اصفهان و نیز پیش‌بینی روند تحولات توسعه اراضی و کاربری اراضی تا سال ۱۴۲۵ و نهایتاً یافتن چهارچوبی مناسب و علمی برای شناسایی مکان‌های مناسب جهت توسعه سکونتگاه‌های انسانی است. بدین منظور، هدف اول تحقیق، مشخص کردن روند توسعه فضایی- کالبدی شهر اصفهان و تأثیر آن بر اراضی کشاورزی، پوشش درختی، مراتع و سطوح آبی می‌باشد. هدف دوم، کاربست مدل LTM (بر مبنای بررسی و تحلیل روند گسترش اراضی ساخته‌شده از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵) در محدوده مطالعاتی برای پیش‌بینی تحولات کاربری اراضی تا سه دهه آتی (سال ۱۴۲۵) است. هدف سوم، شناسایی و سنجش تناسب اراضی برای توسعه شهر اصفهان در سال ۱۴۲۵ از طریق مدل‌سازی پهنه‌بندی توان اکولوژیک توسعه شهری با استفاده از روش ترکیب خطی وزن‌دار (wlc)[1]در مدل ارزیابی چندمعیاره (MCE)[2]است. برای دستیابی به اهداف مذکور، ابتدا با استفاده از روش‌های چندمرحله‌ای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای سنجنده TM لندست (طبقه‌بندی نظارت‌شده با روش حداکثر احتمال و طبقه‌بندی نظارت‌نشده با روش Cluster) در نرم‌افزار Envi به پردازش و بررسی روند پراکنش شهری و ارزیابی تغییرات کاربری اراضی در محدوده موردمطالعه طی سال‌های ۹۵-۱۳۶۵ پرداخته‌شده و در ادامه ضمن استفاده از شاخص‌های پیشنهادی تِسای یعنی تراکم، اندازه متروپل، درجه توزیع متعادل (ضرایب جینی و آنتروپی شانون) و درجه تجمع (ضرایب موران و گری) برای بررسی روند و الگوی رشد کالبدی- فضایی شهر طی این دوره، به پیش‌بینی و شبیه‌سازی روند تغییرات و توسعه آتی شهر با استفاده از مدل LTM در محیط نرم‌افزار Idrisi Terrset 2020 برای سال ۱۴۲۵ پرداخته‌شده است. متعاقباً بر اساس الگوی احتمالی مدل LTM، تغییرات کاربری اراضی در قالب «سناریوی روند» در طی سه دهه آتی (۱۴۲۵-۱۳۹۵) پیش‌بینی گردیده است و در نهایت برای دستیابی به «سناریوی وضع

1. Weighted Linear Combination
2. Multi Criteria Evaluation

مطلوب» با استفاده از روش wlc، اراضی مناسب توسعه شهر اصفهان در سال ۱۴۲۵ شناسایی و موردسنجش تناسب قرارگرفته است.

مهم‌ترین سؤالاتی که در این پژوهش به آن‌ها پاسخ داده می‌شود این است که: ۱- الگوی توسعه فضایی-کالبدی شهر اصفهان چگونه است و چه اثری بر گسترش آن داشته است؟ ۲- بر مبنای سناریوهای «رونـد» و «وضع مطلوب»، مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی و رشد و توسعه فضایی-کالبدی شهر اصفهان در سال ۱۴۲۵ به چه صورت خواهد بود؟

پیشینه مرتبط با مدل‌سازی رشد و توسعه شهری نشان می‌دهد که سیر استفاده از مدل در فرآیند رشد شهری از مدل‌های قدیمی دهه ۱۹۵۰ میلادی به سمت مدل‌های پویاتر و منعطف‌تر امروزی از قبیل سلول‌های خودکار، رگرسیون لجستیک، شبکه‌های عصبی، الگوریتم ژنتیک و... می‌باشد. در این راستا در چند سال اخیر افزایش دسترسی به داده‌های سنجش‌ازدور و بهبود قدرت تفکیک آن‌ها و نیز قابلیت سیستم اطلاعات جغرافیایی در مدل‌سازی رشد شهری سبب شده است که محققان در سراسر دنیا از این ابزارها استفاده نمایند. همچنین استفاده ترکیبی از مدل‌های مناسب در ترکیب با GIS و سنجش‌ازدور سبب شده که توسعه آتی شهرها در آینده نیز شبیه‌سازی شود (شهرکی و همکاران، ۱۳۹۷: ۷۹).

محققین بسیاری در کشورهای مختلف با استفاده از دوره‌های مختلف تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌های شبیه‌سازی فرایندهای تغییر و تبدیل کاربری اراضی شهری مانند LTM، LTM-cluster، LCM، UDM، Markov Chain، LULCC،CUF، what-if، Cellular Automata، SLEUTH، GTABM، CLUE-S، Logistic Regression، UrbanSim، MOLAND، ITLUP، QUEST، DUEM، CAST، SIMLUCIA، DINAMICA، UES، FCAUGM، LUCAS، UPLAN، PCraster، DUEM، SWARM، TRANUS، Metropilus، GeoSOS، FLUS، LUT، LR و ... به ارزیابی و پیش‌بینی گسترش فضایی-کالبدی آتی شهرها پرداخته‌اند. در ادامه صرفاً برخی از آخرین پژوهش‌های مرتبط با موضوع مدل‌سازی رشد و توسعه شهری با استفاده از مدل LTM موردبررسی قرارگرفته می‌گیرد.

۱) عمرانی و همکاران (۲۰۱۹)، در مقاله «چارچوب مدلِ خوشه تبدیل اراضی (LTM-cluster): به‌کارگیری k-means و محیط محاسباتی Spark برای تجزیه‌وتحلیل تغییرات اراضی در مقیاس بزرگ»، یک چارچوب جدید برای شبیه‌سازی تغییر زمین معرفی کرده‌اند که مدل سنتیِ تبدیل اراضی (LTM) را با ابزارهای خوشه‌بندیِ داده‌ها به‌منظور انجام شبیه‌سازی تغییر زمین در مناطق بزرگ‌مقیاس و در طی چند مرحله زمانی ترکیب می‌کند. این چارچوب که مدل LTM-cluster نامیده می‌شود، مجموعه داده‌های کلان کاربری زمین را زیرمجموعه قرار می‌دهد که به LTM مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی ارائه می‌شوند. LTM-cluster از الگوریتم خوشه‌بندی k-means استفاده می‌کند که در محیط محاسباتی Spark پیاده‌سازی شده است. این پژوهشگران از سه مطالعه موردی در ایالات‌متحده آمریکا استفاده نموده‌اند که از نظر وسعت شبیه‌سازی، اندازه سلول، فواصل زمانی، تعداد ورودی‌ها و کمیت تغییرات شهری با همدیگر متفاوت هستند. نتایج تحقیق تأیید می‌کند که مدل LTM-cluster برای مدیریت مجموعه داده‌های کلان از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار است (Omrani, Parmentier, Pijanowski, 2019: 182).

۲) یو جانگ کیم (۲۰۱۹)، در پژوهشی با عنوان «برنامه‌ریزی سناریوی پیشرفته برای آمادگی جهت تغییر نامطمئن آب‌وهوا: پیش‌بینی رشد شهری در آینده و آسیب‌پذیری سیل»، به بررسی میزان آمادگی شهرهای ساحلی ایالات‌متحده آمریکا برای رشد شهری آینده و خطرات سیل پرداخته است. بدین منظور در سناریوسازی، سناریوهای رشد شهری آینده و خطر سیل را با استفاده از مدل تبدیل زمین (LTM) در شهر ساحلی تامپا ایجاد نموده است. برای تحلیل تأثیر، سه سناریوی رشد شهری مختلف با مقایسه مواجهه با سیلاب شهری در سطح شهر و محله ارزیابی‌شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که رشد

به‌صورت «سناریوی طرح کاربری اراضی»، نسبت به رشد به‌صورت «سناریوی روند کنونی»، مناطق شهری کمتری را در معرض خطر سیل قرار می‌دهد؛ اما میزان مواجهه با سیلاب شهری بسیار بیشتر از «سناریوی رشد انعطاف‌پذیر» در سطح شهر است. حتی در سطح محله، تعداد بیشتری از محله‌ها در «سناریوی رشد برنامه‌ریزی‌شده» نسبت به «سناریوی روند کنونی» در برابر خطرات سیل آسیب‌پذیر هستند (Kim, 2019).

۳) محمودزاده و همکاران (۲۰۲۲)، در مقاله‌ای با عنوان «مدل‌سازی رشد شهری و تحلیل تغییر کاربری/پوشش زمین در یک منطقه شهری (موردمطالعه: تبریز)»، با ادغام دو مدل رگرسیون لجستیک و LTM با یکدیگر، به مدل‌سازی اکولوژیکی توسعه شهری در منطقه کلان‌شهر تبریز با توجه به حفظ منابع زیست‌محیطی، جلوگیری از گسترش شهری و مدیریت گسترش فیزیکی این کلان‌شهر به شیوه‌ای سازگار با محیط‌زیست پرداخته‌اند. در این راستا، برای توسعه اکولوژیکی آتی کلان‌شهر تبریز، از بلوک‌بندی شش‌ضلعی نقشه احتمال شهرنشینی در کنار سیاست‌های توسعه زیست‌محیطی در قالب استفاده از ۳۰ درصد ظرفیت‌های توسعه‌ایِ کاربری‌های ناکارآمد برای جلوگیری از رشد پراکنده در تبریز استفاده‌شده است. همچنین، برای حفظ مناظر اکولوژیکی، شبکه‌های اکولوژیکی در قالب کمربند سبز به طول ۹۱ کیلومتر طراحی‌شده است که می‌تواند در جلوگیری از ادغام شهرهای کوچک و روستاهای مجاور در این کلان‌شهر مؤثر باشد (Mahmoudzadeh et al., 2022:1).

مبانی نظری

الگوی توسعهٔ شهری پراکنده یا اسپرال شهری پس از جنگ جهانی دوم به‌ویژه در دههٔ ۱۹۶۰ به‌مثابه الگوی غالب توسعهٔ فضایی شهری در سرتاسر جهان با تفاوت در تاریخ، علل و پیامدها نمایان شده است (Gomez et al., 2014: 21) و تا مدت مدیدی از پدیده‌های ویژه شهرهای آمریکایی در نظر گرفته می‌شد که به دلیل وفور زمین‌های ارزان، ساخت بی‌رویه جاده‌ها و تولید بیش‌ازاندازه اتومبیل در این کشور رخ داد؛ اما این امر امروزه به پدیده‌ای جهانی تبدیل‌شده است که بیشتر شهرهای کشورهای توسعه‌یافته و درحال‌توسعه با آن روبه‌رو هستند (مولایی و همکاران، ۱۳۹۵: ۴۸). در این میان، تغییر کاربری اراضی ناشی از رشد و توسعه شهر یک فرایند پیچیده بوده و مدل‌سازی این سیستم‌ها همواره چالش‌برانگیز است (Tayyebi & Pijanowski, 2014: 10). لذا با توجه به توسعه پراکنده شهری و تغییرات اراضی پیرامونی شهرها، مدل‌سازی این تغییرات، به‌عنوان یک ابزار کارآمد برای برنامه‌ریزان، اقتصاددانان، اکولوژیست‌ها و طرفداران محیط‌زیست جهت بررسی تغییرات آتی توسعه شهری محسوب می‌گردد (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۸۹).

بسیاری از مدل‌های مختلف رشد شهری بر اساس تئوری‌های شهری خاص در طول تاریخ طولانی تکامل خود از دهه ۱۹۵۰ توسعه‌یافته‌اند. این مدل‌ها برای مطالعه گسترش شهری و تأثیر آن بر محیط‌زیست توسعه‌یافته و به‌طور گسترده مورداستفاده قرارگرفته‌اند. آن‌ها را می‌توان در سیاست‌گذاری شهری یا تحلیل سناریوهای توسعه بکار گرفت (Li & Gong: 2016: 1637-1638). مدل‌های اولیه توسعه شهری بزرگ‌مقیاس و پیچیده بودند و نیاز به محاسبات سنگین ریاضی داشتند و از انعطاف کافی برخوردار نبودند و در دهه 1970 میلادی موردانتقاد قرار گرفتند. متعاقباً مدل‌های کیفی جایگزین آن‌ها شدند و تا پایان دهه 1980 میلادی به‌منظور بررسی توسعه شهرها مورداستفاده قرار گرفتند. توسعه و پیشرفت GIS در فراهم آوردن اطلاعات فضایی مناسب، در دهه 1990 و به‌کارگیری آن‌ها در مدل‌سازی فضایی –کالبدی، تحلیل تغییرات کاربری اراضی و رشد شهری را تسهیل کرد (رحیمی، ۱۳۹۳: ۱۰۳–۱۰۲).

مدل‌سازی شهری یک روند عملی است که در فاز اول تلاش بر این است تا مکانیسم غالب در شکل‌گیری و ایجاد تغییر در شهرها شرح داده شود و در فاز دوم با تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی بلندمدت از اثرات نامطلوب آن جلوگیری کرد. با توجه به ماهیت دینامیک و پویای شهر باید از مدل‌هایی برای تحلیل استفاده نمود که تغییرات در طول زمان را نشان دهد تا با اتخاذ تدابیر لازم این روند تغییرات را به‌طور بهینه ساماندهی کرد (لطفیان، ۱۳۹۴: ۳۰). مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های دینامیکی پیچیده مانند مناطق شهری تا حدّ زیادی می‌تواند از همکاری روش‌ها و تکنیک‌های سیستم GIS در ترکیب با تکنیک‌های هوش مصنوعی مانند منطق فازی و شبکه‌های عصبی بهره‌مند شوند (McDonald & Urban, 2011:7).

با توجه به اینکه عوامل تغییرات کاربری اراضی در مقیاس‌های مکانی_زمانی به‌صورت غیرخطی عمل می‌کنند. ازاین‌رو برای شبیه‌سازی پویایی کاربری‌های اراضی نیاز به ابزارهای غیرخطی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)[1]است (Zivkovic et al., 2009: 143). این شبکه‌ها ابزاری قدرتمند در رویکرد یادگیری ماشینی برای تعیین و مدل کردن الگوها و رفتارهای پیچیده است و برای الگو شناسی در انواع مختلف نظم و هماهنگی، از قبیل اقتصاد، پزشکی، تحلیل تصویر، طبقه‌بندی الگوها، پیش‌بینی‌های اقلیمی و سنجش‌ازدور کاربرد دارند (محمودزاده و رنجبر، ۱۳۹۷: ۳۷). این شبکه‌ها طی دو دهه گذشته به‌طور گسترده‌ای توسط مدل‌سازان تغییرات کاربری اراضی مورداستفاده قرارگرفته‌اند (Tayyebi & Pijanowski, 2014: 10).

تئوبالد[2] و هوبز[3]دو نوع اصلی مدل‌های تغییر کاربری زمین را بیان کردند: مدل‌های نوع رگرسیونی (مدل‌های برآورد تجربی) و مدل‌های شبیه‌ساز بر پایهٔ قوانین انتقال (Theobald & Hobbs, 1998: 66). ازآنجاکه استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی با مدل‌های رگرسیونی بسیار مرتبط است و با الگوهای مورداستفاده با آن شباهت زیادی دارد؛ این مدل‌ها در گروه مدل‌های رگرسیونی قرار می‌گیرند (Tayyebi & Pijanowski, 2014: 10).

طیف گسترده‌ای از مدل‌های کاربری و پوشش اراضی برای فرایندها و مقیاس‌های مختلف توسعه پیداکرده‌اند (Matthews et al., 2007: 1447). در اوایل دهه ۲۰۰۰، مدل‌های پیش‌بینی مختلفی مانند CA، CUF، CLUE،LTM معرفی شدند (Kim, 2019: 18). در این میان، یکی از مهم‌ترین مدل‌های تحلیل رشد فضایی_کالبدی شهرها، مدل تبدیل اراضی (LTM) می‌باشد.LTM بر پایه ANN و GIS برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی تغییرات پوشش و کاربری و اراضی و برآورد اثر تغییرات در آینده در مقیاس‌های شهری و منطقه‌ای توسعه‌یافته است. این مدل بر اساس انواع مختلف داده‌های اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و زیست‌محیطی به کار گرفته می‌شود؛ به‌عبارت‌دیگر، این عوامل به متغیرهای پیش‌بینی‌کننده تغییر کاربری اراضی مدل کمک می‌کنند. این مدل می‌تواند تغییرات کاربری اراضی را با مدل‌های اکولوژیکی مانند جریان آب‌های زیرزمینی، سیستم حمل‌ونقل و تغییرات پوشش جنگلی پیوند دهد (Pijanowski et al., 2002: 553).

روش پژوهش

به دلیل استفاده از نتایج تحقیق در مدیریت و برنامه‌ریزی رشد و توسعه بهینه فضایی–کالبدی شهر اصفهان در دهه‌های آتی، نوع تحقیق بر مبنای هدف، «کاربردی» است؛ و به دلیل وابستگی متغیر وابسته رشد شهر به متغیرهای مستقل مؤثر

1. Artificial Neural Networks
2. Theobald
3. Hobbs

در توسعه شهر از نظر ماهیت و روش، ترکیبی از روش‌های «اسنادی، توصیفی، تحلیلی، علّی، پیمایشی» است. در جدول ۱ عناصر اصلی روش‌شناسی تحقیق بیان‌شده است.

جدول ۱. عناصر اصلی روش‌شناسی تحقیق

پرسش تحقیق	چیستی، چگونگی
مدل‌ها	ریاضیاتی پیش‌بینی کننده
استراتژی‌های تحقیق	استقرایی، پی‌کاوی
رویکردهای روش‌شناسی تحقیق	کمّی
نوع تحقیق	کاربردی
هدف تحقیق	پیش‌بینی، تغییر، ارزشیابی، برآورد تأثیر
انواع داده‌ها	داده‌های دست‌اول، داده‌های دست‌دوم
منابع داده‌ها	محیط‌های مصنوعی
زمان‌بندی گردآوری داده‌ها	طولی، تاریخی
روش و نحوه گردآوری داده‌ها	تاریخی، موردی، پیمایشی، پس رویدادی یا علّی- مقایسه‌ای، عمل‌نگر یا اقدام پژوهی
روش تحلیل داده‌ها	توصیفی، تحلیلی، علیّت
سناریوها	رونـد، مطلوب

منبع: بلیکی، ۱۳۹۷؛ علیزاده و همکاران، ۱۳۸۷

به‌منظور بررسی روند پراکنش شهری و ارزیابی تغییرات کاربری اراضی در محدوده موردمطالعه شهر اصفهان طی سال‌های ۹۵-۱۳۶۵ از داده‌های اصلی شامل: تصاویر ماهواره‌ای سنجنده TM ماهواره لندست مربوط به سال‌های ۱۳۶۵، ۱۳۷۷ و ۱۳۹۵، نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه، نقشه‌های مؤثر در ارزیابی رشد و توسعه فضایی-کالبدی شهر (شامل نقشه‌های حریم شهر، طیف ارتفاعی، شیب و جهت شیب زمین، فرسایش‌پذیری خاک، شبکه راه‌های ارتباطی، رودخانه، کاربری اراضی) و همچنین نقشه‌ها و گزارش‌های طرح‌های توسعه و عمران شهری و منطقه‌ای شهر اصفهان استفاده‌شده است. روش‌های تجزیه‌وتحلیل داده‌ها به شرح ذیل می‌باشد:

۱- روش‌های چندمرحله‌ای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای سنجنده TM لندست به‌منظور پردازش و بررسی روند پراکنش شهری و تغییرات کاربری اراضی در محدوده موردمطالعه طی سال‌های ۹۵-۱۳۶۵:

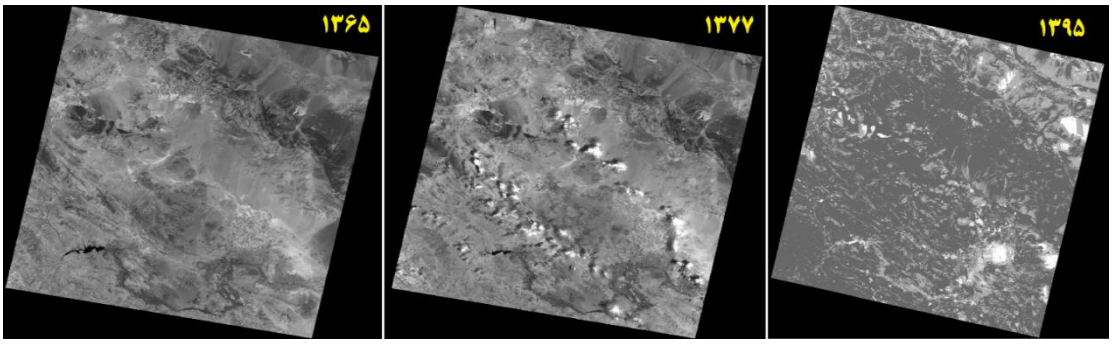
به‌منظور بررسی و ارزیابی تغییرات پوشش ارضی صورت گرفته، ابتدا تصاویر ماهواره‌ای سنجنده TM لندست مربوط به سال‌های ۱۳۶۵، ۱۳۷۷ و ۱۳۹۵ شهر اصفهان از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا[1]دانلود شد و عملیات پردازش بر روی آن‌ها در سه مرحله «پیش‌پردازش (تطبیق و تصحیح هندسی تصاویر)»، «پردازش (طبقه‌بندی تصاویر)» و «پس پردازش (ارزیابی صحت نتایج طبقه‌بندی تصاویر)» با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS 10.2 و Idrisi Terrset 2020 انجام شد.

جدول ۲. منابع اطلاعات موجود از تصاویر ماهواره‌ای

ماهواره	سنجنده	سال تصویر اخذشده	قدرت تفکیک
Landsat 5	TM	۱۳۶۵	۳۰ متر
Landsat 5	TM	۱۳۷۷	۳۰ متر
Landsat 8	TM	۱۳۹۵	۳۰ متر

منبع: نگارنده با استفاده از اطلاعات سازمان زمین‌شناسی امریکا

1. USGS



شکل ۱. تصاویر ماهواره‌ای سنجنده TM لندست شهر اصفهان در سال‌های ۱۳۶۵، ۱۳۷۷ و ۱۳۹۵
منبع: سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا

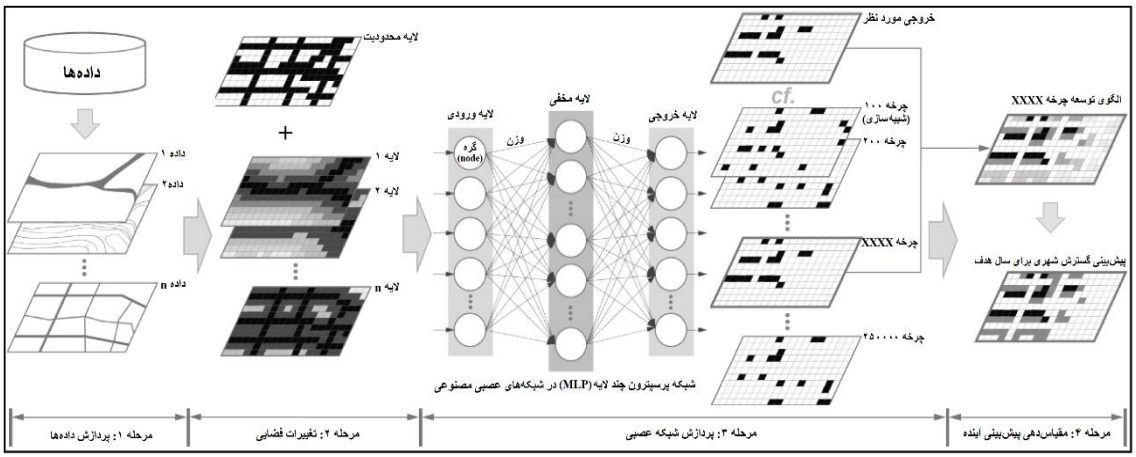
۲- شاخص‌های پیشنهادی تِسای[1] یعنی تراکم، اندازه متروپل، درجه توزیع متعادل (ضریب جینی[2] و ضریب آنتروپی شانون[3]) و درجه تجمع (ضریب موران[4] و ضریب گَری[5]) به‌منظور شناخت و تعیین الگوی گسترش یا رشد کالبدی-فضایی شهر و محاسبه درجه پراکنش از فشردگی آن طی دوره ۹۵-۱۳۶۵؛

۳- مدل تبدیل اراضی (LTM) به‌منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی روند تغییرات و توسعه آتی شهر اصفهان برای سال ۱۴۲۵:

مدل LTM از پرکاربردترین ابزارهای پیش‌بینی تغییرات پوشش و کاربری اراضی در مقیاس‌های شهری و منطقه‌ای به دلیل عملکرد پیش‌بینی دقیق آن است. این یک مدل مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) است. به این صورت که، رابطه بین عوامل محرک فضایی و تغییرات کاربری زمین را با GIS و فرآیند یادگیری ماشین شبکه‌های عصبی مصنوعی بررسی می‌کند (Kim, 2019: 22). فرآیند انجام مدل‌سازی LTM در نرم‌افزار Idrisi Terrset شامل ۸ مرحله می‌باشد: ۱- آماده‌سازی داده‌ها ۲- ایجاد شبکه ۳- ایجاد فایل الگو (الگوی یادگیری شبکه) ۴- آموزش شبکه ۵- تست شبکه ۶- شبیه‌سازی تغییرات رشد شهر ۷- ارزیابی مدل ۸- پیش‌بینی رشد شهر (شکل ۲).

در این پژوهش، داده‌های اولیه موردنیاز برای مدل‌سازی رشد شهری، از تصاویر ماهواره‌ای، سازمان‌ها و نقشه‌های مصوب شهری اصفهان اخذ و با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS و Idrisi Terrset آماده‌سازی شدند. این داده‌ها عبارت‌اند از: نقشه‌های حریم شهر، طیف ارتفاعی، شیب و جهت شیب زمین، فرسایش‌پذیری خاک، مناطق شهری سال ۱۳۶۵، مناطق شهری سال ۱۳۹۵، فاصله از شبکه راه‌های ارتباطی اصلی، فاصله از رودخانه، فاصله از اراضی بایر، فاصله از اراضی کشاورزی، فاصله از اراضی مرتع، فاصله از اراضی پوشش درختی، فاصله از مناطق ساخته‌شده شهری، فاصله از مراکز خدمات شهری، محدودیت‌های توسعه شهری. در ادامه برای مدل‌سازی از مدل LTM در نرم‌افزار Idrisi جهت آموزش، تست، شبیه‌سازی و پیش‌بینی توسعه احتمالی شهر در افق سال ۱۴۲۵ بهره گرفته شد. برای این منظور، اختلاف حاصل از توسعه شهری (تغییر مناطق شهری) از سال ۱۳۶۵ تا سال ۱۳۹۵ به‌عنوان «متغیر وابسته» و معیارهایی را که در توسعه شهری دخیل هستند به‌عنوان «متغیر مستقل» به محیط مدل وارد شدند.

1. Yu-Hsin Tsai
2. Gini coefficient
3. Shannon entropy
4. Moran coefficient
5. Geary coefficient



شکل ۲. فرآیند اجرایی مدل‌سازی LTM

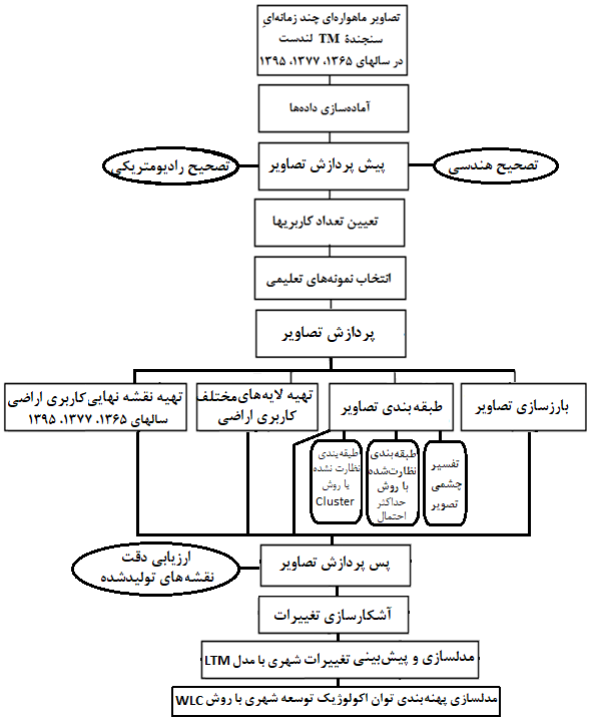
منبع: Kim, 2019: 29

۴- روش ترکیب خطی وزن‌دار (wlc) در مدل ارزیابی چندمعیاره (MCE) به‌منظور مدل‌سازی پهنه‌بندی توان اکولوژیک توسعه شهری اصفهان برای سال ۱۴۲۵ از طریق شناسایی اراضی مناسب توسعه شهر و سنجش تناسب آن‌ها.

هدف از تحلیل ارزیابی چند معیاره، انتخاب بهترین آلترناتیو (بهترین مکان یا پیکسل) بر مبنای رتبه‌بندی آن‌ها از طریق ارزیابی چند معیار اصلی است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۰۳). wlc ترکیبی از روش کمّی و کیفی است که معیارهای اندازه‌گیری شده و وزن‌های داده‌شده توسط یکی از روش‌های فن تصمیم‌گیری چندمعیاره (AHP،ANP، TOPSIS و ...) به هر کدام از آن‌ها را با هم ضرب می‌کند (کریمی و همکاران، ۱۳۹۷: ۲۲۱). بر این اساس wlc روش امتیازدهی نیز نامیده می‌شود. روش wlc در محیط نرم‌افزار GIS یا Idrisi مشتمل بر مراحل زیر است:

- تعیین مجموعه معیارهای ارزیابی (لایه‌های نقشه) و گزینه‌ها؛
- استاندارد کردن هر لایه نقشه معیار و تبدیل مقیاس (یعنی مقیاس ارزش‌ها و مقادیر معیارهای ارزیابی باهم همخوان و قابل‌مقایسه شود. در این تحقیق برای کمی سازی و استانداردسازی معیارها از روش *منطق فازی* استفاده شد).
- تعیین وزن‌های مربوط به هر معیار (به این معنی که به هر نقشه معیار مستقیماً یک وزن اهمیت نسبی اختصاص داده شود. در این تحقیق با استفاده از روش AHP در نرم‌افزار Expert Choice وزن‌ها تعیین گردید)؛
- تولید لایه‌های نقشه وزن‌دار استانداردشده (یعنی ضرب لایه‌های نقشه استانداردشده در وزن‌های متناظر با آن‌ها)؛
- تلفیق لایه‌ها به‌منظور طبقه‌بندی لایه‌های وزن‌دار نقشه استانداردشده و مشخص نمودن ارزش طبقات آن‌ها (با استفاده از عملیات همپوشانی و تابع اجتماع (union) بر روی لایه‌های وزن‌دار نقشه‌ای که استانداردشده، نمره یا امتیاز کل در ارتباط با هر گزینه به دست آورده می‌شود)؛
- طبقه‌بندی یا رتبه‌بندی گزینه‌ها (پیکسل‌ها) بر اساس امتیاز (یعنی گزینه دارای بیشترین امتیاز، بهترین گزینه می‌باشد).

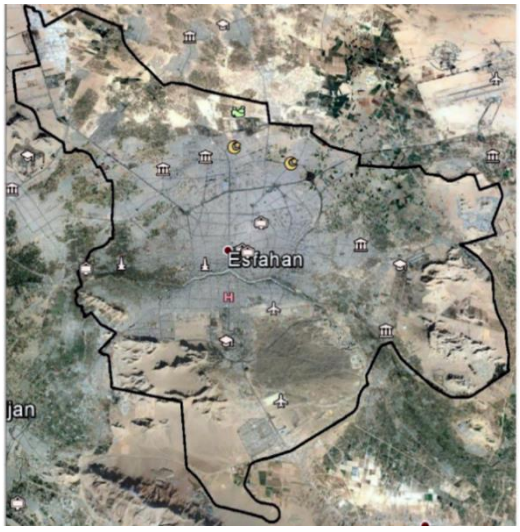
نتیجه حاصل از این تلفیق، نقشه‌ای است که دارای ارزش‌هایی بین ۰ و ۱ است؛ مناطق دارای ارزش ۰ نامطلوب‌ترین و مناطق دارای ارزش ۱ مطلوب‌ترین قسمت‌ها می‌باشند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۱۲).



شکل ۳. فرآیند اجرای پژوهش

محدوده موردمطالعه

شهر اصفهان با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۹ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۸ دقیقه شمالی در مرکز ایران واقع‌شده است و دارای سومین رتبه جمعیتی در سطح کشور بعد از شهرهای تهران و مشهد است (مهندسین مشاور نقش جهان پارس، ۱۳۹۳: ۴). محدوده شهری اصفهان به ۱۵ منطقه شهری تقسیم می‌شود. در سال ۱۳۹۵ دارای ۱۹۶۱۲۶۰ نفر جمعیت و ۲۰۸۸۴ هکتار مساحت محدوده و ۳۴۳۶۹/۵ هکتار مساحت حریم (مجموعاً ۵۵۲۵۳/۵ هکتار) بوده است. محدوده موردمطالعه پژوهش، کل پهنه محدوده و حریم شهر می‌باشد.

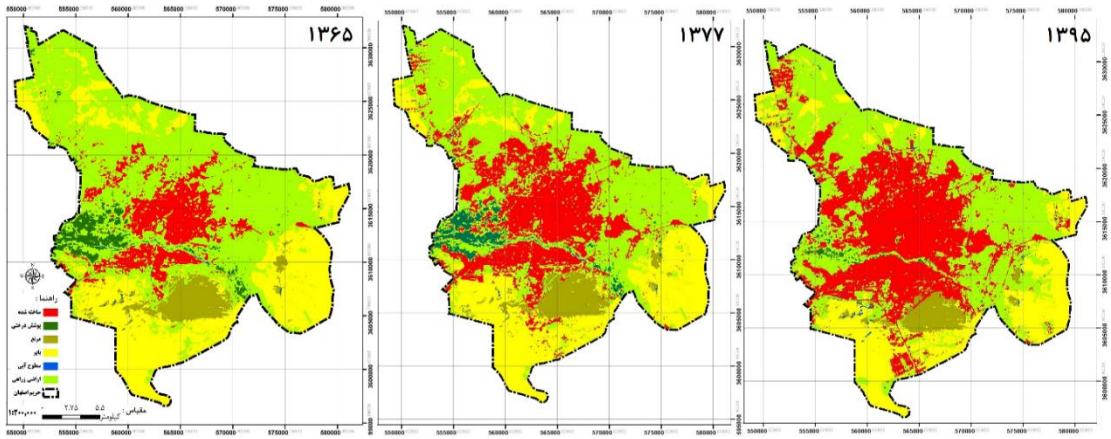


شکل ٤. موقعیت منطقه موردمطالعه در تصویر ماهواره‌ای

یافته‌ها

آشکارسازی تغییرات پوشش و کاربری اراضی محدوده موردمطالعه

به‌منظور مشخص کردن تغییر پوشش و کاربری زمین در محدوده موردمطالعه مربوط به سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵ (تغییرات ۳۰ ساله) از فن آشکارسازی تغییرات با روش «مقایسه پس از طبقه‌بندی با استفاده از عملگر Crosstab» در نرم‌افزار Idrisi استفاده‌شده است. در جدول ۵ نتایج حاصل از مساحت کاربری‌های مختلف حاصل از نقشه ۵ نشان داده‌شده است.



شکل۵. کاربری اراضی شهر اصفهان طی سال‌های ۱۳۶۵، ۱۳۷۷ و ۱۳۹۵ (استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای)

جدول ٤. میزان صحت کلی و ضریب کاپا نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده

سال	صحت کلی (درصد)	ضریب کاپا
۱۳۶۵	۸۵	۰/۸۰
۱۳۷۷	۷۹	۰/۷۸
۱۳۹۵	۸۸	۰/۸۳

جدول ۵. مساحت و میزان تغییرات سطوح کاربری اراضی شهر اصفهان طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۶۵

کاربری اراضی	مساحت سال ۱۳۶۵		مساحت سال ۱۳۷۷		مساحت سال ۱۳۹۵		تغییر از ۱۳۶۵ تا ۱۳۷۷		تغییر از ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۵		تغییر از ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵	
	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد
اراضی بایر	۱۶۳۹۴	۲۹/۷	۱۴۷۸۳	۲۶/۸	۱۱۳۴۷	۲۰/۶	-۱۶۱۱	-۱۰	-۳۴۳۶	-۲۳	-۵۰۴۷	-۳۱
اراضی ساخته‌شده	۶۴۱۴	۱۱/۶	۱۲۷۰۴	۲۳	۱۷۸۶۳	۳۲/۴	۶۲۹۰	۹۸	۵۱۵۹	۴۱	۱۱۴۴۹	۱۷۸
اراضی کشاورزی	۲۷۵۸۵	۵۰	۲۳۲۷۷	۴۲/۲	۲۳۳۷۶	۴۲/۴	-۴۳۰۸	-۱۶	۹۹	۰/۵	-۴۲۰۹	-۱۵
پوشش درختی	۱۷۸۸	۳/۲	۱۴۷۵	۲/۷	۳۵۶	۰/۷	-۳۱۳	-۱۸	-۱۱۱۹	-۷۶	-۱۴۳۲	-۸۰
اراضی مرتعی	۲۹۲۳	۵/۳	۲۸۵۳	۵/۲	۲۱۱۱	۳/۸	-۷۰	-۲	-۷۴۲	-۲۶	-۸۱۲	-۲۸
اراضی آبی	۱۱۴	۰/۲	۱۲۶	۰/۲	۱۶۵	۰/۳	۱۲	۱۱	۳۹	۳۱	۵۱	۴۵
مجموع	۵۵۲۱۸	۱۰۰	۵۵۲۱۸	۱۰۰	۵۵۲۱۸	۱۰۰	-	-	-	-	-	-

تحلیل تغییرات کاربری اراضی شهر طی دوره ۳۰ ساله ۱۳۹۵-۱۳۶۵

پس از پردازش و طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۶۵ و استفاده از ماتریس حالت اولیه و ثانویه، جدول تغییراتِ ایجادشده و نقشه تغییرات کاربری اراضی شهر تولید گردید (جدول ۶ و نقشه ۲). میزان تغییرات به وجود آمده در کاربری‌ها طی دوره ۱۳۹۵-۱۳۶۵ به شرح زیر است:

الف) اراضی بایر: اراضی بایر با مساحت ۱۶۳۹۴ هکتار در سال ۱۳۶۵ به ۱۱۳۴۷ هکتار در سال ۱۳۹۵ کاهش پیداکرده است. میزان تغییرات به وجود آمده در این دوره ۵۳۲۳- هکتار (۳۲- درصد) می‌باشد.

ب) اراضی ساخته‌شده: اراضی ساخته‌شده با مساحت ۶۴۱۴ هکتار در سال ۱۳۶۵ به ۱۷۸۶۳ هکتار در سال ۱۳۹۵ افزایش پیداکرده است. میزان تغییرات به وجود آمده در این دوره ۱۱۴۱۳ هکتار (۱۷۸ درصد) می‌باشد.

پ) اراضی کشاورزی: اراضی کشاورزی با مساحت ۲۷۵۸۵ هکتار در سال ۱۳۶۵ به ۲۳۳۷۶ هکتار در سال ۱۳۹۵ کاهش پیداکرده است. میزان تغییرات به وجود آمده در این دوره ۳۹۵۰- هکتار (۱۳- درصد) می‌باشد.

ت) پوشش درختی: پوشش درختی با مساحت ۱۷۸۸ هکتار در سال ۱۳۶۵ به ۳۵۶ هکتار در سال ۱۳۹۵ کاهش پیداکرده است. میزان تغییرات به وجود آمده در این دوره ۱۳۶۶- هکتار (۷۶- درصد) می‌باشد.

ث) اراضی مرتعی: اراضی مرتعی با مساحت ۲۹۲۳ هکتار در سال ۱۳۶۵ به ۲۱۱۱ هکتار در سال ۱۳۹۵ کاهش پیداکرده است. میزان تغییرات به وجود آمده در این دوره ۸۳۹- هکتار (۲۸- درصد) می‌باشد.

ج) اراضی آبی: اراضی آبی با مساحت ۱۱۴ هکتار در سال ۱۳۶۵ به ۱۶۵ هکتار در سال ۱۳۹۵ افزایش پیداکرده است. میزان تغییرات به وجود آمده در این دوره ۶۵ هکتار (۵۷ درصد) می‌باشد.

بررسی روند کلی تغییر کاربری‌ها طی دوره ۳۰ ساله توسعه شهری از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵ (جدول ۶) و مقایسه سطح و جمعیت (جدول ۸) نشان می‌دهد تغییرات مساحت شهر خیلی سریع‌تر از تغییرات جمعیت آن بوده و این مسئله طی مدت ۳۰ سال باعث حدود ۳ برابر شدن مساحت شهر شده است. در این میان می‌توان مسئله شدت پراکنش شهری را در رشد نامنظم شهر در بستر اراضی زراعی و باغی پیرامون مشاهده نمود که به قابلیت اکولوژیکی آن آسیب شدید وارد کرده است.

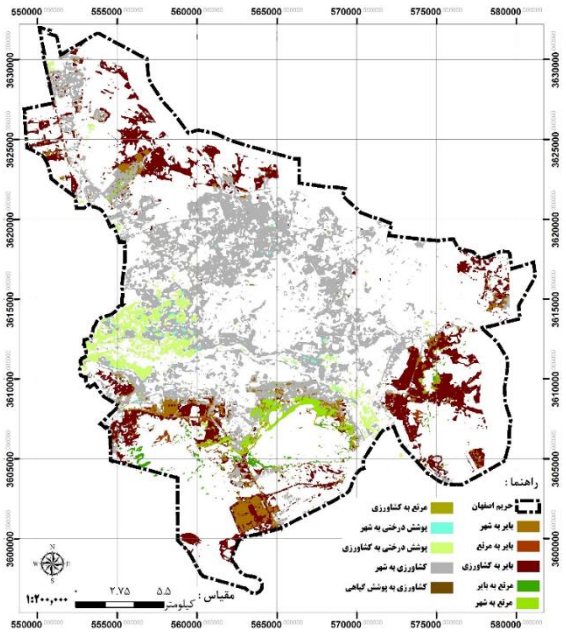
در طول این دوره ۳۰ ساله «اراضی ساخته‌شده» بیشترین میزان تغییرات مثبت (۱۱۴۱۳ هکتار / ۱۷۸ درصد) و کاربری «پوشش درختی» بیشترین میزان تغییرات منفی (۱۳۶۶- هکتار / ۷۶- درصد) نسبت به سایر کاربری‌ها را دارند. کمترین میزان تغییرات نیز مربوط به «کاربری کشاورزی» (۳۹۵۰- هکتار / ۱۳- درصد) است.

در این راستا، میزان تغییرات اراضی ساخته‌شده ۱۱۴۱۳ هکتار (۱۷۸ درصد) افزایش‌یافته و از ۶۴۱۴ هکتار در سال ۱۳۶۵ به ۱۷۸۶۳ هکتار در سال ۱۳۹۵ رسیده است. این در حالی است که جمعیت شهر از ۹۸۶۷۵۰ نفر در سال ۱۳۶۵ به ۱۹۶۱۲۶۰ نفر در سال ۱۳۹۵ افزایش‌یافته است. به‌عبارت‌دیگر، تغییرات جمعیت ۹۷۴۵۱۰ نفر (۹۹ درصد) بوده است. با این حساب میزان افزایش جمعیت با میزان افزایش ساخت‌وساز و توسعه شهری تفاوتی به میزان ۷۹- درصد را نشان می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر، رشد شهر با میزان افزایش جمعیت مطابقت نداشته است؛ لذا شکاف بین رشد مناطق شهری و جمعیت در این دوره بیانگر این است که توسعهٔ افقی بیشتر از فرم عمودی اتفاق افتاده است.

از نتایج منفی توسعه شهری در این دوره نیز به زیر ساخت‌وساز رفتن هکتارها اراضی زراعی و باغی، به‌ویژه باغات سمت غرب (ناژوان) و جنوب شرق شهر است. به‌طوری‌که با در اختیار داشتن ۱۷۶۹۴ هکتار از اراضی بایر برای رشد شهر، میزان تخریب اراضی کشاورزی، باغات و درختی برابر با ۵۳۱۶ هکتار (۸۸ درصد) بوده است. بر این اساس در رشد اراضی ساخته‌شده، بیشترین سهم از کاهش اراضی کشاورزی به میزان ۹۶۴۲/۴ هکتار (۸۴/۵ درصد) ناشی شده است (جدول ۶).

جدول ٦. مقایسه تغییرات کاربری و پوشش اراضی شهر اصفهان بر اساس تصاویر طبقه‌بندی‌شده سال‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۹۵

۱۳۶۵ (هکتار)	۱۳۹۵ (هکتار)							
	طبقه کاربری اراضی	اراضی بایر	اراضی ساخته‌شده	اراضی کشاورزی	پوشش درختی	اراضی مرتعی	اراضی آبی	مجموع طبقه
	اراضی بایر	۱۶۳۹۴	۱۱۹۱/۲	۴۹۸۰	۰	۴۲۱/۸	۳۰/۳	۲۳۰۱۷/۳
	اراضی ساخته‌شده	۰	۶۴۱۴	۰	۰	۰	۰	۶۴۱۴
	اراضی کشاورزی	۷۶۵/۴	۹۶۴۲/۴	۲۷۵۸۵	۱۱۳	۶۹/۲	۳۸/۵	۳۸۲۱۳/۵
	پوشش درختی	۰	۶۸/۵	۱۴۱۰/۵	۱۷۸۸	۰	۰	۳۲۶۷
	اراضی مرتعی	۵۳۲/۷	۵۰۱/۷	۱۹۵/۴	۰	۲۹۲۳	۱۰۰/۴	۴۲۵۳/۲
	اراضی آبی	۲	۹/۳	۹۲/۶	۰	۰	۱۱۴	۲۱۷/۹
	مجموع طبقه	۱۷۶۹۴/۱	۱۷۸۲۷/۱	۳۴۲۶۳/۵	۱۹۰۱	۳۴۱۴	۲۸۳/۲	۰
	تغییرات طبقه	۱۳۰۰/۱	۱۱۴۱۳/۱	۶۶۷۸/۵	۱۱۳	۴۹۱	۱۶۹/۲	۰
	تفریق تصاویر	−۵۳۲۳/۲	+۱۱۴۱۳/۱	−۳۹۵۰	−۱۳۶۶	−۸۳۹/۲	+۶۵/۳	۰
	(میزان تغییرات از ۱۳۶۵–۱۳۹۵)	(٪−۳۲)	(٪+۱۷۸)	(٪−۱۳)	(٪−۷۵)	(٪−۲۸)	(٪+۵۷)	



شکل ٦. تغییرات کاربری اراضی شهر اصفهان طی سال‌های ۱۳۹۵–۱۳۶۵ بر اساس پردازش تصاویر ماهواره‌ای

تغییرات کاربری طبقه اراضی ساخته‌شده (شهر) طی سال‌های ۱۳۹۵–۱۳٦٥

روند فضایی تغییرات کاربری اراضی ساخته‌شده طی دوره ۱۳۹۵–۱۳۶۵ نشان می‌دهد که در نتیجه از بین رفتن اراضی کشاورزی، زمین‌های بایر، مراتع، پوشش درختی و سطوح آبی، مساحت مناطق مسکونی افزایش داشته است. طی این دوره، گسترش شهر بیشترین تأثیرات را بر روی کاربری کشاورزی با نابودی ۹۶۴۲/۴ هکتار (۸۴/۵ درصد) از مزارع داشته است.

جدول ۷. تغییر کاربری اراضی ساخته‌شده از سال ۱۳۶۵ تا سال ۱۳۹۵

ردیف	تغییر کاربری اراضی	مساحت (هکتار)	درصد
۱	اراضی بایر به ساخته‌شده	۱۱۹۱/۲	۱۰/۴
۲	کشاورزی به ساخته‌شده	۹۶۴۲/۴	۸۴/۵
۳	پوشش درختی به ساخته‌شده	۶۸/۵	۰/۶
۴	مرتع به ساخته‌شده	۵۰۱/۷	۴/۴

۵	سطوح آبی به ساخته‌شده	۹/۳	۰/۱
۶	مجموع	۱۱۴۱۳/۱	۱۰۰

جدول ۸. تغییرات سطح کاربری اراضی ساخته‌شده و جمعیت شهر اصفهان طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۶۵

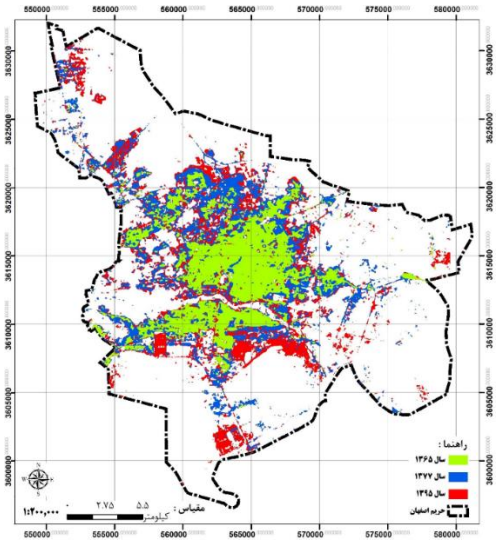
سال	مساحت مناطق شهری (هکتار)	تغییر مناطق شهری در مقایسه با دوره قبل (هکتار)	درصد تغییر مناطق شهری	جمعیت (نفر)	تغییر جمعیت در مقایسه با دوره قبل (نفر)	درصد تغییر جمعیت
۱۳۶۵	۶۴۱۴	–	–	۹۸۶۷۵۳	–	–
۱۳۷۷	۱۲۷۰۴	۶۲۹۰	۹۸	۱۳۱۰۶۵۹	۳۲۳۹۰۶	۳۳
۱۳۹۵	۱۷۸۶۳	۵۱۵۹	۴۱	۱۹۶۱۲۶۰	۶۵۰۶۰۱	۵۰

الگوی رشد کالبدی- فضایی شهر طی دوره ۳۰ ساله ۱۳۹۵-۱۳٦٥

به‌منظور تحلیل شکل شهر و برنامه‌ریزی برای چگونگی گسترش فیزیکی آتی آن، شاخص‌های کمّی مختلفی به بررسی سنجش فرم شهری می‌پردازند (آزادخانی، ۱۳۹۷: ۱۶). در این پژوهش برای شناخت و تعیین الگوی گسترش شهر اصفهان و محاسبه درجه پراکنش از فشردگی آن از شاخص‌های پیشنهادی تِسای یعنی تراکم، اندازه متروپل، درجه توزیع متعادل (ضریب جینی و ضریب آنتروپی شانون) و درجه تجمع (ضریب موران و ضریب گَری) استفاده‌شده است (قرخلو و زنگنه،۱۳۸۸: ۲۴). نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌های سنجش فرم شهری و ضرایب مربوطه نشان می‌دهد الگوی رشد کالبدی-فضایی اصفهان طی مدت ۳۰ ساله ۹۵-۱۳۶۵، به‌صورت «*پراکنده*» بوده و حرکت کندی به سمت رشد هوشمند شهری از نظر میزان فشردگی دارد (جدول ۹).

جدول ۹. شاخص‌ها و ضرایب سنجش فرم شهری اصفهان

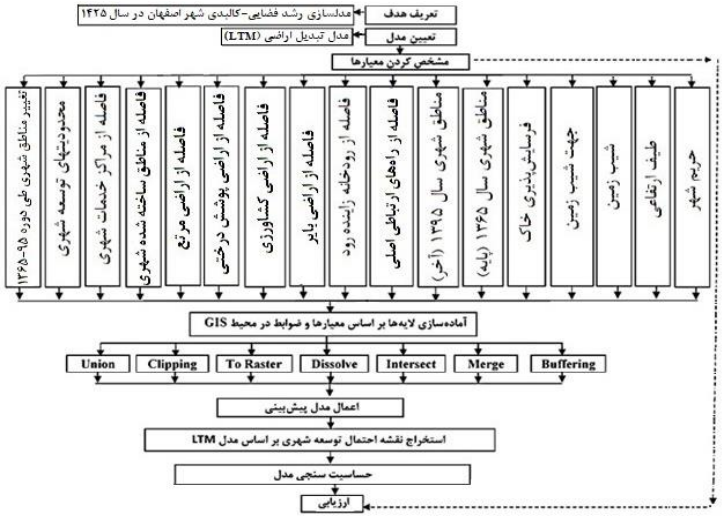
شاخص	ضریب			تفسیر
	۱۳۶۵	۱۳۷۵	۱۳۹۵	
جینی	۰/۱۲۲	۰/۱۴۸	۰/۱۱۹	پراکندگی
آنتروپی شانون	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۹۹	پراکندگی
موران	-۰/۱۷۰	-۰/۱۴۱	-۰/۰۹۷	پراکندگی
گَری	-۰/۱۶۷	-۰/۲۶۴	-۰/۲۹۵	پراکندگی



شکل۷. روند و الگوی گسترش فیزیکی شهر اصفهان بر اساس پردازش تصاویر ماهواره‌ای چند زمانه طی سال‌های ۹۵-۱۳۶۵

پیش‌بینی توسعه آتی شهر اصفهان با مدل تبدیل اراضی (LTM)

مدل تبدیل اراضی (LTM) با استفاده از عوامل مؤثر در توسعه شهری و نقش و عملکرد هر یک از آن‌ها، رشد و توسعه شهری را با توجه به فاکتورهای محدود به هر منطقه تبیین می‌کند (رحیمی، ۱۳۹۲: ۱۲۹). هدف از اجرای این مدل در این پژوهش عبارت است از: ۱) مدل‌سازی تغییر کاربری زمین شهر اصفهان با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۱۳۶۵، ۱۳۷۷ و ۱۳۹۵ و سایر متغیرهای مؤثر؛ ۲) پیش‌بینی آینده رشد شهری اصفهان برای سال ۱۴۲۵ بر اساس داده‌های گذشته. در ادامه به روند نحوه اجرای مدل و مراحل آن پرداخته‌شده است.



شکل ۸. فلوچارت فرآیند پیش‌بینی رشد شهری اصفهان تا افق سال ۱۴۲۵ بر اساس مدل LTM

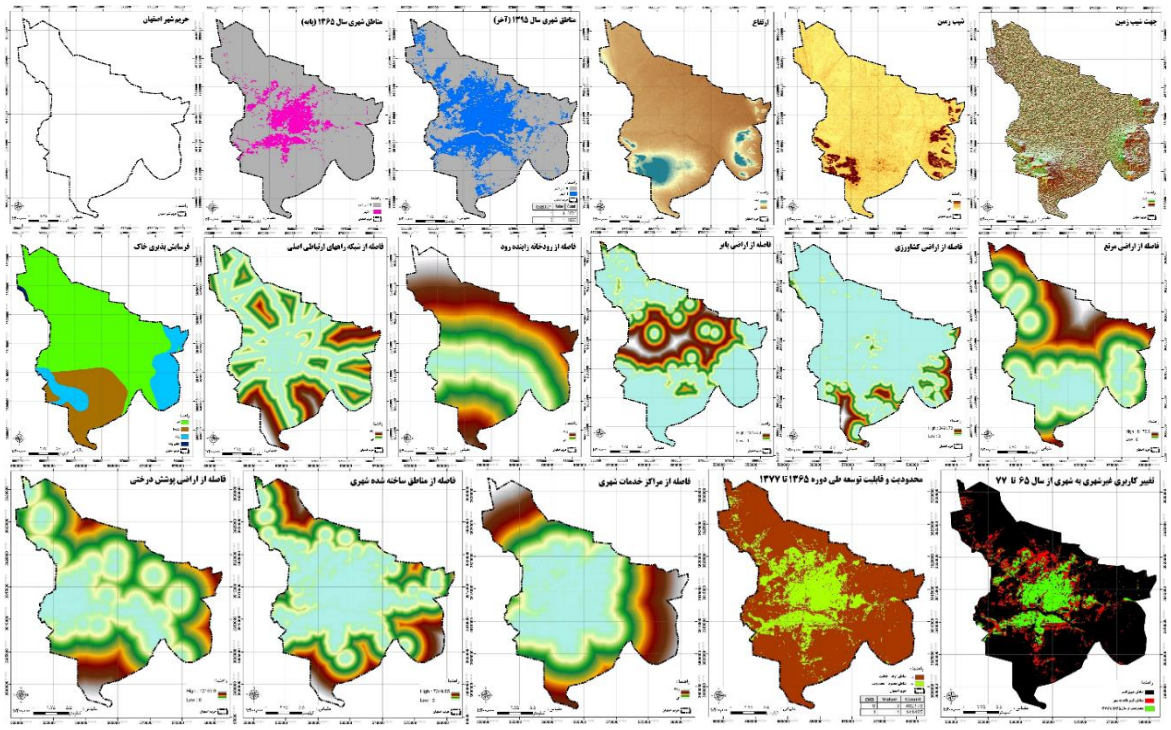
۱- آماده‌سازی داده‌ها:

در این مطالعه از دو گروه متغیر مستقل شامل لایه‌های طبیعی و انسانی (کالبدی) مؤثر در توسعهٔ شهری به‌عنوان داده‌های ورودی برای مدل LTM استفاده‌شده است (جدول ۱۰).

جدول ۱۰. متغیرهای مورداستفاده در مدل LTM

متغیر	نوع لایه	لایه	نام لایه	ماهیت داده	منبع	تفکیک (متر)
مستقل	ورودی	طبیعی	حریم شهر	بولین۰ و ۱	داده سازمانی از اداره کل راه شهرسازی اصفهان	۳۰
			ارتفاع	پیوسته	داده توپوگرافی و پردازش داده‌های سنجنده Aster	۳۰
			شیب زمین	پیوسته	لایه ارتفاع با اجرای دستور SLOPE	۳۰
			جهت شیب زمین	پیوسته	لایه ارتفاع با اجرای دستور ASPECT	۳۰
			فرسایش‌پذیری خاک	پیوسته	همپوشانی لایه شیب و لایه سطوح سنگی	۳۰
		انسانی (کالبدی)	مناطق شهری سال ۱۳۶۵ (پایه)	بولین ۰ و ۱	تصویر ماهواره‌ای طبقه‌بندی‌شده سال ۱۳۶۵ با اجرای دستور Reclass	۳۰
			مناطق شهری سال ۱۳۹۵ (آخر)	بولین ۰ و ۱	تصویر ماهواره‌ای طبقه‌بندی‌شده سال ۱۳۹۵ با اجرای دستور Reclass	۳۰
			فاصله از شبکه راه‌های اصلی	پیوسته	لایه جاده با اجرای دستور Distance	۳۰
			فاصله از رودخانه	پیوسته	لایه رودخانه با اجرای دستور Distance	۳۰
			فاصله از اراضی بایر	پیوسته	لایه اراضی بایر با اجرای دستور Distance	۳۰
			فاصله از اراضی کشاورزی	پیوسته	لایه اراضی کشاورزی با اجرای دستور Distance	۳۰
			فاصله از اراضی مرتع	پیوسته	لایه اراضی مرتع با اجرای دستور Distance	۳۰
			فاصله از اراضی پوشش درختی	پیوسته	لایه پوشش درختی با اجرای دستور Distance	۳۰
			فاصله از مناطق ساخته‌شده شهری	پیوسته	لایه مناطق شهری با اجرای دستور Distance	۳۰

		فاصله از مراکز خدمات شهری	پیوسته	لایه خدمات شهری با اجرای دستور Distance	۳۰
		محدودیت‌های توسعه شهری ۷۷-۱۳۶۵	بولین۰ و ۱	تصویر ماهواره‌ای طبقه‌بندی‌شده با دستور Reclass	۳۰
وابسته	خروجی	تغییر مناطق شهری ۱۳۷۷-۱۳۶۵	بولین ۰ و ۱	تفریق تصویر ماهواره‌ای طبقه‌بندی‌شده از ۱۳۶۵ تا ۱۳۷۷	۳۰



شکل ۹. لایه‌های مورداستفاده در مدل LTM

۲- ایجاد شبکه:

شبکه‌های عصبی مورداستفاده شبکه پرسپترون چندلایه (MLP) می‌باشد که دارای ۳ لایه شامل لایه ورودی، لایه مخفی و لایه خروجی می‌باشد. از داده‌های ورودی برای ایجاد الگو استفاده شد. لایه ورودی (متغیرهای مستقل) «متغیرهای مؤثر بر کاربری اراضی» است و لایه خروجی (متغیر وابسته) «متغیر کاربری تغییریافته در دوره زمانی موردمطالعه» است. لذا تعداد نورون‌های (واحدهای) لایه ورودی برابر با «تعداد متغیرها» و تعداد نورون‌های لایه خروجی برابر با «تعداد طبقات کاربری» تغییریافته و پایدار است. بر این اساس با لایه‌های ذکرشده در نقشه ۴، شبکه عصبی با ۱۶ نورون ورودی، ۱۶ نورون مخفی و ۱ نورون خروجی ایجاد گردید. برای ایجاد نورون خروجی، «مناطق شهری» در تصاویر دو دوره زمانی سال‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۷۷ موردبررسی قرار گرفتند و میزان تغییرات شهر به روش «مقایسه پس از طبقه‌بندی» استخراج شد. این متغیر به‌عنوان نورون خروجی که بیان‌کننده تغییرات شهری طی دوره زمانی ۷۷-۱۳۶۵ است، در مدل استفاده‌شده است (نقشه ۵).

۳- ایجاد فایل الگو (الگوی یادگیری شبکه):

با استفاده از فایل متنی مورداستفاده برای ایجاد فایل الگو، این فایل ایجاد و در مرحله بعد برای آموزش شبکه به کار گرفته می‌شود (احمدی، ۱۳۹۸: ۶۶). در این مرحله، روند تغییرات در دوره زمانی اول (۷۷-۱۳۶۵) و ارتباط آن‌ها با متغیرهای استفاده‌شده ایجاد می‌شود (رحیمی،۱۳۹۶: ۴۷). در این پژوهش تعداد ۳۹۸۱۶۶ فایل الگو برای داده‌کاوی انتخاب‌شده است.

درصورتی‌که تغییر به طبقه شهری ایجاد نشده باشد کد ۰ (صفر) و اگر تغییر به طبقه شهری ایجادشده باشد کد ۱ (یک) می‌گیرد.

٤- آموزش شبکه:

هدف از آموزش شبکه، برقراری ارتباط بین طبقات (نحوه تغییرات شهری) با ایجاد الگوهایی در سطح شبکه است (رحیمی، ۱۳۹۶: ۵۲). در این مرحله شبکه ایجادشده با الگوریتم MLP آموزش داده می‌شود تا به کمترین میزان خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) در یادگیری برسد (همان: ۴۷). در چرخه ۱۰۰۰۰ میزان خطا با رقم ۰/۰۷۹۷۹۷۱ در کمترین حد است؛ و به همین دلیل از تصویر احتمال پیش‌بینی این چرخه (که در مرحله تست شبکه ایجاد می‌گردد) برای گرفتن خروجی نقشهٔ «احتمال شهرنشینی» استفاده می‌شود. بررسی نقشه حاصل از این مرحله با عنوان نقشه تغییرات واقعی در محدوده موردمطالعه مناطقی را نشان می‌دهد که بین سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵ دچار رشد شهری شده‌اند (نقشه ۶).

٥- تست شبکه:

پس از الگوی یادگیری شبکه و تهیه نقشه تغییرات واقعی شهر و محاسبه تعداد سلول‌های تغییریافته، «تست شبکه» با توجه به نقشه‌های ورودی در مرحله آموزش موردسنجش قرار می‌گیرد. این مرحله بر اساس شبکه‌های اصلاح‌شده در پایان هر چرخه انجام می‌گیرد و تصاویر احتمال انتقال کاربری ایجاد می‌گردند که از آن‌ها برای استخراج موقعیت‌های شهری جدید در آینده، استفاده می‌شود. سپس با به دست آمدن بیشترین صحت و کمترین خطای RMSE پایان می‌یابد. در پایان این مرحله، «فایل احتمال (که احتمال تغییر هر سلول (منطقه) را در آینده نشان می‌دهد)» و «فایل متنی گزارش دهنده ضریب کاپا» و «درصد متریک سازگاری (میزان درصد صحت)» ایجاد می‌گردد (کامیاب و همکاران، ۱۳۹۰، ۱۰۸). خروجی این مرحله، «تصویر احتمال پیش‌بینی بر اساس هر چرخه» و «تصویر رشد شهری پیش‌بینی‌شده مدل برای دوره زمانی موردمطالعه» است (احمدی، ۱۳۹۸: ۶۷). نقشه ۷ پتانسیل احتمال تغییر به شهر از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵ را نشان می‌دهد. در این نقشه مناطقی که احتمال بالاتری دارند (مناطق آبی‌رنگ) برای رشد در آینده مستعدتر هستند.

٦- شبیه‌سازی رشد شهر:

با استفاده از مراحل «الگوی یادگیری شبکه» و «تست شبکه»، نقشه رشد شهری از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵ شبیه‌سازی می‌گردد. مناطق زرد رنگ در نقشه بیانگر این است که این مناطق در سال ۱۳۹۵ احتمال تغییر به شهر را دارند (نقشه ۸).

۷- نقشه خطای شبیه‌سازی:

این نقشه خطای شبیه‌سازی از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵ را نشان می‌دهد و از ترکیب نقشه‌های «شبیه‌سازی» و «تغییرات واقعی» به دست می‌آید و مناطقی را نشان می‌دهد که در *مدل* و *واقعیت* تغییر کرده‌اند و یا تغییر نکرده‌اند (نقشه ۹).

۸- ارزیابی مدل:

در شبکه‌های عصبی مصنوعی برای جلوگیری از آموزش بیش‌ازحد که منجر به افزایش خطا و یادگیری نامناسب الگوها می‌گردد، باید از معیارهای مختلفی برای کنترل روند یادگیری استفاده شود و بهترین سیکل (چرخه) یادگیری برای ارزیابی و مراحل دیگر شبکه انتخاب گردد. برای این منظور از ضرایب مختلف مانند: خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، درصد متریک سازگاری (PCM)[1] و ضریب کاپا (KC)[2] استفاده می‌شود (رحیمی، ۱۳۹۳: ۱۰۷). در این تحقیق ارزیابی نتایج مدل با استفاده از این ضرایب صورت گرفته است. با افزایش چرخه میزان RMSE کاهش می‌یابد. بر این اساس، سیکل ۱۰۰۰۰ دور به‌عنوان سیکل مناسب جهت شبکه مورداستفاده انتخاب گردید. در این سیکل میزان خطا کاهش‌یافته و ضریب

1. Percent Correct Metric (PCM)
2. Kappa Coefficient (KC)

سازگاری و کاپا نیز سازگارتر شده است که نشان‌دهنده آموزش موفق شبکه برای به دست آوردن خروجی نقشه «پیش‌بینی رشد احتمالی شهر» در این چرخه می‌باشد. درصد متریک سازگاری ((PCM میزان صحت چرخه‌های مدل را نشان می‌دهد. این ضریب از تقسیم تعداد سلول‌های شهری تغییریافته بر تعداد کل سلول‌های تغییریافته (شهری و غیرشهری) به دست می‌آید. در این ماتریس، میزان درصد صحت (PCM) ۴۰ تا ۶۰ درصد «قابل‌قبول» و بیش از ۶۰ درصد «عالی» است. در این پژوهش، صحت مدل حدود ۶۰ درصد می‌باشد.

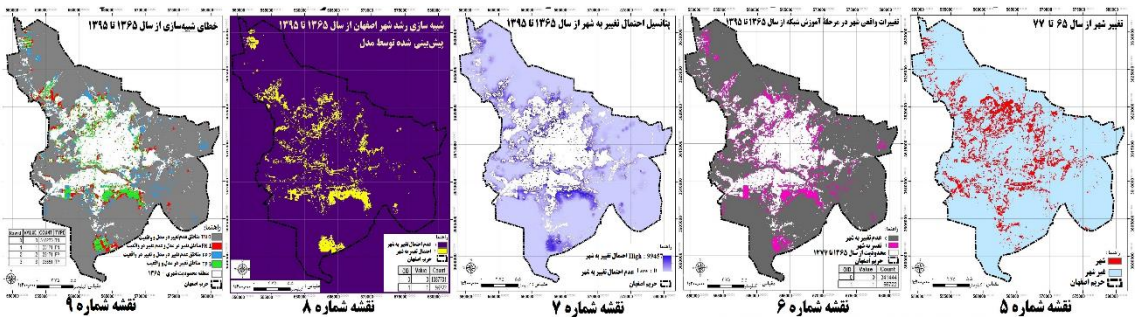
جدول ۱۱. نتایج اعتبارسنجی مدل LTM در شبکه‌های عصبی مصنوعی

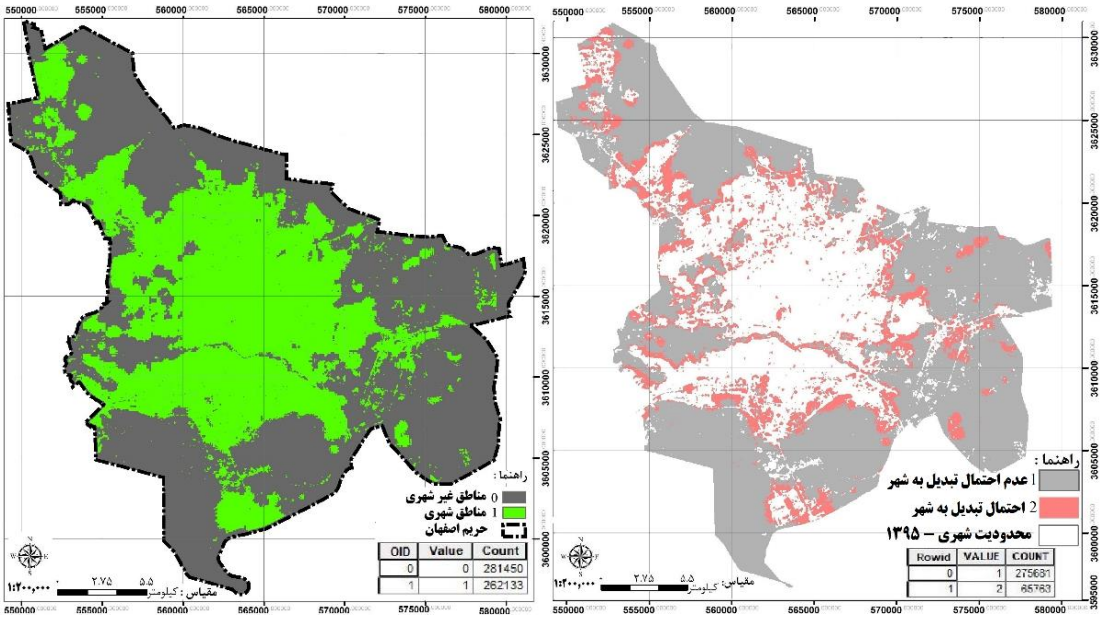
سیکل یادگیری	درصد متریک سازگاری (PCM)	ضریب کاپا (Kappa)	خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)
۱۰۰	۵۷/۳۰۵۸۰۷	۰/۵۰	۰/۰۸۲۵۲۷۵
۱۰۰۰۰	۵۹/۷	۰/۵۳	۰/۰۷۹۷۹۷۱

۹- پیش‌بینی آینده رشد شهری:

برای پیش‌بینی آینده رشد شهری جهت محاسبه کمّیت تغییرات شهری از روش «استفاده از داده‌های گذشته» بهره گرفته‌شده است. در این روش، الگوی کمّی تغییرات شهری، مشابه دوره‌های زمانی گذشته است و میزان سلول‌های تغییریافته برای دوره ۳۰ ساله آینده (۱۴۲۵–۱۳۹۵) مطابق با میزان تغییری است که در دوره ۳۰ ساله گذشته (۱۳۹۵–۱۳۶۵) برآورد شده است. بر این مبنا، با توجه به تغییرات شهر در دوره‌های ۱۳۹۵–۱۳۶۵ و ۱۴۲۵–۱۳۹۵، میزان نیاز تبدیل به شهر ۶۵۷۶۳ پیکسل (۵۹۱۸ هکتار) در نظر گرفته‌شده است و بر این اساس نقشه سال ۱۴۲۵ پیش‌بینی گردید. در این نقشه، بیشترین توسعه احتمالی بر روی اراضی شمال غرب، شرق، جنوب و غرب شهر اتفاق افتاده است. ضلع شمال و جنوب شرق شهر نیز مقداری از توسعه شهر را به خود اختصاص داده است (نقشه ۱۰). نقشه ۱۱ نیز نشان‌دهنده رشد و توسعه فیزیکی شهر طی دوره ۱۴۲۵–۱۳۶۵ به میزان ۲۶۲۱۳۳ سلول ۳۰×۳۰ مترمربع (حدود ۲۳۵۹۲ هکتار) می‌باشد (مناطق سبز رنگ). همچنین طی این سال‌ها ۲۷۵۶۸۱ سلول (۲۵۳۳۰/۵ هکتار) نیز بدون توسعه خواهد ماند (مناطق طوسی‌رنگ).

با توجه به اینکه، برای سال ۱۴۲۵ نیاز به ۵۹۱۸ هکتار زمین برای کاربری شهری خواهد بود، بر این اساس و مطابق جدول ۱۴ که نتایج رشد احتمالی شهر اصفهان تا سال ۱۴۲۵ را نشان می‌دهد، نواحی ساخته‌شده شهر در سال افق به میزان ۳۳ درصد افزایش خواهد داشت و از ۱۷۸۶۳ هکتار در سال ۱۳۹۵ به ۲۳۷۸۱ هکتار در سال ۱۴۲۵ خواهد رسید.





شکل ۱۰. پیش‌بینی رشد احتمالی شهر برای سال ۱۴۲۵ نقشه ۱۱: رشد احتمالی شهر تا سال ۱۴۲۵

سناریوهای رشد آتی شهر اصفهان

برای ترسیم وضعیت آتیِ توسعه فضایی–کالبدی شهر اصفهان و دستیابی به چشم‌انداز مقدماتی تعیین‌شده، سناریوهایی تدوین گردیده که بر اساس آن چگونگی رفتار سیستم شهر در آینده مورد پیش‌بینی قرارگرفته است. این سناریوها عبارت‌اند از:

۱– سناریوی روند؛ یعنی بررسی وضعیت آینده شهر در صورت ادامه روند گذشته و حال.

۲– سناریوی وضع مطلوب؛ یعنی ترسیم توسعه آتی شهری موردقبول.

سناریوی روند (تداوم روند گذشته و حال)

در سناریوی روند، وضعیت توسعه آتی شهر بر مبنای روند گذشته و حال پیش‌بینی می‌شود و فرض بر این است که در آینده وضعیت توسعه آتی شهر ادامه الگوهای قبلی باشد (محمودزاده، ۱۳۹۳: ۱۶۴). بر مبنای این سناریو و طبق بررسی‌های انجام‌شده (جدول ۶)، از سال ۱۳۶۵ تا سال ۱۳۹۵، ۱۱۴۴۹ هکتار (۱۷۸٪) به مساحت کاربری ساخته‌شده شهر افزوده‌شده است. از سوی دیگر در طول این دوره کاربری کشاورزی ۴۲۰۹ هکتار (۱۵٪)، پوشش درختی ۱۴۳۲ هکتار (۸۰٪) و مرتع ۸۱۲ هکتار (۲۸٪) از زمین‌های خود را ازدست‌داده‌اند. بیشترین سهم در کاهش کاربری مربوط به کاربری کشاورزی است. از عوامل اصلی در کاهش این اراضی را می‌توان توسعه شهر، اراضی بایر و پوشش درختی دانست. در این راستا، از اراضی کشاورزی ۹۶۴۲/۴ هکتار به کاربری ساخته‌شده، ۷۶۵/۴ هکتار به اراضی بایر و ۱۱۳ هکتار به پوشش درختی تبدیل‌شده است. مهم‌ترین کاربری که در آن توسعه شهری بیشتر رخداده مربوط به کاربری کشاورزی است (۹۶۴۲/۴ هکتار).

در ادامه این روند، بر اساس نقشه احتمال تهیه‌شده از تصاویر خروجی مدل LTM (نقشه ۱۱) تا سال ۱۴۲۵ حدود ۵۹۱۸ هکتار به کاربری ساخته‌شده شهر افزوده خواهد شد؛ که در این میان سهم تبدیل از تغییر کاربری کشاورزی به کاربری ساخته‌شده ۴۸۸۵ هکتار خواهد بود. در نهایت پیش‌بینی می‌شود مساحت کاربری ساخته‌شده شهر به ۲۳۷۸۱ هکتار در سال ۱۴۲۵ برسد. جدول ۱۲ و نقشه ۱۲ تغییرات کاربری اراضی شهر ناشی از سناریوی روند در طی دوره ۱۳۹۵–۱۴۲۵ را نشان می‌دهند. میزان تغییرات به وجود آمده در کاربری‌ها طی این دوره به شرح زیر خواهد بود:

الف) اراضی بایر: اراضی بایر با مساحت ۱۱۳۴۷ هکتار در سال ۱۳۹۵ به ۱۰۹۷۵ هکتار در سال ۱۴۲۵ کاهش پیدا خواهد کرد. میزان تغییرات به وجود آمده در این دوره ۶۴۴/۴- هکتار (۴- درصد) می‌باشد.

ب) اراضی ساخته‌شده: اراضی ساخته‌شده با مساحت ۱۷۸۶۳ هکتار در سال ۱۳۹۵ به ۲۳۷۸۱ هکتار در سال ۱۴۲۵ افزایش پیدا خواهد کرد. میزان تغییرات به وجود آمده در این دوره ۵۹۱۸ هکتار (۳۳ درصد) می‌باشد.

پ) اراضی کشاورزی: اراضی کشاورزی با مساحت ۲۳۳۷۶ هکتار در سال ۱۳۹۵ به ۱۸۲۲۱ هکتار در سال ۱۴۲۵ کاهش پیدا خواهد کرد. میزان تغییرات به وجود آمده در این دوره ۴۸۸۵- هکتار (۲۲- درصد) می‌باشد.

ت) پوشش درختی: پوشش درختی با مساحت ۳۵۶ هکتار در سال ۱۳۹۵ به ۲۹۲ هکتار در سال ۱۴۲۵ کاهش پیدا خواهد کرد. میزان تغییرات به وجود آمده در این دوره ۶۵- هکتار (۱۸- درصد) می‌باشد.

ث) اراضی مرتعی: اراضی مرتعی با مساحت ۲۱۱۱ هکتار در سال ۱۳۹۵ به ۱۸۱۸ هکتار در سال ۱۴۲۵ کاهش پیدا خواهد کرد. میزان تغییرات به وجود آمده در این دوره ۲۹۱- هکتار (۱۴- درصد) می‌باشد.

ج) اراضی آبی: اراضی آبی با مساحت ۱۶۵ هکتار در سال ۱۳۹۵ به ۱۳۱ هکتار در سال ۱۴۲۵ کاهش پیدا خواهد کرد. میزان تغییرات به وجود آمده در این دوره ۳۲/۵- هکتار (۲۱- درصد) می‌باشد.

بررسی روند کلی تغییر کاربری‌های شهر طی دوره ۳۰ ساله توسعه شهری آینده از سال ۱۳۹۵ تا ۱۴۲۵ (جدول ۱۲، نقشه ۱۲) و مقایسه سطح و جمعیت (جدول ۱۵) نشان می‌دهد، تغییرات مساحت شهر کُندتر از تغییرات جمعیت آن خواهد بود ولی این مسئله طی مدت ۳۰ سال باعث رشد ۳۳ درصدی مساحت شهر خواهد شد.

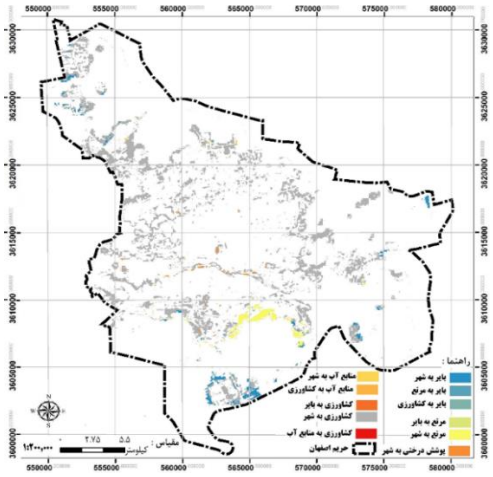
در طول این دوره ۳۰ ساله «اراضی ساخته‌شده» بیشترین میزان تغییرات مثبت (۵۹۱۸ هکتار / ۳۳ درصد) و کاربری «اراضی کشاورزی» بیشترین میزان تغییرات منفی (۴۸۸۵- هکتار / ۲۱- درصد) نسبت به سایر کاربری‌ها را خواهند داشت. کمترین میزان تغییرات نیز مربوط به «اراضی بایر» (۶۴۴/۴- هکتار / ۶- درصد) خواهد بود.

در این راستا، میزان تغییرات اراضی ساخته‌شده ۵۹۱۸ هکتار (۳۳ درصد) افزایش می‌یابد و از ۱۷۸۶۳ هکتار در سال ۱۳۹۵ به ۲۳۷۸۱ هکتار در سال ۱۴۲۵ خواهد رسید. این در حالی است که جمعیت شهر از ۱۹۶۱۲۶۰ نفر در سال ۱۳۹۵ به حدود ۳۸۹۸۰۰۰ نفر در سال ۱۴۲۵ افزایش خواهد یافت. به‌عبارت‌دیگر، تغییرات جمعیت حدود ۱۹۳۷۰۰۰ نفر (۵۰ درصد) خواهد بود. با این حساب میزان افزایش جمعیت با میزان افزایش ساخت‌وساز و توسعه شهری تفاوتی به میزان ۱۷ درصد را نشان می‌دهد. به‌بیان‌دیگر، رشد شهر با میزان افزایش جمعیت مطابقت ندارد؛ لذا شکاف بین رشد مناطق شهری و جمعیت در این دوره بیانگر این است که توسعهٔ عمودی شهر بیشتر از توسعه افقی اتفاق خواهد افتاد.

از نتایج منفی توسعه شهری در این دوره، به زیر ساخت‌وساز رفتن هکتارها اراضی زراعی اطراف شهر است. به‌طوری‌که با در اختیار داشتن ۱۱۳۵۲/۶ هکتار از اراضی بایر برای رشد شهر، میزان تخریب اراضی کشاورزی برابر با ۴۸۸۵ هکتار (۲۲ درصد) خواهد بود. بر این اساس در رشد اراضی ساخته‌شده، بیشترین سهم از کاهش اراضی زراعی به میزان ۸۲/۵ درصد ناشی شده است (جدول ۱۳). با مقایسه نقشه سال ۱۳۹۵ و نقشه شبیه‌سازی‌شده برای سال ۱۴۲۵ می‌توان به این نتیجه دست‌یافت که توسعه اراضی ساخته‌شده به ضرر اراضی کشاورزی، پوشش درختی و مراتع خواهد بود.

جدول ۱۲. مقایسه تغییرات کاربری و پوشش اراضی شهر اصفهان بین سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۴۲۵ در سناریوی روند

		۱۴۲۵ (هکتار)						
	طبقه کاربری اراضی	اراضی بایر	اراضی ساخته‌شده	اراضی کشاورزی	پوشش درختی	اراضی مرتعی	اراضی آبی	مجموع طبقه
۱۳۹۵ (هکتار)	اراضی بایر	۱۱۳۴۷	۶۴۴/۵	۵/۱	۰	۰/۴	۰	۱۱۹۹۷
	اراضی ساخته‌شده	۰	۱۷۸۶۳	۰	۰	۰	۰	۱۷۸۶۳
	اراضی کشاورزی	۵/۲	۴۸۸۵	۲۳۳۷۶	۰	۰	۰/۱	۱۲۸۲۶۶/۳
	پوشش درختی	۰	۶۵	۰	۳۵۶	۰	۰	۴۲۱
	اراضی مرتعی	۰/۴	۲۹۱	۰	۰	۲۱۱۱	۰	۲۴۰۲/۴
	اراضی آبی	۰	۳۲/۵	۰/۱	۰	۰	۱۶۵	۱۹۷/۶
	مجموع طبقه	۱۱۳۵۲/۶	۲۳۷۸۱	۱۲۳۳۸۱/۲	۳۵۶	۲۱۱۱/۴	۱۶۵/۱	۰
	تغییرات طبقه	۵/۶	۵۹۱۸	۵/۲	۰	۰/۴	۰/۱	۰
	تفریق تصاویر (میزان تغییرات از ۱۴۲۵-۱۳۹۵)	-۶۴۴/۴ (٪-۴)	+۵۹۱۸ (٪ +۳۳)	-۴۸۸۵/۱ (٪ -۲۲)	-۶۵ (٪-۱۸)	-۲۹۱ (٪ -۱۴)	-۳۲/۵ (٪-۲۱)	۰



شکل ۱۱. تغییرات کاربری اراضی شهر اصفهان طی سال‌های ۱۴۲۵-۱۳۹۵

تغییرات کاربری طبقه اراضی ساخته‌شده (شهر) طی سال‌های ۱۴۲۵-۱۳۹۵ بر اساس سناریوی روند

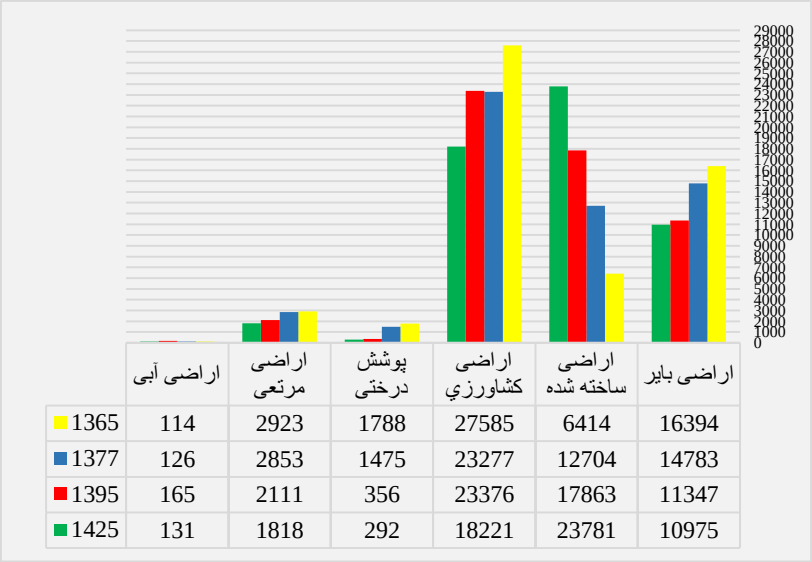
روند فضایی تغییرات کاربری اراضی ساخته‌شده طی دوره ۱۴۲۵-۱۳۹۵ مطابق جدول ۱۳ نشان می‌دهد که در نتیجه از بین رفتن اراضی کشاورزی، زمین‌های بایر، مراتع، پوشش درختی و سطوح آبی، مساحت مناطق مسکونی افزایش داشته است. در طی این دوره گسترش شهر بیشترین تأثیرات را بر روی کاربری کشاورزی با نابودی ۴۸۸۵ هکتار از مزارع داشته است.

جدول ۱۳. تغییر کاربری اراضی ساخته‌شده از سال ۱۳۹۵ تا سال ۱۴۲۵

ردیف	تغییر کاربری اراضی	مساحت (هکتار)	درصد
۱	اراضی بایر به ساخته‌شده	۶۴۴/۵	۱۱
۲	کشاورزی به ساخته‌شده	۴۸۸۵	۸۲/۵
۳	پوشش درختی به ساخته‌شده	۶۵	۱
۴	مرتع به ساخته‌شده	۲۹۱	۵
۵	سطوح آبی به ساخته‌شده	۳۲/۵	۰/۵
۶	مجموع	۵۹۱۸	۱۰۰

جدول ١٤. تغییرات سطوح کاربری اراضی شهر اصفهان از سال ۱۳۶۵ تا ۱۴۲۵ (هکتار)

کاربری اراضی	مساحت در سال ۱۳۶۵	مساحت در سال ۱۳۷۷	تغییر از ۱۳۶۵ تا ۱۳۷۷	مساحت در سال ۱۳۹۵	تغییر از ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۵	تغییر از ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵	مساحت در سال ۱۴۲۵	تغییر از ۱۳۹۵ تا ۱۴۲۵
اراضی بایر	۱۶۳۹۴	۱۴۷۸۳	−۱۶۱۱ (٪ −۱۰)	۱۱۳۴۷	−۳۴۳۶ (٪ −۲۳)	−۵۰۴۷ (٪ −۳۱)	۱۰۹۷۵	−۳۷۲ (٪ −۴)
اراضی ساخته‌شده	۶۴۱۴	۱۲۷۰۴	۶۲۹۰ (٪۹۸)	۱۷۸۶۳	۵۱۵۹ (٪۴۱)	۱۱۴۴۹ (٪۱۷۸)	۲۳۷۸۱	۵۹۱۸ (+٪۳۳)
اراضی کشاورزی	۲۷۵۸۵	۲۳۲۷۷	−۴۳۰۸ (٪ −۱۶)	۲۳۳۷۶	۹۹ (٪۰/۵)	−۴۲۰۹ (٪ −۱۵)	۱۸۲۲۱	−۵۱۵۵ (٪ −۲۲)
پوشش درختی	۱۷۸۸	۱۴۷۵	−۳۱۳ (٪ −۱۸)	۳۵۶	−۱۱۱۹ (٪ −۷۶)	−۱۴۳۲ (٪ −۸۰)	۲۹۲	−۶۴ (٪ −۱۸)
اراضی مرتعی	۲۹۲۳	۲۸۵۳	−۷۰ (٪ −۲)	۲۱۱۱	−۷۴۲ (٪ −۲۶)	−۸۱۲ (٪ −۲۸)	۱۸۱۸	−۲۹۳ (٪ −۱۴)
اراضی آبی	۱۱۴	۱۲۶	۱۲ (٪۱۱)	۱۶۵	۳۹ (٪۳۱)	۵۱ (٪۴۵)	۱۳۱	−۳۴ (٪ −۲۱)
مجموع	۵۵۲۱۸	۵۵۲۱۸	–	۵۵۲۱۸	–	–	۵۵۲۱۸	–



شکل ۱۲. تغییرات سطوح کاربری اراضی شهر اصفهان از سال ۱۳۶۵ تا ۱۴۲۵ (هکتار)

جدول ۱۵. تغییرات سطح کاربری اراضی ساخته‌شده و جمعیت شهر اصفهان طی سال‌های ۱۴۲۵-۱۳۶۵

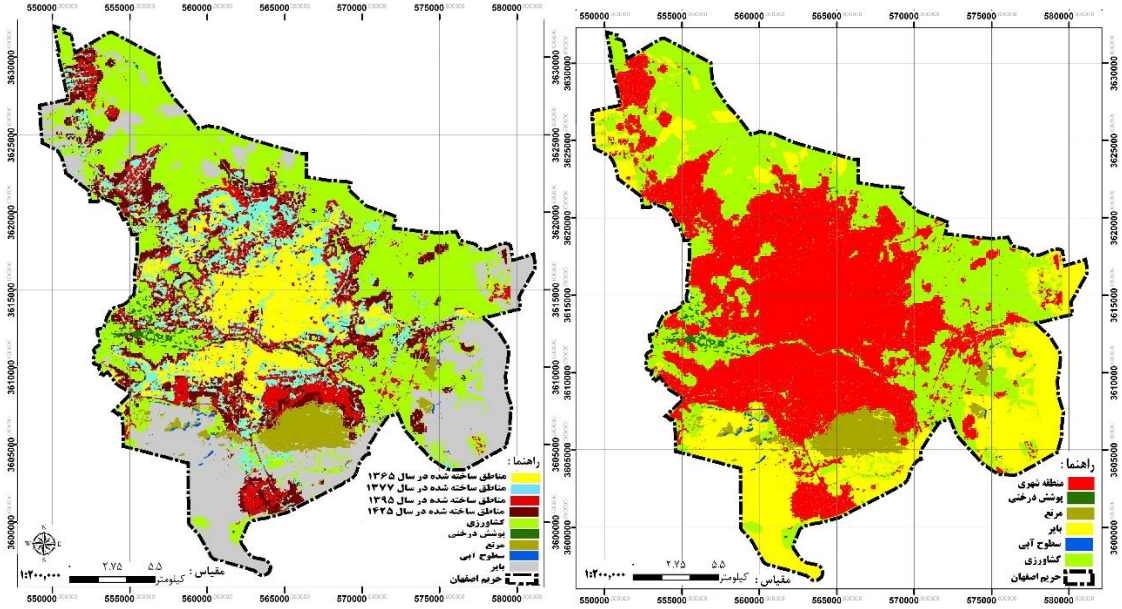
سال	مساحت مناطق شهری (هکتار)	تغییر مناطق شهری در مقایسه با دوره قبل (هکتار)	درصد تغییر مناطق شهری	جمعیت (نفر)	تغییر جمعیت در مقایسه با دوره قبل (نفر)	درصد تغییر جمعیت
۱۳۶۵	۶۴۱۴	–	–	۹۸۶۷۵۳	–	–
۱۳۷۷	۱۲۷۰۴	۶۲۹۰	۹۸	۱۳۱۰۶۵۹	۳۲۳۹۰۶	۳۳
۱۳۹۵	۱۷۸۶۳	۵۱۵۹	۴۱	۱۹۶۱۲۶۰	۶۵۰۶۰۱	۵۰
۱۴۲۵	۲۳۷۸۱	۵۹۱۸	۳۳	۳۸۹۸۱۸۰[1]	۱۹۳۶۹۲۰	۹۹

منبع: نگارنده، بر اساس پردازش تصاویر ماهواره‌ای سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵ و سرشماری مرکز آمار ایران و پیش‌بینی جمعیت

۱. پیش‌بینی جمعیت برای سال ۱۴۲۵ بر اساس جمعیت سال‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۹۵ و نرخ رشد به میزان ۲/۳۱ صورت گرفته است.

در نقشه ۱۳ سیمای توسعه شهری اصفهان در افق سال ۱۴۲۵ با سناریوی روند پیش‌بینی‌شده است. مطابق جدول ۱۵ برای توسعه آتی شهر ۵۹۱۸ هکتار اراضی موردنیاز خواهد بود که در این سناریو ازیک‌طرف، مجاورت این شهر با باغات و اراضی کشاورزی، اراضی مرتعی، اراضی آبی و پوشش درختی اطراف شهر موجودیت این ذخایر اکولوژیک را به مخاطره خواهد انداخت. از سوی دیگر، روند توسعه مناطق روستایی پیرامون شهر به علت نیاز به استفاده از زیرساخت‌های شهری و بالا رفتن قیمت اراضی، در دهه‌های آتی موج دومی از توسعه پراکنده و ادغام در بافت شهر را شروع خواهد کرد.

نتایج حاصل از سناریوی روند در اصفهان نشانگر ادامه رشد پراکنده شهری و توسعه افقی در دهه‌های آتی می‌باشد و اراضی موجود در محدوده شهر به ساخت‌وسازهای شهری اختصاص خواهد یافت که ادامه این روند نه‌تنها مشکلات زیست‌محیطی را باعث می‌گردد، بلکه باعث افزایش هزینه‌های توسعه و آماده‌سازی اراضی موردنیاز توسعه شهری خواهد شد.



نقشه ۱۳. وضعیت توسعه آتی شهر اصفهان در سناریوی روند تا سال ۱۴۲۵ نقشه ۱۴: کاربری اراضی شهر اصفهان در سال ۱۴۲۵

سناریوی وضع مطلوب (مدل‌سازی پهنه‌بندی توان اکولوژیک توسعه شهری با روش WLC)

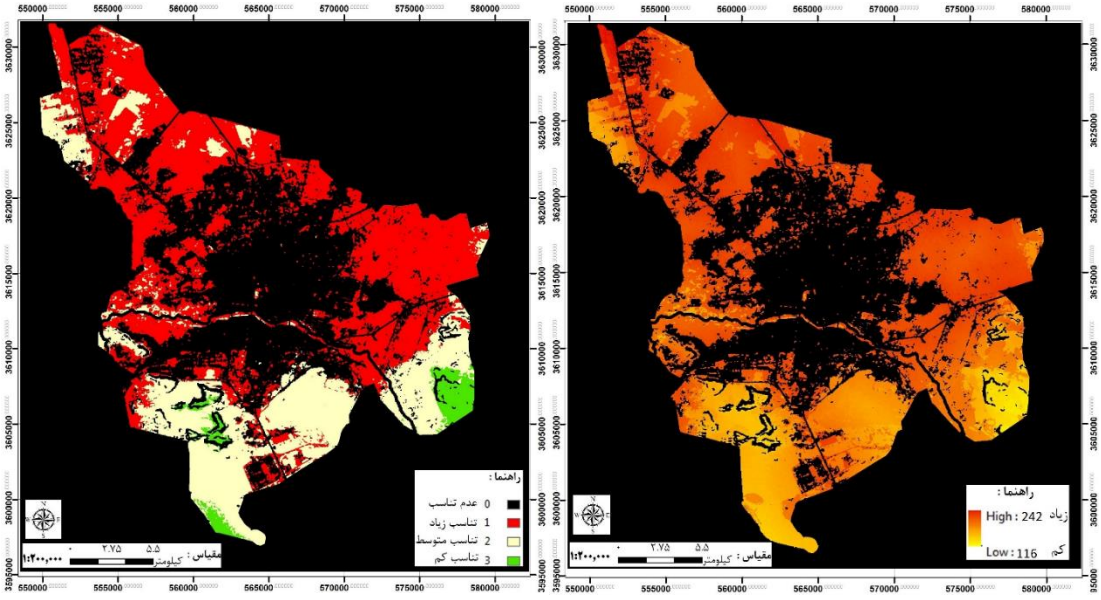
فرآیند مکان‌یابی مناسب برای تخصیص زمین به کاربری‌های مناسب، تلاشی است برای ایجاد چارچوبی که طی آن بتوان برای رسیدن به راه‌حل بهینه اقدام کرد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۷: ۲۱۹). ارزیابی توان اکولوژیک به معنای ارزش‌گذاری هر یک از لکه‌های یکنواخت و همگن سرزمین برای انواع کاربری‌های مختلف است. بر این اساس در هر یک از مناطق، درجه مرغوبیت سرزمین برای انواع توسعه‌ها مشخص می‌شود. این امر موجب کاهش و به حداقل رساندن پیامدهای منفی ناشی از توسعه بر محیطزیست می‌شود (کوشکی، ۱۳۹۵: ۲۰).

در سناریوی وضع مطلوب، برای شناسایی اراضی مناسب توسعه شهر اصفهان در سال ۱۴۲۵ از روش ترکیب خطی وزن‌دار (wlc) در مدل MCE در محیط نرم‌افزار Idrisi TerrSet جهت انجام عملیات ارزیابی توان اکولوژیک استفاده‌شده است. بدین منظور، مراحل انجام عبارت‌اند از: ۱- تعیین معیارهای لازم و آماده‌سازی نقشه‌های معیارهای اکولوژیکی (نقشه ۴) ۲- کمی سازی و استانداردسازی معیارها با روش منطق فازی ۳- وزن دهی به معیارها با روش فرایند تحلیل سلسله

مراتبی (AHP) ۴- ترکیب (تلفیق) لایه‌ها و تحلیل تناسب با اجرای فرایند ارزیابی چندمعیاره با روش wlc ۵- درجه‌بندی مطلوبیت اراضی برای توسعه شهری (نقشه ۱۴) ۶- طبقه‌بندی لایه نهایی و تناسب اراضی برای توسعه شهری (نقشه ۱۶).

در نقشه درجه‌بندی مطلوبیت اراضی برای توسعه شهری، مقادیر بیشتر نشان‌دهنده درجه توان بالاتر و مقادیر کمتر بیانگر درجه توان پایین‌تر برای توسعه شهری است. بر این اساس، *مناطق غرب، شمال غرب، شمال، شرق و شمال شرق* شهر اصفهان دارای تناسب و قابلیت بالاتری برای توسعه هستند (حدود ۷۰ درصد) و مناطق حاشیه‌ای خصوصاً در سمت *جنوب* (به‌استثنای اراضی اطراف جاده اصفهان _ بهارستان)، *جنوب غرب* و *جنوب شرق* شهر که ارتفاع بالاتری دارند و کاربری آن‌ها مراتع و اراضی بایر است، از تناسب و قابلیت کمتری برای توسعه برخوردار هستند (حدود ۳۰ درصد).

نقشه تناسب اراضی برای توسعه شهری (نقشه ۱۵) به سه‌طبقه شامل مناطق با تناسب زیاد (کد ۱)، مناطق با تناسب متوسط (کد ۲) و مناطق با تناسب کم (کد ۳) طبقه‌بندی گردید. مطابق این نقشه، قسمت‌های *جنوب* (به‌استثنای اراضی اطراف جاده اصفهان _ بهارستان)، *جنوب غرب* و *جنوب شرق*، شرایط مناسب برای توسعه شهری را ندارند؛ بنابراین، باید از توسعه بی‌رویه در این جهات جلوگیری شود. از این نقشه می‌توان برای الگویی جهت توسعه در آینده استفاده نمود.



شکل۱٤. درجه‌بندی مطلوبیت اراضی برای توسعه شهری بر اساس روش wlc **شکل ۱۵.** تناسب اراضی برای توسعه شهری

مقایسه تناسب اراضی برای توسعه شهری با رشد احتمالی شهر در سال ۱٤۲۵

در این مرحله، لایه «رشد احتمالی شهر در سال ۱۴۲۵» که از مدل LTM استخراج‌شده است (نقشه ۱۱) با لایه «تناسب اراضی برای توسعه شهری» که از روش wlc به‌دست‌آمده است (نقشه ۱۶)، تلفیق و مقایسه گردید تا مشخص شود چه میزان مساحت در رشد و توسعه آینده شهر اصفهان تا سال ۱۴۲۵ در هر طبقه از مناطق قرار دارد (نقشه ۱۷).

نتایج حاصل از جدول ۱۶ نشان می‌دهد که ۳۲ درصد (۱۷۸۶۳ هکتار) از اراضی مناطقی هستند که بیرون از منطقه تناسب هستند (اراضی ساخته‌شده تا سال ۱۳۹۵)؛ ۴ درصد (۲۳۱۸ هکتار) نیز به دلیل عدم تناسب، جدای از تحلیل قرارگرفته‌اند. مجموع مساحت مناطق دارای تناسب زیاد و متوسط برای توسعه شهری در سال ۱۴۲۵، ۵۷۱۲ هکتار است که در این میان ۴۶۶۶ هکتار (۸ درصد) از رشد شهری در مناطقی اتفاق می‌افتد که دارای **تناسب زیاد** *(کد ۱ در لایه تناسب)* برای توسعه هستند (غالباً حواشی خط محدوده در سمت غرب، شمال غرب، شمال و شرق شهر)؛ و ۱۰۴۶ هکتار

(۲ درصد) در مناطقی به وقوع خواهد پیوست که دارای **تناسب متوسط** هستند (سمت جنوب شهر در امتداد جاده اصفهان_بهارستان). غالب کاربری‌های این مناطق اراضی کشاورزی و بایر می‌باشد.

اراضی با مساحت‌های ۱۷۰۳۱ هکتار (۳۱٪)، ۱۱۰۵۴ هکتار (۲۰٪) و ۱۶۲۰ هکتار (۳٪) نیز به ترتیب مناطقی هستند که برای توسعه شهری دارای **تناسب زیاد** (سمت غرب، شمال غرب، شمال شرق، شرق)، **تناسب توسط** (سمت جنوب، جنوب غرب، جنوب شرق) و **تناسب کم** (سمت جنوب غرب، جنوب شرق) هستند اما هیچ رشدی توسط مدل برای این مناطق پیش‌بینی‌نشده است.

جدول ۱۶. میزان مساحت تناسب اراضی برای توسعه شهری با رشد احتمالی شهر در سال ۱۴۲۵

ردیف	طبقات	کد در نقشه	مساحت (هکتار)	درصد از منطقه
۱	بیرون از منطقه	۰ | ۰	۱۷۸۶۳	۳۲
۲	عدم رشد شهری در مناطق با تناسب زیاد	۰ | ۱	۱۷۰۳۱	۳۱
۳	عدم رشد شهری در مناطق با تناسب متوسط	۰ | ۲	۱۱۰۵۴	۲۰
۴	عدم رشد شهری در مناطق با تناسب کم	۰ | ۳	۱۶۲۰	۳
۵	جدای از تحلیل	۱ | ۰	۲۳۱۸	۴
۶	رشد شهری در مناطق با تناسب زیاد	۱ | ۱	۴۶۶۶	۸
۷	رشد شهری در مناطق با تناسب متوسط	۱ | ۲	۱۰۴۶	۲

بحث

یکی از مهم‌ترین مباحث شهر و شهرنشینی در ایران، بررسی و تحلیل رشد و توسعهٔ کالبدی–فضایی شهر است. بدین لحاظ، از یکسو بررسی و شبیه‌سازی توسعه فیزیکی شهر و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و از سوی دیگر، تحلیل تناسب زمین برای توسعهٔ شهری و شناسایی اراضی مناسب و اولویت‌دار برای توسعه کالبدی–فضایی آن در آینده به‌منظور مدیریت و برنامه‌ریزی رشد و توسعه شهری و همچنین ارزیابی اثرات تجمعی آن، ضروری می‌باشد. لذا مطالعه میزان تغییرات شهری در سال‌های گذشته و پیش‌بینی این تغییرات در سال‌های آینده می‌تواند در برنامه‌ریزی و استفاده بهینه از منابع و کنترل تغییرات غیراصولی گام مهمی باشد و از طریق مدل‌سازی رشد و گسترش شهری می‌توان تغییرات کاربری را برای سری زمانی چندین ساله، جهت برنامه‌ریزی‌های شهری مناسب پیش‌بینی نمود. در شهر اصفهان به دلیل افزایش جمعیت، محدوده سکونتی شهر طی چهار دهه اخیر رشد چشمگیری داشته است. بر این مبنا در پژوهش حاضر رشد و گسترش فیزیکی شهر اصفهان همراه با تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل LTM شبیه‌سازی گردید. بدین منظور، ابتدا نقشه‌های کاربری اراضی شهر تهیه و تغییرات پوشش اراضی و مناطق رشد شهری در طول ۳۰ سال، از ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵ موردبررسی، مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. از مدل LTM در محیط نرم‌افزار Idrisi Terrset نیز برای آموزش، تست، شبیه‌سازی و پیش‌بینی توسعه احتمالی شهر در افق سال ۱۴۲۵ بهره گرفته شد و بر این اساس «سناریوی رونـد» تدوین و مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. در ادامه جهت تدوین «سناریوی وضع مطلوب»، روش wlc برای مدل‌سازی پهنه‌بندی توان اکولوژیک توسعه شهری به‌منظور شناسایی اراضی مناسب توسعه شهر اصفهان در سال ۱۴۲۵ به کار گرفته شد.

نتیجه‌گیری

در شهر اصفهان، محدوده سکونتی شهر طی چهار دهه اخیر رشد چشمگیری داشته است. یکی از عوامل اصلی توسعه فیزیکی شهر، افزایش سریع جمعیت آن است که در ۳ دهه گذشته جمعیت آن ۲ برابر شده است. در بیان دلایل افزایش

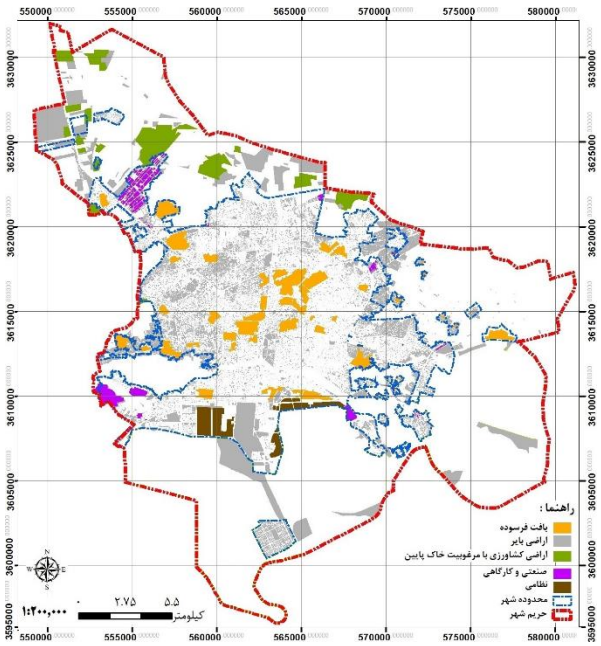
سریع جمعیت آن می‌توان به این موارد اشاره نمود: ۱- رشد طبیعی جمعیت شهر؛ ۲- صنعتی شدن منطقه؛ ۳- مهاجرت جمعیت از روستاها و شهرهای استان اصفهان و استان‌های هم‌جوار به شهر اصفهان؛ ۴- ادغام تعداد زیادی از سکونتگاه‌های روستایی و شهرک‌های پیرامون در شهر اصفهان. در پژوهش حاضر ابتدا به بررسی و تحلیل روند تحولات رشد کالبدی- فضایی شهر اصفهان پرداخته شد. از بررسی الگوی فیزیکی رشد شهر با شاخص‌های سنجش فرم شهری پیشنهادی تسای یعنی تراکم، اندازه متروپل، درجه توزیع متعادل (ضرایب جینی و آنتروپی شانون) و درجه تجمع (ضرایب موران و گری) می‌توان نتیجه گرفت که الگوی رشد کالبدی-فضایی شهر طی مدت ۳۰ ساله ۹۵-۱۳۶۵، از نوع «الگوی پراکندگی شهری» و با سرعت کم است.

با عنایت به اینکه مطالعه میزان تغییرات شهری در سال‌های گذشته و پیش‌بینی این تغییرات در سال‌های آینده می‌تواند در برنامه‌ریزی و استفاده بهینه از منابع و کنترل تغییرات غیراصولی گام مهمی باشد، از طریق مدل‌سازی رشد و گسترش شهری می‌توان تغییرات کاربری اراضی را برای سری زمانی چندین ساله، جهت برنامه‌ریزی‌های شهری مناسب پیش‌بینی نمود. بر این مبنا با استفاده از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای چند زمانه‌ایِ سنجنده TM لندست در طی دوره ۳۰ ساله از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵ در شهر اصفهان با روش «طبقه‌بندی پیکسل پایه» سه نقشه کاربری اراضی برای سال‌های ۱۳۶۵، ۱۳۷۷ و ۱۳۹۵ تهیه گردید و متعاقباً روند پراکنش شهری و تغییرات کاربری اراضی شهر ارزیابی شد. نتایج حاکی از آن است که منطقه موردمطالعه در سال ۱۳۶۵، ۶۴۱۴ هکتار کاربری اراضی ساخته‌شده داشته است که این مقدار در سال ۱۳۹۵ به ۱۷۸۶۳ هکتار افزایش‌یافته است. با توجه به اینکه شهر اصفهان در سال ۱۳۶۵، ۹۸۶۷۵۰ نفر بوده و در سال ۱۳۹۵ به ۱۹۶۱۲۶۰ نفر رسیده است، مقایسه تغییرات درصد مساحت نسبت به تغییرات درصد جمعیت بین سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵ نشان می‌دهد که تغییرات مساحت شهر خیلی سریع‌تر از تغییرات جمعیت آن بوده و این مسئله طی مدت ۳۰ سال باعث حدود ۳ برابر شدن مساحت شهر شده است؛ درحالی‌که طی این دوره آماری جمعیت شهر حدود ۱ برابر افزایش‌یافته است. به‌عبارت‌دیگر، رشد شهر با میزان افزایش جمعیت مطابقت نداشته است؛ لذا شکاف بین رشد مناطق شهری و جمعیت در این دوره بیانگر این است که توسعهٔ افقی بیشتر از فرم عمودی اتفاق افتاده است. مسئله شدت پراکنش شهری را می‌توان در رشد نامنظم شهر در بستر اراضی کشاورزی اطراف شهر مشاهده نمود که به قابلیت اکولوژیکی آن آسیب وارد کرده است. بی‌توجهی به ضوابط و مقررات گسترش کالبدی- فضایی شهر در سال‌های اخیر به‌خصوص ۳۰ سال گذشته، مایه نابودی اراضی کشاورزی یا تبدیل عامدانه آن‌ها به اراضی بایر و سپس به کاربری‌های ساخته‌شده گردیده است.

برای جلوگیری از ادامه این مسئله، با استفاده از مدل تبدیل اراضی (LTM) که توانایی یادگیری الگوهای توسعه شهری و درنتیجه پیش‌بینی گسترش شهری را بر اساس پارامترهای مؤثر توسعه دارد، مدل‌سازی توسعه شهری اصفهان برای سال ۱۴۲۵ انجام گرفت. بدین منظور، با استفاده از متغیرهای مستقل و وابسته، نقشه احتمال توسعه شهری در سال ۱۴۲۵ استخراج شد. این مدل‌سازی نشانگر این است که اراضی ساخته‌شده بین سال‌های ۱۳۹۵ تا سال افق پیش‌بینی (۱۴۲۵)، ۳۳ درصد (۵۹۱۸ هکتار) افزایش خواهد یافت و از ۱۷۸۶۳ هکتار به ۲۳۷۸۱ هکتار خواهد رسید. در این راستا در رشد اراضی ساخته‌شده، ۸۲/۵ درصد از اراضی کشاورزی، ۱ درصد از پوشش درختی، ۵ درصد از اراضی مرتعی، ۰/۵ درصد از اراضی آبی و ۱۱ درصد از اراضی بایر ناشی خواهد شد؛ که این توسعه، علاوه بر تخریب منابع زیست‌محیطی، تغییرات شدید اکولوژیکی را نیز به بار خواهد آورد. در واقع نتایج مدل نشانگر توسعه اسپرال و پراکنده شهری به پیرامون شهر می‌باشد که تخریب اراضی پیرامونی که عمدتاً اراضی کشاورزی می‌باشد را به دنبال خواهد داشت. این مسئله لزوم اتخاذ سیاست‌های مناسب برای جلوگیری از تخریب اکوسیستم‌ها و استفاده ناکارآمد از منابع و زمین را پررنگ می‌کند.

بدین منظور، برای شناسایی مناطق مستعد توسعهٔ شهری اصفهان تا سال ۱۴۲۵ با استفاده از روش ترکیب خطی وزن‌دار (wlc) در قالب سناریوی وضع مطلوب، نقشه توان سرزمین محدوده موردمطالعه تهیه شد که در آن مناطق اولویت‌دار و مناسب برای توسعه شهری را نشان می‌دهد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، نواحی غرب، شمال غرب، شمال، شرق و شمال شرق شهر از اولویت بالاتری برخوردار می‌باشند. نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان الگویی جهت انتخاب مکان‌های مناسب توسعه شهری مورداستفاده قرار گیرد. لذا می‌توان با به‌کارگیری روش‌های صحیح، از پیشروی رشد و توسعه شهری در جهت بخش‌های نامناسب و پیشگیری نمود. درنتیجه، از منابع موجود در منطقه در حد توان و ظرفیتشان استفاده خواهد شد و همچنین محیط‌زیست منطقه حفظ خواهد شد.

لازم به ذکر است، همان‌گونه که در پاسخ به رشد پراکنده شهری در کشورهای توسعه‌یافته، طرفداران رشد هوشمند، استراتژی‌های توسعه شهری را برای کنترل رشد پراکنده و تشویق توسعه فشرده پیشنهاد نموده‌اند (He et al., 2023)، در این مطالعه نیز استفاده از پتانسیل‌های موجود در داخل محدوده شهر اصفهان (نقشه ۱۶) جهت ساماندهی مشکلات شهری و انتظام فضایی شهری از طریق راهبرد توسعه میان‌افزا، به‌عنوان اولین و مناسب‌ترین راهکار توسعه فضایی-کالبدی شهر اصفهان به‌منظور توسعه موزون شهر، جلوگیری از تغییر و تخریب کاربری‌های پیرامون شهر (عمدتاً اراضی کشاورزی)، کاهش هزینه‌های خدمات‌رسانی، حفظ تعادل اکولوژیکی شهر و غیره پیشنهاد می‌گردد. سیاست‌های راهبرد توسعه میان‌افزای شهر اصفهان عبارت‌اند از: ۱- توسعه مجدد بافت‌های نامناسب شهری از طریق بهسازی و نوسازی بافت‌های فرسوده شهری و اختصاص آن‌ها جهت توسعه شهری؛ ۲- خروج کاربری‌های نامناسب شهری ازجمله پادگان‌ها، کارگاه‌های صنعتی مزاحم از محدوده شهر و ایجاد کاربری‌های موردنیاز شهر به‌جای آن‌ها؛ ۳- استفاده مجدد از اراضی بایر و رهاشده شهری.



شکل ۱۶. پتانسیل‌های توسعه شهری اصفهان

شایان‌ذکر است، وجه تشابه این پژوهش با پژوهش‌های پیشین سایر محققان در شهر اصفهان، بررسی تغییرات پوشش و کاربری اراضی و روند تغییرات شهری در آینده بر اساس تغییرات گذشته و نیز پیش‌بینی و شبیه‌سازی توسعه احتمالی

شهر از طریق یافتن محتمل‌ترین مکان‌ها برای توسعه شهری آینده است. با این تفاوت که در تحقیقاتی مانند پژوهش خانم فلاحتکار (۱۳۸۷) با عنوان «آشکارسازی تغییرات پوشش اراضی اصفهان با استفاده از سنجش‌ازدور و GIS» با به‌کارگیری مدل *زنجیره مارکوف* به مدل‌سازی تغییرات کاربری و پوشش اراضی شهر اصفهان در افق سال ۱۴۰۴ پرداخته‌شده است و در پژوهش آقای جهانیان (۱۳۹۸) با عنوان «استخراج قوانین انتقال اتوماتای سلولی با استفاده از الگوریتم‌های هوش جمعی برای مدل‌سازی گسترش شهری اصفهان» با به‌کارگیری مدل‌های *اتوماتای سلولی*، *رگرسیون لجستیک*، *زنجیره مارکوف*، *مدل ترکیبی CA-LR-GWO* به مدل‌سازی گسترش شهری اصفهان در سال ۱۳۹۲ پرداخته‌شده است؛ اما در پژوهش حاضر از مدل تبدیل اراضی (LTM) بهره گرفته‌شده است.

وجه تمایـز این پژوهش با سایر پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه در سایر شهرهای کشور با مدل‌های مختلف شبیه‌سازی، به‌کارگیری دو سناریو شامل «سناریوی روند» به‌منظور بررسی و ارزیابی تغییرات کاربری اراضی شهر اصفهان در طی سه دهه آتی (۱۴۲۵–۱۳۹۵) بر اساس روند گذشته و «سناریوی مطلوب» به‌منظور مدل‌سازی پهنه‌بندی توان اکولوژیک توسعه شهری اصفهان برای سال ۱۴۲۵ با استفاده از روش wlc جهت یافتن مناسب‌ترین مکان‌ها برای توسعه شهری آینده می‌باشد.

در پایان به مهندسین مشاور، برنامه‌ریزان، مدیران و سیاست‌گذاران شهری اصفهان که سومین طرح جامع شهری اصفهان را در دست تهیه دارند پیشنهاد می‌گردد نتایج تحقیق حاضر و سایر تحقیقات صورت گرفته با روش‌های مختلف مدل‌سازی را در برنامه‌ریزی‌های توسعه شهری در راستای مدیریت بهینه اراضی و توسعه پایدار در نظر بگیرند تا در آینده کمترین زیان و خسارت را از توسعهٔ افقی این شهر شاهد باشند.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد منافع

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

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه‌کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

آزادخانی، پاکزاد؛ سلیمانی، سمیه؛ امیدی، مهدی. (۱۳۹۷). بررسی الگوی توسعه کالبدی-فضایی شهر ایلام با مدل آنتروپی شانون و هلدرن. *فصلنامه مطالعات عمران شهری*، ۲ (۴)، ۲۵–۴.

آمارنامه شهر اصفهان. (۱۳۹۶). شهرداری اصفهان.

احمدی، علی. (۱۳۹۸). *تأثیر توسعه شهری بر کیفیت آب در حوزه قره‌سو با استفاده از مدل LTM*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد منابع طبیعی – محیط‌زیست. مؤسسه آموزش عالی غیردولتی بهاران.

امامی، ابراهیم. (۱۳۹۶). *مدل‌سازی فضایی زمانی توسعه شهری با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم‌های هوشمند (موردمطالعه: شهر کرمانشاه)*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد شهرسازی، دانشگاه ارومیه.

جهانیان، امیر. (۱۳۹۸). *استخراج قوانین انتقال اتوماتای سلولی با استفاده از الگوریتم‌های هوش جمعی برای مدل‌سازی گسترش شهری (موردمطالعه: شهر اصفهان)*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی. دانشگاه اصفهان.

داداش‌پور، هاشم؛ سالاریان، فردیس. (۱۳۹۴). تحلیل تأثیر پراکنده‌رویی بر تغییر کاربری زمین در منطقه شهری ساری. *فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری*، ۳ (۲)، ۱۶۳-۱۴۵.

رحیمی، اکبر. (۱۳۹۲). *ارزیابی و مدلسازی توسعه فضایی-کالبدی با تأکید بر توسعه میان‌افزا (موردمطالعه: کلان‌شهر تبریز)*. رساله دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری. دانشگاه تبریز.

رحیمی، اکبر. (۱۳۹۳). مدل‌سازی توسعه شهر تبریز در سال ۱۴۱۰ با استفاده از مدل LTM. *فصلنامه پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری*، ۵ (۲)، ۱۱۰-۹۹.

رحیمی، اکبر؛ صدرموسوی، میرستار؛ پورمحمدی، محمدرضا. (۱۳۹۴). تحلیلی بر تغییرات کاربری زمین شهری با استفاده از مدل تحول زمین (موردمطالعه: شهر تبریز). فصلنامه جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۱۹ (۵۴)، ۲۰۹-۱۸۹.

رحیمی، کامران. (۱۳۹۶). *شبیه‌سازی و ارزیابی تغییرات گسترش شهر تهران با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (موردمطالعه: شهر تهران)*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی. دانشگاه خوارزمی.

زنگنه، سعید؛ امیدی‌پور، مرتضی. (۱۳۹۷). شبیه‌سازی رشد و توسعه کالبدی شهرها با به‌کارگیری مدل سلول‌های خودکار فازی (FCA) (موردمطالعه: شهر اهواز). *فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی*، ۷ (۲۷)، ۹۲-۷۷.

سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا/https://www.usgs.gov

شناور، بامشاد؛ حسینی، محسن؛ اورک، ندا. (۱۳۹۵). ارزیابی توان سرزمین به‌منظور استقرار کاربری توسعه شهری با استفاده از روش wlc (موردمطالعه: حوزه آبخیز زرد خوزستان). *فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست*، ۱۸ (۳)، ۱۱۶-۹۹.

فلاحتکار، سامره. (۱۳۸۷). *آشکارسازی تغییرات پوشش اراضی شهر اصفهان با استفاده از سنجش‌ازدور و GIS*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد محیط‌زیست. دانشگاه صنعتی اصفهان.

قرخلو، مهدی و زنگنه، سعید. (۱۳۸۸). شناخت الگوی رشد کالبدی- فضایی شهر با استفاده از مدل‌های کمّی (موردمطالعه: شهر تهران). *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، سال ۲۰، ۳۴ (۲)، ۴۰-۱۹.

کریمی، سعید و بالیست، جهانبخش. (۱۳۹۷). مکان‌یابی توسعه شهری با منطق فازی و ترکیب خطی وزنی و فن تصمیم‌گیری فرایند تحلیل شبکه‌ای (موردمطالعه: شهر کاشان). *فصلنامه اطلاعات جغرافیایی (سپهر)*، ۲۷ (۱۰۵)، ۲۳۲-۲۱۹.

کوشکی، پریسا. (۱۳۹۵). *مدل‌سازی توان اکولوژیک کاربری‌های کشاورزی و شهری با مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (موردمطالعه: حوزه آبخیز گلِرود بروجرد)*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد ارزیابی و آمایش سرزمین. دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان.

کوشکی، پریسا؛ پورخباز، حمیدرضا. (۱۳۹۹). مدل‌سازی توان اکولوژیک توسعه شهری (موردمطالعه: حاشیه شهر بروجرد). *فصلنامه برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، ۲۴ (۲)، ۱۴۰-۱۱۱.

لطفیان، رحمت. (۱۳۹۴). *بررسی تغییرات و پیش‌بینی آینده توسعه شهری کاشان با استفاده از روش‌های CA-Markov و ژئومد*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد محیطزیست. دانشگاه صنعتی اصفهان.

محمودزاده، حسن. (۱۳۹۳). *ارزیابی و تحلیل اکولوژیک توسعه فضایی کلان‌شهر تبریز*. رساله دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری. دانشگاه تبریز.

محمودزاده، حسن؛ رنجبر، امیرمسعود. (۱۳۹۷). کاربرد مدل LTM در پیش‌بینی و مدل‌سازی توسعه فیزیکی شهر ایلخچی. *فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای انسانی*، ۵۰ (۱)، ۵۳-۳۵.

مولایی، محمد؛ مشکینی، ابوالفضل؛ خاوریان، امیررضا. (۱۳۹۵). روندهای پراکنده‌رویی شهری و برنامه‌ریزی توسعهٔ فضایی پایدار (موردمطالعه: منطقهٔ ۲ تهران). دو *فصلنامه معماری و شهرسازی پایدار*، ۴ (۲)، ۵۴-۴۳.

مهندسین مشاور نقش‌جهان پارس. (۱۳۹۳). *طرح بازنگری طرح تفصیلی شهر اصفهان، گزارش مطالعات و طرح*. معاونت شهرسازی و معماری شهرداری اصفهان.

مهندسین مشاور نقش‌جهان پارس. (۱۳۹۷). *سند پهنه‌بندی حریم شهر اصفهان*. معاونت شهرسازی و معماری شهرداری اصفهان.

References

Aburas, M. M., Ho, Y. M., Ramli, M. F., Ash'aari, Z. H. (2016). The simulation and prediction of spatio-temporal urban growth trends using cellular automata models. *journal of International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 380-389.

Ahmadi, A. (2019). *The effect of urban development on water quality in Gharehsoo area using LTM model*. Master's thesis of natural resources-environment. Baharan higher education institute of Gorgan. [In Persian].

Azadkhani, P., & Omidi, M. (2018). Investigating the physical-spatial development pattern of Ilam city with Shannon and Heldren's entropy model. *Journal of Urban civil studies*, 2 (4), 4-25. [In Persian].

Bamshad, Sh., Hosseini, M., Orak, N. (2016). Assessing land capability for urban landuse by the Weighted Liner Composition (WLC) in GIS (Case Study: Zardrud watersheds of Khouzestan province). *journal of Env. Sci. Tech*, 18 (3), 99-116. [In Persian].

Chen, J.P., Gong, C., Torrens, P. M., & Osullivan, D. (2002). Cellular automata and urban simulation: where do we geoform here?. *journal of Environment and Panning & Design*, 28, 163-168.

Dadashpoor, H., & Salarian, F. (2015). Analysis of the impacts of urban sprawl on land use changes in Sari city. *Journal of Geographical urban planning research*, 3 (2), 145-163. [In Persian].

Emami, E. (2017). *Spatio-temporal modeling of urban development Using satellite image processing and smart algorithms (case study: Kermanshah city).* Master's thesis of urbanism. university of Urmia. [In Persian].

Falahatkar, S. (2008). *Land Cover Change Detection of Isfahan Using Remote Sensing and GIS.* Master's thesis of environment. Isfahan university of technology. [In Persian].

Ghrakhlou, M., & Zanganehe, S. (2009). The identifying spatial growth pattern of cities with Regard to quantities models: Tehran. *Journal of Geography and environmental planning*, year 20, 34 (2), 19-40. [In Persian].

Gomez, M., Hortas, M., & Li, L. (2014). The causes of urban sprawl in spanish urban areas: A spatial approach. *Journal of Spatial economic analysis*, 11 (2), 219-247.

He, Q., Yan, M., Zheng, L., & Wang, B. (2023). Spatial stratified heterogeneity and driving mechanism of urban development level in China under different urban growth patterns with optimal parameter-based geographic detector model mining. *Journal of Computers, Environment and Urban Systems*, 105.

Jahaniyan, A. (2019). *Extracting the regulations of cellular automata transmission by collective intelligence algorithms for modelling urban expansion (area of study: Isfahan).* Master's thesis of Civil Engineering – Remote Sensing. university of Isfahan. [In Persian].

Karimi, S., & Balist, J. (2018). Urban development locating with fuzzy logic, weighted linear combination and FANP decision-making technique(case study: Kashan). *Journal of geographical information (Sepehr)*, 27 (105), 219-232. [In Persian].

Kim, Y. J. (2019). *Advancing scenario planning to prepare for uncertain climate change: future urban growth prediction and flood vulnerability (case study: Tampa city, United States of America)*. PhD thesis of urban and regional sciences. Texas A&M university.

Kooshki, P. (2016). *Ecological capacity modeling of agricultural and urban land uses with multi-criteria decision making models (case Study: Geleroud watershed of Boroujerd).* Master's thesis of evaluation and spatial planning. Khatam Alanbia university of technology, Behbahan. [In Persian].

Kooshki, P., & Pourkhabbaz, H. (2020). Ecological capacity modeling of urban development (case Study: Boroujerd city margin). *Journal of Spatial planning*, 24 (2), 111-140. [In Persian].

Mahmoudzadeh, H. (2014). *The ecological assessment and analysis of spatial development of Tabriz metropolitan*. PhD thesis of geography and urban planning. University of Tabriz. [In Persian].

Li, X., & Gong, P. (2016). Urban growth models: progress and perspective. *Journal of Sci. Bull*, 61 (21), 1637–1650.

Liu, J., Xu, Q., & Huang, X. (2022). Analysis of the heterogeneity of urban expansion landscape patterns and driving factors based on a combined Multi-Order Adjacency Index and Geodetector model. *Journal of Ecological Indicators*, 136.

Lotfian, R. (2015). *Change detection and predication of urban development in Kashan region using CA-Markov and GEOMOD method.* Master's thesis of environmental. Isfahan university of technology. [In Persian].

Mahmoudzadeh, H., Abedini, A., & Aram, F. (2022). Urban growth modeling and landuse /land-cover change analysis in a metropolitan area (case study:Tabriz). *Journal of land*, 11(2162), 1-17.

Mahmoudzadeh, H., & Ranjbar, A. M. (2018). Application of LTM for modeling of physical development of the Ilkhichi city. *Journal of Human geography research*, 50 (1), 35-53. [In Persian].

Matthews, R. B., Gilbert, N. G.;, Roach, A., Polhill, J. G., & Gotts, N. M. (2007). Agent-based land-use models: a review of applications. *Journal of Landscape ecol*, 22 (10), 1447-1459.

McDonald, R. I., & Urban, D. L. (2011). Spatially varying rules of landscape change: Lessons from a case study. *Journal of Landscape and urban planning*, 46 (1), 4–31.

Molaei, M., & Meshkini, A., & Khavarian, A. (2016). Trends of urban sprawl and sustainable spatial development planning (case study: Region 2 in Tehran city). *Journal of Sustainable architecture and urbanism*, 4 (2), 43-54. [In Persian].

Naqsh Jahan Pars Consulting Engineers. (2014). *Revision plan of the detailed plan of Isfahan city, study report and plan*. Urbanism and architecture deputy of Isfahan municipality. [In Persian].

Naqsh Jahan Pars Consulting Engineers. (2018). *The zoning document of the Isfahan city boundary*. Urbanism and architecture deputy of Isfahan municipality. [In Persian].

Omrani, H., Helbich, M., & Pijanowski, B. (2019). The land transformation model-cluster framework. *Journal of Environmental modelling & software*, 111. 182-191.

Pijanowski, B., & Brown, D.G., Shellito, B.A., & Manik, G.A. (2002). Using neural networks and GIS to forecast land use changes: a land transformation model. *Journal of Computers, Environment and Urban Systems*, 26 (6), 553-575.

Rahimi, A. (2013). *Evaluation and modeling urban physical and spatial structure with special reference to in-fill development case study: Tabriz metropolitan.* PhD thesis of geography and urban planning. University of Tabriz. [In Persian].

Rahimi, A. (2014). Modeling of Tabriz expansion in 2031 using LTM. *Journal of Urban ecology researches*, 5 (2), 99-110. [In Persian].

Rahimi, A., Sadrmosavi, M., & Pourmohamadi, M. (2015). An analysis of urban landuse changes in Tabriz using LTM. *journal of geography and planning, 19(54),189-209.* [In Persian].

Rahimi, K. (2017*). Simulation and evaluation of city expansion using artificial neural network (case Study: Tehran)*. Master's thesis of remote sensing and geographical information system. kharazmi university of Tehran. [In Persian].

Statistics of Isfahan city. (2017). Isfahan municipality. [In Persian].

Tayyebi, A., & Pijanowski, B. (2014). Modeling multiple land use changes using ANN, CART and MARS. *International Journal of Applied earth observation and geoinformation*, 28, 102-116.

Theobald, D.M., & Hobbs, N.T. (1998). Forecasting rural land-use change: A comparison of regression and spatial transition-based models. *Journal of geographical and environmental modeling*, 2(1), 65–82.

Wang, J., Bretz, M., Dewan, A. A., & Aghajani, M. (2022). Machine learning in modelling land-use and land cover-change (LULCC): Current status, challenges and prospects. *Journal of Science of The Total Environment*, 822.

Zanganeh, S., & Omidipour, M. (2018). Urban expansion and physical development simulation using fuzzy cellular automata (case Study: Ahwaz). *Journal of Geography and environmental studies*, 7(27), 77-92. [In Persian].

Zhang, Y., & Kwan, M-P., & Yang, J. (2023), A user-friendly assessment of six commonly used urban growth models. *Journal of Computers, Environment and Urban Systems*, 104.

Zivkovic, Z., Mihajlovic, I., & Nikolic, D. (2009). Artificial neural network method applied on the nonlinear multivariate problems. *Serbian journal of Management*, 4 (2), 143-155.