Open Access

Urban Urban Ecology Researches

Vol. 17(3), (Series 44): 127-144

Doi: 10.30473/grup.2026.73988.2910

E-ISSN: 2538-3949 P-ISSN: 2538-3930

ORIGINAL ARTICLE

Forecasting the Growth of Ilam City Using Satellite Images and the CA-MARKOV Model

Saleh Arekhi

Associate Professor, Geography Group, Golestan University, Golestan, Iran.

*Correspondence
Saleh Arekhi
E-mail: arekhi1348@yahoo.com

Receive Date: 06/March/2025
Revise Date: 17/July/2025
Accept Date: 07/Sep/2026

How to cite
Arekhi, S. (2026). Forecasting the Growth of Ilam City Using Satellite Images and the CA-MARKOV Model. *Urban Ecology Researche*, 17(3), 127-144.

EXTENDED A B S T R A C T

Introduction
This research addresses the critical issue of rapid urban expansion and its impact on the environmental sustainability of Ilam, Iran. As urban populations increase due to demographic shifts and physical development, the pressure on surrounding natural landscapes becomes immense. The study focuses on the transformation of land use classes—specifically residential/built-up areas, agriculture, forests, barren lands, and gardens—from 1976 (1355 SH) to 2021 (1400 SH). The central problem is that unplanned horizontal growth leads to the degradation of biodiversity, loss of agricultural productivity, and increased environmental costs, such as higher surface temperatures and ecological imbalance. The primary objective of this study is to analyze historical land-use changes and utilize spatial forecasting models to predict future urban footprints, thereby providing a scientific basis for sustainable urban planning and land-use management.

Mothodology
The study employs a multi-temporal remote sensing approach combined with advanced spatial modeling. Four Landsat satellite images (MSS, TM, ETM+, and OLI) covering the period from 1355 to 1400 SH were used. The methodology involved several key stages:
- **Image Processing:** Geometric and radiometric corrections were applied to ensure consistency across the time series, using ground control points and dark-object subtraction.
- **Classification:** A supervised classification using the Maximum-Likelihood method was performed via ENVI and ArcGIS software. Training samples were selected based on field knowledge and Google Earth imagery to ensure high accuracy.
- **Accuracy Assessment:** The classification reliability was verified using the Kappa coefficient and overall accuracy metrics, which showed high performance across all years.
- **Predictive Modeling:** To simulate future scenarios, the research integrated **Markov Chain** models with **Cellular Automata (CA)**. The Markov model was used to calculate the probability and magnitude of land-use transitions, while the CA component handled the spatial allocation of these changes based on neighborhood rules and suitability filters. This hybrid **CA-Markov** approach allowed for the simulation of land-use maps for the years 1410

Findings
The results indicate a profound shift in the landscape of Ilam over the past four decades. Historical analysis reveals that residential/built-up land increased by approximately 1,905.73 hectares, largely at the expense of forest cover, which declined by 2,066.16 hectares, and barren lands, which decreased by 1,110.78 hectares. While agricultural land saw an increase of 1,403.46 hectares, the overall trend highlights a significant conversion of natural ecosystems into anthropogenic

landscapes.

The CA-Markov simulation for the future periods (1410 and 1420) confirms that these trends are set to persist. The model predicts that the proportion of residential land will rise from 35.11% in 1400 to 41.34% in 1410, reaching 42.00% by 1420. Concurrently, forest cover is projected to undergo a severe decline, dropping from 16.13% in 1400 to roughly 12.32% by 1420. The discussion of these findings suggests that the current trajectory of Ilam's urban growth is highly extractive, treating forests and barren lands as primary sources for urban expansion. This spatial pattern indicates a lack of containment in urban boundaries, suggesting that without intervention, the city will continue to sprawl into ecologically sensitive zones, potentially leading to permanent loss of regional biodiversity and ecosystem services.

Discussion and Conclusion

This study concludes that the historical growth pattern of Ilam City is unsustainable under current management paradigms. The CA-Markov model effectively demonstrates that continued horizontal expansion will lead to the critical depletion of forest and agricultural resources. To mitigate these impacts, the research offers several strategic recommendations:

- Urban Intensification: Planners should prioritize vertical growth and densification within existing urban limits to reduce the footprint of sprawl.
- Regulatory Oversight: Strict enforcement of urban growth boundaries and the limitation of construction permits in high-sensitivity ecological zones (especially forests) are essential.
- Strategic Land-Use Policy: Development projects should be directed toward barren or less ecologically valuable lands to protect the city's natural buffers.
- Integrated Planning: Future urban governance must integrate spatial forecasting models into the decision-making process to balance economic development with environmental sustainability and climate resilience.

K E Y W O R D S

Satellite Images, Land Use Change, Forecasting Urban Growth, CA-Markov, Ilam City

Copyright © 2026, by the author(s). Published by Payame Noor University, Tehran, Iran.
This is an open access article under the CC BY 4.0 license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

فصلنامه علمی

پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری

سال ۱۷، شماره ۳، پیاپی ۴۴، فصل پاییز (۱۴۴-۱۲۷)

Doi: 10.30473/grup.2026.73988.2910

E-ISSN: 2538-3949 P-ISSN: 2538-3930

«مقاله پژوهشی»

پیش‌بینی رشد شهر ایلام با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل CA-MARKOV

صالح ارخی

دانشیار، گروه جغرافیا، دانشگاه گلستان، گلستان، ایران.

***نویسنده مسئول:** صالح ارخی

رایانامه: arekhi1348@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱ ۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶

تاریخ پذیرش: ۴۰۵/۰۶/۱۶

استناد به این مقاله:

ارخی، صالح (۱۴۰۵). پیش‌بینی رشد شهر ایلام با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل CA-MARKOV. *پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری*، ۱۷(۳)، ۱۴۴-۱۲۷.

چکیده

امروزه گسترش فیزیکی روزافزون و بدون برنامه‌ریزی شهرها، باعث کاهش کیفیت زندگی جوامع شهری و غیرشهری شده است. با توجه به اینکه شهر ایلام نیز مانند سایر شهرها در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت مواجه بوده، تغییر و تحولات قابل توجهی را در کاربری اراضی شهری این شهر شاهد هستیم. در این تحقیق با استفاده از تصاویر چندزمانه لندست مربوط به سال‌های ۱۳۵۵، ۱۳۶۷، ۱۳۸۰ و ۱۴۰۰ و با استفاده از تکنیک پردازش تصاویر ماهواره‌ای به بررسی تغییرات کاربری اراضی در مقطع زمانی ۱۳۵۵ تا ۱۴۰۰ و مقایسه بعد از طبقه‌بندی و با تأکید بر پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و بالاخص گسترش فضایی شهر ایلام در سال‌های ۱۴۱۰ و ۱۴۲۰ با استفاده از مدل سلول خودکار- مارکوف پرداخته شده است. بر اساس نتایج این تحقیق، تغییرات کاربری‌ها و سطح کاربری‌های منطقه محاسبه و مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج طی مقطع زمانی ۱۳۵۵ تا ۱۴۰۰، افزایش ۱۹۰۵/۷۳ هکتاری اراضی مسکونی و تخریب ۲۰۶۶/۱۶ هکتاری کاربری جنگل را نشان می‌دهد. در ضمن، نتایج به‌دست آمده بر اساس پیش بینی، بیانگر رشد ۶/۹ درصدی کاربری اراضی مسکونی از سال ۱۴۰۰ تا ۱۴۲۰ می‌باشد. براین اساس، کاربری‌های مناطق مسکونی با روند افزایشی بالا که متناسب با روند افزایش جمعیت بوده است، در منطقه پیش‌بینی شده است و از طرفی کاربری کشاورزی با روند افزایشی ناچیز و سه کلاس جنگل، اراضی بایر و باغ به ترتیب با روند کاهشی محاسبه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی

تصاویر ماهواره‌ای، تغییرات کاربری، پیش‌بینی رشد شهری، سلول خودکار- مارکوف، شهر ایلام.

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. © ۱۴۰۵ ناشر این مقاله، دانشگاه پیام نور است.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده 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

جمعیت جهان در گذر زمان همواره به شکل فزاینده‌ای در حال افزایش است و به تازگی نیز از مرز هشت میلیارد نفر عبور کرد است (Aslam et al., 2022). گزارش‌ها حاکی از آن است که این روند در ادامه نیز سیر صعودی خود را حفظ خواهد کرد؛ به‌طوری‌که پیش‌بینی می‌شود، جمعیت جهان در سال ۲۰۳۰ به ۸/۵ میلیارد نفر، در سال ۲۰۵۰ به ۹/۷ میلیارد نفر و در سال ۲۱۰۰ به ۱۰/۴ میلیارد نفر برسد (صندوق جمعیت سازمان ملل متحد[1]، ۲۰۲۲). روند اقتصادی شهرها و بهبود کیفیت زندگی بشر سبب شده است که سهم عمده‌ای از جمعیت جهان در شهرها سکنی گزینند (Gupta and Bharat, 2022). در حال حاضر، ۵۵ درصد جمعیت جهان در شهرها زندگی می‌کنند و پیش‌بینی می‌شود که همسو با افزایش جمعیت جهان، این رقم نیز افزایش یابد و در سال ۲۰۵۰ به ۷۰ درصد برسد (صندوق جمعیت سازمان ملل متحد، ۲۰۲۲). افزایش روزافزون جمعیت شهرنشین و به دنبال آن رشد شهرها، منجر به پیشرفت جوامع بشری و تقویت اقتصاد ملی کشورها خواهد شد (Musavengane et al., 2020). اما توسعه فضایی شهر می‌تواند پیامدهای بی‌شماری از جمله افزایش دمای سطح زمین (LST[2]) (Gupta et al., 2023). تخریب و از دست دادن تنوع زیستی (McDonald et al., 2020)، تراکم جمعیت و حاشیه‌نشینی، و تغییرات در کاربری/پوشش اراضی (LULC[3]) را به همرا آورد (Guan et al., 2022) .

سکونتگاه‌های جوامع انسانی به تدریج تکامل یافته و از ساختار ابتدایی و ساده روستایی به ساختار پیچیده شهرهای امروزی تغییر نموده‌اند (Qian et al., 2022; Bhat et al., 2017). به موازات افزایش روزافزون جمعیت شهرنشین، میزان ساخت‌وساز در فضای شهر توسعه یافته است. توسعه ساخت‌و ساز در فضای افقی و بدون توجه به محدودیت‌های موجود از جمله کمبود عرضه زمین منجر به بروز مشکلات محیطی، اقتصادی و حقوقی برای شهروندان شده است. از این‌رو مدیریت توسعه ساخت‌وساز شهری امری الزم، ضروری و اجتناب‌ناپذیر می‌نماید (Hegazy & Kaloop, 2015; Matovnikov & Matovnikova, 2016).

در سرتاسر جهان، پوشش‌های طبیعی زمین تحت تأثیر رشد شهری قرار گرفته‌اند. رشد جمعیت منجر به توسعه سریع شهرها می‌شود و این رشد و گسترش سبب تغییر کاربری و پوشش زمین در بسیاری از شهرها می‌گردد. یکی از موضوع‌های حیاتی قرن ۲۱ دربارهٔ پایداری شهر، چگونگی رشد و توسعهٔ شهر در فضا است (Anderson,1996). از عوامل مهم برای برنامه‌ریزی و مدیریت شهری به‌خصوص در راستای دستیابی به توسعه پایدار در نواحی شهری و استفاده بهینه از سرزمین، در دسترس بودن اطلاعات صحیح و به‌هنگام از وضعیت کاربری و پوشش اراضی مناطق شهری است. شهرها همواره تحت تأثیر نیروها و عوامل گوناگونی شکل گرفته و گسترش می‌یابند، در نتیجه شناخت و مکان‌یابی اراضی مناسب برای توسعهٔ کالبدی شهرها بسیار ضروری است. تحلیل تناسب زمین برای گسترش شهرها فرآیندی است که به ارزیابی‌های دقیقی نیاز دارد. رشد شهری یک فرایند پیچیده است که شامل جنبه‌های مکانی، زمانی، اقتصادی، اجتماعی و فیزیکی است (Han et al., 2009). بر این اساس، یافتن الگویی مناسب در جهت رشد و توسعه کالبدی شهر اهمیت ویژه‌ای یافته است و باید در برنامه‌ریزی‌ها مورد توجه قرار گیرد. روش‌های متنوعی برای مدل‌سازی تغییرات پوشش و کاربری اراضی وجود دارد که می‌توان به مدل‌های مارکوف، سلول خودکار مارکوف، ژئومود، مدل‌های آماری و ... اشاره کرد. با مدل‌سازی سیستم پیچیده شهری، الگوهای فضایی و روندهای رشد شهری را می‌توان شبیه‌سازی و پیش‌بینی کرد و درک بهتری از سیستم شهر به‌عنوان یک کل به‌دست آورد (رضازاده و همکاران، ۱۳۸۸). از این‌رو از مدل‌های فضایی که ابزارهایی مفید برای درک فرایند توسعه شهری و ابزاری کمکی برای سیاست-گذاری، مدیریت و برنامه‌ریزی شهری و فراهم‌کننده اطلاعات برای ارزیابی تأثیرات شهری بر محیط زیست هستند، می‌توان برای مدل‌سازی فرایند توسعه شهری استفاده نمود (He et al., 2008). مدل سلول‌های خودکار به دلیل داشتن ماهیت دینامیک و همچنین ویژگی‌های منحصر به فرد آن در مدل‌سازی عوارض طبیعی و فیزیکی سطح زمین، کاربرد وسیعی در پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و هم‌چنین توسعه اراضی شهری یافته است (علیمحمدی و همکاران، ۱۳۸۹).

شهر ایلام از جمله شهرهای میانی ایران در غرب کشور و مرکز سیاسی استان ایلام است. این شهر جدای از روند تاریخی آن، در اوایل جنگ تحمیلی مورد تهاجم قرار گرفت و به قسمت بزرگی از تأسیسات زیربنایی، آموزشی، فرهنگی، بهداشتی، کالبدی و امکانات ارتباطی آن آسیب جدی وارد شد. پس از جنگ، بافت کالبدی شهر، ساختارهای اقتصادی - اجتماعی و زیربنایی شهر مرمت شد و توسعهٔ کالبدی شهر نیز روند سریعی به خود گرفت. رشد طبیعی جمعیت، مهاجرت از روستاها و شهرهای کوچک به شهر ایلام، افزایش جمعیت و در

1. UFPA (United Nations Population Fund)
2. .Land Surface Temperature
3. Land Use Land Cover

کنار آن توسعهٔ سریع کالبدی، از وجوه بارز شهر در چند دههٔ گذشته و به ویژه بعد از پایان جنگ تحمیلی بوده است. با توجه به اهمیت رهیافت توسعهٔ پایدار در توسعهٔ شهری و رشد و تعادل اکولوژیک یک شهر، ضرورت دارد که برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی و شهری در چارچوب توان‌های اکولوژیک و شهری باشد. همچنین با در نظر گرفتن روند افزایش جمعیت شهر ایلام و در پی آن گسترش فیزیکی و ملحق شدن روستاهای پیرامونی به شهر، بررسی روند توسعهٔ فیزیکی و گسترش شهر و پیش‌بینی این روند در آینده، نه تنها به برنامه-ریزان و مدیران در رفع مشکلات موجود یاری می‌رساند، بلکه می‌تواند مسیری مشخص و روشن برای برنامه‌ریزی‌های آینده ارائه دهد. بنابراین هدف از این مطالعه، بررسی روند تغییرات کاربری اراضی در مقطع زمانی ۱۳۵۵ تا ۱۴۰۰ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، محاسبه میزان تغییرات کاربری‌ها به یکدیگر با تأکید بر اراضی مسکونی و پیش‌بینی تغییرات احتمالی کاربری اراضی در سال‌های ۱۴۱۰ و ۱۴۲۰ با استفاده از مدل سلول خودکار- مارکوف در شهر ایلام می‌باشد.

مبانی نظری

چارچوب نظری

مدل زنجیره مارکوف

مدل مارکوف، شامل زنجیره متوالی از متغیرهای تصادفی x_1 , x_2, x_3 و... می‌باشد، به‌عبارت دیگر اگر مجموعه‌ای از حالات را به‌صورت $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_r\}$ داشته باشیم، P_{ij}از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{ij}^{(n)} = \sum_{k=1}^{r} P_{ik} P_{kj} \qquad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه: P_{ij}احتمال رفتن از حالت i به حالت j را پس از n گام نشان می‌دهد.

در این مدل دو نقشه مربوط به دو دوره زمانی به‌صورت ماتریسی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. به‌طوری‌که براساس طبقه‌بندی بالاترین احتمال پیش‌بینی می‌شود که هر پیکسل در هر کلاس با چه احتمالی در همان کلاس مانده یا به کلاسی دیگر تبدیل می‌شود (Eastman, 2006). بنابراین در این طبقه‌بندی توزیع ارزش بازتابی در هر نمونه تعلیمی توسط یک تابع تراکم احتمال، که براساس تئوری احتمال بیس بنا شده، نشان داده خواهد شد. این طبقه‌بندی، احتمال اینکه هر سلول متعلق به یک کاربری باشد را بررسی نموده و سلول را به کاربری با بالاترین احتمال عضویت اختصاص می‌دهد. آنالیز مارکوف بر روی مطالعه انواع پوشش گیاهی و تغییر پوشش شهری و غیر شهری متمرکز شده است (خوش‌گفتار و همکاران، ۱۳۸۹). خروجی مارکوف شامل احتمالات تبدیل وضعیت، ماتریس مساحت‌های تبدیل شده هر کلاس و در نهایت تصاویر احتمالات شرطی برای تبدیل کاربری‌های مختلف است.

مدل سلول خودکار

سلول خودکار[1] یک سیستم دینامیک و گسسته در مکان و زمان می‌باشد که بر روی یک شبکه منظم از سلول‌ها عمل می کند. در این سیستم، مقدار یا حالت هر سلول در طول زمان در قالب تابعی از مقادیر سلول‌های همسایه و مقدار خود سلول تغییر می‌کند. چیزی که در این مدل حائز اهمیت است این است که این تغییرات در قاب زمان و مکان فقط به شکل محلی تغییر می‌کنند و فقط سلول‌های مجاور هستند که در این تغییرات دخیل می‌باشند. حالت هر سلول در زمان $t+1$ به‌وسیله حالت سلول‌های همسایگی در زمان t و مطابق قوانین تبدیل از پیش تعریف شده، تعیین می‌گردد. CA به‌عنوان روشی با دینامیک‌های زمانی – مکانی می‌تواند تغییرات را در فضای دو بعدی شبیه‌سازی کند. این روش به‌صورت گسترده در بسیاری از زمینه‌های جغرافیایی خصوصا جهت مدل‌سازی رشد شهری و تکامل کاربری زمین، بکار برده شده است (خوش‌گفتار و همکاران، ۱۳۸۹).

هر CA دارای ۵ المان اصلی و پایه می‌باشد که به شرح زیر می‌باشد:

۱. **شبکه منظم سلولی:** این فضا از سلول‌های مستقل تشکیل شده است. از نظر تئوریک این سلول‌ها می‌توانند اشکال هندسی متفاوتی داشته باشد ولی به‌طور معمول این فضا به‌صورت منظم از سلول‌های مربعی تشکیل شده است. دلیل انتخاب چنین ساختاری سادگی در همسایگی و عدم نیاز به الگوریتم‌های پیچیده می‌باشد.

۲. **مجموعه مقادیر ممکن برای هر سلول:** هر سلول می‌تواند مقداری را از بین مقادیر این مجموعه به خود بگیرد. این مقدار می‌تواند معرف نوع کاربری اراضی و پوشش زمین در محدوده آن سلول باشد.

۳. **همسایگی:** مجموعه سلول‌های مجاور هر سلول که در تغییر مقادیر سلول مرکزی موثر می‌باشند.

۴. **قوانین انتقال.** این قوانین قلب یک مدل CA محسوب می‌شوند که دینامیک پدیده مورد نظر را نمایش می

1 .Celllar Automata (CA)

دهد. این قوانین مقدار یا حالت هر سلول را بعد از یک مرحله زمانی و با توجه به مقادیر همسایه‌هایش قبل از انتقال، مشخص می‌سازد. در هر مدل CA هدف اصلی تعیین صحیح و مناسب قوانین انتقال می‌باشد و این قوانین هستند که کارایی مدل را تعیین می‌کنند.

۵. فضای زمانی: یک فضای گسسته در زمان که شامل مراحل زمانی است. در هر مرحله مقادیر سلول‌ها بر اساس قوانین انتقال تغییر می‌یابند.

مارکوف و CA هردو، مدل دینامیک گسسته در زمان و موقعیت هستند. مشکل ذاتی زنجیره مارکوف این است که هیچ درک جغرافیایی تولید نمی‌کند. احتمال تبدیل ممکن است روی هر گروه پایه، دارای صحت و دقت باشد، اما هیچ دانش و آگاهی از توزیع مکانی تصادفی درون هر گروه کاربری زمین وجود ندارد. یعنی هیچ مؤلفه مکانی در خروجی مدل‌سازی وجود ندارد. به همین خاطر CA را با زنجیره مارکوف تلفیق شده است (خوش‌گفتار و همکاران، ۱۳۸۹).

پیش‌بینی روند تغییرات کاربری اراضی با استفاده از ترکیب روش زنجیره‌های مارکوف و مدل اتوماسیون سلولی (سلول خودکار)

این روش براساس تلفیق مدل اتوماسیون سلولی ((CA و زنجیره‌های مارکوف و مکان‌یابی براساس تحلیل‌های چندمعیاره برای پیش‌بینی روند تغییرات کاربری و پوشش اراضی می‌پردازد. از مزایای این روش استفاده از روش مجاورت فضایی و به‌علاوه از دانش توزیع فضایی احتمالی به تحلیل زنجیره‌های مارکوف و در نهایت پیش‌بینی روند تغییرات کاربری اراضی می‌پردازد. در این پژوهش نیز برای انجام این روش با استفاده از نرم‌افزار Selva Idrisi نقشه کاربری اراضی برای سال‌های ۱۳۵۵ و ۱۳۸۰ و ۱۴۰۰ تهیه شده در مراحل قبل را ابتدا با استفاده از روش زنجیره‌های مارکوف پی بینی و سپس با مدل ترکیب و نقشه احتمالی تغییرات پهنه‌بندی برای سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۵۰ تهیه شده است.

پیشینه پژوهش

حجم زیاد و رو به افزایش پژوهش‌ها نشان می‌دهد که CA یک ابزار مناسب برای مدل‌سازی دینامیک مکانی می‌باشد (Batty et al., 1994) و به دلیل طبیعت مکانی‌اش، بسیار مورد توجه برنامه-ریزان شهری بوده و می‌باشد. رشد سریع تکنولوژی‌های سنجش از دور و سامانه‌های اطلاعات مکانی و همچنین پیشرفت در علم رایانه و کاربرد آن در برنامه‌ریزی شهری سبب به وجود آمدن روش‌های مدل‌سازی مکانی جدیدی چون سلول‌های خودکار (Clarke et al., 1997)، شبکه‌های عصبی هوشمند (Pijanowskia et al., 2002)، مدل‌های آماری (Cheng and Masser, 2003) و برخی دیگر شده است. در زمینه گسترش شهر و تأثیر آن در تغییرات کاربری اراضی منطقه، به منابع زیر می‌توان اشاره نمود:

جوادی در سال ۱۳۸۷ از تلفیق شبکه‌های عصبی و سلول خودکار- مارکوف جهت مدل‌سازی توسعه شهری اصفهان در محیط سلولی استفاده کرد. این مدل‌سازی با استفاده از ۳ پارامتر شبکه راه‌ها، شیب و تراکم همسایگی شهری صورت پذیرفته و در نهایت نتایج مدل‌سازی با استفاده از شاخص کاپا مورد ارزیابی قرار گرفت.

خوش‌گفتار و همکاران در سال ۱۳۸۹، به شبیه‌سازی رشد شهری تهران با استفاده از مدل CA-Markov در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۵ پرداختند و نتایج علاوه بر رشد ۳ درصدی مناطق شهری از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۵، حاکی از کارایی بالای مدل تلفیقی CA-Markov در پایش روند توسعه شهر در سال‌های گذشته و پیش‌بین رشد شهری برای سال‌های آتی براساس الگوی رشد سال‌های گذشته است.

احدنژاد و همکاران در سال ۱۳۹۰ به ارزیابی و پیش‌بینی تغییرات و پراکنش افقی شهر تبریز با استفاده از تصاویر چندزمانه و GIS در مقطع زمانی ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۹ پرداختند. براساس نتایج مطالعه آنها گسترش کالبدی- فضایی شهر تبریز در امتداد شرقی و غربی است.

میثاق و همکاران (۱۳۹۶)، با تلفیق تحلیل‌های تصمیم‌گیری چند معیار مبتنی بر GISبا میدل ترکیبی CA-Markov روند گسترش افقی کلان‌شهر تبریز را برای سال ۱۴۰۷ مدل‌سازی کردند. نتایج حاصل از مدل‌سازی آنها نشان دهنده رشد ۲۵ درصدی اراضی شهری این کلان‌شهر بود. همسو با این مطالعات، اکبری و همکاران (۱۳۹۸) نیز پژوهشی مشابه داشتند و توسعه فضایی شهر رشت را برای سال ۲۰۲۷ شبیه‌سازی کردند. نتایج حاصل از تحقیق آنها مؤید افزایش مضاعف وسعت اراضی شهری در این منطقه بود.

کیانی‌سلمی و همکاران (۱۳۹۷)، در مطالعه‌ای به ارزیابی پوشش اراضی شهرکرد و پیش‌بینی آینده آن با بهره‌گیری از داده-های دور سنجی و مدل CA-Markov پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که اراضی فضای سبز و نواحی شهری در طی دوره مورد مطالعه افزایش یافته و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۱۴۰۵ نواحی شهری ۱۰/۶ درصد افزایش یابد.

صالحی و همکاران (۱۳۹۸)، روند تغییرات کاربری اراضی را در حوضه آبریز صفارود رامسر با استفاده از مدل CA-Markov

کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که در فاصله زمانی ۲۰۱۴-۲۰۲۸ اراضی جنگلی و مراتع به ترتیب به میزان ۴/۹۲ و ۱/۷ درصد کاهش خواهند یافت. کاربری مسکونی ۸/۰۴ درصد افزایش و اراضی کشاورزی به مقدار ناچیزی تغییر خواهد داشت که بیانگر تغییرات کاربری به سمت اراضی مسکونی است.

رهنما (۱۴۰۲)، در مطالعه‌ای به شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی در پیراشهر زاهدان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که بیش‌ترین کاهش کاربری، در سال‌های ۲۰۰۰۰ تا ۲۰۱۰ در باغ‌ها و اراضی کشاورزی پیراشهر زاهدان و بیش‌ترین افزایش کاربری در محدوده ساخته شده و اراضی بایر اتفاق افتاده است و در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۱ کاربری‌های مرتع، ساخته شده و کشاورزی، افزایشی و اراضی بایر کاهشی بوده است. در این تحقیق سپس نسبت به پیش‌بینی برای سال ۲۰۴۰ اقدام شده است که بر اساس پیش‌بینی سال ۲۰۴۰ محدوده‌های ساخته شده حدود ۱۱/۷ درصد افزایش مساحت خواهند داشت.

جنرت و وو[1] در سال ۲۰۰۱ برای ارزیابی تغییرات بیابان‌ها در مرکز آریزونا به واسطه گسترش مناطق شهری، به آنالیز مکانی کاربری‌های اراضی تهیه شده، با استفاده از مدل مارکوف و اتوماسیون سلولی از سال ۱۹۱۲ تا ۱۹۹۵ پرداختند. نتایج مطالعه آنها گسترش مناطق شهری با نتایج افزایش جمعیت در این دوره مطابق بوده است.

ژا[2] و همکاران در سال ۲۰۰۳، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست TM اقدام به تهیه نقشه شهر نانژینگ در چین شرقی نمودند. در این مطالعه سعی شد تا شاخص جدیدی به نام NDBI برای جداسازی مناطق مسکونی معرفی شود.

پونیتس و مالانسون[3] در سال ۲۰۰۵ با استفاده از مدل CA-Markov و ارزیابی چند معیاره و به کار بردن داده‌های سه زمان مختلف که از نقشه‌های کاربری زمین موجود به‌دست آمده و به‌صورت رستری تبدیل شده‌اند، به پیش‌بینی تغییرات در ماساچوست مرکزی آمریکا پرداخته است (Ponitus and Malanson, 2005).

هنریکیوز[4] و همکارانش (۲۰۰۶)، با استفاده از مدل سلول خودکار- مارکوف در سه زمان متفاوت که از تصاویر فتوگرامتری هوایی استخراج گردید و به فرمت رستری تبدیل شده‌اند، رشد شهری را در شهرهای چیلان و لس‌آنجلس شبیه‌سازی کرده‌اند.

چانگ[5] (۲۰۰۶)، برای بررسی پوشش گیاهی کوه جیوجیو از داده‌های اسپات مربوطه به چهار دوره زمانی استفاده کردند. آنها نیز در انتها از آنالیز زنجیره مارکوف و Cellular automata برای پیش‌بینی تغییرات زمانی و مکانی پوشش گیاهی بهره گرفته‌اند و نتیجه گرفته شد که در مطالعه انجام شده مدل CA-Markov برای شبیه‌سازی روند تغییرات پوشش گیاهی مناسب‌تر از سایر روش‌های موجود است.

دیپ[6] و همکاران (۲۰۱۴)، به مدل‌سازی رشد شهری با استفاده از زنجیره مارکوف پرداختند. نتایج به وضوح نشان می‌دهد که تغییرات عمده بین دوره‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۹ در کالس‌های نواحی ساخته شده (حدود ۲۷٪) و سپس کشاورزی (۱۷/۷٪) و زمین‌های فرعی (۱۰/۲٪) رخ داده است. در این مطالعه ضریب کاپا مدل مارکوف ۹۱٪ محاسبه شد که نشان‌دهنده اعتبار مدل برای پیش‌بینی‌های آینده است.

صدیقی و همکاران (۲۰۱۷)، به دینامیک رشد شهری CA-Markov با استفاده از مدل‌های CA-Markov و رگرسیون لجستیک پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که یکپارچگی سنجش ازدور GIS و مدل‌های رشد، اطلاعات مهمی را در رابطه با فرآیند توسعه شهری برای برنامه‌ریزان شهرها فراهم می‌کند.

ابوراس[7] و همکاران (۲۰۱۷)، به بررسی توانایی مدل CA-Markov برای شبیه‌سازی روند رشد فضایی موقت شهری با استفاده از یک فرایند سلسله مراتبی تحلیلی پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که رشد شهر سربان در کشور نیجریه در آینده افزایش خواهد یافت. بر اساس مدل مارکف پیش‌بینی می‌شود که مساحت شهر سربان در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۳۰ به ترتیب حدود ۲۴۲/۱ و ۲۷۸/۱ کیلومترمربع افزایش یابد.

پژوهش کیسامبا و لی[8] (۲۰۲۳)، در شهر دودما[9] در کشور تانزانیا از جمله مطالعات اخیر در زمینه مدل‌سازی توسعه فضایی شهرها به حساب می‌آید که با روش CA-Markov انجام شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی تغییرات LULC این شهر برای سال ۲۰۳۰ نشان می‌دهد که مساحت اراضی شهری در این منطقه به میزان ۳۹/۹۶ درصد افزایش خواهد یافت. همسو با این مطالعات، شفیع‌زادمقدم و هلبیچ[10] (۲۰۱۳)، رهنما (۲۰۲۱) ، بقا[11] و همکاران (۲۰۲۱) و طارق[12] و همکاران (۲۰۲۲)، نیز در پژوهش-

1. Jenerette and Wu
2. Zha
3. Ponitus and Malanson
4. Henriquez
5. Chang
6. Deep
7. Aburas
8. Kisamba & Li
9. Dodoma
10. Shafizadeh Moghadam & Helbich
11. Baqa
12. Tariq

های خود، به کمک مدل CA-Markov به ترتیب به مدل‌سازی توسعه فضایی شهرهای بمبئی، کراچی و پیشاور پرداختند. مدل‌سازی‌های حاصل از این مطالعات همگی از گسترش دو چندان اراضی شهری خبر می‌دهند.

روش انجام پژوهش

داده‌های مورداستفاده

تصاویر استفاده شده در این تحقیق، تصاویرMSS1355 ، TM1367، ETM^{+}1380 و OLI1400 از ماهواره لندست می‌باشند و از نرم‌افزارهای ENVI5، Idrisi Selva وArcGIS10.3 برای پردازش داده‌ها، مدل‌سازی، شبیه‌سازی و خروجی گرفتن و از روش حداکثر احتمال[1] برای طبقه‌بندی کاربری‌ها و از مدل سلول خودکار–مارکوف برای محاسبه تغییرات، پیش‌بینی و شبیه‌سازی تغییرات در سال‌های ۱۴۱۰ و ۱۴۲۰ استفاده شده است.

برای پایش الگوهای مکانی رشد کاربری اراضی، مدل شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی در مراحل زیر به کار گرفته شد:

- محاسبه تغییرات کاربری‌ها، با استفاده از آنالیز زنجیره مارکوف در سال‌های مورد بررسی و
- محاسبه و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل سلول خودکار–مارکوف در ماتریس تبدیل ۱۳۵۵– ۱۴۰۰.

تصحیح هندسی

در این مطالعه، به منظور تصحیح هندسی، از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ تهیه شده از سازمان جغرافیایی ارتش استفاده گردید. در این مرحله اقدام به اعمال تصحیحات هندسی بر روی تصاویر شد و تصویر سنجنده OLI سال ۱۴۰۰ با استفاده از روش تصویر– وکتور، زمین مرجع شد. برای این کار از ۴۷ نقطه کنترل زمینی با پراکنش مناسب و در تقاطع جاده‌ها، آبراهه‌ها و ... استفاده گردید تا مدل ریاضی که برای پیدا کردن ضرایب مجهول در معادله مورد استفاده قرار می‌گیرد، خطای کم‌تری داشته باشد. برای تبدیل مختصات تصویر تصحیح شده به تصویر تصحیح نشده، از تابع درجه اول استفاده گردید و برای نمونه‌گیری مجدد ارزش پیکسل‌های تصویر تصحیح نشده از روش نزدیکترین همسایه استفاده و در نهایت تصویر سنجنده OLI با خطای RMS معادل ۰/۳۷ زمین مرجع گردید. در ضمن، تصحیح هندسی تصویر MSS سال ۱۳۵۵، TM سال ۱۳۶۷ و +ETM سال ۱۳۸۰ به روش تصویر به تصویر انجام گردید. بدین منظور تصویر ۱۴۰۰ بعد از تصحیح هندسی به‌عنوان مبناء در نظر گرفته شد. ابتدا نقاط کنترل انتخاب شدند، سپس نقاطی که دارای خطای زیادی بودند از جدول مربوطه حذف شدند و در نهایت با حذف ۷، ۹ و ۸ نقطه کنترل زمینی، تصویر MSS با ۳۸، تصویر TM با ۲۴ و تصویر + ETM با ۴۰ نقطه کنترل با خطای معادل ۰/۳۲، ۰/۲۹ و ۰/۳۸ تصحیح شد. به منظور تعیین تغییرات علاوه بر هم مختصات بودن تصاویر، باید ابعاد پیکسل‌های آنها نیز یکسان که در این تحقیق اندازه همه پیکسل‌ها ۲۸/۵ متر است.

تصحیح رادیومتریک

در ضمن، تصحیح رادیومتریک زمانی انجام می‌گیرد که از تصاویر چند زمانه یعنی تصاویری که مربوط به فصل‌ها یا سال‌های مختلف و یا سنجنده‌های مختلف هستند، استفاده شود. دو نوع تصحیح رادیومتریک وجود دارد، تصحیح رادیومتریک مطلق و تصحیح رادیومتریک نسبی. روش تصحیح رادیومتریک مطلق نیازمند ورود داده‌های مربوط به خصوصیات اتمسفریک و کالیبراسیون سنجنده است. انجام این تصحیح در اغلب موارد و به خصوص برای داده‌های قدیمی کار بسیار سختی است (Du et al., 2002). در مقابل تصحیحات رادیومتریک نسبی با هدف کاهش متغیرهای اتمسفریک و غیره منتظره در میان تصاویر چندزمانه صورت می‌گیرد. یکی از روش‌های تصحیح رادیومتریک نسبی، کاهش تیرگی پدیده[2] است. در حالت ایده‌آل پدیده‌های تیره رنگ دارای تابش صفر در همه طول موج‌ها هستند. در این روش فرض می‌شود که در هر باند از تصویر می‌توان پیکسل‌هایی یافت که مقادیر آنها صفر یا نزدیک به یک می‌باشد (مثل آب). به این ترتیب اثر اتمسفری تابش انحرافی به‌صورت یک مقدار ثابت به پیکسل‌ها در هر باند اضافه می‌گردد. به همین دلیل جهت حذف خطای رادیومتریک بایستی ارزش پیکسل‌های هر باند از حداقل DN مربوط به هر باند کم شود. کاهش تیرگی پدیده یک روش ساده است که به‌طور گسترده در بسیاری از موارد به کار گرفته می‌شود (Chavez and Mackinnon, 1994). در این مطالعه از این روش جهت تصحیح رادیومتریک تمام تصاویر ذکر شده در بالا استفاده شده است.

انتخاب نمونه‌های تعلیمی

انتخاب نمونه‌های تعلیمی مورد نیاز برای طبقه‌بندی کلاس‌های مختلف در منطقه با شناخت از منطقه و با استفاده از اطلاعات جنبی و استفاده از تصویر رنگی مرکب ۴،۳،۲ (RGB) صورت

1. Maximum Likelihood

2. Dark Object Subtraction

گرفت. انتخاب این تصویر رنگی مرکب صرفاً جهت شناسایی کلاس‌های مورد نظر و انتخاب بهترین نمونه‌های تعلیمی بوده است. انتخاب نمونه‌های تعلیمی یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تعیین کننده درجه تعمیم قواعد طبقه‌بندی به نمونه‌های نامشخص می‌باشد. برای این منظور در منطقه مورد مطالعه به فراخور سهم هر طبقه تعداد مناسبی نمونه تعلیمی به‌طور تصادفی با استفاده از بررسی‌های میدانی، تصاویر گوگل ارث (Google Earth) و تصاویر رنگی مرکب انتخاب گردیدند (۱٫۳٪ و ۱٫۱٪ ۱/۴٪ و ۰٫۹۷٪ سطح منطقه برای سه دوره تصویر مورد مطالعه برای سال های ۱۳۵۵ ،۱۳۶۷، ۱۳۸۰و ۱۴۰۰). پس از آنکه نمونه‌های تعلیمی برای پوشش‌های مختلف انتخاب شدند، جهت ارزیابی و اصلاح نمونه‌ها، نشانه‌های طیفی هر یک از کلاس‌های فوق در باندهای اصلی و پردازش شده استخراج شد و نمودار توزیع ارزش طیفی نمونه‌های تعلیمی در تمامی باندهای طیفی بررسی شد.

برای بررسی تشابه آنها و میزان تفکیک‌پذیری و تباین کلاس‌ها، از روش ارزیابی کمی تفکیک‌پذیری استفاده و تفکیک-پذیری آنها با استفاده از شاخص واگرایی تبدیل شده بررسی شد. با هدف انتخاب بهترین مجموعه باندهای که تفکیک‌پذیری طبقات برای طبقه‌بندی در آنها بهتر صورت پذیرد از مشخصه‌های آماری نمونه‌های تعلیمی استفاده گردید که مبتنی بر واگرایی بین نشانه-های طیفی مربوط به طبقات بر پایه محاسبه میانگین و ماتریس واریانس– کوواریانس طبقات در نمونه‌های تعلیمی انتخابی می-باشند. پس از انتخاب بهترین ترکیب‌ها باندی عملیات طبقه‌بندی با استفاده از روش حداکثر احتمال صورت گرفت. به منظور حذف پیکسل‌های منفرد و پراکنده در سطح تصویر طبقه‌بندی شده و همچنین بدست آوردن تصویر مطلوب و با وضوح بیش‌تر، از فیلتر پایین‌گذر نما در اندازه ۳×۳ پیکسل استفاده شد.

تهیه نقشه واقعیت زمینی

در این تحقیق برای تعیین صحت نقشه‌های حاصل از طبقه‌بندی داده‌های ماهواره‌ای، با استفاده از روش نمونه‌برداری تصادفی استفاده و بر روی نقشه منطقه پیاده شد و با در نظر گرفتن موقعیت مکانی محل قطعات نمونه در روی زمین، نوع پوشش سطح زمین تعیین شد. در روی زمین موقعیت نمونه‌ها با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) با دقت بالا پیاده و نوع پوشش زمینی در محل نمونه‌ها مشخص گردید. با توجه به اطلاعات به‌دست آمده از عملیات صحرایی و با بهره‌گیری از قابلیت سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی نقشه واقعیت زمینی با پنج کلاس تهیه گردید. به دلیل ساختار رستری تصاویر ماهواره‌ای و نیز با توجه به اینکه این نقشه مبناء در ارزیابی دقت طبقه‌بندی تصاویر مورد استفاده قرار می‌گیرد، ساختار نقشه واقعیت زمینی از حالت برداری به رستری تبدیل شد. در مجموع ۱۳۶،۱۴۰، ۱۸۹ و ۱۶۶ نقطه به ترتیب از سال‌های ۱۳۵۵، ۱۳۶۷، ۱۳۸۰ و ۱۴۰۰ از منطقه مورد مطالعه برداشت و از آنها یک نقشه با ساختار رستری تهیه شد. در نهایت نقشه‌های حاصل از طبقه‌بندی با نقشه های واقعیت زمینی مقایسه گردیده است. شکل ۱، مراحل مفهومی تحقیق را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. مراحل کلی تحقیق

ارزیابی دقت نقشه‌ها

به منظور ارزیابی دقت نقشه‌های تولید شده با توجه به آشنایی با منطقه مورد مطالعه و به کمک تفسیر چشمی تصویر رنگی کاذب (MSS321، $ETM^{+}432$، TM432 و OLI432) اقدام به جمع‌آوری نمونه‌های تعلیمی با استفاده از نقشه توپوگرافی منطقه (۱:۲۵۰۰۰۰ (متعلق به سال‌های ۱۳۵۵، ۱۳۶۷، ۱۳۸۰ و ۱۴۰۰ گردید و در نهایت با استفاده از روش پیشنهادی دلاییان و اسمیت (Dellepian & Smith, 1999) صحت نقشه‌های تولیدی ارزیابی گردید (رابطه ۲).

$$O.A = \frac{\sum_{i=1}^{c} E_{ii}}{N}$$ رابطه ۲

در این رابطه: O.A دقت کل،N تعداد کل پیکسل‌های معلوم، E_{ii} اعضا قطری ماتریس خطا و دقت کلای طبقه‌بندی است. همچنین ضریب کاپا از رابطه ۳ محاسبه گردید.

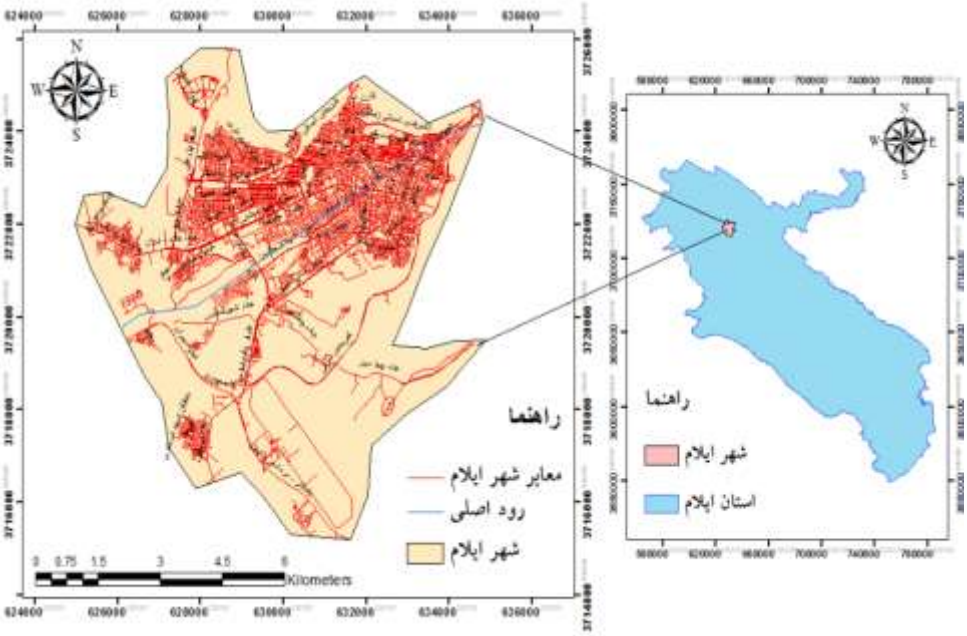
$$K = \frac{Po-Pc}{1-Pc} * 100$$ رابطه ۳

برای ارزیابی صحت پیش‌بینی مدل علاوه بر مقایسه بصری نقشه کاربری اراضی پیش‌بینی شده با نقشه کاربری اراضی پایان دوره، نقشه‌های کاربری اراضی تولید شده از کلاس بندی شده و پیش‌بینی شده از مدلها در سال‌های ۱۳۵۵، ۱۳۶۷، ۱۳۸۰ و ۱۴۰۰ مقایسه و صحت آن با استفاده از شاخص کاپا ارزیابی شد.

محدوده مورد مطالعه

شهر ایلام در مرکزیت استان ایلام در مختصات جغرافیایی ′۲۵ °۴۶ طول شرقی و ′۳۸ °۳۳ عرض شمالی واقع شده است. منطقه مورد مطالعه محدوده‌ای به وسعت ۶۱۹۳/۷۷ هکتار در استان ایلام و ارتفاع مرکز شهر ۱۴۴۰ متر از سطح دریا می‌باشد (شکل ۲). منطقه ایلام از نظر تقسیمات زمین‌شناسی در بخش زاگرس چین خورده قرار گرفته و امتداد ناهمواری‌ها به تبعیت از سیستم زاگرس، شمال غربی- جنوب شرقی است (سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان ایلام، ۱۳۸۵). میانگین بارش سالانه آن حدود ۶۱۶ میلی متر می‌باشد (نجفی، ۱۳۸۹).

جمعیت منطقه در سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۴۰۰ در جدول ۱، نشان داده شده است. توسعه کالبدی- فضایی شهر ایلام، با توجه به تحولات جمعیتی این شهر، نشان می‌دهد که این شهر طی سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۸۵ همواره رو به گسترش بوده است و طی این دوره دو برابر افزایش جمعیت را شاهد بودیم.



شکل ۲. موقعیت منطقه مورد مطالعه

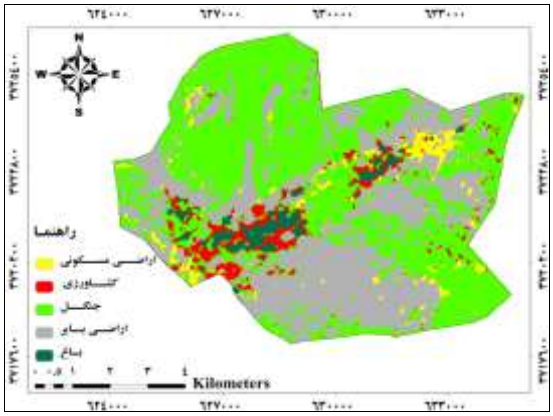
جدول ۱. روند رشد جمعیت در شهر ایلام در سال‌های مختلف

سال	۱۳۶۵	۱۳۷۰	۱۳۷۵	۱۴۰۰
جمعیت	۸۰۹۳۵	۱۱۶۴۲۸	۱۲۶۳۴۶	۱۶۰۳۵۵

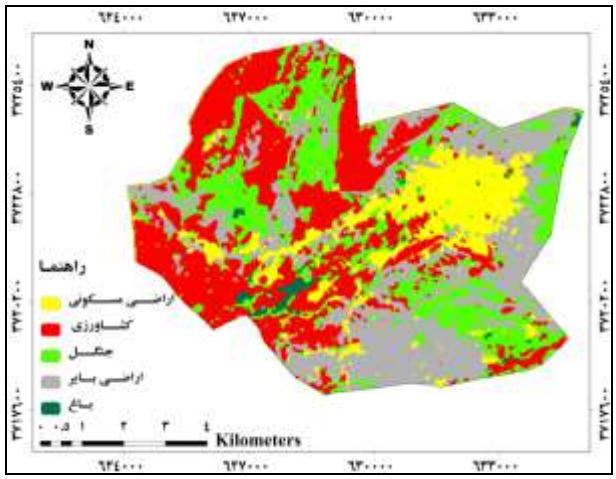
یافته‌ها

طبقه‌بندی تصاویر و ارزیابی دقت

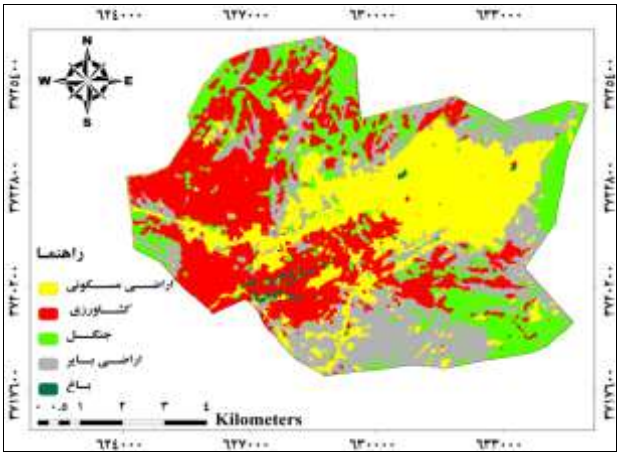
تصاویر چندزمانه استفاده شده در تحقیق پس از تصحیح هندسی و رادیومتریک برای تهیه نقشه پوشش زمین مورد بررسی قرار گرفته است. در ضمن، تعداد کاربری‌ها با توجه به تصاویر و نقشه‌های کاربری موجود و شرایط منطقه مورد مطالعه و بازدید میدانی برای تهیه نقشه پوشش زمین به پنج کلاس تقسیم شده است که عبارتند از: اراضی مسکونی، کشاورزی، جنگل، اراضی بایر و باغ. در ضمن، برای طبقه‌بندی تصاویر از روش طبقه‌بندی نظارت شده حداکثر احتمال استفاده شده است (اشکال ۳، ۴، ۵ و ۶).



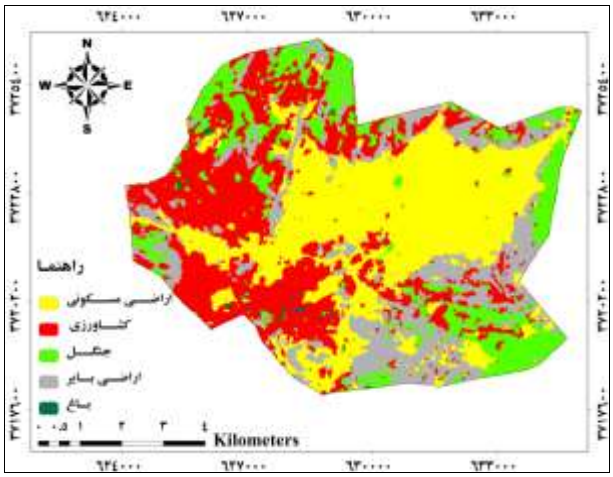
شکل۳. پهنه‌بندی کاربری اراضی شهر ایلام سال ۱۳۵۵



شکل۴. پهنه‌بندی کاربری اراضی شهر ایلام سال ۱۳۶۷



شکل ۵. پهنه‌بندی کاربری اراضی شهر ایلام سال ۱۳۸۰



شکل ۶. پهنه‌بندی کاربری اراضی شهر ایلام سال ۱۴۰۰

پس از طبقه‌بندی کاربری‌های اراضی، به ارزیابی دقت پرداخته شد. برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی، انتخاب یک‌سری پیکسل‌های نمونه معلوم و مقایسه کلاس آنها با نتایج طبقه-بندی لازم می‌باشد. بدین جهت تصاویر طبقه‌بندی شده با نمونه‌های زمینی تهیه شده به نرم‌افزار ادریسی انتقال یافته و میزان دقت کاربری‌ها (دقت کل و ضریب کاپا) به شرح زیر به‌دست آمد. با توجه به نتایج حاصل از ارزیابی دقت در چهار سال مورد مطالعه، میزان تطابق نمونه‌ها با واقعیت زمینی بسیار بالاست (جدول ۲).

جدول ۲. ارزیابی دقت طبقه‌بندی تصاویر در چهار سال مورد مطالعه

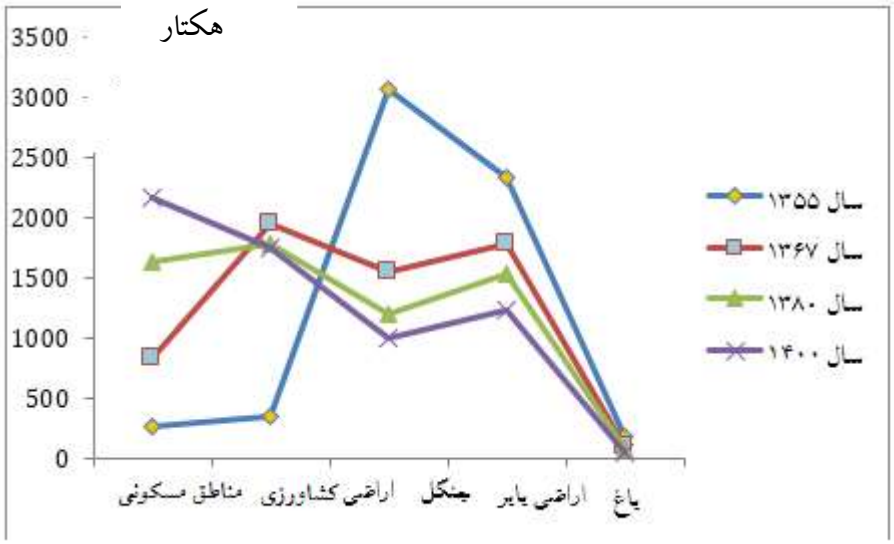
نام کاربری	۱۳۵۵		۱۳۶۷		۱۳۸۰		۱۴۰۰	
	ضریب کاپا	دقت کل	ضریب کاپا	دقت کل	ضریب کاپا	دقت کل	ضریب کاپا	دقت کل
اراضی مسکونی	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۸	۱
اراضی کشاورزی	۰/۸۸	۰/۹۰	۰/۹۸	۱	۰/۹۸	۱	۰/۹۹	۱
جنگل	۰/۹۲	۰/۹۴	۰/۸۸	۰/۹۰	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۸	۱
اراضی بایر	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۹۷	۱	۰/۹۸	۱	۰/۹۷	۱
باغ	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۸	۱	۰/۹۲	۰/۹۴	۰/۹۹	۱

فرایند تغییر کاربری اراضی و میزان گسترش فضایی-کالبدی شهر ایلام

آنالیز زنجیره مارکوف، برای محاسبه احتمالات تبدیل براساس نقشه‌های کاربری اراضی استخراج شده از تصاویر لندست براساس سال‌های ۱۳۵۵، ۱۳۶۷، ۱۳۸۰ و ۱۴۰۰ مورد استفاده قرار گرفت و یک ماتریس تبدیل ۱۳۵۵-۱۴۰۰ با فاصله زمانی به کار رفته برای کالیبراسیون، ۴۵ سال ساخته شد. با مطالعه و بررسی شکل ۷ و جدول مساحت کاربری‌های چهار دوره از شهر ایلام (جدول ۳) و با توجه به رشد دوبرابری جمعیت (جدول ۱)، ایجاد ساخت و سازها و رشد و توسعه روزافزون کالبدی شهر کاملا مشهود می‌باشد. بررسی این تصاویر نشان می‌دهد که شهر ایلام، کاربری جنگل و اراضی بایر را به شدت تحت تأثیر قرار داده است و به اراضی مسکونی تبدیل نموده است. در مجموع سیر رشد مناطق مسکونی در این بازه زمانی در همه جهات بوده است.

براساس اطلاعات به‌دست آمده از جدول۳، بیش‌ترین افزایش سطوح کاربری در منطقهٔ شهری ایلام مربوط به مناطق مسکونی می‌باشد که طی دوره ۴۵ ساله، ۱۹۰۵/۷۳ هکتار افزایش را نشان می‌دهد که این افزایش سطح با توجه به تصاویر شکل‌های ۳ تا ۶ و ماتریس حاصله از تغییرات کاربری‌ها مربوط به تخریب کاربری جنگل (۲۰۶۶/۱۶ هکتار) و کاهش اراضی بایر (۱۱۱۰/۷۸ هکتار) می‌باشد. در کاربری اراضی کشاورزی ۱۴۰۳/۴۶ هکتار افزایش و در کاربری باغ نیز ۱۳۲/۲۵ هکتار کاهش رخ داده است. بنابراین سه کلاس جنگل، اراضی بایر و باغ به ترتیب به نفع دو کلاس اراضی مسکونی و اراضی کشاورزی کاهش یافته‌اند که بیش‌ترین

افزایش مربوط به کاربری مناطق مسکونی می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای، شهر ایلام گسترش فضایی – کالبدی قابل توجهی داشته است.



شکل ۷. تغییرات کاربری اراضی شهر ایلام در طی سال‌های مورد مطالعه

جدول ۳. مساحت کاربری‌های اراضی شهر ایلام در طی سال‌های مورد مطالعه

سال	۱۳۵۵	۱۳۶۷	۱۳۸۰	۱۴۰۰
مناطق مسکونی	۲۶۸/۶۷	۸۲۳/۳۹	۱۶۲۸/۸۸	۲۱۷۴/۴۰
اراضی کشاورزی	۳۳۹/۴۶	۱۹۵۷/۳۸	۱۷۷۵/۴۱	۱۷۴۲/۹۲
جنگل	۳۰۶۵/۱۹	۱۵۴۳/۵۲	۱۱۹۱/۹۱	۹۹۹/۰۳
اراضی بایر	۲۳۴۱/۱۹	۱۷۷۸/۱۱	۱۵۲۶/۷۰	۱۲۳۰/۴۱
باغ	۱۷۹/۲۶	۹۱/۳۷	۷۰/۸۷	۴۷/۰۱
مجموع	۶۱۹۳/۷۷	۶۱۹۳/۷۷	۶۱۹۳/۷۷	۶۱۹۳/۷۷

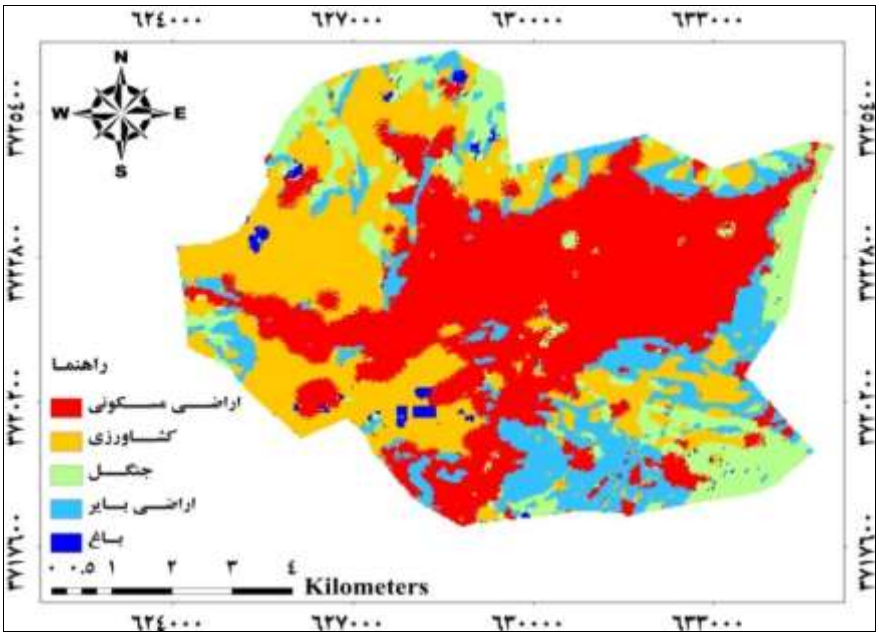
تخصیص مکانی کاربری اراضی پیش‌بینی شده

مجموعه داده‌ها شامل نقشه کاربری اراضی سال ۱۴۰۰ به‌عنوان نقشه پایه، ماتریس مناطق تبدیل مربوط به دوره زمانی ۱۳۵۵–۱۴۰۰ و نقشه‌های شایستگی سال ۱۴۰۰، با استفاده از عملگر CA برای پیش‌بینی نقشه کاربری سال ۱۴۱۰ با یکدیگر تلفیق شدند. چهارده بار تکرار برای مدل CA، به دلیل فاصله زمانی سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۱۰ اختصاص داده شد. با هربار اجرای مدل، هر نقشه شایستگی به‌دلیل اعمال فیلتر ۵×۵، مجددا وزن‌دهی گردید تا مکان کاربری اراضی شبیه‌سازی شده تعیین شود (Ponitus and Malanson, 2005). برای سال ۱۴۲۰ نیز به همین منوال پیش‌بینی انجام گرفته است. ماتریس منطقه تبدیل به‌دست آمده از آنالیز زنجیره مارکوف مقدار زمینی را که در دوره‌ای n ساله به یک کلاس اختصاص یافته است، تعیین می‌کند (Myint and Wang, 2006). بنابراین در پایان هر تکرار، نقشه کاربری اراضی جدیدی به وسیله هم‌پوشانی تمامی نتایج به‌دست آمده از مراحل پیشین تولید می‌گردد.

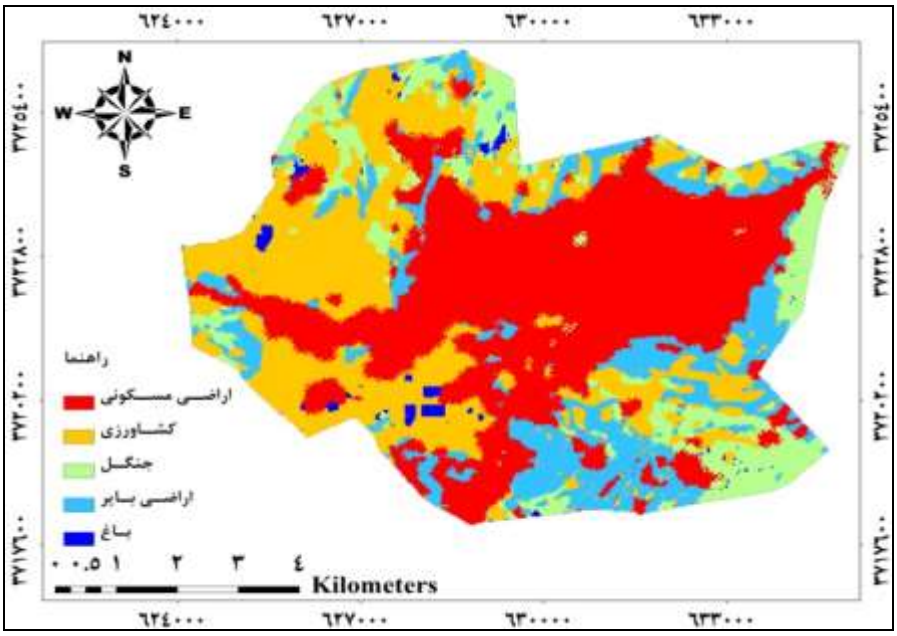
طبق پیش‌بینی شبیه‌سازی‌های مدل سلول خودکار– مارکوف (جدول۴)، مناطق مسکونی از ۳۵/۱۱ درصد در سال ۱۴۰۰ به ۴۱/۳۴ درصد در سال ۱۴۱۰ و سپس به ۴۲ درصد، در سال ۱۴۲۰ افزایش خواهد یافت و این در حالی می‌باشد که کاربری جنگل از ۱۶/۱۳ درصد در سال ۱۴۰۰ به ۱۲/۶۱ درصد در سال ۱۴۱۰ و در نهایت به ۱۲/۳۲ درصد در سال ۱۴۲۰ خواهد رسید و روند کاهشی آن کاملا مشهود می‌باشد. مناطق اراضی کشاورزی نیز در سال ۱۴۱۰ ، ۱۷/۱۱ هکتار افزایش را نشان می‌دهد و سپس در سال ۱۴۲۰ به میزان ۸ هکتار از مساحت آن کاسته خواهد شد. مناطق اراضی بایر نیز با روند کاهشی از سال ۱۴۰۰ تا ۱۴۲۰ تقریبا ۴ درصد از مساحتش کاسته خواهد شد و در آخر کلاس باغ با روند افزایشی تقریبا ۱۳ هکتار بر مساحتش افزوده خواهد شد. شکل ۸ و ۹ پیش‌بینی تغییرات کاربری‌های اراضی را نشان می‌دهند.

جدول ۴. مساحت کاربری‌های شبیه‌سازی شده و سال مرجع (هکتار و درصد)

سال	۱۴۰۰		۱۴۱۰		۱۴۲۰	
نام کاربری	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد
مناطق مسکونی	۲۱۷۴/۴۰	۰/۳۵۱۱	۲۵۶۰/۳۱	۰/۴۱۳۴	۲۶۰۱/۶۹	۰/۴۲۰۰
اراضی کشاورزی	۱۷۴۲/۹۲	۰/۲۸۱۴	۱۷۶۰/۰۳	۰/۲۸۴۲	۱۷۵۲/۸۳	۰/۲۸۳۰
جنگل	۹۹۹/۰۳	۰/۱۶۱۳	۷۸۱/۲۹	۰/۱۲۶۱	۷۶۳/۲۹	۰/۱۲۳۲
اراضی بایر	۱۲۳۰/۴۱	۰/۱۹۸۶	۱۰۳۱/۶۲	۰/۱۶۶۶	۱۰۱۵/۴۳	۰/۱۶۴۱
باغ	۴۷/۰۱	۰/۰۰۷۶	۶۰/۵۲	۰/۰۰۹۷	۶۰/۵۳	۰/۰۰۹۷
مجموع	۶۱۹۳/۷۷	۱	۶۱۹۳/۷۷	۱	۶۱۹۳/۷۷	۱



شکل ۸. نقشه کاربری زمین شبیه‌سازی شده سال ۱۴۱۰



شکل ۹. نقشه کاربری زمین شبیه‌سازی شده سال ۱۴۲۰

بحث و نتیجه‌گیری

ویژگی جوامع شهری امروز سبب ناپایداری انسان‌ها و محیط زیست گردیده است. درک مکانیسم فرایند رشد شهری به منظور رسیدن به شکل شهری پایدار بسیار مهم است. مدل-های فضایی ابزارهای مفید برای درک فرایند توسعه شهری، ابزار کمکی سیاست‌گذاری، مدیریت و برنامه‌ریزی شهری و فراهم‌کننده اطلاعات برای ارزیابی تأثیرات شهری بر محیط زیست و اکوسیستم هستند. در تحقیق حاضر، با استفاده از نقشه‌های کاربری زمین به‌دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای سال‌های ۱۳۵۵، ۱۳۶۷، ۱۳۸۰ و ۱۴۰۰ و مدل CA-Markov که تلفیقی از آنالیز زنجیره مارکوف و مدل‌های CA است، به بررسی رشد شهری و تغییرات کاربری زمین در شهر ایلام پرداخته شد.

شهر ایلام در فاصله زمانی ۱۳۵۵ تا ۱۴۰۰ با حدود ۳۱/۷۴ درصد رشد شهری مواجه بوده است و تغییر کاربری در این بازه زمانی در افزایش دو کلاس اراضی مسکونی و اراضی کشاورزی و کاهش سه کلاس جنگل، اراضی بایر و باغ بوده است. در مرحله بعد با ایجاد ماتریس تبدیل مساحت کاربری-های بین سال‌های ۱۳۵۵–۱۴۰۰ با استفاده از مدل سلول خودکار- مارکوف به پیش‌بینی تغییرات و رشد شهری در سال‌های ۱۴۱۰ و ۱۴۲۰ پرداخته شد که نتایج حاکی از افزایش ۶/۹ درصدی اراضی مسکونی در سال‌های آتی می‌باشد. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان‌دهنده آن می‌باشد که اگر گرایش و روند موجود رشد شهری رایج بدون تدوین سیاست‌های توسعه‌ای ادامه یابد، به کاهش فضاهای جنگل و کشاورزی منجر خواهد گشت. بنابراین براساس فرایند برنامه‌ریزی، کاربری زمین شهری باید در چارچوبی فراهم گردد که بر پایه آن از استفاده نامناسب زمین جلوگیری به عمل آید و در عین حال اهداف اقتصادی، اجتماعی، محدودیت‌های فیزیکی و سیاست‌های زیست‌محیطی رعایت شود. تغییرات کاربری اراضی شبیه‌سازی شده برای آینده، در بردارنده نتایج و پیشنهادهای زیست‌محیطی و اجتماعی-اقتصادی با اهمیتی در زمینه برنامه‌ریزی شهری پایدار در منطقه مورد مطالعه می‌باشند.

راهکارهای

با توجه به یافته‌های تحقیق، راهکارهای زیر ارائه می‌گردد:

- ✓ اجتناب از صدور مجوز به ساخت و سازهای تشدید کننده توسعه پراکنده و بی‌برنامه؛
- ✓ جلوگیری از رشد پراکنده و افقی شهر با تراکم‌سازی در محدوده پیش‌بینی نشده رشد شهر؛
- ✓ نظارت بیش‌تر بر محدوده‌های شهری؛
- ✓ استفاده از شیوه‌های انبوه‌سازی و بلندمرتبه‌سازی؛
- ✓ هدایت توسعه شهری در جهاتی غیر از اراضی جنگلی.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در این مقاله وجود ندارد.

تأمین مالی

این پژوهش توسط هیچ نهادی حمایت مالی نشده و تمامی هزینه‌ها توسط نویسندگان تأمین شده است.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از همه کسانی‌که در به ثمر نشستن این مطالعه سهم داشته‌اند، قدردانی به عمل می‌آید.

References

Aburas, M. M., Ming, H. O. Y., Ramli, M. F., & Ash'aari, Z. H. (2017). Improving the capability of an integrated CA-Markov model to simulate spatio-temporal urban growth trends using an Analytical Hierarchy Process and Frequency Ratio. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 62, 50–63. https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.03.006

Ahadnejad Roshti, M., & Hosseini, A. (2011). Evaluation and prediction of changes and horizontal distribution of cities using multi-temporal satellite images and geographic information system (case study: Tabriz city during 1984-1989). *Journal of Urban Research and Planning*, 2(4), 1–20. (In Persian) https://sanad.iau.ir/journal/ebtp/Article/675487?jid=675487&lang=en

Akbari, D., Moradizad, M., & Akbari, M. (2019). Land use changes and simulation of urban growth and development in Rasht using neural network model and Markov chain automata cellular. *Urban Research and Planning*, 10(39), 157–166. (In Persian) https://jupm.marvdasht.iau.ir/article_3654_94742ae87caeaa2becfe3d9c8f0880d8.pdf?lang=en

Alimohammadi Sarab, A., Motakan, A. A., & Mirbagheri, B. (2010). Evaluation of the efficiency of the automated cell model in simulating urban land expansion in the southwestern suburbs of

Tehran. *Moders of Human Sciences - Spatial Planning and Development*, (2), 82–102. (In Persian) http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4817437

Anderson, W. P., Kanaroglou, P. S., & Miller, E. J. (1996). Urban form, energy and the environment: A review of issues, evidence and policy. *Urban Studies*, 33(1), 7–35. https://doi.org/10.1080/00420989650012095

Aslam, R. W., Shu, H., & Yaseen, A. (2023). Monitoring the population change and urban growth of four major Pakistan cities through spatial analysis of open source data. *Annals of GIS*, 29(3), 355–367. https://doi.org/10.1080/19475683.2023.2166989

Baqa, M. F., Chen, F., Lu, L., Qureshi, S., Tariq, A., Wang, S., Jing, L., Hamza, S., & Li, Q. (2021). Monitoring and modeling the patterns and trends of urban growth using urban sprawl matrix and CA-Markov model: A case study of Karachi, Pakistan. *Land*, 10(7), Article 700. https://doi.org/10.3390/land10070700

Batty, M., Couclelis, H., & Eichen, M. (1994). Urban systems as cellular automata. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21(2), 159–164. https://doi.org/10.1068/b240159

Bhat, P. A., Shafiq, M. U., Mir, A. A., & Ahmed, P. (2017). Urban sprawl and its impact on land use/land cover dynamics of Dehradun City, India. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 513–521. https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2017.10.003

Chang, C. L. (2006). Markov model and cellular automata for vegetation. *Journal of Geographical Research*, 45, 45–57. https://rangelandsrm.ir/article-1-873-en.pdf

Chavez, P. S., & MacKinnon, D. J. (1994). Automatic detection of vegetation changes in the southwestern United States using remotely sensed images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(5), 571–583. https://www.researchgate.net/publication/255022354

Cheng, J., & Masser, I. (2003). Urban growth pattern modeling: A case study of Wuhan city, PR China. *Landscape and Urban Planning*, 62(4), 199–217. https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00150-0

Clarke, K. C., Hoppen, S., & Gaydos, L. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco bay area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2), 247–261. https://doi.org/10.1068/b240247

Deep, S., & Saklani, A. (2014). Urban sprawl modeling using cellular automata. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 17(2), 179–187. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2014.07.001

Dellepiane, S. G., & Smith, P. C. (1999). Quality assessment of image classification algorithms for land cover mapping: A review and a proposal for a cost-based approach. *International Journal of Remote Sensing*, 20(8), 1461–1486. https://doi.org/10.1080/014311699212560

Feizizadeh, B., & Hajimirrahimi, M. (2007). Detecting land use changes using object-oriented classification method (case study: Andisheh town). *Surveying*, 19(99), 1–10. (In Persian) https://geoeh.um.ac.ir/jufile?ar_sfile=362590

Guan, Y., Li, X., Yang, J., Li, S., & Tian, S. (2022). Spatial differentiation of comprehensive suitability of urban human settlements based on GIS: A case study of Liaoning province, China. *Environment, Development and Sustainability*, 24(3), 4150–4174. https://doi.org/10.1007/s10668-021-01610-x

Gupta, P., & Bharat, A. (2022). Developing sustainable development index as a tool for appropriate urban land take. *Environment, Development and Sustainability*, 24(11), 13378–13406. https://doi.org/10.1007/s10668-021-01992-y

Gupta, R., Sharma, M., Singh, G., & Joshi, R. K. (2023). Characterizing urban growth and land surface temperature in the western Himalayan cities of India using remote sensing and spatial metrics. *Frontiers in Environmental Science*, 11, Article 1122935. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1122935

Han, J., Hayashi, Y., Cao, X., & Imura, H. (2009). Application of an integrated system dynamics and cellular automata model for urban growth assessment: A case study of Shanghai, China. *Landscape and Urban Planning*, 91(3), 133–141. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.12.002

Hathout, S. (2002). The use of GIS for monitoring and predicting urban growth in East and West St Paul, Winnipeg, Manitoba, Canada. *Journal of Environmental Management*, 66(3), 229–238. https://doi.org/10.1006/jema.2002.0596

He, C., Okada, N., Zhang, Q., Shi, P., & Li, J. (2008). Modeling dynamic urban expansion processes incorporating a potential model with cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 86(1), 79–91. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.12.010

Hegazy, I. R., & Kaloop, M. R. (2015). Monitoring urban growth and land use change detection with GIS and remote sensing techniques in Daqahlia governorate Egypt. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4(1), 117–124. https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2015.02.005

Henríquez, C., Azócar, G., & Romero, H. (2006). Monitoring and modeling the urban growth of two mid-sized Chilean cities. *Habitat International*, 30(4), 945–964. https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2005.05.002

Ilam Province Management and Planning Organization. (2006). *The position of Ilam Province in realizing spatial planning orientations*. Ilam Statistical Yearbook (Population), 2006. (In Persian)

Javadi, Y. (2008). *Modeling land cover changes using cellular automata in a GIS environment* [Master's thesis, University of Tehran]. (In Persian)

Jenerette, G. D., & Wu, J. (2001). Analysis and simulation of land use change in the central Arizona–Phoenix region, USA. *Landscape Ecology*, 16(7), 611–626. https://doi.org/10.1023/A:1013170528551

Kamyab, H. R., Mahini, A. R., Hosseini, M., & Gholamali Fard, M. (2010). Adopting an information-based approach using logistic regression method for modeling urban development in Gorgan. *Environment Studies*, 36(54), 89–96. (In Persian) https://jes.ut.ac.ir/article_21477_88d0e9d72f0914045721e39afa6b215a.pdf?lang=en

Khosh-e-Goftar, M., & Talei, M. (2010). Simulation of urban growth in Tehran, using the CA-Markov model. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 2(2), 17–33. (In Persian) https://jhgr.ut.ac.ir/article_63011_2f4f1163f7d7199edbd9b59498ebe16b.pdf?lang=en

Kiani-Salmi, A., & Ebrahimi, A. (2018). Land cover assessment of Shahrekord and its future prediction using remote sensing data and CA-Markov model. *Journal of Spatial Planning (Geography and Development)*, 8(1), 71–88. https://doi.org/10.22108/sppl.2018.109227.1159 (In Persian)

Kisamba, F. C., & Li, F. (2023). Analysis and modelling urban growth of Dodoma urban district in Tanzania using an integrated CA–Markov model. *GeoJournal*, 88(1), 511–532. https://doi.org/10.1007/s10708-022-10617-4

Matovnikov, S., & Matovnikova, N. (2016). Innovative urban planning methods for the urban landscape design in the Volgograd agglomeration. *Procedia Engineering*, 150, 1966–1971. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.1966

McDonald, R. I., Mansur, A. V., Ascensão, F., Colbert, M., Crossman, K., Elmqvist, T., Gonzalez, A., Güneralp, B., Haase, D., & Hamann, M. (2020). Research gaps in knowledge of the impact of urban growth on biodiversity. *Nature Sustainability*, 3(1), 16–24. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0436-6

Misagh, N., Nisai Samani, N., & Tomanian, A. (2018). Simulating Tabriz urban growth using the CA-Markov model and multi-criteria decision making. *Human Geography Research*, 50(1), 217–231. https://doi.org/10.22059/jhgr.2017.224800.1007382 (In Persian)

Mohammadzadeh, R. (2007). Environmental study of accelerated physical development of cities with emphasis on the cities of Tehran and Tabriz. *Regional Development*, (9), 93–112. (In Persian) https://doi.org/10.22067/geography.v5i9.4240

Musavengane, R., Siakwah, P., & Leonard, L. (2020). The nexus between tourism and urban risk: Towards inclusive, safe, resilient and sustainable outdoor tourism in African cities. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 29, Article 100254. https://doi.org/10.1016/j.jort.2019.100254

Myint, S. W., & Wang, L. (2006). Multi-criteria decision approach for land cover change using Markov chain analysis and a cellular automata approach. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32(6), 390–404. https://doi.org/10.5589/m06-032

Najafi, A. (2010). *Geomorphological capabilities and limitations of the physical development of Ilam city* [Master's thesis, University of Tehran]. https://www.sid.ir/fileserver/jf/31913901501.pdf (In Persian)

Pijanowski, B. C., Brown, D. G., Shellito, B. A., & Manik, G. A. (2002). Using neural networks and GIS to forecast land use changes: A land transformation model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26(6), 553–575. https://doi.org/10.1016/S0198-9715(01)00015-1

Pontius, R. G., & Malanson, J. (2005). Comparison of the structure and accuracy of two Land Change Models. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2), 243–265. https://doi.org/10.1080/13658810410001713434

Qian, Y., Chakraborty, T., Li, J., Li, D., He, C., Sarangi, C., Chen, F., Yang, X., & Leung, L. R. (2022). Urbanization impact on regional climate and extreme weather: Current understanding, uncertainties, and future research directions. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39(6), 819–860. https://doi.org/10.1007/s00376-022-1371-9

Rafiee, R., Mahiny, A., & Khorasani, N. (2009). Assessment of changes in urban green spaces of Mashhad city using satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11(6), 431–438. https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.08.005

Rahnama, M. R., Shahbazi, A., & Sargazi, Z. (2013). Simulation of land use changes in Zahedan peri-urban areas. *Development of Peri-Urban Spaces*, 1(9), 1–16. https://doi.org/10.22034/jpusd.2023.351180.1215 (In Persian)

Rezazadeh, R., & Mirahmadi, M. (2009). Cellular automata model: A new method in simulating urban growth. *Journal of Technology of Education*, 4(1), 47–55. https://doi.org/10.22061/tej.2009.1335 (In Persian)

Salehi, N., Haqqani, M. R., & Talebi, A. (2019). Predicting the trend of land use changes using the CA-Markov chain model (Case study: Safarood Ramsar watershed). *Journal of Remote Sensing and GIS in Natural Resources*, 10(1), 106–120. https://www.sid.ir/fileserver/jf/6001413983407.pdf (In Persian)

Shafizadeh-Moghadam, H., & Helbich, M. (2013). Spatiotemporal urbanization processes in the megacity of Mumbai, India: A Markov chains-cellular automata urban growth model. *Applied Geography*, 40, 140–149. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.01.009

Siddiqui, A., Siddiqui, A., Maithani, S., Jha, A. K., Kumar, P., & Srivastav, S. K. (2018). Urban growth dynamics of an Indian metropolitan using CA Markov and Logistic Regression. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 21(3), 229–236. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.11.006

Tariq, A., Yan, J., & Mumtaz, F. (2022). Land change modeler and CA-Markov chain analysis for land use land cover change using satellite data of Peshawar, Pakistan. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 128, Article 103286. https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103286

Yong, D., Teillet, P. M., & Cihlar, J. (2002). Radiometric normalization of multitemporal high-resolution satellite images with quality control for land cover change detection. *Remote Sensing of Environment*, 82(1), 123–134. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00029-9

Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583–594. DOI: 10.1080/01431160304987