



University of Tehran Press

Town & Country Planning

Home Page: <https://jtcp@ut.ac.ir>

Online ISSN: 2423-6268

Monitoring Urban Land-Use Changes and Simulating Future Urban Development (Case Study of Kirkuk, Iraq)

Ebrahim Sami^{1*} | Pooran Karbasi² | Yasmin Marwan Omar Al-Mawli³

1. Corresponding Author, Department of Geography and Urban Planning, University of Maragheh, Maragheh, Iran. Email: e.sami1361@gmail.com
2. Department of Geography and Urban Planning, University of Maragheh, Maragheh, Iran. Email: poorankarbasi@gmail.com
3. Department of Geography and Urban Planning, University of Maragheh, Maragheh, Iran. Email: marwanyasmin778@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:

Received: September 19, 2025

Revised: November 27, 2025

Accepted: December 03, 2025

Published online: March 05, 2026

Keywords:

Land-use change,
SVM classification,
CA–Markov model,
Kirkuk.

ABSTRACT

The rapid pace of urbanization and extensive alterations in land-use patterns, particularly in developing regions, have led to critical challenges in sustainable land management, natural resource depletion, and disruption of ecological equilibrium. This study aims to conduct a spatiotemporal analysis of land-use changes in Kirkuk city from 1990 to 2024 and to forecast future trends until 2036 by employing advanced remote sensing techniques and modeling approaches. Multitemporal Landsat 5 and 8 imagery were utilized, and following rigorous geometric and radiometric preprocessing, land-use classification was performed using the Support Vector Machine (SVM) algorithm within the ENVI software environment. The classification accuracy was assessed through an error matrix, Kappa coefficient, and overall accuracy, yielding values of 88% (Kappa = 0.90) for 1990 and 91% (Kappa = 0.94) for 2024. Subsequently, a combined Cellular Automata–Markov (CA–Markov) model implemented in IDRISI software was used to project land-use changes up to 2036. Model results indicate that urban areas are projected to expand from 6.8% to over 22.3%, while barren lands are expected to decrease from approximately 88% to less than 74%. Minor increases in orchard and waterbody areas were also observed. These patterns suggest a dispersed and unsustainable urban expansion primarily toward the southern and western parts of the city. The outcomes of this study highlight the effectiveness of integrating SVM and CA–Markov algorithms for monitoring and forecasting land-use dynamics in complex urban environments. Furthermore, the findings provide valuable insights for spatial planning, guiding policies to control unplanned urban sprawl, and supporting sustainable management of natural resources.

Cite this article: Sami, E.; Karbasi, P. & Marwan Omar Al-Mawli, Y. (2025-2026). Monitoring Urban Land-Use Changes and Simulating Future Urban Development (Case Study of Kirkuk, Iraq). *Town and Country Planning*. 17 (2), 359-376. <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.402308.670522>



© Authors retain the copyright and full publishing rights.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.402308.670522>

Publisher: University of Tehran Press.



پایش تغییرات کاربری اراضی شهری و شبیه‌سازی توسعه آبی شهر (مطالعه موردی: شهر کرکوک، عراق)

ابراهیم سامی^{۱*} | پوران کرباسی^۲ | یاسمین مروان عمر المولی^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران. رایانامه: e.sami1361@gmail.com
 ۲. گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران. رایانامه: poorankarbas@gmail.com
 ۳. گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران. رایانامه: marwanyasmin778@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۱۴

کلیدواژه:

تغییرات کاربری اراضی،
طبقه‌بندی SVM،
کرکوک،
مدل CA-Markov.

افزایش شتابان شهرنشینی و تغییرات گسترده در الگوهای کاربری اراضی، به‌ویژه در مناطق در حال توسعه، موجب بروز چالش‌هایی در زمینه مدیریت پایدار زمین، از بین رفتن منابع طبیعی و اختلال در توازن اکولوژیکی شده است. مطالعه حاضر با هدف تحلیل فضایی-زمانی تغییرات کاربری اراضی در شهر کرکوک طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴ و پیش‌بینی روند آن تا سال ۲۰۳۶ با بهره‌گیری از رویکردهای پیشرفته سنجش از دور و مدل‌سازی انجام گرفته است. برای این منظور، از تصاویر چندزمانه ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸ استفاده شد و پس از انجام دادن پیش‌پردازش‌های هندسی و رادیومتریکی، طبقه‌بندی به کمک الگوریتم یادگیری ماشین SVM در محیط نرم‌افزار ENVI اجرا شد. صحت طبقه‌بندی با استفاده از ماتریس خطا، ضریب کاپا و دقت کلی ارزیابی شد که نتایج به ترتیب برابر با ۸۸ درصد (Kappa=0/90) در سال ۱۹۹۰ و ۹۱ درصد (Kappa=0/94) در سال ۲۰۲۴ برآورد شد. در ادامه، با بهره‌گیری از مدل ترکیبی CA-Markov در نرم‌افزار IDRISI، پیش‌بینی تغییرات تا افق ۲۰۳۶ انجام گرفت. نتایج مدل نشان داد که سطح کاربری شهری از ۸/۶ درصد به بیش از ۲۲/۳ درصد خواهد رسید، درحالی‌که اراضی بایر از حدود ۸۸ درصد به کمتر از ۷۴ درصد کاهش خواهد یافت. همچنین، افزایش محدود در کاربری باغی و پهنه آبی نیز مشاهده شد. این الگوها حاکی از توسعه پراکنده و ناپایدار مناطق شهری در جهت جنوب و غرب شهر است. دستاوردهای این پژوهش بیانگر کارایی بالای ترکیب الگوریتم‌های SVM و CA-Markov در پایش و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در مناطق پیچیده شهری است. همچنین، نتایج می‌تواند به عنوان ابزار تصمیم‌یار در تدوین سیاست‌های فضایی، کنترل گسترش بی‌رویه شهری، و مدیریت منابع طبیعی به کار گرفته شود.

استناد: سامی، ابراهیم؛ کرباسی، پوران و مروان عمر المولی، یاسمین (۱۴۰۴). پایش تغییرات کاربری اراضی شهری و شبیه‌سازی توسعه آبی شهر (مطالعه موردی: شهر کرکوک، عراق). *آمایش سرزمین*، ۱۷ (۲) ۳۵۹-۳۷۶. <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.402308.670522>

© نویسندگان. ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.402308.670522>



مقدمه

در دهه‌های اخیر، تحولات جمعیتی، به‌ویژه مهاجرت گسترده از مناطق روستایی به شهرها، موجب گسترش سریع مناطق شهری شده است (Rimal et al., 2018a; Tariq et al, 2022). این روند در بسیاری از کشورها بدون تکیه بر برنامه‌ریزی دقیق و آینده‌نگرانه صورت گرفته و پیامدهایی عمیق برای ساختارهای شهری و زیست‌محیطی به دنبال داشته است (Wei & Ewing, 2019; Guite, 2019: 260). رشد شتاب‌زده فضاهای شهری اغلب با دست‌اندازی به اراضی کشاورزی حاصل‌خیز و زیست‌بوم‌های طبیعی و تکه‌تکه شدن و جدا شدن لکه‌های طبیعی همراه بوده است؛ موضوعی که در مطالعات مختلف به عنوان تهدیدی اساسی برای پایداری بلندمدت زیست‌محیطی مطرح شده است (Bhatta, 2010; Frenkel & Ashkenazi, 2008; Cahya et al., 2018; Cao et al., 2017; Gehad et al., 2024; Alberti, 2005; Elmquist et al., 2013).

پیامدهای این توسعه ناپایدار شامل افزایش هزینه‌های مدیریت و برنامه‌ریزی شهری، از بین رفتن منابع تولید غذایی، رشد بی‌رویه در نواحی فاقد زیرساخت مناسب و نیز گسترش الگوهای ناکارآمد حمل‌ونقل است (Angel, 2023: 128; Gumma et al., 2020: 660; Millard-Ball & Barrington-Leigh, 2020; Sientop et al., 2022: 660; al., 2017). افزون بر این، کاهش تنوع زیستی و تخریب منابع آبی و خاکی نیز از دیگر تبعات جدی این روند هستند (Winkler et al., 2021; Bajocco et al., 2018; Rimal et al., 2012). در چنین شرایطی، بهره‌گیری از مدل‌های پیش‌بینی رشد، نظیر CA-Markov، ابزار مهمی برای سیاست‌گذاران شهری محسوب می‌شود تا بتوانند بر پایه سناریوهای علمی آینده توسعه شهرها را ترسیم کنند (Pampoore-Thampi et al., 2021; Arneth et al., 2014; Powers & Jetz, 2019; Subedi et al., 2013; Wang et al., 2020; Hishe et al., 2021; al.). در کنار پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه داده‌های مکانی و فناوری سنجش از دور، همچنان نبود هماهنگی میان منابع اطلاعاتی یکی از موانع اصلی برای تحلیل دقیق روند تغییرات کاربری اراضی محسوب می‌شود (Chughtai et al., 2021). این ضعف کار تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان شهری را در تدوین سیاست‌های کلان به‌شدت دشوار کرده است.

تحولات جمعیتی و گسترش سریع شهرها در دهه‌های اخیر توجه پژوهشگران زیادی را به تحلیل تغییرات کاربری زمین و پیامدهای آن بر محیط زیست و توسعه پایدار جلب کرده است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که توسعه شهری شتاب‌زده، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، با تخریب اکوسیستم‌ها، کاهش پوشش گیاهی، افزایش فرسایش خاک و تغییرات قابل توجه در منابع آبی همراه بوده است. باهتا^۱ (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای جامع بر روند توسعه شهری در آسیا و آفریقا نشان داد که گسترش سریع شهرها بدون برنامه‌ریزی مناسب موجب کاهش پوشش گیاهی و افزایش تکه‌تکه شدن زیستگاه‌ها می‌شود و تهدیدی جدی برای تنوع زیستی و پایداری اکولوژیکی است. مشابه این نتایج، فرانک^۲ و همکارانش (۲۰۰۸) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat در خاورمیانه نشان دادند که توسعه شهری شتاب‌زده موجب نابودی بخش بزرگی از اراضی کشاورزی و تخریب اکوسیستم‌های طبیعی می‌شود.

در اروپا، کیلگاریف^۳ و همکارانش (۲۰۲۰)، با تحلیل داده‌های شعاعی رشد شهری در چند کشور اروپایی، نشان دادند که توسعه فضاهای شهری با هدایت مناسب می‌تواند فشار بر منابع زمین را کاهش دهد، اما نبود چارچوب‌های نظارتی و هماهنگی بین نهادها موجب توسعه پراکنده و ناکارآمد می‌شود. مطالعاتی در امریکای جنوبی نیز حاکی از آثار مشابه است. ریبیرو^۴ و همکارانش (۲۰۲۴) با استفاده از مدل DINAMICA در برزیل روند توسعه اراضی شهری به هزینه مناطق کشاورزی و جنگلی را تحلیل کردند و نشان دادند که این روند موجب افزایش آسیب‌پذیری اکوسیستم‌ها و تهدید تنوع زیستی می‌شود. در امریکای شمالی، میلارد بال و برینگتون لی (۲۰۲۰) نشان دادند که رشد شهری سریع و بدون برنامه‌ریزی هزینه‌های مدیریت شهری و زیرساخت‌ها را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

1. Bhatta
2. Frenkel
3. Kilgarriff
4. Ribeiro

استفاده از مدل‌های پیش‌بینی و یادگیری ماشینی نیز در سال‌های اخیر اهمیت یافته است. پمپور تامپی^۱ و همکارانش (۲۰۲۱) با استفاده از مدل‌های CA-Markov و CNN-LSTM نشان دادند که این روش‌ها می‌توانند روند تغییرات کاربری زمین و گسترش شهرها را با دقت بالا پیش‌بینی کنند و به سیاست‌گذاران در طراحی برنامه‌های شهری پایدار کمک کنند؛ همچنین بر ترکیب سامانه‌های مکانی و الگوریتم‌های یادگیری ماشینی برای تحلیل و پیش‌بینی تغییرات شهری تأکید و آن را مؤثرترین روش برای هماهنگی سیاست‌های توسعه با اهداف SDG-15 معرفی کرده‌اند.

یافته‌های میدانی از شهر کراچی پاکستان نشان می‌دهد که بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ سهم مناطق ساخته‌شده نزدیک به دوبرابر افزایش یافته است. این افزایش با نرخ تغییرات سالیانه بالایی همراه بوده است و عوامل متعددی نظیر رشد جمعیت و توسعه اقتصادی در آن نقش داشته‌اند (Shah et al., 2021). مطالعات گسترده‌تری در شهرهای متوسط هند نشان می‌دهند که در بسیاری از موارد گسترش کالبدی شهر با کاهش چشمگیر پوشش گیاهی همراه بوده است. نتایج حاصل از این مطالعات بیانگر اثرگذاری مستقیم بر شاخص‌های زیست‌محیطی و کیفیت زندگی هستند (Chetry, 2022). در شهر گوانگژو چین نیز داده‌های طولی از یک دوره سی و پنج ساله گویای رشد سالیانه قابل توجه فضاهای شهری تحت تأثیر سیاست‌های توسعه اقتصادی هستند (Wu et al., 2015). در عربستان، به‌کارگیری روش‌های یادگیری عمیق، مانند CNN-LSTM، برای تحلیل روند گسترش شهرها، کارایی بالایی را در تشخیص الگوهای فضایی نشان داده و با دقت بالایی همراه بوده است (Boulila et al., 2021). در بخارست رومانی، مطالعات نشان می‌دهند که بیش از نیمی از اراضی کشاورزی در اثر توسعه شهری از بین رفته‌اند و این امر با تهدیدهایی نظیر از دست رفتن تنوع زیستی و منابع طبیعی همراه بوده است (Diaconu et al., 2025). مطالعه‌ای جدید در سال ۲۰۲۳ ترکیب مدل‌های یادگیری ماشینی با سامانه‌های مکانی را مؤثرترین روش برای تحلیل و پیش‌بینی تغییرات شهری معرفی می‌کند و بر نقش آن در تدوین سیاست‌های سازگار با اهداف توسعه پایدار (SDG-15) تأکید دارد (Gaur & Singh, 2023). نمونه‌ای از این تحلیل‌ها در کشور برزیل با استفاده از مدل DINAMICA روند نگران‌کننده‌ای از توسعه اراضی شهری به هزینه مناطق کشاورزی و جنگلی را به تصویر کشیده است (Ribeiro et al., 2024). در اروپا، داده‌های شعاعی رشد شهری نشان می‌دهند که گسترش کالبدی با ابعاد شهرها همخوانی دارد، اما سیاست‌گذاری‌ها و نظارت‌های محلی تأثیر بسزایی در الگوی توسعه دارند (Kilgarriff et al., 2020). در پژوهشی دیگر، به تهدید گسترده اکوسیستم‌ها و گونه‌های زیستی در اثر توسعه شهری اشاره شده است که شامل نابودی تالاب‌ها و زیستگاه‌های طبیعی نیز می‌شود (Simkin et al., 2022). نتایج مشابهی در سریلانکا نیز با توجه به مهاجرت‌های روستایی و رشد بدون برنامه‌ریزی مشاهده شده است (Subasinghe et al., 2016).

الگوهای مکانی گسترش شهری بسته به سیاست‌های ملی و محلی متفاوت هستند. برخی کشورها با مدیریت بهتر توانسته‌اند توسعه فضایی را به گونه‌ای هدایت کنند که فشار بر منابع زمین کاهش یابد (Wang et al., 2020). اما در اکثر موارد روند توسعه به گونه‌ای بوده که پایداری شهری را به خطر انداخته است (Hu et al., 2023). نبود هماهنگی بین نهادهای مرتبط با برنامه‌ریزی شهری، نبود چارچوب‌های نظارتی قوی و عدم انطباق سیاست‌های توسعه با شرایط واقعی مهم‌ترین عوامل در بروز تغییرات بی‌رویه در کاربری اراضی بوده‌اند (Gaur & Singh, 2023). این در حالی است که فناوری‌های نوین سنجش از دور و تحلیل مکانی قابلیت آن را دارند که نواقص موجود را تا حد زیادی پوشش دهند (Pampoore-Thampi et al., 2021). در خاورمیانه، شهر کرکوک نمونه‌ای بارز از توسعه شهری سریع و بدون برنامه‌ریزی است. افزایش مهاجرت‌های داخلی، بازگشت آوارگان، فشار بر زیرساخت‌ها و ناکارآمدی طرح جامع شهری موجب شکل‌گیری سکونتگاه‌های غیررسمی و پراکندگی فضایی شده است (Ahmed, 2017; Omer & Raheem, 2016; DAO, 2014; Jasim et al., 2020). این روند، علاوه بر آثار کالبدی، پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی گسترده‌ای را به همراه دارد که مدیریت آن بدون بهره‌گیری از ابزارهای GIS و RS غیرممکن است.

با توجه به اهمیت موضوع، هدف اصلی این پژوهش ارزیابی اثر گسترش شهری بر تغییرات کاربری زمین در کرکوک طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴ است. همچنین، با بهره‌گیری از مدل‌های پیش‌بینی و ابزارهای مکانی، روند تغییرات کاربری زمین تا سال ۲۰۳۶ پیش‌بینی و اثر اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی آن تحلیل می‌شود. این پژوهش تلاش دارد خلأهای موجود در برنامه‌ریزی شهری را شناسایی و به سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری کمک کند تا توسعه پایدارتر و منسجم‌تر در کرکوک و سایر شهرهای مشابه امکان‌پذیر شود.

مبانی نظری

توسعه شهرها فرایندی پیچیده و چندبعدی است که با تعامل متغیرهای جمعیتی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بر اساس نظریه‌های توسعه شهری، رشد نامتعادل و بدون برنامه‌ریزی می‌تواند به گسترش پراکنده، تخریب منابع طبیعی، کاهش پوشش گیاهی و افزایش فشار بر زیرساخت‌ها منجر شود (Angel, 2023). مطالعات نشان داده‌اند که مهاجرت‌های روستایی، بازگشت آوارگان و سیاست‌های توسعه اقتصادی نقش تعیین‌کننده‌ای در الگوهای گسترش شهری دارند و در صورت فقدان مدیریت مناسب پیامدهای اجتماعی و زیست‌محیطی قابل توجهی ایجاد می‌کنند (Chetry, 2022).

تحلیل تغییرات کاربری زمین و پیش‌بینی روندهای شهری با استفاده از مدل‌های مکانی، مانند CA-Markov و DINAMICA امکان ارزیابی اثر توسعه بر محیط زیست و کیفیت زندگی را فراهم می‌آورد (Ribeiro et al., 2024). این مدل‌ها بر اساس داده‌های ماهواره‌ای، نقشه‌های زمین و شاخص‌های جمعیتی و اقتصادی سناریوهای آینده را شبیه‌سازی می‌کنند و به تصمیم‌گیران امکان می‌دهند تا سیاست‌های توسعه شهری را با اهداف پایداری هم‌سو کنند. همچنین ادغام یادگیری ماشینی و سامانه‌های اطلاعات مکانی دقت تحلیل‌ها را افزایش می‌دهد و امکان ارزیابی آثار زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی تغییرات کاربری زمین را فراهم می‌سازد (Boulila et al., 2021; Gaur & Singh, 2023).

در سطح نظری، این پژوهش بر نظریه‌های پایداری شهری مبتنی است. پایداری شهری شامل سه بُعد اصلی اقتصاد، جامعه و محیط زیست است و توسعه شهری پایدار باید تعادل میان این سه بُعد را برقرار کند (Guite, 2019). افزایش مناطق ساخته‌شده بدون برنامه‌ریزی اغلب با نابودی زیستگاه‌های طبیعی، کاهش منابع آب و خاک و افزایش مشکلات حمل‌ونقل همراه است که این موضوع باعث کاهش کیفیت زندگی و تهدید سلامت محیط شهری می‌شود (Winkler et al., 2021). از سوی دیگر، مدیریت شهری و سیاست‌های هدایت توسعه می‌تواند فشار بر منابع زمین و اکوسیستم‌ها را کاهش دهد و توسعه را به سمت بهره‌وری و تعادل با محیط زیست هدایت کند (Hu et al., 2023).

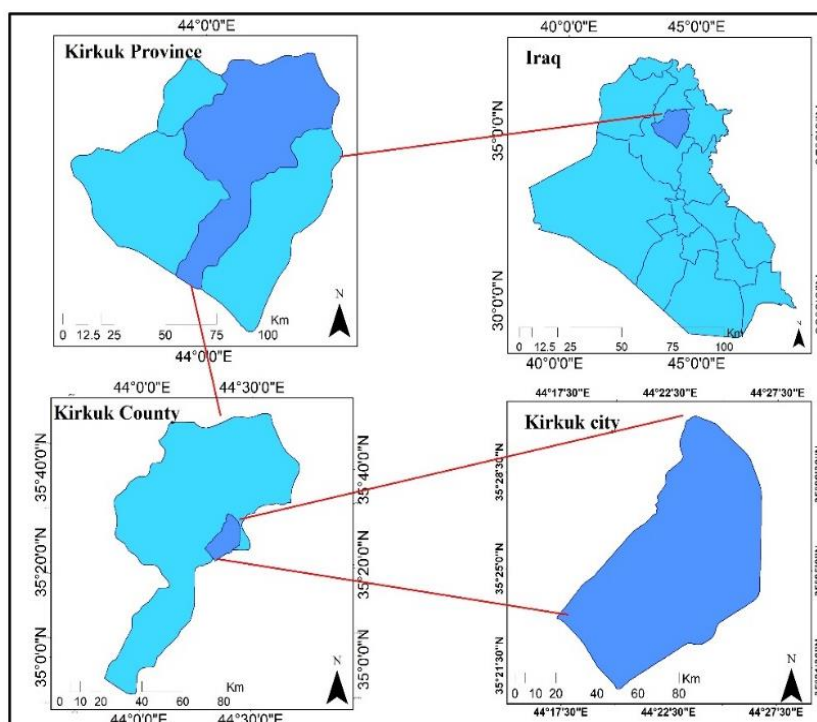
پژوهش‌های منطقه‌ای و ملی، از جمله مطالعات شهر کرکوک، نشان می‌دهند که فقدان چارچوب‌های نظارتی و هماهنگی بین نهادهای شهری موجب رشد پراکنده و غیررسمی می‌شود و اثر اقتصادی و اجتماعی منفی به همراه دارد. بنابراین، پیش‌بینی روندهای توسعه شهری با استفاده از ابزارهای GIS و RS، تحلیل کاربری زمین و سناریوهای آینده می‌تواند راهگشای تصمیم‌گیری در حوزه سیاست‌گذاری شهری باشد (Shareef et al., 2019).

محدوده پژوهش

شهر کرکوک، واقع در شمال عراق، در محدوده‌ای بین عرض‌های جغرافیایی ۳۵° ۲۸' تا ۳۵° ۳۱' شمالی و طول‌های ۴۴° ۲۲' تا ۴۴° ۲۷' شرقی قرار گرفته است. این شهر در منطقه‌ای واقع شده است که از یک سو به دشتهای مرکزی عراق و از سوی دیگر به تپه‌های دامنه کوه‌های زاگرس منتهی می‌شود و با ارتفاعی میانگین حدود ۳۵۰ متر از سطح دریا جایگاهی ژئوپلیتیکی میان شهرهای مهمی چون بغداد، اربیل و سلیمانیه یافته است (Jasim et al., 2020: 6). برآوردها نشان می‌دهد که مساحت محدوده شهری کرکوک تا سال ۲۰۲۰ در حدود ۱۹۲ کیلومتر مربع بوده که به دلیل روند پرشتاب گسترش افقی این مقدار در حال افزایش مستمر است (Taha et al., 2024).

از نظر اقلیمی، کرکوک در پهنه‌ای با آب‌وهوای نیمه‌خشک قرار دارد. تابستان‌ها عموماً گرم و خشک و زمستان‌ها سرد و نسبتاً مرطوب است. میانگین دمای سالیانه در حدود ۲۲ درجه سانتی‌گراد و میزان بارش سالیانه در حدود ۴۰۰ میلی‌متر

گزارش شده که این شرایط اقلیمی به طور مستقیم بر الگوهای کاربری زمین، به ویژه در عرصه‌های کشاورزی و فضای سبز شهری، تأثیر می‌گذارد (Ahmed et al., 2017). جمعیت شهر طبق آخرین سرشماری‌ها از ۱/۲ میلیون نفر فراتر رفته و نرخ رشد سالیانه جمعیت شهری طی بیست سال گذشته به طور میانگین حدود ۲/۷ درصد بوده است (UN-Habitat, 2022: 33). بافت کالبدی کرکوک ترکیبی از مناطق مسکونی پرتراکم، اراضی کشاورزی، پهنه‌های صنعتی و فضاهای باز را در بر می‌گیرد. در این میان، نواحی شرقی شهر بیشتر شاهد توسعه متراکم و برنامه‌ریزی شده بوده‌اند، در حالی که مناطق غربی عمدتاً به اراضی بایر یا زمین‌های زراعی اختصاص دارند (Aja, 2025). در سال‌های اخیر، مساحت محدوده‌های ساخته‌شده در کرکوک تقریباً دو برابر شده که این گسترش اغلب با از بین رفتن اراضی کشاورزی با ارزش بالا همراه بوده است (Abdallatif et al., 2025).



شکل ۱. محدوده پژوهش

روش پژوهش

پژوهش حاضر از نوع کاربردی است و از لحاظ روش‌شناسی در زمره مطالعات کمی-مکانی قرار می‌گیرد. هدف اصلی بررسی گسترش کالبدی شهر و سنجش تغییرات کاربری اراضی در بازه‌های زمانی با تکیه بر داده‌های سنجش از دور (RS) و تحلیل‌های مکانی در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) است. برای این منظور، از تکنیک‌های پیش‌پردازش تصاویر، طبقه‌بندی پیشرفته با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SV) و مدل‌سازی آینده‌نگر با استفاده از مدل CA-Markov بهره گرفته شده است.

جدول ۱. ویژگی تصاویر ماهواره‌ای

ماهواره	سنجنده	قدرت تفکیک مکانی	تاریخ تصویر برداری	تعداد باندها	ردیف	گذر
Landsat 5	TM	۳۰	۱۹۹۰	۷	۳۵	۱۶۹
Landsat 8	OLI/TIRS	۳۰	۲۰۲۴	۱۱	۳۵	۱۶۹

آماده‌سازی داده‌ها و پیش‌پردازش

تصاویر ماهواره‌ای Landsat 5 TM و Landsat 8 OLI مربوط به سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۴ از سامانه USGS EarthExplorer استخراج شدند. این تصاویر دارای قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر بوده‌اند و برای دقت بالاتر در چند مرحله پیش‌پردازش شدند:

الف) تصحیح رادیومتریکی

برای تبدیل داده‌های خام به بازتابندگی قابل تحلیل، ابتدا تبدیل مقدار DN به درخشندگی انجام گرفت:

$$L_{\lambda} = \frac{(L_{max} - L_{min})}{Q_{cal\ max} - Q_{cal\ min}} \times (Q_{cal} - Q_{cal\ min}) + L_{min} \quad (1)$$

که در آن L_{λ} : درخشندگی طیفی، Q_{cal} : مقدار عددی دیجیتال، L_{max} ، L_{min} : بیشینه و کمینه درخشندگی باند، $Q_{cal\ max}$ ، $Q_{cal\ min}$: بیشینه و کمینه مقادیر DN هستند (Chander et al., 2009: 6). سپس مقدار بازتابندگی سطحی بدین صورت محاسبه شد:

$$\rho = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN \cdot \cos(\theta_s)} \quad (2)$$

که در آن ρ : بازتابندگی، ρ : فاصله زمین تا خورشید (بر حسب AU)، ESUN: انرژی خورشیدی باند، θ_s : زاویه خورشید هستند (Chander et al., 2009: 9).

ب) تصحیح هندسی

برای تصحیح هندسی ناشی از حرکت ماهواره و توپوگرافی، روش Rectification مبتنی بر نقاط کنترل زمینی (GCP) و مدل UTM استفاده شد. خطای RMSE کمتر از ۰/۵ پیکسل به عنوان معیار دقت پذیرفته شد (Wu et al., 2015).

طبقه‌بندی تصاویر با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM)

ماشین بردار پشتیبان (SVM) یکی از روش‌های قدرتمند یادگیری ماشین است که در طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای بسیار کاربردی و دقیق شناخته شده است. این الگوریتم با هدف یافتن یک مرز تصمیم‌گیری بهینه سعی می‌کند کلاس‌های مختلف را با بیشترین فاصله ممکن از هم جدا کند (Mountrakis et al., 2011).

SVM در اصل یک طبقه‌بند دودویی است. اما از طریق تکنیک‌هایی مانند One-vs-One و One-vs-All برای طبقه‌بندی چندکلاسه نیز به کار می‌رود. در مطالعات سنجش از دور، تصاویر ماهواره‌ای دارای ویژگی‌هایی مانند غیرخطی بودن، هم‌پوشانی طیفی بین کلاس‌ها و پیچیدگی آماری هستند. بنابراین SVM با هسته‌های غیرخطی مانند RBF عملکرد بسیار بهتری نسبت به روش‌هایی مانند حداکثر احتمال دارد (Pal & Mather, 2005).

در این پژوهش، برای طبقه‌بندی تصاویر لندست در محیط نرم‌افزار ENVI از SVM با کرنل RBF^۱ استفاده شد. فرمول کرنل RBF به صورت رابطه ۳ است:

$$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2) \quad (3)$$

که در آن x_i ، x_j : بردارهای ویژگی (پیکسل‌ها) و γ : پارامتر کرنل است که نقش کنترل «شعاع تأثیر» هر بردار را دارد (Huang et al., 2002: 387). در این پژوهش، تصاویر ماهواره‌ای لندست در سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۴ به کمک مدل SVM طبقه‌بندی شدند. کلاس‌های مورد نظر شامل اراضی شهری/ ساخته‌شده، اراضی کشاورزی، آب و اراضی بایر بودند. دقت طبقه‌بندی با استفاده از ماتریس خطا، شاخص Kappa و دقت کلی^۲ ارزیابی شد.

1. radial basis function
2. overall accuracy

پیش‌بینی تغییرات با مدل CA-Markov

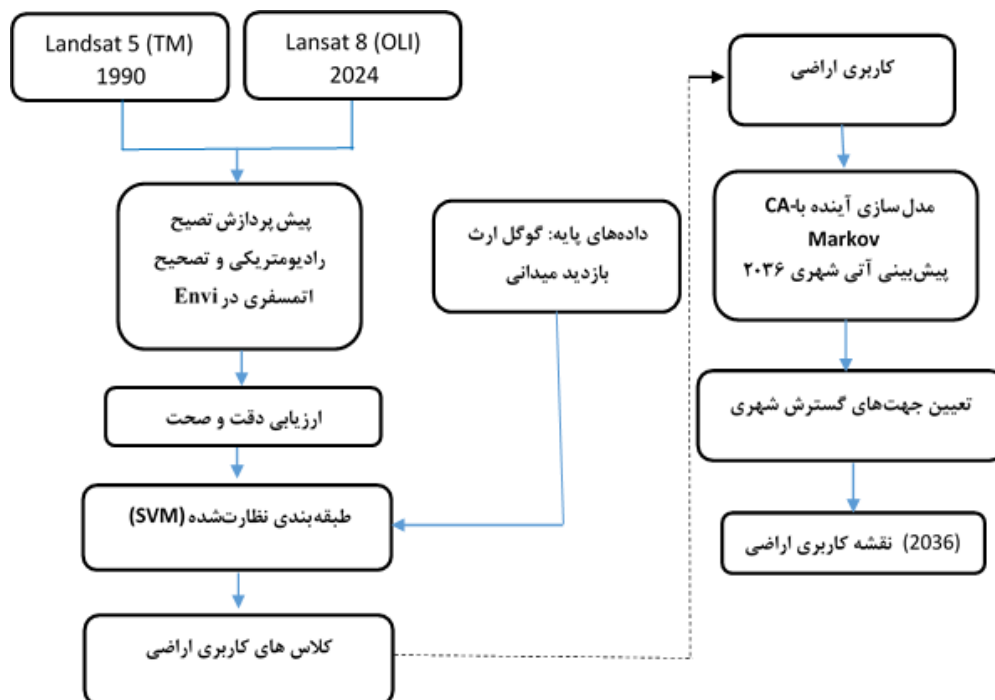
برای پیش‌بینی تغییرات آتی کاربری اراضی تا سال ۲۰۳۶، از مدل CA-Markov استفاده شد که ترکیبی از دو جزء زنجیره مارکوف و اتوماتای سلولی است (Boulila et al., 2021). در این مدل، احتمال انتقال بین کلاس‌های مختلف کاربری با استفاده از ماتریس انتقال مارکوف محاسبه می‌شود:

$$P(t+1) = P(t) \cdot T \quad (4)$$

که در آن $P(t)$ توزیع کاربری زمین در زمان (t) و T ماتریس احتمال انتقال است (Boulila et al., 2021). بخش اتوماتای سلولی (CA)، با اعمال قواعد مکانی، تغییرات فضایی و جهت‌گیری توسعه را لحاظ می‌کند (Boulila et al., 2021). مدل با استفاده از نرم‌افزار IDRISI اجرا شد.

تحلیل فضایی و ارزیابی نتایج

برای ارزیابی تغییرات کاربری اراضی، از محیط ArcGIS Pro و ابزارهای آماری مکانی استفاده شد. مساحت طبقات و الگوهای گسترش شهری در جهت‌های جغرافیایی مختلف تحلیل شدند. در آخر با تحلیل نتایج مدل‌ها ارتباط میان گسترش شهری و تغییر کاربری اراضی تبیین شد و پیامدهای این تغییرات در زمینه‌های اجتماعی، زیست‌محیطی و برنامه‌ریزی شهری مورد بحث قرار گرفت. این روش تحقیق، ضمن تلفیق داده‌های مکانی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، بستری برای تصمیم‌گیری آگاهانه در زمینه مدیریت زمین و برنامه‌ریزی شهری فراهم می‌آورد.



شکل ۲. مراحل پژوهش

یافته‌های پژوهش

تحلیل طبقه‌بندی کاربری اراضی کرکوک در سال ۱۹۹۰

نتایج حاصل از طبقه‌بندی تصویر ماهواره‌ای لندست مربوط به سال ۱۹۹۰ نشان می‌دهد که الگوی توزیع کاربری اراضی در محدوده شهری کرکوک در این بازه زمانی به طور غالب در تسلط اراضی بایر و فاقد بهره‌برداری مشخص قرار داشته است. بر اساس نتایج پردازش تصویر در محیط نرم‌افزار ENVI و استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) اراضی بایر با سهمی بالغ بر ۸۸/۸۴ درصد از کل سطح منطقه بیشترین سطح پوشش را به خود اختصاص داده‌اند. این طبقه بخش اعظم فضای

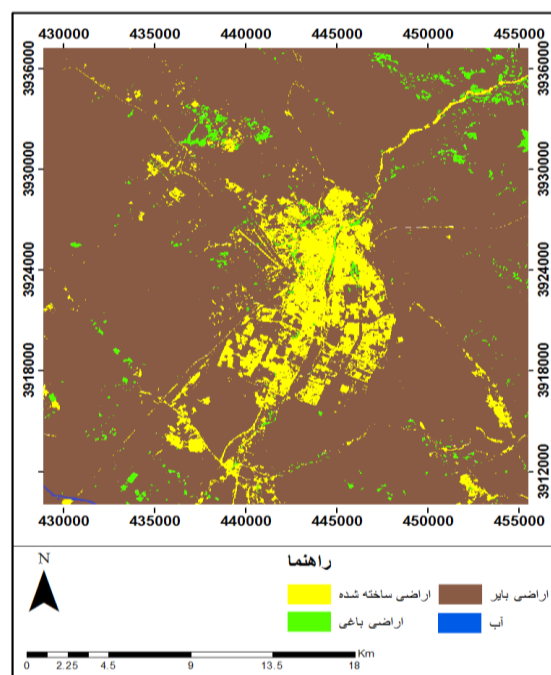
پیرامونی و حتی نواحی درون‌شهری کرکوک را شامل می‌شود که دلالت بر توسعه‌نیافتگی کالبدی و تمرکز فعالیت‌های اقتصادی در هسته مرکزی دارد.

پس از این طبقه، اراضی ساخته‌شده (مناطق توسعه‌یافته شهری) با سهمی در حدود ۸/۶۳ درصد در رتبه دوم قرار دارند. این مقدار نشان‌دهنده آن است که در سال ۱۹۹۰، توسعه فیزیکی شهر کرکوک هنوز در مراحل ابتدایی خود قرار داشته و تمرکز ساخت‌وسازها در بخشی محدود از بافت مرکزی شهر متمرکز بوده است. بررسی فضایی نشان می‌دهد که این مناطق بیشتر در بخش‌های شرقی و شمال شرقی شهر پراکنده شده‌اند. در رتبه سوم، اراضی باغی و فضای سبز کشاورزی با سهمی حدود ۲/۴۰ درصد از کل مساحت منطقه به ثبت رسیده‌اند. این میزان کم بیانگر آن است که به‌رغم وجود ظرفیت‌های بالقوه برای توسعه فضای سبز ساختار اکولوژیکی و کشاورزی کرکوک در آن زمان بسیار محدود بوده است. در آخر، طبقه سطح آب (آب‌های سطحی و رودخانه‌ای) با پایین‌ترین میزان ممکن، معادل تنها ۰/۱۳ درصد از مساحت منطقه، کمترین گستردگی فضایی را دارد. این موضوع نیز مؤید وضعیت اقلیمی نیمه‌خشک منطقه و فقدان منابع آبی گسترده در محدوده شهری است.

این نتایج نشان می‌دهند که در سال ۱۹۹۰ شهر کرکوک از منظر توسعه کالبدی و تنوع کاربری اراضی در سطحی ابتدایی قرار داشته است و فضای غالب آن را اراضی بایر و غیر قابل بهره‌برداری تشکیل می‌داده‌اند. چنین الگویی زمینه‌ساز تحلیل دقیق‌تر روندهای گسترش شهری در دهه‌های بعد، به‌ویژه در مقایسه با سال‌های ۲۰۲۴، خواهد بود و می‌تواند به عنوان مبنایی برای سنجش نرخ تبدیل کاربری‌ها و افزایش سکونتگاه‌های شهری مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۲. مساحت اراضی طبقه‌بندی‌شده شهر کرکوک در سال ۱۹۹۰

کاربری	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)
اراضی ساخته‌شده	۶۶/۷۷۳	۸/۶۳
اراضی باغی	۱۸/۵۹۹	۲/۴۰
اراضی بایر	۶۸۷/۴۷۵	۸۸/۸۴
آب	۰/۸۹۳	۰/۱۳



شکل ۳. نقشه اراضی طبقه‌بندی‌شده شهر کرکوک در سال ۱۹۹۰

تحلیل طبقه‌بندی کاربری اراضی کرکوک در سال ۲۰۲۴

در سال ۲۰۲۴، اراضی بایر، با وجود روند کاهشی نسبت به دوره قبل، بیشترین طبقات کاربری اراضی را با ۷۴ درصد مساحت از سطح منطقه مورد پوشش قرار داده است. همچنین اراضی ساخته‌شده با روند رو به رشد خود، ۱۹/۶۱ درصد مساحت منطقه، سهم مهمی را به خود اختصاص داده است و پیش‌روی را به سوی قسمت‌های جنوبی منطقه در بر گرفته است. اراضی باغی در حدود ۵/۰۲ درصد بوده که نسبت به دوره قبل روند افزایشی داشته است و پهنه آبی در این دوره به دلیل ایجاد سد در قسمت شمال شرقی شهر کرکوک در حدود ۰/۵۲ درصد است.

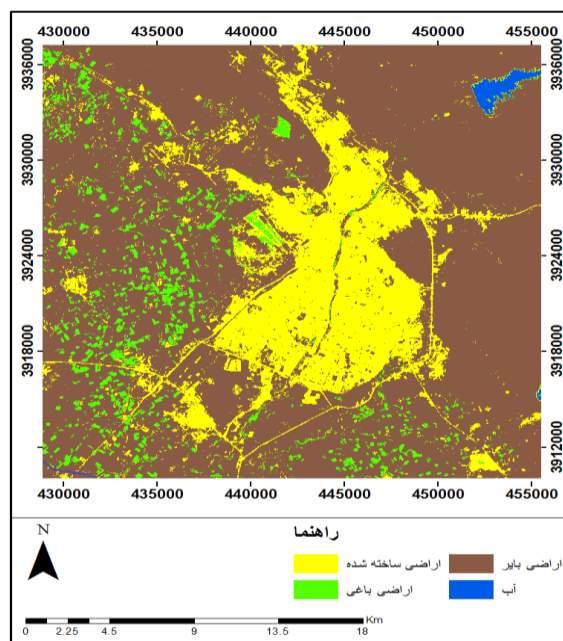
بررسی تصویر طبقه‌بندی‌شده مربوط به سال ۲۰۲۴ نشان‌دهنده تغییرات چشمگیر در ساختار فضایی و الگوهای کاربری اراضی شهر کرکوک در مقایسه با سال ۱۹۹۰ است. به‌رغم کاهش نسبی در سهم اراضی بایر، این طبقه همچنان غالب‌ترین نوع کاربری در منطقه به شمار می‌رود؛ طوری که حدود ۷۴ درصد از سطح کل محدوده مطالعه را در بر می‌گیرد. این میزان، گرچه نسبت به دوره قبل کاهش یافته، همچنان حاکی از وجود حجم گسترده‌ای از اراضی بی‌استفاده و فرصت‌های بالقوه برای توسعه‌های آینده است. توزیع فضایی این اراضی به‌ویژه در بخش‌های شمالی و شمال‌غربی شهر متمرکز شده و به دلیل کمبود زیرساخت و خدمات شهری هنوز توسعه کالبدی به صورت یکنواخت به این نواحی نفوذ نکرده است. در مقابل، اراضی ساخته‌شده، با رشدی قابل‌توجه نسبت به سال‌های گذشته، اکنون ۱۹/۷۷ درصد از کل مساحت منطقه را به خود اختصاص داده است. این روند افزایشی بیانگر توسعه فزاینده سکونتگاه‌ها، گسترش زیرساخت‌ها، افزایش تراکم ساختمانی و تغییر کاربری فضاهای بایر به مناطق مسکونی و تجاری است. تحلیل‌های مکانی حاکی از آن است که این توسعه اغلب در راستای محورهای جنوبی شهر صورت گرفته و پهنه‌های تازه‌ساخت در حاشیه جاده‌های اصلی و پیرامون نواحی صنعتی در حال شکل‌گیری هستند. این پدیده ضمن افزایش بار بر خدمات شهری، نشانگر فشار جمعیتی و نیاز به سیاست‌گذاری برای رشد پایدار شهری است.

اراضی باغی و کشاورزی نیز با سهمی در حدود ۵/۰۲ درصد نسبت به سال ۱۹۹۰ روندی افزایشی را تجربه کرده‌اند. به نظر می‌رسد بخشی از این رشد ناشی از بازسازی و بهره‌برداری مجدد از اراضی متروکه کشاورزی، ارتقای شیوه‌های آبیاری، و نیز تغییر نگرش به فضای سبز شهری بوده باشد. این طبقه عمدتاً در بخش‌های جنوب‌غربی و حاشیه رودخانه‌های محلی گسترش یافته و نقشی مهم در حفظ تعادل اکولوژیکی و تأمین محصولات کشاورزی محلی ایفا می‌کند. در آخر، پهنه آبی که در سال‌های پیشین سهمی بسیار اندک داشت، در سال ۲۰۲۴ با ۰/۵۳ درصد مساحت، به‌ویژه به دلیل احداث یک سد جدید در قسمت شمال‌شرقی شهر، رشد قابل‌توجهی را نشان داده است. این تغییر نه‌تنها بر توازن کاربری اراضی تأثیر گذاشته، بلکه فرصت‌هایی برای توسعه منابع آبی، کشاورزی و گردشگری شهری نیز فراهم کرده است. ایجاد این سد موجب افزایش ذخیره آب، تعدیل دمای محلی و بهبود شرایط اقلیمی در مجاورت آن شده است که در ارزیابی آثار زیست‌محیطی توسعه شهری اهمیت دارد.

به طور کلی، تغییر الگوی توزیع کاربری اراضی در سال ۲۰۲۴ حاکی از روند حرکت کرکوک به سوی توسعه کالبدی پرشتاب و در عین حال افزایش چالش‌های مدیریتی در عرصه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی است. تداوم این روند بدون برنامه‌ریزی فضایی جامع می‌تواند منجر به تشدید نابرابری فضایی، نابودی اراضی ارزشمند کشاورزی و افزایش مخاطرات محیطی شود. بنابراین تحلیل دقیق این تغییرات از طریق تلفیق تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌سازی مکانی ابزار مهمی برای سیاست‌گذاران در مسیر توسعه پایدار شهر به شمار می‌رود.

جدول ۳. مساحت اراضی طبقه‌بندی‌شده شهر کرکوک در سال ۲۰۲۴

کاربری	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)
اراضی ساخته‌شده	۱۵۱/۷۴۶	۱۹/۷۷
اراضی باغی	۳۸/۸۴۹	۵/۰۲
اراضی بایر	۵۷۹/۱۵۴	۷۴/۶۸
آب	۴/۰۸۴	۰/۵۳



شکل ۴. نقشه اراضی طبقه‌بندی شده شهر کرکوک در سال ۲۰۲۴

برای ارزیابی صحت نتایج طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای در این پژوهش، از دو شاخص استاندارد یعنی دقت کلی و ضریب کاپا^۱ استفاده شده است. این شاخص‌ها از جمله معیارهای استاندارد در سنجش اعتبار طبقه‌بندی تصاویر سنجش از دور به شمار می‌روند و در مطالعات مختلف به عنوان ابزار اصلی ارزیابی عملکرد مدل‌های طبقه‌بندی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Congalton & Green, 2019: 84; Belgiu & Drăguț, 2016: 28). دقت کلی نشان‌دهنده نسبت تعداد پیکسل‌های به‌درستی طبقه‌بندی شده به کل پیکسل‌ها است. درحالی‌که، ضریب کاپا میزان توافق طبقه‌بندی شده واقعی و پیش‌بینی شده را با در نظر گرفتن احتمال توافق تصادفی مشخص می‌کند (Basheer et al., 2022).

بر اساس داده‌های حاصل از ارزیابی طبقه‌بندی سال ۱۹۹۰ (مطابق جدول ۴) مقدار دقت کلی برابر با ۸۸ درصد و ضریب کاپا معادل ۰/۹۰ به دست آمده است. این ارقام گویای آن است که فرایند طبقه‌بندی دارای دقت بسیار مناسب و قابل اعتماد است و خطای طبقه‌بندی در سطح قابل قبولی قرار دارد. همچنین توزیع پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی شده در نقشه خروجی تطابق بالایی با داده‌های واقعی زمینی داشته است، که نشان از عملکرد موفق الگوریتم مورد استفاده دارد.

در مرحله بعد، طبقه‌بندی انجام شده بر روی تصاویر مربوط به سال ۲۰۲۴، دقت بالاتری را در مقایسه با سال پیشین نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که دقت کلی به ۹۱ درصد و ضریب کاپا به ۰/۹۴ افزایش یافته است. این ارتقای کیفی را می‌توان به بهبود کیفیت تصاویر نسبت داد. در واقع، افزایش مقدار کاپا به بیش از ۰/۹ از نمایانگر سطح توافق بسیار بالا میان نقشه تولیدی و داده‌های واقعی است که اعتبار تحلیل‌های بعدی مبتنی بر این طبقه‌بندی را به طور قابل ملاحظه‌ای تقویت می‌کند. نتایج فوق، نه تنها مؤید دقت مناسب طبقه‌بندی هستند، بلکه قابلیت اتکای مدل‌سازی مکانی را، در تحلیل تغییرات کاربری اراضی شهر کرکوک، طی دوره زمانی بلندمدت، دارد.

جدول ۴. دقت کلی و ضریب کاپا تصاویر

تصاویر	دقت کلی	ضریب کاپا
(۱۹۹۰)	۸۸	۰/۹۰
(۲۰۲۴)	۹۱	۰۹۴/۰۹۴

1. kappa coefficient

آنالیز تغییرات

یافته‌ها (جدول ۵) بیانگر تحولات قابل توجه در الگوی کاربری اراضی شهر کرکوک طی یک بازه سی و چهار ساله هستند. در این دوره، مساحت اراضی بایر با کاهش ۱۰۸/۳۲۱ هکتار به شکل قابل توجهی به سایر کاربری‌ها، به‌ویژه ساخت‌وساز شهری، اختصاص یافته است. اراضی ساخته‌شده با افزایش ۸۴/۹۷۳ هکتار بیشترین سهم از اراضی بایر را به خود اختصاص داده‌اند که نشانگر رشد افقی شهر و گسترش فیزیکی نواحی مسکونی است. همچنین افزایش ۲۰/۲۵ هکتار در اراضی باغی نشان‌دهنده تمایل به توسعه فضای سبز یا کشاورزی خرد در حاشیه شهر است. از سوی دیگر، رشد ۳/۱۹۱ هکتار پهنه آبی بیشتر به دلیل ساخت سد جدید در بخش شمال شرقی شهر در دوره اخیر است. این داده‌ها می‌توانند مبنایی قوی برای تحلیل روند تغییرات کاربری، مدل‌سازی آینده، و ارائه سیاست‌های توسعه پایدار در منطقه مورد مطالعه باشند.

جدول ۵. تحلیل تغییرات کاربری اراضی شهر کرکوک بین سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۴

میزان تغییرات	۲۰۲۴	۱۹۹۰
۸۴/۹۷۳	۱۵۱/۷۴۶	۶۶/۷۷۳
۲۰/۲۵	۳۸/۸۴۹	۱۸/۵۹۹
-۱۰۸/۳۲۱	۵۷۹/۱۵۴	۶۸۷/۴۷۵
۳/۱۹۱	۴/۰۸۴	۰/۸۹۳

شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی با مدل زنجیره مارکوف

در این پژوهش، به منظور پیش‌بینی تغییرات آتی کاربری اراضی در محدوده شهر کرکوک، از مدل زنجیره مارکوف^۱ بهره گرفته شد. این مدل یکی از روش‌های معتبر در شبیه‌سازی زمانی تغییرات در سیستم‌های مکانی است که به‌ویژه در مطالعات کاربری/پوشش زمین (LULC) کاربرد فراوان دارد (Eastman, 2016). زنجیره مارکوف بر پایه یک اصل آماری عمل می‌کند؛ که در آن احتمال انتقال از یک وضعیت (کلاس کاربری) به وضعیت دیگر تنها به وضعیت فعلی بستگی دارد و مستقل از مسیر طی شده است. این ویژگی باعث می‌شود مارکوف برای پیش‌بینی‌هایی که نیازمند بررسی روندهای تاریخی هستند گزینه‌ای مناسب باشد (Basheer et al., 2022).

در گام نخست، تصاویر طبقه‌بندی‌شده سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۴ به عنوان ورودی‌های پایه در مدل به کار گرفته شدند. تصویر سال ۱۹۹۰ به عنوان نقشه پایه و تصویر سال ۲۰۲۴ به عنوان نقشه پیرو در محیط نرم‌افزار IDRISI و ماژول LCM^۲ وارد شد. این دو نقشه اساس تولید ماتریس احتمال انتقال را شکل دادند. این ماتریس نشان می‌دهد که چه نسبتی از هر کلاس کاربری می‌تواند به کلاس‌های دیگر در دوره آتی (سال ۲۰۳۶) تبدیل شود.

جدول ۶. احتمال تغییرات کلاس‌های کاربری اراضی به کلاس دیگر از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴

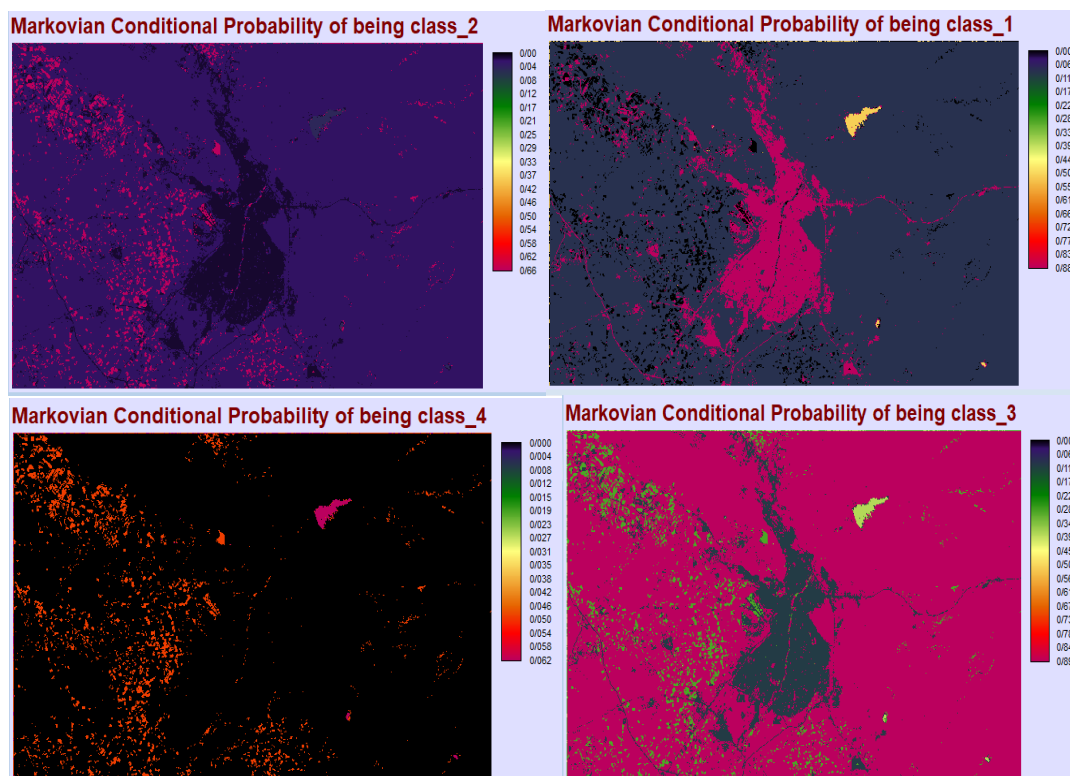
آب	اراضی بایر	اراضی باغی	اراضی ساخته‌شده	کاربری
۰/۰۰۰۰	۰/۱۰۴۵	۰/۰۱۲۲	۰/۸۸۳۲	اراضی ساخته‌شده
۰/۰۴۸۸	۰/۲۸۶۵	۰/۶۶۴۶	۰/۰۰۰۰	اراضی باغی
۰/۰۰۰۰	۰/۸۹۳۴	۰/۰۲۳۶	۰/۰۸۳۰	اراضی بایر
۰/۰۶۱۵	۰/۳۷۷۹	۰/۰۵۰۳	۰/۵۱۰۳	آب

تحلیل ماتریس تغییرات نشان داد که بیشترین احتمال انتقال به کلاس اراضی ساخته‌شده (شهری) با مقدار ۰/۸۸ (۸۸ درصد) مشاهده شد. این مقدار حاکی از پتانسیل بالای تغییر سایر کاربری‌ها به نواحی شهری در دهه آینده است. این رشد بیشتر در مناطق پیرامونی و حاشیه‌های جنوبی و جنوب‌غربی شهر پیش‌بینی می‌شود، جایی که زیرساخت‌ها در حال گسترش و جمعیت در حال تمرکز است.

از سوی دیگر، احتمال باقی ماندن یا تبدیل سایر کاربری‌ها نیز بدین شرح است: احتمال انتقال یا حفظ اراضی باغی برابر با

1. markov chain model
2. land change modeler

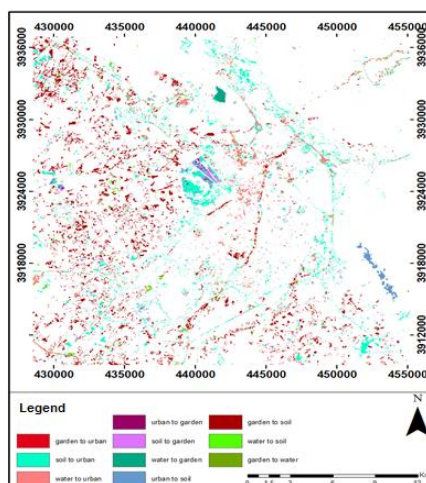
۰/۶۶ (۶۶ درصد) است که نشان‌دهنده نوسانات بالای این کلاس تحت تأثیر توسعه شهری و تغییر در نیازهای مصرف زمین است. اراضی بایر با احتمال ۰/۸۹ (۸۹ درصد) همچنان بیشترین سهم فضایی را حفظ خواهند کرد، اما هم‌زمان در معرض تغییرات بالقوه به مناطق شهری هستند. پهنه‌های آبی با احتمال ۰/۰۶ (۶ درصد) کمترین احتمال تغییر را دارند که این مسئله می‌تواند به ثبات طبیعی منابع آب یا محدودیت‌های توسعه‌ای در این نواحی مربوط باشد.



شکل ۵. احتمال تغییرات کاربری اراضی

اراضی ساخته‌شده (CLASS-1)، اراضی باغی (CLASS-2)، اراضی بایر (CLASS-3)، آب (CLASS-4)

در آخر، تحلیل زنجیره مارکوف در این تحقیق چارچوبی کمی و قابل اتکا برای پیش‌بینی روند توسعه شهری فراهم آورد و توانست به کمک ابزارهای سنجش از دور و GIS تصویری روشن از جهت‌گیری آتی استفاده از زمین در شهر کرکوک ارائه دهد. این پیش‌بینی می‌تواند مبنایی مناسب برای مدیریت پایدار زمین و برنامه‌ریزی شهری در افق ۲۰۳۶ را فراهم آورد.



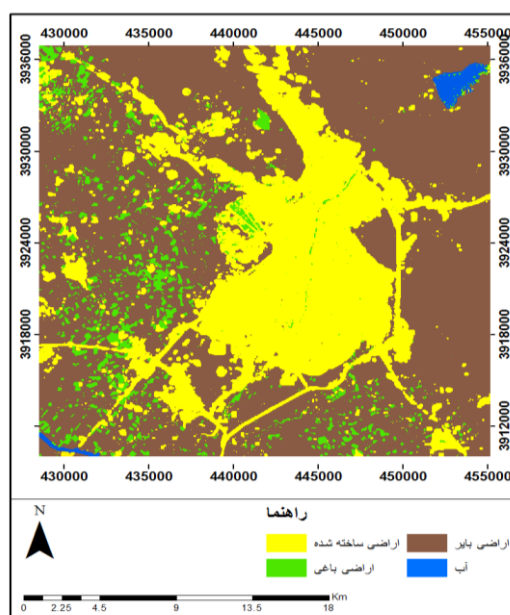
شکل ۶. تغییرات کلاس‌های کاربری به کلاس دیگر از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴

با هدف پیش‌بینی تغییرات مکانی و زمانی کاربری اراضی در افق ۲۰۳۶، از مدل ترکیبی CA-Markov استفاده شد. پس از تهیه نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده مربوط به سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۴ و محاسبه ماتریس احتمال تغییرات، مدل وارد مرحله شبیه‌سازی ساختار فضایی آتی با در نظر گرفتن همسایگی مکانی شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که اراضی شهری از ۷۴۶/۱۵۱ هکتار در سال ۲۰۲۴ به ۲۲۳/۸۷ هکتار در سال ۲۰۳۶ افزایش خواهند یافت؛ این به معنای رشدی برابر با ۷۲/۱۲ هکتار طی این دوره است. در مقابل، اراضی بایر که تا سال ۲۰۲۴ مساحت ۵۷۹/۱۵ هکتار را شامل می‌شدند، در سال ۲۰۳۶، به ۵۰/۴۹ هکتار کاهش پیدا می‌کنند. این نشان‌دهنده کاهش ۷۹/۳۴ هکتاری است. همچنین، اراضی آبی از ۴/۰۸۴ هکتار به ۷/۵۷ هکتار افزایش یافته‌اند که ممکن است به توسعه منابع آب سطحی، مانند ساخت سدها، مرتبط باشد. اراضی باغی نیز از ۳۸/۸۴۹ هکتار به ۴۱/۸۹ هکتار افزایش نشان داده‌اند، که بیانگر گسترش تدریجی فضاهای سبز در حاشیه شهر است.

نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های پژوهش‌های مشابه هم‌خوانی دارد؛ به‌ویژه در زمینه رشد شدید نواحی شهری و کاهش پوشش‌های سبز و کشاورزی (Ahmed., 2017; Ribeiro et al., 2024). همچنین، مطالعات مختلف تأکید کرده‌اند که در شهرهایی با نرخ بالای مهاجرت و توسعه زیرساختی احتمال تبدیل کاربری به مناطق ساخته‌شده بیش از سایر انواع کاربری است (Diaconu et al., 2025). این تغییرات، گواهی بر پویایی ساختار فضایی شهر کرکوک در طی دوره مورد مطالعه هستند و نشان می‌دهند که رشد شهرنشینی، کاهش اراضی بایر، و توسعه مناطق مسکونی و سبز در دستور کار پوشش‌های فضایی منطقه قرار گرفته‌اند. نتایج به‌دست‌آمده می‌توانند مبنایی مؤثر برای سیاست‌گذاری در حوزه برنامه‌ریزی شهری، مدیریت منابع زمین و حفاظت از اراضی کشاورزی در آینده باشند.

جدول ۷. پیش‌بینی سهم کاربری اراضی شهر کرکوک برای سال ۲۰۳۶

کاربری	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)
اراضی ساخته‌شده	۲۲۳/۸۷	۲۸/۹۳
اراضی باغی	۴۱/۸۹	۵/۴۱
اراضی بایر	۵۰/۴۹	۶۴/۶۸
آب	۷/۵۷	۰/۹۸



شکل ۷. پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از روش ترکیب زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار سال ۲۰۳۶

نتیجه

نتایج بررسی داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی شهر کرکوک در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴، همراه با شبیه‌سازی پیش‌بینی سال ۲۰۳۶، نشان‌دهنده روندهای قابل تأمل در گسترش افقی شهر و کاهش اراضی طبیعی و کشاورزی است. طی این دوره، درصد اراضی ساخته‌شده از حدود ۸/۶ درصد به بیش از ۱۹/۷ درصد افزایش یافته است؛ درحالی‌که اراضی بایر با وجود کاهش همچنان در سال ۲۰۲۴ بیش از ۷۴ درصد از مساحت منطقه را شامل می‌شوند. این تحولات ناشی از عوامل متعددی بوده است، از جمله مهاجرت‌های پس از جنگ، رشد جمعیت، توسعه زیرساخت‌ها، و افزایش سکونتگاه‌های غیررسمی در مناطق پیرامونی شهر. تحلیل ماتریس انتقال مارکوف و مدل CA-Markov نشان می‌دهد که روند توسعه شهری تا سال ۲۰۳۶ همچنان ادامه خواهد داشت و با شدت بیشتری دنبال می‌شود. بر اساس نتایج، پیش‌بینی شده است که اراضی ساخته‌شده نسبت به سال ۲۰۲۴ به میزان ۷۲ هکتار افزایش یابد و به ۲۲۳ هکتار برسد. در مقابل، کاهش قابل توجهی در اراضی بایر رخ خواهد داد؛ طوری که این اراضی به حدود ۵۰۰ هکتار محدود می‌شوند. همچنین تغییرات مثبت در اراضی باغی مشاهده شده است که مساحت آن از ۳۸/۸ هکتار به ۴۱/۸ هکتار افزایش می‌یابد. پهنه‌های آبی نیز از ۴ هکتار به ۷/۵ هکتار گسترش خواهند یافت که احتمالاً نتیجه‌ای از مداخلات انسانی، احداث سدها و اصلاح الگوهای استفاده از زمین است.

این یافته‌ها تأیید می‌کنند که رشد سریع و بدون برنامه‌ریزی مناطق شهری، همانند سایر مطالعات مشابه در کشورهای در حال توسعه، تهدیدی جدی برای پایداری منابع طبیعی، امنیت غذایی و زیست‌بوم منطقه محسوب می‌شود (Shah et al., 2021; Wu et al., 2015; Ribeiro et al., 2024). با وجود برخی بهبودهای جزئی در اراضی باغی و منابع آبی، استمرار توسعه غیرمنظم شهری می‌تواند فشارهای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی را تشدید کند و منجر به افزایش هزینه‌های مدیریت شهری و کاهش کیفیت زندگی شود. بر اساس نتایج این پژوهش، سیاست‌گذاری‌های آینده باید به چند محور اصلی توجه داشته باشند: کنترل گسترش افقی شهر از طریق محدودسازی توسعه پراکنده، حفاظت از اراضی کشاورزی و طبیعی، ارتقای کیفیت و توزیع خدمات شهری، تشویق به توسعه عمودی و اجرای برنامه‌های بازآفرینی شهری، و بهره‌گیری مؤثر از ابزارهای سنجش از دور و مدل‌های پیش‌بینی مکانی برای مدیریت پایدار کاربری اراضی. این پیشنهادها با یافته‌های پژوهش‌های مشابه در شهرهای آسیایی و خاورمیانه همخوانی دارند و نشان می‌دهند که تلفیق داده‌های مکانی، مدل‌سازی پیش‌بینی و سیاست‌گذاری مبتنی بر شواهد راهکاری مؤثر برای هدایت توسعه شهری پایدار است (Gaur & Singh, 2023; Subasinghe et al., 2016). در نتیجه، این مطالعه نه تنها روند گذشته و آینده تغییرات کاربری اراضی کرکوک را روشن می‌سازد، بلکه چارچوب علمی و عملی برای تصمیم‌گیران فراهم می‌کند تا با اتخاذ سیاست‌های هوشمندانه آثار منفی توسعه شهری بر محیط زیست و جامعه کاهش یابد و شهر کرکوک به مسیر توسعه پایدار هدایت شود.

منابع

- Abdallatif, M. I., Omer; D. A., & Noori, A. M. (2024). Monitoring and prediction of land cover changes of Kirkuk City using machine learning and remote sensing data Available to Purchase. *The 5th International Conference On Civil And Environmental Engineering Technologies*. <https://doi.org/10.1063/5.0236482>
- Ahmed, S. H. (2017). Detection of urban expansion and its impact on land surface temperatures in Kirkuk, Iraq using remote sensing and GIS. BİNGÖL UNIVERSIT, *Department of Soil Science Plant Nutrition*.
- Ajaj, Q. M. (2025). Remote Sensing-based Land Surface Temperature Retrieval in Kirkuk City, Iraq Using GIS and TES Algorithm: A Climatic Concer. *Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 6 (4), 475-481.
- Alberti, M. (2005). The effects of urban patterns on ecosystem function. *Int. Reg. Sci. Rev.* 28, 168–192. <https://doi.org/10.1177/0160017605275160>
- Angel, S. (2023). Urban expansion: theory, evidence and practice. *Buildings & Cities*, 4 (1), 124-138. <https://doi.org/10.5334/bc.348>
- Arneth, A., Brown, C., & Rounsevell, M. D. A. (2014). Global models of human decision-making for land-based mitigation and adaptation assessment. *Nat. Clim. Chang.* 4, 550–557. <https://doi.org/10.1038/nclimate2250>
- Bajocco, S., De Angelis, A., Perini, L., Ferrara, A., & Salvati, L. (2012). The impact of land use/land cover changes on landdegradation dynamics: A mediterranean case study. *Environmental Management*, 49 (5), 980–989. <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9831-8>
- Basheer, S., Wang, X., Farooque, A. A., Nawaz, R. A., Liu, K., Adekanmbi, T., & Liu, S. (2022). Comparison of Land Use Land Cover Classifiers Using Different Satellite Imagery and Machine Learning Techniques. *Remote Sensing*, 14 (19), 4978. <https://doi.org/10.3390/rs14194978>
- Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>
- Bhatta, B. (2010). Causes and consequences of urban growth and sprawl. In *Analysis of Urban growth and sprawl from remote sensing data*. Berlin, Heidelberg: Springer, 17-36. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-05299-6>
- Boulila, W., Ghandorh, H., Khan, M. A., Ahmed, F., & Ahmad, J. (2021). A novel CNN-LSTM-based approach to predict urban expansion: Evaluation in Saudi Arabia. *ArXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.01695>
- Cahya, D.L., Martini, E., & Kasikoen, K.M. (2018). Urbanization and land use changes in peri-urban area using spatial analysis methods (case study: Ciawi urban areas, Bogor Regency). In *IOP conference series: Earth and environmental science*. IOP Publishing Ltd, 123, 12035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/123/1/012035>
- Cao, H., Liu, J., Fu, C., Zhang, W., Wang, G., Yang, G., & Luo, L. (2017). Urban Expansion and Its Impact on the Land Use Pattern in Xishuangbanna since the Reform and Opening up of China. *Remote Sens.* 9(137). <https://doi.org/10.3390/rs9020137>
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113 (5), 893–903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Chetry, V. (2022). Geospatial measurement of urban sprawl using multi-temporal datasets from 1991 to 2021: Case studies of four Indian medium-sized cities (Lucknow UA, Bhubaneswar UA, Raipur UA, Dehradun UA). *Environmental Monitoring and Assessment*, 194 (12), 860. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10542-6>
- Chughtai, A. H., Abbasi, H., & Karas, I. R. (2021). A review on change detection method and accuracy assessment for land use land cover. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100482. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100482>
- Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429052729>
- DAO. (2014). *Kirkuk Masterplan – Dar Al Omran*. Retrieved from.
- Diaconu, D. C., Peptenatu, D., Gruia, A. K., Grecu, A., Gruia, A. R., Gruia, M. F., Drăghici, C. C., Băloi, A. M., Alexandrescu, M. B., & Sibinescu, R. B. (2025). The Impact of Urban Expansion on Land Use in Emerging Territorial Systems: Case Study Bucharest-Ilfov, Romania. *Agriculture*, 15, 406. <https://doi.org/10.3390/agriculture15040406>
- Eastman, J. R. (2016). *TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System: Manual*. Clark Labs, Clark University. https://www.geocarto.com/TerrSet_Brochure.pdf
- Elmqvist, T., Fragkias, M., Goodness, J., Güneralp, B., Marcotullio, P. J., McDonald, R. I., Parnell, S., Schewenius, M., Sendstad, M., Seto, K., Wilkinson, C. (2013). *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities: A Global Assessment*. Dordrecht Heidelberg New York London: Springer Nature.

- Frenkel, A., & Ashkenazi, M. (2008). Measuring urban sprawl: How can we deal with it? *Environment and Planning: Planning & Design*, 35 (1), 56–79. <https://doi.org/10.1068/b32155>
- Gaur, S., & Singh, R. (2023). A Comprehensive Review on Land Use/Land Cover (LULC) Change Modeling for Urban Development: Current Status and Future Prospects. *Sustainability*, 15, 903. <https://doi.org/10.3390/su15020903>
- Gehad, T. Y., Omer, N. Q., & Abdulmajeed, N. S. (2024). Methodology for using multi-temporal Landsat images to monitor urban growth of Kirkuk Governorate. *Techniques*, 6 (2), 113–119. <https://doi.org/10.51173/jt.v6i2.1915>
- Guite, L. T. S. (2019). Assessment of urban sprawl in Bathinda city, India. *J. Urban Manag*, 8, 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2018.12.002>
- Gumma, M. K., Mohammad, I., Nedumaran, S., Whitbread, A., & Lagerkvist, C. J. (2017). Urban sprawl and adverse impacts on agricultural land: A case study on Hyderabad, India. *Remote Sensing*, 9 (11), 1–16. <https://doi.org/10.3390/rs9111136>
- Hishe, S., Bewket, W., Nyssen, J., & Lyimo, J. (2020). Analysing past land use land cover change and CA-Markov-based future modelling in the middle Suluh Valley, Northern Ethiopia. *Geocarto Int.* 35, 225–255. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1516241>
- Hu, S., Yang, Z., Andres, S., Torres, G., Wang, Z., Han, H., Wada, Y., Wanger, T.C., & Li, L. (2023). Converging trend of global urban land expansion sheds new light on sustainable development. *ArXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.02293>
- Huang, C., Davis, L. S., & Townshend, J. R. G. (2002). An assessment of support vector machines for land cover classification. *Remote Sensing*, 23 (4), 725–749. <https://doi.org/10.1080/01431160110040323>
- Islam, M. S., & Ahmed, R. (2012). Land use change prediction in Dhaka City using Gis aided markov chain modeling. *Life and Earth Science*, 6, 81–89. <https://doi.org/10.3329/jles.v6i0.9726>
- Jasim, A., Yassin Ezalden, N., & Ajaj, Q. M., Hasan, K. (2020). Comparative urban growth among various local jurisdictions of Kirkuk City from 2014 to 2016. *JSST*, 63 (2).
- Khan, Z., Saeed, A., & Bazai, M. H. (2020). Land use/land cover change detection and prediction using the CA-Markov model: A case study of Quetta city, Pakistan. *Geography and Social sciences*, 2 (2), 164-182
- Kilgarriff, P., Lemoy, R., & Caruso, G. (2020). Change in Artificial Land Use over time across European Cities: A rescaled radial perspective. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.08401>
- Lal Shrestha, H., Poude, N. S., Bajracharya, R. M., & Sitaula, B. K. (2019). Mapping and Modelling of Land Use Change in Nepal. *Forest and Livelihood*, 18 (1). <https://doi.org/10.3126/jfl.v18i1.59621>
- Long, Y., Liu, X., Luo, S., Luo, T., Hu, S., Zheng, Y., Shao, J., & Liu, X. (2023). Evolution and Prediction of Urban Fringe Areas Based on Logistic-CA-Markov Models: The Case of Wuhan City. *Land*, 12 (10), 1874. <https://doi.org/10.3390/land12101874>
- Millard-Ball, A., & Barrington-Leigh, C. (2020). *Want to fix urban sprawl? Ditch the cul-de-sac*, *Wired*. <https://www.wired.com/story/fix-urban-sprawl-ditch-cul-de-sac/>
- Mountrakis, G., Im, J., & Ogole, C. (2011). Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66 (3), 247–259. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001>
- Omar, N. Q., & Raheem, A. M. (2016). Determining the suitability trends for settlement based on multi criteria in Kirkuk, Iraq. *Open geospatial data, softw. stand.* 1, 10. <https://doi.org/10.1186/s40965-016-0011-2>
- Omer, N. Q., & Raheem, A. M. (2016). Determining the suitability trends for settlement based on multi criteria in Kirkuk, Iraq. *Open Geospatial Data*, 10. <https://doi.org/10.1186/s40965-016-0011-2>
- Pal, M., & Mather, P. M. (2005). Support vector machines for classification in remote sensing. *Remote Sensing*, 26 (5), 1007–1011. <https://doi.org/10.1080/01431160512331314083>
- Pampoore-Thampi, O., Varde, A. S., & Yu, D. (2021). *Mining GIS data to predict urban sprawl*. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2103.11338>
- Powers, R. P., & Jetz, W. (2019). Global habitat loss and extinction risk of terrestrial vertebrates under future land-use-change scenarios. *Nat. Clim. Chang*, 9, 323–329. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0406-z>
- Ribeiro, M. P., Viégas, V. S., de Mello, K., Soares, F. D. S., Valente, R. A., & Chen, D. (2024). Land use/land cover forecast and urban sprawl analysis in a Brazilian city in the Atlantic Forest Biome. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII, 3, 465–470. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-3-2024-465-2024>
- Rimal, B., Zhang, L., Keshtkar, H., Haack, B. N., Rijal, S., & Zhang, P. (2018a). Land use/land cover dynamics and modeling of urban land expansion by the integration of cellular automata and markov chain. *ISPRS Int. J. Geo Inf*, 7, 154. <https://doi.org/10.3390/ijgi7040154>
- Rimal, B., Zhang, L., Stork, N., Sloan, S., & Rijal, S. (2018b). Urban expansion occurred at the expense of agricultural lands in the Tarai region of Nepal from 1989 to 2016. *Sustainability*, 10, 1341. <https://doi.org/10.3390/su10051341>

- Samardzic-Petrovic, M., Dragicevic, S., Kovačević, M., Bajat, B. (2015). Modeling Urban Land Use Changes Using Support Vector Machines. *Transactions in GIS*, 25 (5). <https://doi.org/10.1111/tgis.12174>
- Shareef, M. A., Hassan, N. D., & Noori, A. M. (2019). Integrating GIS and fuzzy multi-criteria method to evaluate land degradation and their impact on the urban growth of Kirkuk city, Iraq. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 28 (15), 800–815.
- Siedentop, S., Schmidt, S., & Dunlop, A. (2022). Managing Urban Growth – an Overview of the Literature. *Raumforschung und Raumordnung*, 80 (6), 659-677. <https://doi.org/10.14512/rur.1653>
- Simkin, R. D., Seto, K. C., Mcdonald, R. I. & Jetz, W. (2022). Biodiversity impacts and conservation implications of urban land expansion projected to 2050. *Sustainability Science*, 119 (12), e2117297119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2117297119>
- Subasinghe, S., Estoque, R. C., & Murayama, Y. (2016). Spatiotemporal Analysis of Urban Growth Using GIS and Remote Sensing: A Case Study of the Colombo Metropolitan Area, Sri Lanka. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5 (11), 197. <https://doi.org/10.3390/ijgi5110197>
- Shah, F., Wei, L., Lashari, A. H., Islam, A., Khattak, L. H., & Rasool, U. (2021). Evaluation of land use and land cover Spatio-temporal change during rapid Urban sprawl from Lahore, Pakistan. *Urban Climate*, 39, 100931. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100931>
- Subedi, P., Subedi, K., & Thapa, B. (2013). Application of a hybrid cellular automaton – Markov (CA-Markov) model in land-use change prediction: a case study of Saddle Creek Drainage Basin, Florida. *Appl. Ecol. Environ. Sci*, 1, 126–132. <https://doi.org/10.12691/aees-1-6-5>
- Taha, T. S., & Omar, N. Q. (2024). Urban growth suitability index for Kirkuk City using remote sensing data and AHP-based GIS method. *The 5th International Conference On Civil And Environmental Engineering Technologies*. <https://doi.org/10.1063/5.0238433>
- Tariq, A., Mumtaz, F., Majeed, M., & Zeng, X. (2022). Spatio-temporal assessment of land use land cover based on trajectories and cellular automata Markov modelling and its impact on land surface temperature of Lahore district Pakistan. *Environ. Monit. Assess.* 195(1). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10738-w>
- UN-Habitat. (2022). *Kirkuk City Profile: Urban Recovery and Reconstruction*. United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat), Iraq Programme.
- Wang, H., Zheng, B., Liu, Y., & LiU, Y. (2020). Urban expansion patterns and their driving forces based on the center of gravity-GTWR model: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Geographical Sciences*, 30 (2), 297-318. <https://doi.org/10.1007/s11442-020-1729-4>
- Wang, S. W., Munkhnasan, L., & Lee, W. K. (2021). Land use and land cover change detection and prediction in Bhutan's high altitude city of Thimphu, using cellular automata and Markov chain. *Environ. Challenges*, 2, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100017>
- Wei, Y. D., & Ewing, R. (2018). Urban expansion, sprawl and inequality. *Landscape and Urban Planning*, 177, 259-265. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.05.021>
- Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M., & Herold, M. (2021). Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nature Communications*, 12. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2>
- Wu, Y., Li, S., & Yu, S. (2015). Monitoring urban expansion and its effects on land use and land cover changes in Guangzhou city, China: 1979–2013. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188 (1), 54. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5069-2>
- Zhang, J., Hou, Y., Dong, Y., Wang, C., & Chen, W. (2022). Land Use Change Simulation in Rapid Urbanizing Regions: A Case Study of Wuhan Urban Areas. *Environmental Research and Public Health*, 19 (14), 8785. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148785>