

شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی منطقه کلان‌شهری مشهد طی دوره ۱۳۶۲ تا ۱۴۰۸، با بهره‌گیری از

مدل MOLUSCE

باغبان، ساجده (دانشجوی دکترا جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران)

رهنما، محمدرحیم (استاد گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران)

اجزا شکوهی، محمد (گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران)

وحیدی، حسین (دانشگاه فردوسی مشهد)

چکیده

کلان‌شهر مشهد به عنوان دومین کلان‌شهر بزرگ ایران، گسترش فضایی پرسرعتی را تجربه می‌کند که این امر منجر به تغییرات زیادی در منطقه کلان‌شهری مشهد شده است. به همین منظور، این پژوهش با هدف شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی در منطقه کلان‌شهری مشهد، با استفاده از مدل MOLUSCE و به روش توصیفی-تحلیلی انجام شده است. در این راستا، ابتدا تغییرات کاربری اراضی در منطقه کلان‌شهری مشهد در بازه زمانی ۱۳۶۲ تا ۱۴۰۸ بررسی شده و سپس وضعیت آن تا سال ۱۴۰۸ با استفاده از مدل MOLUSCE در نرم‌افزار QGIS پیش‌بینی شده است. برای این منظور، تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌های لندست ۵ و ۸ با استفاده از روش حداکثر احتمال طبقه‌بندی شده و به پنج کلاس مناطق ساخته شده، فضای سبز و اراضی دارای پوشش گیاهی، اراضی بایر، پهنه‌های آبی و مناطق کوهستانی (صخره‌ای) تقسیم شده‌اند. نتایج بررسی تغییرات کاربری اراضی نشان می‌دهد که در این بازه زمانی، اراضی بایر و مناطق ساخته شده به ترتیب با ۱۵۰۹۹۳٫۷۴ هکتار (۷۳٫۹۲٪) و ۱۲۰۸۲۳٫۷۶ هکتار (۵۹٫۲۷٪) افزایش داشته‌اند، درحالی‌که فضاهای سبز با ۱۵۰۸۱۱٫۷۶ هکتار (۷۳٫۰۸٪) کاهش یافته‌اند. پیش‌بینی‌ها برای سال ۲۰۳۰ نیز نشان‌دهنده تداوم این روندها است. ارزیابی نقشه‌های تغییر کاربری در ۱۴۰۸ نشان می‌دهد که توسعه شهر به سمت شمال و شمال غرب و جنوب است، به گونه‌ای که فشار تغییرات بافاصله گرفتن از مرزهای شهر و نزدیک شدن به مرزهای منطقه کلان‌شهری کاهش می‌یابد و مقاومت زمین‌ها در برابر تغییرات افزایش می‌یابد. باتوجه به اینکه ارزیابی اعتبار مدل با ضرایب کاپای کلی (۰/۷۸)، کاپای هیستوگرام (۰/۹۴) و کاپای موقعیت (۰/۸۳) تأیید شده است، نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان راهنمایی برای مدیریت بهینه اراضی و دستیابی به توسعه پایدار در این منطقه کلان‌شهری مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: منطقه کلان‌شهری مشهد، شبیه‌سازی کاربری اراضی، الگوریتم حداکثر احتمال، نرم‌افزار QGIS، مدل

MOLUSCE

Simulation of land use changes in the metropolitan area of Mashhad during the period 1984 to 2030, utilizing the MOLUSCE model

As the second-largest city in Iran, Mashhad is undergoing rapid urban development, leading to significant transformations within its metropolitan area. This study aims to simulate land-use changes in the Mashhad metropolitan region, employing the MOLUSCE model through a descriptive-analytical methodology. Initially, changes in land use from 1984 to 2020 were examined to understand the patterns and trends over this period. Furthermore, projections regarding land use were generated for the year 2030 utilizing the MOLUSCE model within the QGIS software⁹⁴⁷. In this process, satellite imagery from the Landsat 5 and 8 satellites was classified using the maximum likelihood classification method, allowing us to categorize the land into five distinct classes: built-up areas, green spaces and vegetated lands, barren lands, water bodies, and mountainous (rocky) regions. The findings of the study indicate that over the specified timeframe, barren lands and built-up areas have increased significantly by 15,993.74 hectares (73.92%) and 12,823.76 hectares (59.27%), respectively. Conversely, green spaces have faced a substantial decrease of 15,811.76 hectares (73.08%). Projections for the year 2030 suggest that these trends are likely to persist, particularly with urban development moving towards the north, northwest, and south directions. Additionally, as the distance from the city's borders increases, there is a noticeable decline in the impact of land-use changes, which results in a greater resistance of land to these transformations. The model's validity was confirmed by overall Kappa coefficients (0.78), histogram Kappa (0.94), and positional Kappa (0.83), indicating a high level of reliability. The results of this research can serve as a valuable guide for effective land management and the promotion of sustainable development in the metropolitan area of Mashhad.

Mashhad metropolitan area, land use simulation, maximum likelihood algorithm, QGIS software, MOLUSCE model

۱. مقدمه

شهرها، به عنوان زنده ترین محیط های انسانی، نه تنها بستر زندگی و کار میلیون ها نفر هستند، بلکه نشانه ای از فرهنگ و دستاوردهای بشری نیز محسوب می شوند (بوترا^۱ و همکاران، ۲۰۱۶، ص. ۲). بر اساس آمار سال ۲۰۱۸، حدود ۵۵ درصد از جمعیت جهانی در مناطق شهری زندگی می کنند (سازمان ملل متحد، ۲۰۱۸، ص. ۱۹) و پیش بینی می شود این رقم تا سال ۲۰۵۰ به ۶۸ درصد افزایش یابد (سازمان ملل متحد، ۲۰۲۲، ص. ۳). روند سریع شهرنشینی به گسترش افقی شهرها منجر شده و این فرایند نه تنها بر جامعه انسانی، بلکه بر محیط زیست شهری در هر دو مقیاس محلی و منطقه ای تأثیرگذار بوده است (رهنما و ویات^۲، ۲۰۲۱، ص. ۱۵۰؛ فونتین و رونسول^۳، ۲۰۰۹، ص. ۱۲۳۷). تغییرات اساسی در چشم انداز شهری - منطقه ای، از جمله تبدیل اراضی طبیعی و کشاورزی به کاربری های غیرکشاورزی، نشان دهنده سرعت قابل توجه رشد شهرنشینی است

¹ Butera

² United nations

³ United nations

⁴ Rahnama & Wyatt

⁵ Fontaine & Rounsevell

(انجل^۱ و همکاران، ۲۰۱۱، ص. ۵۴؛ ژانگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۴، ص. ۴۴۲۸؛ ژو^۳ و همکاران، ۲۰۱۷، ص. ۳۸؛ دو^۴ و همکاران، ۲۰۲۰، ص. ۲). لذا، مدیریت کاربری اراضی می‌تواند به‌عنوان ابزاری کلیدی، نقش مؤثری در کنترل توسعه اراضی و مدیریت ساخت‌وساز ایفا کند (ژو^۵ و همکاران، ۲۰۱۹، ص. ۱۰۱۶۴۴). تنظیم کاربری اراضی، به‌طور هدفمند توسط دولت‌های ملی و محلی به‌کار گرفته می‌شود تا اهداف برنامه‌ریزی فضایی تحقق یابد و چشم‌انداز آینده شکل بگیرد (ورن^۶، ۲۰۰۹، ص. ۱). این فرایند که می‌تواند شامل تخصیص سرمایه‌گذاری‌های فضایی و تأمین مالی زیرساخت‌های متنوع باشد، به حفظ تعادل بین توسعه و محیط‌زیست کمک می‌نماید (زرین و زانت^۷، ۲۰۲۳، ص. ۱۱۰۷۴۶). در این راستا، برنامه‌ریزان و مدیران شهری از روش‌های متنوعی برای توسعه طرح‌ها و سیاست‌های تخصیص منابع استفاده می‌کنند. با این حال، به دلیل وجود نواقص بنیادین ناشی از فقدان مدل‌های پویا، با کاستی‌های قابل‌توجهی مواجه هستند (کیو^۸، ۲۰۱۸، ص. ۷۵۴). برای مقابله با این چالش‌ها، مدل‌های مکانی - زمانی سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش‌ازدور می‌توانند به‌طور مؤثری به درک فرایندهای پیچیده مدل‌سازی شهری و شناسایی شکاف‌های موجود کمک کنند. این فناوری‌ها نه تنها به بهبود کیفیت تصمیم‌گیری یاری می‌رسانند، بلکه امکان پیش‌بینی سناریوهای مختلف را نیز فراهم آورده و بدین ترتیب مسیرهای جدیدی برای توسعه پایدار شهرها می‌گشایند (یوسفی^۹ و همکاران، ۲۰۲۲، ص. ۹۹۳).

در دهه‌های اولیه توسعه علم سیستم‌های زمین، پیشرفت‌های چشمگیری در مدل‌سازی کاربری اراضی رخ داد، اما روش‌های سنتی نتوانسته‌اند به‌خوبی فرایندهای پیچیده تغییر کاربری زمین را پیش‌بینی کنند. این مدل‌ها معمولاً با نواقص متعدد در پیش‌بینی رشد شهری همراه هستند. به همین دلیل، مدل‌های جدیدتری برای پیش‌بینی رشد و تغییرات شهری توسعه یافته‌اند که به درک بهتر دینامیک‌های شهری و بهبود سیاست‌گذاری کمک می‌کنند. این مدل‌ها ابزارهای کلیدی برای برنامه‌ریزی و مدیریت مؤثرتر شهرها به‌شمار می‌روند (لیواند مارتینز و اولایا مورالس^{۱۰}، ۲۰۱۲، ص. ۳۷؛ وربورگ^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۹، ص. ۷۸؛ موسوی^{۱۲}، ۲۰۱۵، ص. ۵۰). در میان مدل‌های پیش‌بینی و شبیه‌سازی تغییرات شهری، مدل‌سازی کاربری/پوشش زمین (LULC)، به‌عنوان یک روش جذاب برای شبیه‌سازی عناصر سیستم‌های کاربری زمین و نمایش تعاملات بین تغییر کاربری

¹ Angel

² Zhong

³ Zhou

⁴ Dou

⁵ Zhu

⁶ warren

⁷ Zarin & Zannat

⁸ Qiu

⁹ Yousefi

¹⁰ Lievano Martinez & Olaya Morales

¹¹ Verburg

¹² Moosavi

زمین و محیط اطراف شناخته می‌شود (لی^۱ و همکاران، ۲۰۲۳، ص. ۱۰۶۵۳). مدل‌سازی LULC ابزار مفیدی در برنامه‌ریزی شهری به شمار می‌رود که در بررسی تغییرات آبی کاربری‌ها و ارزیابی تأثیرات سیاست‌های مختلف بر آن‌ها، نقش کلیدی ایفا می‌نماید، زیرا می‌تواند دلایل تغییرات کاربری زمین را با توجه به عوامل پویای مختلف تحلیل نماید (رن^۲ و همکاران، ۲۰۱۹، ص. ۴۰۰).

مدل‌های متعددی در نرم‌افزارهای گوناگون برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی توسعه یافته‌اند؛ با این حال، این نرم‌افزارها معمولاً به صورت یکپارچه تمامی مراحل شبیه‌سازی را پوشش نمی‌دهند. در مقابل، QGIS این امکان را می‌دهد که داندلود تصاویر ماهواره‌ای و مراحل طبقه‌بندی و پیش‌بینی تغییرات کاربری به صورت یکپارچه انجام شوند؛ به گونه‌ای که به وسیله پلاگین مدل^۳ MOLUSCE، می‌توان عملیات طبقه‌بندی و پیش‌بینی کاربری اراضی را انجام داد و به ارزیابی تغییرات پرداخت. این ویژگی‌های منحصر به فرد QGIS، آن را به ابزاری کارآمد برای تحلیل و مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی تبدیل کرده و از این طریق به مدیران شهری امکان می‌دهد تا تصمیمات بهتری در زمینه برنامه‌ریزی و توسعه پایدار اتخاذ کنند. مدل^۴ MOLUSCE در نرم‌افزار QGIS ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری زمین است که با استفاده از روش‌های مبتنی بر مکان و مدل‌های آماری، قابلیت پیش‌بینی روند تغییرات کاربری زمین را در زمان‌های مختلف فراهم می‌کند (ایزینکارالار^۵، ۲۰۲۴، ص. ۷۷۴۹).

از دیگر ویژگی‌های بارز این مدل، امکان ترکیب معیارهای متعددی است که به کاربران این اجازه را می‌دهد تا سناریوهای مختلف را به راحتی شبیه‌سازی کنند. این انعطاف‌پذیری در فرایند مدل‌سازی می‌تواند به بهبود تصمیم‌گیری‌های مدیریت شهری و تخصیص بهینه منابع کمک شایانی نماید. به علاوه، انعطاف‌پذیری این ابزار در مواجهه با شرایط متغیر محیطی و نیازهای خاص جامعه، آن را به گزینه‌ای مناسب برای برنامه‌ریزی پایدار در عرصه شهری تبدیل می‌کند (اسکندر^۶ و همکاران، ۲۰۲۴، ص. ۲۴۵؛ وافدان^۷، ۲۰۲۱، ص. ۲۳۰). به همین منظور، در این پژوهش، مدل^۸ MOLUSCE که در نرم‌افزار QGIS به کار گرفته می‌شود، در مدل‌سازی کاربری اراضی منطقه کلان‌شهری مشهد مورد استفاده قرار گرفته است. این انتخاب به دلیل توانمندی‌های ویژه این مدل در شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی و ارزیابی اثرات آن بر محیط شهری صورت گرفته است. منطقه کلان‌شهری مشهد با جمعیتی بالغ بر سه میلیون نفر در سال ۱۳۹۵، به عنوان دومین منطقه کلان‌شهری بزرگ ایران با چالش‌های متعددی از جمله رشد سریع جمعیت، تقاضای بالا برای توسعه زیرساخت‌ها و نیاز به مدیریت پایدار منابع زمین مواجه است (ره‌نما^۹، ۲۰۲۱، ص. ۱۰۲۵۴۸)؛ لذا، این پژوهش با هدف

^۱ Li

^۲ Ren

^۳ Module for Land Use Change Simulation

^۴ Isinkaralar

^۵ Iskandar

^۶ Wafdan

^۷ rahnama

شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی منطقه کلان‌شهری مشهد با بهره‌گیری از مدل MOLUSCE به عنوان یک روش مبتنی بر مکان و مولفه‌های آماری انجام شده است. در این پژوهش با ترکیب معیارهای متنوع، پس از تحلیل فضایی تغییرات کاربری اراضی در محدوده ۱۸۱۴۱۹ هکتاری منطقه کلان‌شهری مشهد از سال ۱۳۶۲ تا ۱۴۰۸، تغییرات کاربری‌های محدوده مورد مطالعه در سال ۱۴۰۸ شبیه‌سازی شده و تصمیمات بهینه‌ای در راستای مدیریت کاربری اراضی اتخاذ شده است. در این راستا، تصاویر ماهواره‌های لندست ۵ و ۸ با وضوح ۳۰ متر به عنوان اطلاعات اولیه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. داده‌های مرتبط با کاربری اراضی محدوده در بازه زمانی مذکور از تصاویر ماهواره‌ای استخراج و پس از طبقه‌بندی آن‌ها به وسیله الگوریتم حداکثر احتمال^۱ مورد ارزیابی قرار گرفته و مبنای شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی در سال ۱۴۰۸ قرار داده شده است.

کاربری اراضی از جمله موضوعات پراهمیتی است که تحقیقات متعددی در این خصوص با استفاده از رویکردها، مدل‌ها و روش‌های مختلف به شبیه‌سازی تغییرات آن پرداخته‌اند و باتوجه به چالش‌های مذکور در این زمینه، نگرش پژوهشگران به این موضوع بیش‌ازپیش افزایش یافته و اهمیت توسعه یک روش جامع، کامل و دقیق برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی در مطالعات علمی برجسته‌تر شده است. به‌طور کلی روش‌های مورد استفاده در مطالعات مختلف را می‌توان در ۵ دسته زیر طبقه‌بندی کرد: روش‌های آماری (پارک^۲ و همکاران ۲۰۱۱؛ هوانگ^۳ و همکاران ۲۰۱۹؛ ژانگ^۴ و همکاران ۲۰۲۱؛ عزیزی قلاتی و همکاران ۱۳۹۳؛ حسینی و همکاران ۱۳۹۵)، مدل‌های اتوماتای سلولی (کاموسوکو^۵ و همکاران ۲۰۰۹؛ وانگ^۶ و همکاران ۲۰۲۰؛ رهنما^۷، ۲۰۲۱؛ جهدی، ۱۴۰۲؛ جهانی شکیب و عرفانی، ۱۴۰۰)، مدل‌های اقتصادی (جوگان^۸، ۲۰۰۲؛ واکر^۹، ۲۰۰۴). مدل‌های مبتنی بر عامل (هاس^{۱۰} و همکاران ۲۰۱۲؛ حسینعلی و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۵؛ انتوایسل^{۱۲} و همکاران ۲۰۰۸؛ سلوط و همکاران ۱۳۹۸) و در نهایت رویکردهای ترکیبی (طیعی و پیجانوفسکی^{۱۳}، ۲۰۱۴؛ رهنما^{۱۴}، ۲۰۲۱؛ اسماعیلی و ایرانلو، ۱۴۰۰).

¹ Maximum Likelihood

² Park

³ Huang

⁴ Zhang

⁵ Kamusoko

⁶ wang

⁷ rahnama

⁸ Geoghegan

⁹ walker

¹⁰ Hasse

¹¹ Hosseinali

¹² Entwisle

¹³ Tayyebi & Pijanowski

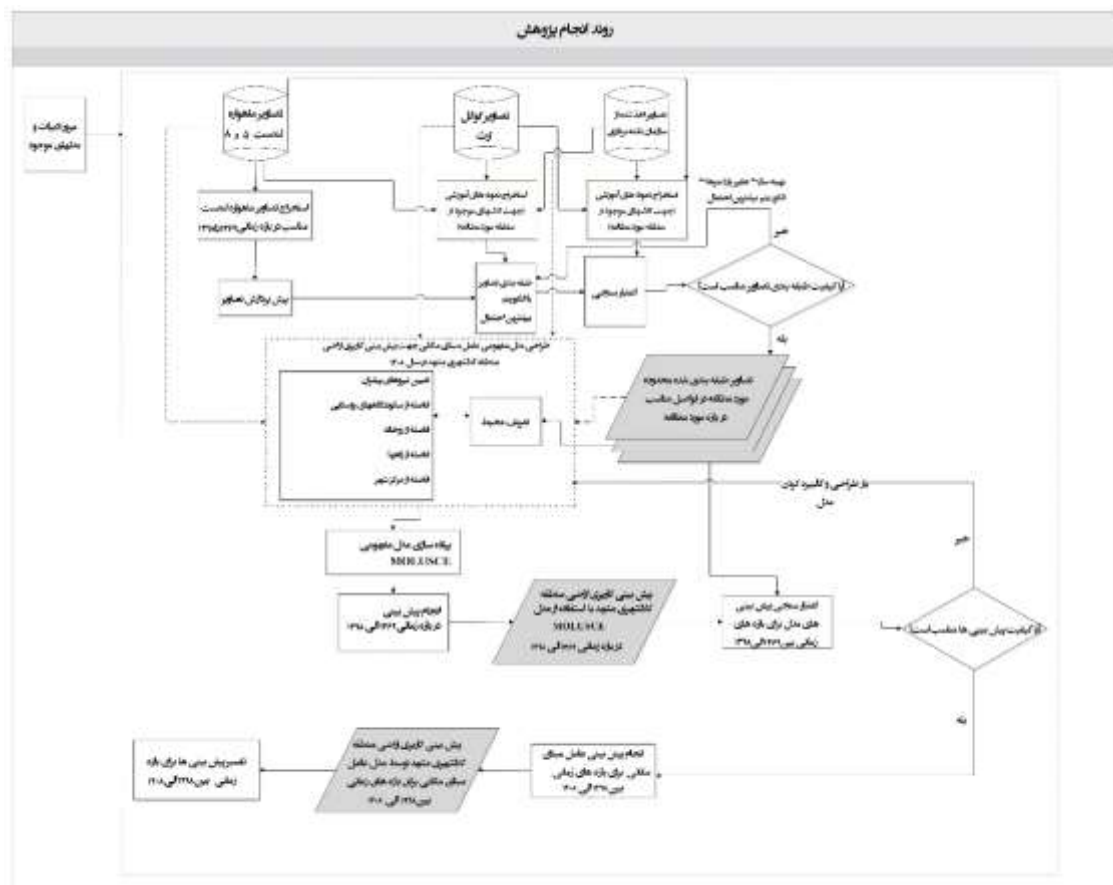
¹⁴ rahnama

ارزیابی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که در زمینه مقیاس مطالعه، مناطق کلان‌شهری مورد غفلت واقع شده‌اند. باوجود چالش‌های متعدد و متنوعی که شهر مرکزی و شهرهای مستقر در هر منطقه کلان‌شهری در زمینه تغییرات کاربری اراضی با آن مواجه هستند، نظارت و ارزیابی این تغییرات از نظر دورمانده است. به همین دلیل، پژوهش حاضر با تمرکز بر این شکاف پژوهشی، منطقه کلان‌شهری مشهد را که در سال‌های اخیر با چالش‌های جدی در زمینه تغییرات کاربری اراضی روبرو بوده، انتخاب نموده است. هدف این پژوهش، پایش این تغییرات و توسعه مدل قدرتمندی برای پیش‌بینی تغییرات آینده است که بتواند در سایر مطالعات مرتبط با مناطق کلان‌شهری نیز به کار رود.

تمایز اصلی این پژوهش در روش مورداستفاده آن نهفته است. در مطالعات پیشین، روش‌های سنتی آماری و یا اتوماتای سلولی باتکیه بر پارامترهای از پیش تعیین شده مورداستفاده قرار گرفته و توانایی تطبیق پارامترهای جدید با الگوریتم‌های مدل را ندارند. ضمن آنکه مدل‌های متداول توسعه‌یافته بیشتر بر داده‌های کمی تکیه دارند و داده‌های مورداستفاده در آن‌ها از الزامات خاصی پیروی می‌کند. در مقابل، مدل به‌کاررفته در این پژوهش به عنوان یک مدل ترکیبی آماری-مکانی، می‌تواند از انواع مختلف داده‌ها، اعم از کیفی و کمی، بهره‌برداری کند و انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به نوع داده‌ها ارائه می‌دهد. علاوه بر این، در اکثر پژوهش‌های انجام شده مراحل مختلف شبیه‌سازی؛ از جمله اخذ تصاویر ماهواره‌ای، طبقه‌بندی و پیش‌بینی در نرم‌افزارهای متفاوتی انجام شده است. اما، در پژوهش فعلی با استفاده از یک مدل جامع، تمامی مراحل به شکل یکپارچه در نرم‌افزار QGIS انجام داده شده است. این یکپارچگی به طور قابل توجهی بر دقت و کارایی مدل نهایی تأثیر می‌گذارد، زیرا عدم انسجام در مراحل شبیه‌سازی که در نرم‌افزارهای مختلف به وقوع می‌پیوندد، می‌تواند منجر به کاهش اعتبار نهایی مدل شود.

۲. متدولوژی

روش‌شناسی انجام این پژوهش از نظر هدف تحقیق، کاربردی - توسعه‌ای و از منظر چارچوب پژوهش، تحلیلی - توصیفی است. جمع‌آوری اطلاعات به صورت مطالعات کتابخانه‌ای - اسنادی صورت گرفته است. در این پژوهش از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (QGIS) به عنوان ابزار محوری پژوهش در جمع‌آوری، تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی اطلاعات استفاده گردیده است. شکل ۱ با به تصویر کشیدن مدل مفهومی پژوهش، فرایند شبیه‌سازی کاربری اراضی منطقه کلان‌شهری مشهد را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مدل فرآیندی پژوهش

جمع‌آوری داده‌ها

در این مطالعه تصویر سنجنده OLI^۱ در ماهواره لندست ۵ (در سال ۱۳۶۲ و ۱۳۸۸) و لندست ۸ (در سال ۱۳۹۸) فاقد ابر و غبار از پایگاه داده USGS Earth Explorer تهیه شده است (earthexplorer.usgs.gov).

پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای

^۱ Operational Land Imager

در بخش پیش‌پردازش تصاویر، تصویر دریافت شده با ترکیب مجموعه باندهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷ به دست آمد (باتوجه به این که باند ۶ حرارتی است، مورد استفاده قرار نگرفته است). و باتوجه به این که تصویر لندست ۵ و ۸ توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا به صورت زمین مرجع شده ارائه شده است، نیازی به تصحیح هندسی ندارند. در ادامه، برای تشخیص عوارض در تصاویر از ترکیب رنگی کاذب برای نمایش تصاویر استفاده شده است. به منظور نمایش ترکیب رنگی کاذب مادون قرمز نزدیک^۱، باند ۴ (مادون قرمز نزدیک)، بصورت کانال قرمز، باند ۳ (قرمز)، بصورت کانال سبز و باند ۲ (سبز)، به صورت کانال آبی نمایش داده شده است. سپس، باتوجه به این که وسعت تصاویر ماهواره‌ای بیشتر از منطقه کلان‌شهری مشهد بود، منطقه مورد مطالعه برش زده شده و سپس مورد پردازش قرار گرفته است.

پردازش تصاویر ماهواره‌ای

طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای یکی از مراحل کلیدی در پردازش داده‌ها به شمار می‌رود که امکان تبدیل داده‌های تصویری (بازتابش‌های ثبت شده در باندهای مختلف) به واقعیت‌های زمینی (نقشه‌های پوشش زمین و کاربری اراضی) را فراهم می‌آورد. این فرایند شامل جداسازی مجموعه‌های طیفی مشابه و تقسیم‌بندی طیف‌هایی است که رفتار مشابهی دارند. در این مرحله، به هر پیکسل در تصاویر یک برچسب خاص اختصاص داده می‌شود و پیکسل‌های مشابه تحت یک دسته قرار می‌گیرند.

در این تحقیق، از روش حداکثر احتمال^۲ برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده است. این روش یکی از متداول‌ترین و کارآمدترین تکنیک‌های طبقه‌بندی در سنجش از دور است که بر اساس مدل‌های آماری و شرطی عمل می‌کند. انتخاب این روش به دلیل توانایی آن در مدیریت داده‌های پیچیده و فراهم آوردن دقت بالا در طبقه‌بندی است که با در نظر گرفتن عدم تقارن و تنوع داده‌ها، احتمال تعلق هر پیکسل به یک کلاس خاص را محاسبه می‌کند. از ویژگی‌های بارز این روش می‌توان به کنترل و شناسایی عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرات فضایی و زمانی، استفاده از اطلاعات آموزشی برای بهبود دقت طبقه‌بندی، و توانایی کار با داده‌های چند طیفی اشاره کرد. این ویژگی‌ها روش حداکثر احتمال را به انتخابی مناسب برای تحلیل و طبقه‌بندی کاربری‌های اراضی در نواحی کلان‌شهری تبدیل کرده است.

مرحله بعدی تهیه نمونه‌های آموزشی از واقعیت زمینی است که به دو گروه تقسیم می‌شوند: (۱) گروه آموزش شامل ۱۴۵۰ نمونه (۷۵٪) و (۲) گروه آزمایش با ۵۰۰ نمونه به عنوان نمونه آزمایشی (۲۵٪). با توجه به دقت تصاویر ماهواره‌ای لندست (۳۰ متر) و ویژگی‌های منطقه کلان‌شهری مشهد، نمونه‌ها به پنج طبقه شامل (۱)

^۱ NIR

^۲ Maximum likely hood

مناطق ساخته شده، ۲) اراضی بایر، ۳) مناطق کوهستانی (صخره‌ای)، ۴) فضا‌های سبز و ۵) پهنه‌های آبی طبقه‌بندی شدند. پس از انتخاب و برچسب‌گذاری نمونه‌ها، مرحله اصلی مدل آغاز می‌شود، یعنی پیش‌بینی سایر پیکسل‌های برچسب‌نزدۀ بر اساس طبقات تعریف‌شده در الگوریتم حداکثر احتمال. در این مرحله، پس از وارد کردن تصویر ماهواره‌ای و نمونه‌های نقطه‌ای به‌عنوان داده‌های اولیه، تصویر طبقه‌بندی‌شده کاربری اراضی به‌عنوان خروجی مدل ارائه می‌شود.

ارزیابی صحت طبقه‌بندی مدل توسط ضریب توافق کاپا^۱

برای ارزیابی دقت مدل، لازم است عملکرد آن را بر روی مجموعه داده‌هایی که قبلاً شاهد آن‌ها نبوده است بررسی کنیم. در واقع، ماشین از داده‌های آموزشی الگوها و ویژگی‌های گوناگونی را فرامی‌گیرد و خود را برای اتخاذ تصمیمات مختلف در زمینه‌هایی مانند شناسایی، طبقه‌بندی یا پیش‌بینی داده‌های جدید آماده می‌سازد. برای بررسی دقیق نحوه تصمیم‌گیری ماشین، پیش‌بینی‌ها ابتدا بر روی داده‌های آموزشی آزمایش می‌شوند. بدین منظور، ابتدا با داده‌های آموزشی کار می‌کنیم و پس از آنکه مدل به طور کافی آموزش دید، از آن برای آزمایش بر روی داده‌های دیگر استفاده می‌کنیم.

برای ارزیابی صحت طبقه‌بندی از برآورد ضریب توافق کاپا استفاده گردیده است. این روش یکی از رایج‌ترین شیوه‌های ارزیابی اعتبار طبقه‌بندی است که ارتباط بین داده‌های مرجع (حقایق زمینی) و نتایج طبقه‌بندی خودکار را مقایسه می‌کند. در این مرحله، نقاط آزمایشی طبقه‌بندی‌شده با تصاویر ماهواره‌ای و تصاویر گوگل ارث مقایسه می‌شوند و طبقه‌بندی انجام شده با کاربری واقعی تطبیق داده می‌شود. سپس صحت یا عدم صحت طبقه‌بندی هر نقطه آزمایشی تعیین شده و ضریب کاپا محاسبه می‌گردد.

ضریب کاپا تکنیک چندمتغیره گسسته‌ای است که اگر یک ماتریس خطا تفاوت معناداری با ماتریس دیگر داشته باشد، در ارزیابی دقت برای تصمیم‌گیری آماری مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ضریب عددی بین -۱ تا +۱ است که هر چه به +۱ نزدیک‌تر باشد، بیانگر وجود توافق بیشتر بین مقیاس‌ها یا ارزیاب‌ها است و هر چه به -۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده وجود توافق کمتر بین آن‌ها است. از طرفی اگر ضریب توافق کاپا صفر شود، نشان‌دهنده عدم توافق کامل است (تی^۲ و همکاران، ۲۰۲۳).

جدول ۱ نشان‌دهنده دستورالعمل‌هایی است که توسط لندیس و کوچ^۳، فلیس^۴ و همکاران و آلتمن^۵ برای ارزیابی سطح توافق ارائه شده است:

^۱ Cohen's kappa coefficient

^۲ Nti

^۳ Landis & Koch

^۴ Fleiss

^۵ Altman

جدول ۱. آستانه‌های قدرت ضریب توافق کاپا

مقیاس معیار آلتمن		مقیاس معیار فلیس		مقیاس معیار لندیس و کوچ	
ناسازگار	< ۰,۲	ناسازگار	< ۰,۲	ضعیف	< ۰,۴
ضعیف	۰,۲۱-۰,۴۰	ضعیف	۰,۲۱-۰,۴۰	متوسط تا خوب	۰,۴۰-۰,۷۵
نسبتاً خوب	۰,۴۱-۰,۶۰	نسبتاً خوب	۰,۴۱-۰,۶۰	عالی	بیشتر از ۰,۷۵
خوب	۰,۶۱-۰,۸۰	محکم	۰,۶۱-۰,۸۰		
بسیار خوب	۰,۸۱-۱,۰۰	تقریباً کامل	۰,۸۱-۱,۰۰		

منبع: لندیس و کوچ، ۱۹۷۷؛ فلیس و همکاران، ۱۹۷۱؛ آلتمن، ۱۹۹۵

رابطه ۱. ضریب کاپا $\text{kappa} = P_i = (PA_o - PA_e) / (1 - PA_e)$

مقدار PA_o نمایانگر میزان توافق دو ارزیاب است

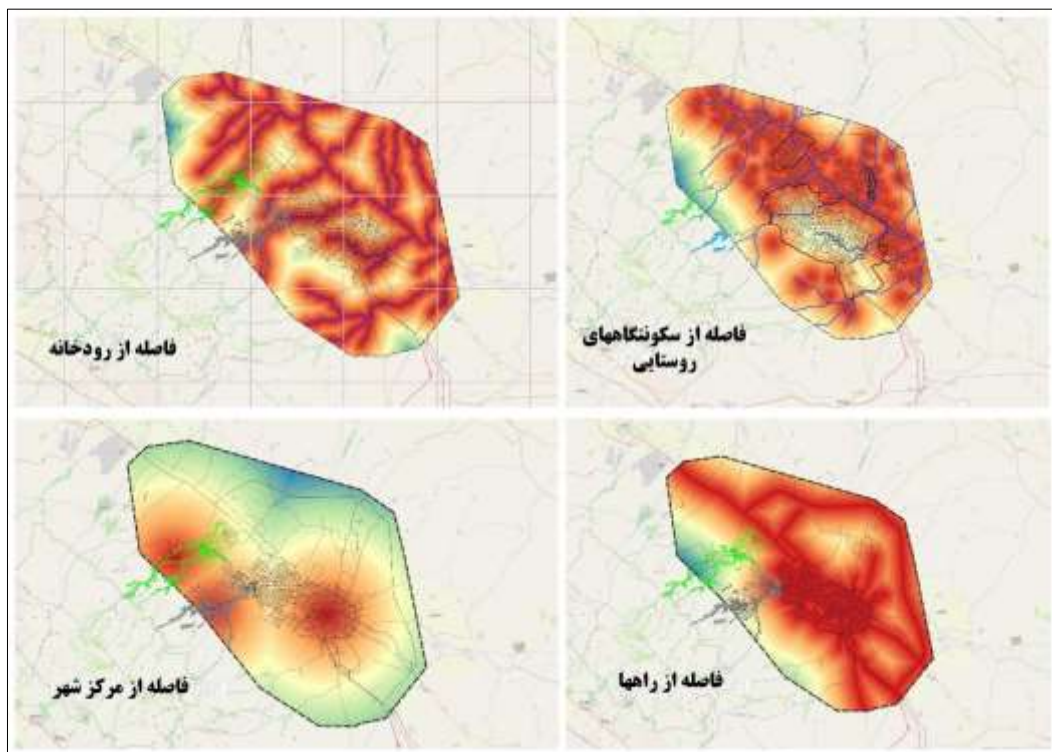
مقدار PA_e نیز نمایانگر میزان توافق مورد انتظار است.

ضریب کاپای طبقه‌بندی‌های صورت گرفته در این پژوهش برای تصویر سال ۱۹۸۴ برابر است با ۰,۷۹ و برای تصویر سال ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ برابر است با ۰,۸۱. لذا، باتوجه به جدول ۱، طبقه‌بندی‌های صورت گرفته، از اعتبار بالایی برخوردار هستند و می‌توانند در مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی مورد استفاده قرار گیرند.

شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی در سال ۱۳۹۸

نیروهای پیشران

نیروهای پیشران این پژوهش به چهار متغیر اساسی اشاره دارند که تأثیر قابل توجهی بر تغییرات کاربری اراضی در مناطق کلان‌شهری دارند. این نیروها عبارتند از، فاصله از مراکز شهری، فاصله از رودخانه، فاصله از راه‌ها و فاصله از سکونتگاه‌های روستایی.



شکل ۲. نیروهای پیشران

مدل MOLUSCE

مدل MOLUSCE یکی از ابزارهای کاربردی در نرم افزار QGIS است که برای شبیه سازی تغییرات کاربری اراضی و تحلیل سناریوهای مختلف توسعه به کار می رود. این مدل قادر است با بهره گیری از داده های فضایی و اطلاعات توصیفی، فرایندهای تغییر کاربری را به دقت ارزیابی کرده و پیش بینی نماید (باغل^۱ و همکاران، ۲۰۲۴). به طور کلی مدل MOLUSCE با سایر مدل های تغییر کاربری زمین مورد مقایسه قرار گرفته است. تفاوت های کلیدی این مدل با سایر مدل های مشابه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مقایسه مدل MOLUSCE با سایر مدل های شبیه سازی تغییرات کاربری اراضی

تمایز	مدل MOLUSCE	سایر مدل ها
رابط کاربری	به صورت یکپارچه در QGIS	متنوع؛ برخی به چند نرم افزار نیاز دارند
الگوریتم مورد استفاده	چندگزینه ای (ANN, LR)	اغلب به یک الگوریتم خاص محدود شده است
نوع داده	رستر	متفاوت
روش اعتبارسنجی	اعتبارسنجی داخلی	ممکن است بسیار متفاوت باشد
منبع باز	به صورت رایگان در دسترس است	برخی مدل ها اختصاصی هستند

¹ Baghel

پتانسیل انتقال	تأکید بر عوامل تأثیرگذارتر بر تغییر کاربری	تمرکز صرف بر پیش‌بینی وضعیت‌های آینده
----------------	--	---------------------------------------

منبع: باغل^۱ و همکاران، ۲۰۲۴؛ کاماراج و رنگاراجان^۲، ۲۰۲۲؛ صبری و خيون^۳، ۲۰۲۴

در این پژوهش، پس از جمع‌آوری داده‌های موردنیاز و پردازش تصاویر ماهواره‌ای، با استفاده از ابزار MOLUSCE در QGIS، مدل‌سازی و شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی انجام شد. ابتدا، نیروهای پیشران (مانند فاصله از مراکز شهری، رودخانه، راه‌ها و سکونتگاه‌های روستایی) به‌عنوان متغیرهای ورودی به مدل معرفی شدند. سپس با تنظیم پارامترها، روند تغییرات کاربری اراضی پیش‌بینی گردید. خروجی‌های مدل شامل نقشه‌ها و آمار مربوط به نوع کاربری‌های مختلف در سال‌های آینده تحلیل و مورد بررسی قرار گرفت.

ارزیابی صحت مدل‌سازی توسط ضریب توافق کاپا

در مدل MOLUSCE، سه نوع کاپا به‌منظور ارزیابی دقت پیش‌بینی‌ها و تطابق داده‌ها محاسبه می‌شود که هر یک از آن‌ها معیاری خاص برای سنجش میزان توافق بین توزیع واقعی و پیش‌بینی‌شده کاربری اراضی به شمار می‌روند. این سه معیار عبارت‌اند از کاپای کلی، کاپای هیستوگرام و کاپای موقعیت.

__کاپای کلی^۴

به‌عنوان یک شاخص کلان از دقت مدل در پیش‌بینی کاربری اراضی استفاده می‌شود. این معیار نشان‌دهنده میزان توافق کلی بین داده‌های واقعی و داده‌های پیش‌بینی‌شده در سطح کل مدل است. شاخص مذکور به ما امکان می‌دهد تا درک بهتری از عملکرد کلی مدل در پیش‌بینی کاربری‌های مختلف ایجاد کنیم (آلتمن^۵، ۱۹۹۵، ص. ۱۷۰؛ فلیس^۶ و همکاران، ۱۹۷۱، ص. ۳۸۰؛ لندیس و کوچ^۷، ۱۹۹۷، ص. ۳۶۵).

__کاپای هیستوگرام^۸

به‌عنوان معیاری برای بررسی توافق در توزیع فراوانی کاربری‌ها در سطح کلاسه‌بندی‌ها استفاده می‌شود. این کاپا معرف این است که چقدر توزیع پیش‌بینی‌شده (از نظر مقادیر تجمعی) با توزیع واقعی مطابقت دارد. کاپای

¹ Baghel

² Kamaraj & Rangarajan

³ Sabri & Khayyun

⁴ Overall Kappa

⁵ Altman

⁶ Fleiss

⁷ Landis & Koch

⁸ Histogram Kappa

هیستوگرام با مقایسه هیستوگرام‌های شبیه‌سازی شده و واقعی برای هر یک از کلاس‌های کاربری محاسبه می‌شود. این موضوع به ما امکان می‌دهد تا دقت مدل را در تفکیک و شبیه‌سازی توزیع فراوانی کاربری‌های مختلف تحلیل کنیم (پونتیوس و میلونز^۱، ۲۰۱۱).

کاپای موقعیت^۲

این شاخص یکی دیگر از معیارهای ارزیابی است که بر توافق در مکان‌های خاص تأکید دارد. این کاپا بررسی می‌کند که چقدر موقعیت جغرافیایی کلاس‌های پیش‌بینی شده با واقعیت مطابقت دارد (ون ولیت^۳ و همکاران، ۲۰۱۱).

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه دارای وسعتی بالغ بر ۱۸۱۴۱۹ هکتار است که شامل محدوده اداری کلان‌شهر مشهد و دیگر مناطق پیرامون آن است. این کلان‌شهر با مساحت بیش از ۳۵۰۰۰ هکتار و جمعیتی معادل ۳ میلیون و ۵۰۰ هزار نفر در سال ۱۳۹۵، به عنوان یکی از نواحی مهم و پرجمعیت کشور شناخته می‌شود. علاوه بر کلان‌شهر مشهد، این محدوده شامل دو شهر طرqbه و شان‌دیز در جنوب غربی منطقه است که به دلیل جاذبه‌های گردشگری و امکانات تفریحی، با جمعیتی بالغ بر ۲۳۷ هزار نفر ارتباطات تنگاتنگی با کلان‌شهر مشهد دارند. این منطقه همچنین شامل ۲۱۶ روستا است که در تحولات منطقه نقش مهمی ایفا می‌کنند. جمعیت روستاهای منطقه از ۱۴۴ هزار نفر در سال ۱۳۸۵ به رقم ۲۳۶ هزار نفر در سال ۱۳۹۵ رسیده است، و این افزایش جمعیت بیانگر نرخ رشد سالانه ای معادل ۵/۱ درصد خواهد بود که در مقایسه با جمعیت محدوده شهری مشهد (۲/۲۵ درصد) بیانگر نرخ رشد سالانه ۲/۳ برابری در روستاهای منطقه کلان‌شهری نسبت به محدوده شهری است (شهرداری مشهد، ۱۳۹۶).

محدوده مورد مطالعه شامل حریم شهر مشهد و چندین شهرک صنعتی مهم، از جمله طوس، فردوسی و کلات است. این منطقه با تمرکز بالای فعالیت‌های صنعتی، کارگاهی و کشاورزی، نقش مهمی در جذب مهاجرین روستایی و تغییر کاربری اراضی ایفا می‌کند. از دیگر عواملی که در گسترش کلان‌شهر مشهد و در نتیجه تغییر کاربری منطقه کلان‌شهری تأثیرگذار بوده است، می‌توان به الحاق ناحیه منفصل قلعه خیابان در شرق، شهرک مهرگان و روستاهای قرقی در شمال و ناحیه منفصل شهر طوس در شمال غرب اشاره کرد که به گسترش شهر به سمت نواحی پیرامونی و بلعیده شدن اراضی کشاورزی کمک کرده است. علاوه بر این پیشران‌ها، احداث کمربندی‌های شمالی و جنوبی نیز تأثیر چشمگیری بر گسترش شهری و تغییر کاربری اراضی در اطراف

¹ Pontius & Millones

² Location Kappa

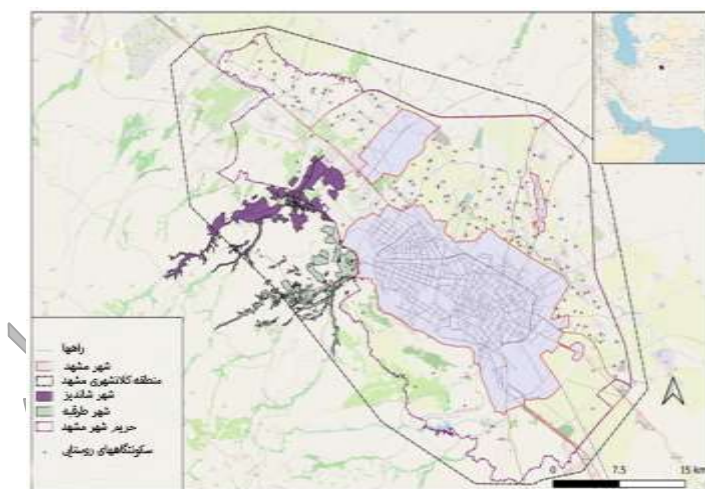
³ van Vliet

کلان‌شهر مشهد داشته است. نکته قابل توجه این است که منطقه کلان‌شهری مشهد به لحاظ کارکردی نمی‌تواند از دو منطقه طبقه و شاندیز که به عنوان بارانداز گردشگری و اوقات فراغت شهر مشهد شناخته می‌شوند، جدا شود. هرچند که این مناطق از نظر اداری و سیاسی با کشیدن یک خط از محدوده حریم شهر مشهد جدا گردیده‌اند، اما به لحاظ کارکردی نمی‌توان آن‌ها را از کلان‌شهر مشهد تفکیک نمود.

اسکان غیررسمی یا حاشیه‌نشینی در منطقه کلان‌شهری مشهد همواره یکی از معضلات اصلی پیش روی مدیریت شهری و کشوری به شمار می‌آید. امروزه حاشیه‌نشینی مانند کمربندی دور تا دور شهر مشهد را در بخش‌های شمال، شمال شرق و شمال غرب به وسعت ۳۸۹۴ هکتار فراگرفته است که معادل ۱۱٪ از کل مساحت شهر است (رمضانی فرخند و همکاران، ۱۴۰۱).

شهر مشهد در ۵۰ سال گذشته، ۳ طرح جامع را تجربه کرده است. طرح جامع خازنی، طرح جامع مهرآزان و طرح جامع فرهاد. بررسی طرح‌ها و برنامه‌های این سه طرح جامع نشان می‌دهد که غرب شهر مشهد، جهت اصلی توسعه شهر در هر سه طرح جامع در نظر گرفته شده است (مهندسین مشاور خازنی، ۱۳۵۰؛ مهندسین مشاور مهرآزان، ۱۳۷۲؛ مهندسین مشاور فرهاد، ۱۳۹۵).

براین اساس، در این مطالعه، منطقه کلان‌شهری مشهد به وسعت ۱۸۱۴۱۹ هکتار در نظر گرفته شده است که در شکل شماره ۳ مشخص شده است.



شکل ۳. محدوده مورد مطالعه

۳. یافته‌ها

تحلیل تغییرات کاربری اراضی (۱۳۶۲-۱۳۹۸)

وضعیت کلی کاربری‌های اراضی در منطقه مورد مطالعه بین سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۴۰۸ در جدول ۳ و شکل ۴ ارائه شده است.

با توجه به جدول ارائه شده، در بین سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۸، تغییرات کاربری اراضی در منطقه موردنظر به طور قابل توجهی مشهود است. نرخ رشد کاربری مسکونی به میزان ۵۹,۲۷٪ افزایش یافته که این امر نمایانگر توسعه شهری گسترده در این بازه زمانی است. در عوض، فضاهای سبز دچار کاهش شدید ۷۳,۰۸٪ شده‌اند، که نشان‌دهنده جایگزینی این فضاها با مناطق مسکونی و توسعه بی‌رویه شهری می‌باشد. همچنین، اراضی بایر نیز با افزایش ۷۳,۹۲٪ و مناطق کوهستانی ضمن تبدیل به مناطق ساخته شده، با کاهش ۵۷,۶۰٪ روبرو شده‌اند که به مشاهدات ناشی از تغییرات کاربری در این منطقه اشاره دارد. در این میان، کم‌ترین تغییرات مربوط به پهنه‌های آبی است.

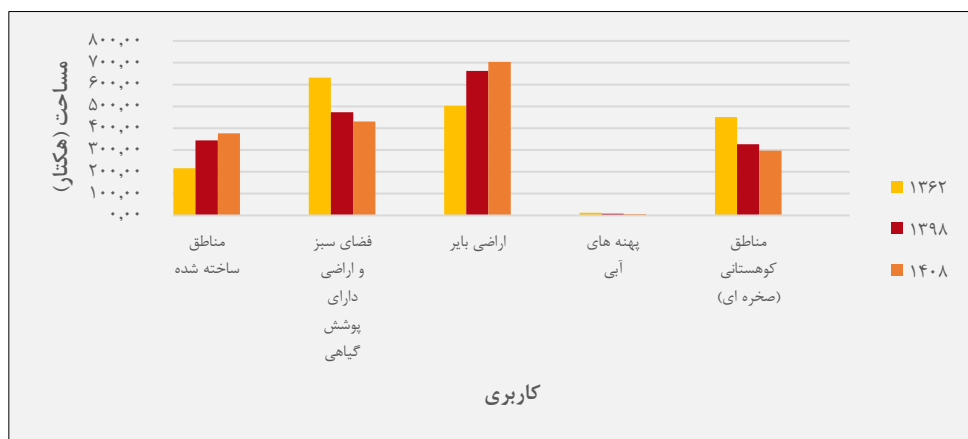
تحلیل فضایی تغییرات در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که فرایند توسعه عمدتاً در شمال و شمال شرق شهر بیش‌ترین تحولات را به خود اختصاص داده است. بررسی ماتریس تغییرات کاربری‌ها نیز نشان‌دهنده این نکته است که بیش‌ترین تغییرات به تبدیل فضاهای سبز به مناطق ساخته شده مربوط می‌شود؛ به‌طوری‌که در بازه زمانی مورد مطالعه، حدود ۵۰٪ از توسعه مناطق ساخته شده ناشی از تبدیل فضاهای سبز به این مناطق بوده است (جدول ۴).

جدول ۳. تغییرات کاربری اراضی منطقه کلان‌شهری مشهد از سال ۱۳۶۲ تا ۱۴۰۸

کلاس کاربری	۱۳۶۲		۱۳۹۸		۱۴۰۸		۱۳۶۲-۱۳۹۸		۱۳۹۸-۱۴۰۸	
	مساحت		مساحت		مساحت		مساحت		مساحت	
	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد
مناطق ساخته شده	۲۱۶۳۵/۷۳	۱۱/۹۳	۳۴۴۵۹/۴۹	۱۸/۹۹	۳۷۵۸۹/۲۰	۲۰/۷۲	۱۲۸۲۳/۷۶	۵۹/۲۷	۳۱۲۹/۷۱	۸/۳۳
فضای سبز و اراضی دارای پوشش گیاهی	۶۳۱۱۶/۵۵	۳۴/۷۹	۴۷۳۰۴/۷۹	۲۶/۰۷	۴۳۱۲۴/۱۸	۲۳/۷۷	-۱۵۸۱۱/۷۶	-۷۳/۰۸	-۴۱۸۰/۶۱	-۹/۶۳
اراضی بایر	۵۰۱۸۴/۹	۲۷/۶۶	۶۶۱۷۸/۶۴	۳۶/۴۸	۷۰۳۴۶/۰۳	۳۸/۷۶	۱۵۹۹۳/۷۴	۷۳/۹۲	۴۱۶۷/۳۹	۵/۹۲
پهنه‌های آبی	۱۳۰۸/۵۱	۰/۷۲	۷۶۴/۴۸	۰/۴۲	۶۳۹/۶۸	۰/۳۵	-۵۴۴/۰۳	-۲/۵۱	-۱۲۴/۸	-۱۹/۵۱
مناطق کوهستانی (صخره‌ای)	۴۵۱۷۳/۰۷	۲۴/۹۰	۳۲۷۱۱/۷۲	۱۸/۰۳	۲۹۷۲۰/۰۵	۱۶/۳۸	-۱۲۴۶۱/۳۶	-۵۷/۶۰	-۲۹۹۱/۶۷	-۱۰/۰۷

مجموع	۱۸۱۴۱/۷۶	۱۰۰	۱۸۱۴۱۹/۱۲	۱۰۰	۱۸۱۴۱۹/۱۲	۱۰۰	۱۸۱۴۱۹/۱۲	۱۰۰	۱۸۱۴۱۹/۱۲	—
-------	----------	-----	-----------	-----	-----------	-----	-----------	-----	-----------	---

منبع: یافته‌های تحقیق

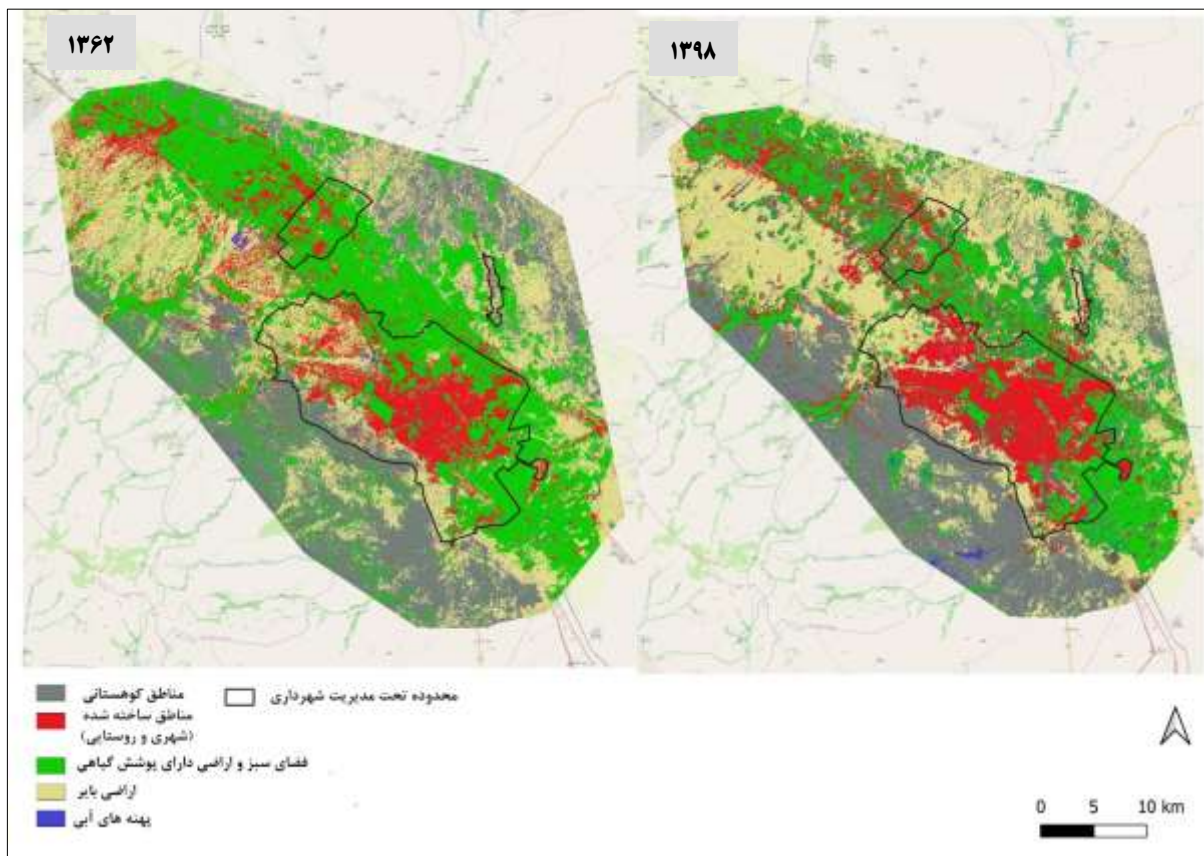


شکل ۴. تغییرات کاربری اراضی منطقه کلان‌شهری مشهد از سال ۱۳۶۲ تا ۱۴۰۸

جدول ۴. انتقال از تمام کاربری‌ها به ساخته شده بین سال‌های ۱۳۶۲-۱۳۹۸

مساحت (۱۳۹۸-۱۳۶۲)		کلاس کاربری
درصد	هکتار	
۴۹/۹۳	۱۱۸۲۵/۸۲	فضای سبز به مناطق ساخته شده
۳۳/۷۸	۸۰۰۰/۶۴	اراضی بایر به مناطق ساخته شده
۱/۵۵	۳۶۷/۹۲	پهنه‌های آبی به مناطق ساخته شده
۱۴/۷۳	۳۴۸۹/۸۴	اراضی کوهستانی به مناطق ساخته شده
۱۰۰	۲۳۶۸۴/۲۲	مجموع

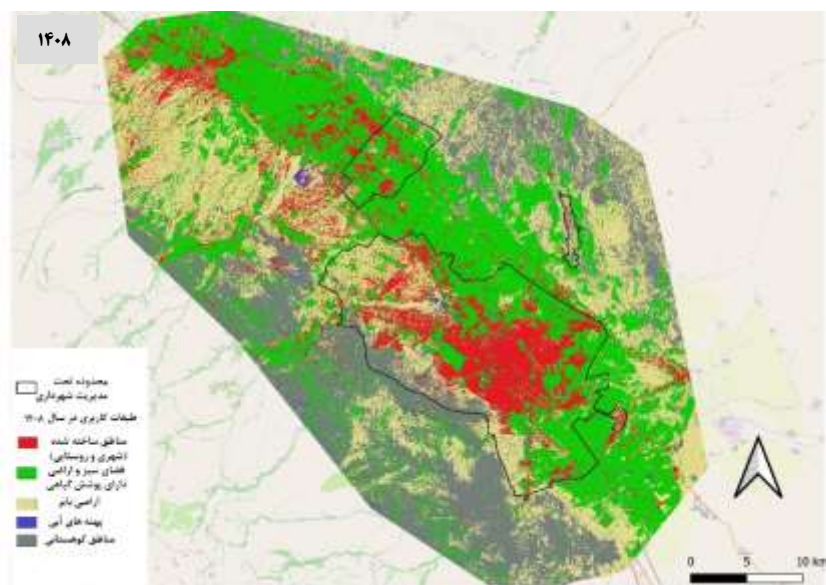
منبع: یافته‌های تحقیق



شکل ۵. کاربری اراضی منطقه کلان‌شهری مشهد در سال‌های ۱۳۶۲ و ۱۳۹۸

پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی تا ۱۴۰۸

بر اساس پیش‌بینی‌های ارائه شده در جدول ۳ برای سال ۱۴۰۸، نرخ رشد کاربری‌ها در منطقه موردنظر نشان‌دهنده تحولات قابل توجهی است. کاربری مسکونی با نرخ ۲۰,۷۲٪ شاهد افزایش قابل توجهی خواهد بود. به این ترتیب، انتظار می‌رود که توسعه شهری همچنان ادامه یابد و به جایگاه برجسته‌تری در این منطقه دست یابد. در مقابل، فضاهای سبز با نرخ رشد ۲۳,۷۷٪- مواجه خواهند شد، که این مهم نشان‌دهنده تخریب اکوسیستم‌های محلی است. اراضی بایر نیز با نرخ ۳۸,۷۶٪ افزایش قابل توجهی خواهند داشت. پهنه‌های آبی با نرخ ۰,۳۵٪ تقریباً بدون تغییر باقی خواهند ماند. در نهایت، مناطق کوهستانی نیز با کاهش ۱۶ درصدی مواجه خواهند بود.



شکل ۶. کاربری اراضی منطقه کلانشهری مشهد در سال ۱۴۰۸

ارزیابی صحت مدل‌سازی

در راستای ارزیابی مدل‌سازی انجام شده، ابتدا کاربری‌های سال ۱۳۹۸ با توجه به کاربری‌های سال ۱۳۶۲ و ۱۳۹۸ مدل‌سازی شده است. ضریب کاپای این مدل‌سازی به شرح جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۵. ضریب کاپای مدل

مقدار	شاخص	ردیف
۸۴/۴۴٪	میزان پیش‌بینی صحیح	۱
۰/۷۸٪	Overall kappa	۲
۰/۹۴٪	Histogram kappa	۳
۰/۸۳٪	Location kappa	۴

منبع: یافته‌های تحقیق

میزان پیش‌بینی صحیح^۱ به این معناست که ۸۴,۴۴ درصد از پیش‌بینی‌های مدل با داده‌های واقعی تطابق داشته است. مدل به خوبی قادر به شناسایی و تفکیک کلاس‌های مختلف کاربری اراضی است. علاوه بر این، مقدار Overall Kappa به معنای توافق خوب پیش‌بینی‌های مدل و توزیع واقعی کاربری اراضی است؛ بنابراین، این مقدار نشان می‌دهد که مدل موفق به پیش‌بینی دقیق کاربری‌های اراضی شده و نتایج آن به طور قابل توجهی با وضعیت واقعی همخوانی دارد.

¹ correctness

مقدار Histogram Kappa نشان‌دهنده سطح بسیار بالایی از توافق بین توزیع کاربری پیش‌بینی شده و توزیع واقعی است. کاپای بالای ۰,۹۰ به عنوان توافق عالی در نظر گرفته می‌شود. این مقدار نشان‌دهنده این است که مدل در تحلیل و شبیه‌سازی توزیع کاربری‌های مختلف بسیار دقت داشته و با درصد بسیار کمی از عدم همخوانی مواجه است.

مقدار Location Kappa نشان‌دهنده توافق خوب بین موقعیت‌های پیش‌بینی شده و واقعیت در توزیع کاربری اراضی است.

مقادیر شاخص کاپا نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های مدل در زمینه مکان‌یابی دقیق کاربری‌ها به خوبی انجام شده و موفقیت قابل توجهی در شناسایی نقاط کلیدی و مهم در فراوانی کاربری‌ها دارد.

۴. بحث

در عصر حاضر، تغییرات کاربری اراضی به عنوان یک چالش اساسی در مدیریت منابع طبیعی و توسعه پایدار مطرح است. بررسی تغییرات کاربری اراضی در منطقه کلان‌شهری مشهد بین سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۸ نشان می‌دهد که اراضی طبیعی و کشاورزی به مناطق ساخته‌شده تبدیل شده‌اند، که به فشار بر منابع طبیعی و کاهش کیفیت محیط‌زیست منجر می‌شود. پیش‌بینی‌ها برای سال ۱۴۰۸ نیز، نشان‌دهنده رشد قابل توجه کاربری مسکونی است که منجر به ادامه توسعه شهری و کاهش فضاهای سبز خواهد شد و تهدیدی برای اکوسیستم و سلامت محیط‌زیست به حساب می‌آید. همچنین، افزایش اراضی بایر ناشی از توسعه ناپایدار و ناکارآمدی مدیریت زمین در ۱۴۰۸ ممکن است اثرات منفی بر کشاورزی و منابع طبیعی داشته باشد. کاهش مناطق کوهستانی و پهنه‌های آبی نیز نگرانی‌هایی در خصوص تنوع زیستی و ضرورت مدیریت بهینه منابع آب را مطرح می‌کند.

یافته‌های فوق با نتایج به دست آمده از تحقیقات رهنما و وایات^۱ (۲۰۲۱) در ملبورن، مرشد^۲ و همکاران (۲۰۲۲) در شهر جاشور بنگلادش، ژائو^۳ و همکاران (۲۰۲۲) در شهر شنژن، و محمودزاده و نقد بیشی^۴ (۲۰۲۱) در نیشابور هم‌خوانی دارد. این مطالعات نشان می‌دهند که رشد سریع در مساحت‌های ساخته‌شده منجر به کاهش مستمر فضاهای سبز می‌شود. به عبارتی، این یافته‌ها تأییدی بر این نکته است که توسعه شهری غیرقابل کنترل می‌تواند به تخریب اکوسیستم‌های طبیعی و کاهش کیفیت زندگی شهروندان منجر شود؛ بنابراین، ضرورت برنامه‌ریزی هوشمند و پایدار در حوزه توسعه شهری بیش‌ازپیش حس می‌شود.

¹ Rahnema & Wyatt

² Morshed

³ Zhao

⁴ Mahmoodzadeh & Naghdbishi

در مقابل، برخی از مطالعات مانند تحقیق مانگایی^۱ (۲۰۲۲) در مالاوی مرکزی نشان می‌دهند که مساحت مناطق ساخته‌شده کاهش یافته است، درحالی‌که اراضی کشاورزی افزایش یافته‌اند. علاوه بر این، مطالعاتی همچون تحقیق طیبی و پیجانوفسکی^۲ (۲۰۱۳) در جنوب شرقی ویسکانسین، نشان می‌دهند که افزایش جنگل‌ها در مناطق نزدیک به جنگل‌های موجود، به‌ویژه در نواحی با لکه‌های کشاورزی و دور از جاده‌ها، مشاهده شده است. این تناقض‌ها در نتایج پژوهش‌ها نشان‌دهنده تنوع و پیچیدگی عواملی است که بر کاربری اراضی تأثیر می‌گذارند و ضرورت بررسی زمینه‌های محلی و سیاست‌های مرتبط با مدیریت منابع طبیعی را بیش‌ازپیش ضروری می‌سازد.

رشد فضایی منطقه کلان‌شهری مشهد به سمت حومه‌های غرب و شمال آن صورت‌گرفته و این روند با پیش‌بینی‌های داداش‌پور و جهانزاد (۱۳۹۵)، رایگانی و همکاران (۱۳۹۷) و رهنما^۳ (۲۰۲۱) هم‌خوانی دارد. ارزیابی نقشه‌های تغییر کاربری در ۲۰۳۰ نشان می‌دهد که توسعه شهر به سمت شمال و غرب و جنوب است، به‌طوری‌که اراضی کشاورزی در مرز شمالی شهر از شمال غرب به شمال شرق به مناطق مسکونی تبدیل می‌شوند. مناطق ساخته‌شده همچنین از طریق مناطق پوشیده از شن و ماسه گسترش خواهند یافت. در بخش غربی شهر، مناطق تحت پوشش خاک با مناطق ساخته‌شده جایگزین می‌شود. مناطق کوهستانی جنوب شهر نیز تبدیل به مناطق ساخته‌شده خواهند شد. مناطق مجاور شهر مشهد بیشتر تحت فشار تغییرات کاربری زمین قرار دارند، درحالی‌که این فشار بافاصله گرفتن از مرزهای شهر و نزدیک‌شدن به مرزهای منطقه کلان‌شهری کاهش می‌یابد و مقاومت زمین‌ها در برابر تغییرات افزایش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه فاصله از مناطق ساخته‌شده بر تغییرات است.

پژوهش شهودی و همکارانش در سال ۱۴۰۲ در منطقه کلان‌شهری تبریز نیز همانند این پژوهش بر تأثیر الحاق روستاهای پیرامون شهر تبریز بر توسعه این شهر و در نتیجه تغییرات کاربری این منطقه کلان‌شهری تأکید نموده‌اند.

تأثیر چشمگیر حاشیه‌نشینی در تغییرات کاربری اراضی نیز در پژوهش انجام شده در منطقه حومه‌ای تورس و دراس_ پرتغال توسط گومزو و همکارانش در سال ۲۰۲۲ بیان شده است.

به طور کلی، ارزیابی یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که بخش شمالی منطقه کلان‌شهری ممکن است در معرض خطر حاشیه‌نشینی گسترده قرار گیرد، در حالی‌که منطقه جنوب غربی، به ویژه شان‌دیز، برای رشد مبتنی بر گردشگری آماده است. در رابطه با گسترش مناطق ساخته‌شده در پهنه غربی و شمالی محدوده، شهرک‌های صنعتی مستقر در منطقه کلان‌شهری نقش به‌سزایی دارند؛ به‌گونه‌ای که این شهرک‌ها با ایجاد فرصت‌های شغلی و جذب سرمایه‌گذاری، موجب جذب مهاجر و افزایش جمعیت در منطقه کلان‌شهری شده‌اند. با توجه به نرخ

¹ Mungai

² Tayyebi & Pijanowski

رشد بالای جمعیت روستاهای مجاور مرز منطقه کلان‌شهری، می‌توان بر نقش کلیدی روستاها و اسکان غیررسمی در توسعه منطقه کلان‌شهری تأکید نمود. با توجه به تراز مثبت مهاجرتی در مشهد (مهاجرپذیری) و دو مولفه فوق، می‌توان نتیجه گرفت که اکثر مهاجران ورودی به این شهر، توانایی اسکان در بخش‌های رسمی آن را ندارند. به همین دلیل، آن‌ها ممکن است یکی از دو مسیر زیر را انتخاب کنند: یا روستاهای اطراف را برای اسکان انتخاب کرده و موجب توسعه مناطق ساخته‌شده در آنجا شوند، یا اراضی با پوشش گیاهی یا بایر را به‌طور غیررسمی به عنوان سکونتگاه خود برگزینند که این موضوع منجر به تغییر کاربری و پوشش این اراضی می‌شود. با توجه به این که مهاجران ورودی به مشهد از توان مالی لازم برای اسکان در داخل شهر برخوردار نیستند، به‌طور غیررسمی حاشیه‌های این شهر را برای سکونت انتخاب می‌کنند. این روند منجر به افزایش سکونتگاه‌های غیررسمی و متعاقباً تغییر کاربری مناطق حاشیه‌ای می‌شود، به‌طوری که اراضی دارای پوشش گیاهی یا دیگر کاربری‌های غیرمسکونی به تدریج به سکونتگاه‌های دائمی تبدیل می‌شوند.

باتوجه به این که در طرح‌های فرادست شهر مشهد، غرب کلان‌شهر مشهد به منظور توسعه در نظر گرفته شده است، توسعه در غرب این شهر در تمام ادوار قابل مشاهده است و این مهم نشان‌دهنده تأثیر طرح‌های فرادست در تغییر کاربری محدوده مورد مطالعه است.

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تغییرات کاربری اراضی منطقه کلان‌شهری مشهد با مساحت ۱۸۱۴۱۹ هکتار مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از تصاویر ماهواره لندست ۵ در سال‌های ۱۳۶۲ و ۱۳۸۸ و لندست ۸ در سال ۱۳۹۸ استفاده شده است. برای طبقه‌بندی این داده‌ها از الگوریتم حداکثر احتمال در نرم‌افزار QGIS بهره گرفته شده است. در مرحله اول، تغییرات کاربری زمین از سال ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۸ با در نظر گرفتن چهار عامل مؤثر بر تغییرات کاربری زمین تحلیل شده است. در نهایت، تغییرات کاربری زمین در ناحیه مورد مطالعه برای سال ۱۴۰۸ شبیه‌سازی شده است.

بررسی و تحلیل انتقال از تمامی انواع کاربری‌های اراضی به کاربری‌های ساخته‌شده در بازه زمانی ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۸ نشان‌دهنده یک تحول اساسی در الگوی توسعه شهری و تغییرات اکوسیستمی منطقه است. پیش‌بینی‌ها برای سال ۱۴۰۸ نیز نشان‌دهنده تحولات عمیق در کاربری‌های اراضی در منطقه موردنظر است که به وضوح ضرورت توجه به چالش‌های محیط‌زیستی را نمایان می‌سازد. افزایش قابل توجه کاربری مسکونی با نرخ ۸,۳۳٪ و همچنین رشد اراضی بایر با ۵,۹۹٪، نگران‌کننده به نظر می‌رسد و حاکی از توسعه شهری بدون برنامه‌ریزی دقیق و پایدار است. در مقابل، کاهش ۹,۶۹٪- در فضاهای سبز بیانگر تخریب اکوسیستم‌های محلی و تهدیدی جدی برای تنوع زیستی و سلامت محیط‌زیست است. این وضعیت نیازمند توجه ویژه به سیاست‌های حفظ و مدیریت فضاهای سبز شهری است تا به تعادل اکولوژیکی و کیفیت زندگی شهروندان آسیب نرساند. علاوه بر

این، تغییرات منفی در کاربری کوهستانی و پهنه‌های آبی، نیاز به مدیریت هوشمند منابع آبی و حفظ منابع طبیعی را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. در نهایت، این وضعیت به‌عنوان هشدار جدی درباره استفاده ناپایدار از منابع طبیعی و پیامدهای آن بر محیط‌زیست و زیست‌محیطی تلقی می‌شود و باید بر اساس آن اقداماتی مؤثر و جامع برای حفظ و مدیریت پایدار این منابع انجام شود، به‌طوری‌که نیاز به حفظ فضاها، سبز و بهینه‌سازی استفاده از اراضی به‌ویژه در مناطق پر جمعیت و در حال توسعه بیش‌تر از پیش حس می‌شود. باتوجه‌به ضرایب کاپای به‌دست‌آمده از تحلیل‌ها (جدول ۵)، مدل مورد‌استفاده در این مطالعه از دقت و اعتبار بالایی برخوردار است. این میزان از توافق نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های ارائه‌شده در خصوص تغییرات کاربری اراضی قابل اعتماد بوده و می‌توان به آن‌ها به‌عنوان ابزار مؤثری برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع طبیعی و توسعه شهری اتکا نمود.

به طور کلی در تغییرات کاربری اراضی منطقه کلان‌شهری مشهد، اسکان غیررسمی، شهرک‌های صنعتی، مناطق گردشگری و طرح‌های جامع تاثیر به‌سزایی دارند؛ لذا در منطقه کلان‌شهری مشهد، می‌بایست این عوامل تحت کنترل درآید.

منابع

۱. اسماعیلی، ف؛ ایلانلو، م. (۱۴۰۰). مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی بر پایه زنجیره مارکوف در روش LCM (نمونه موردی: شهر رامهرمز). *آمایش محیط* ۱۴ (۵۴): ۱۶۶-۱۴۷.
۲. جهانی‌شکیب، ف؛ عرفانی، م. (۱۴۰۰). شبیه‌سازی سناریوهای رشد کاربری شهری با استفاده از روش اتوماتای سلولی SLEUTH. *محیط شناسی* ۴۹ (۴۷): ۲۱۶-۱۹۹.
۳. جهدی، ر. (۱۴۰۲). مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی و پیش‌بینی‌های آینده با استفاده از شبیه‌سازی CA-ANN در حوضه آبخیز ۲۵ شنرود سیاهکل. *جغرافیا و مطالعات محیطی* ۱۲ (۴۶): ۱۷۹-۱۶۴.
۴. حسینی، م؛ کریمی؛ سعدی مسگری، م؛ حیدری، م. (۱۳۹۵). طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم یکپارچه مدل‌سازی تغییر کاربری اراضی شهری. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی* ۱۶ (۴۰): ۹۱-۶۹.
۵. داداش‌پور، ه؛ سالاریان، ف. (۲۰۱۵). تحلیل تاثیر پراکنده‌رویی بر تغییر کاربری زمین در منطقه شهری ساری. *پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری* ۳ (۲): ۱۶۳-۱۴۵.
۶. رایگانی، ب؛ جهانی، غ؛ ستاری‌راد، ا. (۱۳۹۷). پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین برای سال ۲۰۳۰ با استفاده از سنجش از دور و تصاویر چندزمانه لندست (مطالعه موردی: شهر مشهد). *آمایش سرزمین* ۱۰ (۲): ۲۶۹-۲۴۹.

۷. رضانی فرخند، ا.، اکبری، ح.، فولادیان، م.، موسایی. (۱۴۰۳). پیدایش یک حاشیه شهر بر پیکر کلان شهر مشهد: تحلیلی جامعه شناختی - اقتصادی از فرایند شکل گیری محله قلعه خیابان در شهر مشهد. *جغرافیا و توسعه فضای شهری*، ۱۱(۱): ۲۵-۴۷.
۸. شهرداری مشهد. (۱۳۹۶). آمارنامه شهر مشهد. معاونت برنامه ریزی و توسعه سرمایه انسانی شهرداری مشهد با نظارت مدیریت آمار، تحلیل و ارزیابی عملکرد.
۹. شهودی، ج.، احمدزاده، ح.، ولی زاده، ر. (۱۴۰۲). تحلیل عوامل موثر بر روستاهای حریم کلان شهر تبریز (مورد مطالعه: روستاهای دهستان آجی چای). *روستا و توسعه پایدار*، ۵ (۱): ۱۳۰-۱۵۰.
۱۰. عطایی سلوط، ک؛ کیخا، ا. ع؛ احمدپور، م؛ ضیائی، س؛ حسینعلی، ف. (۱۳۹۸). شبیه سازی تغییرات پوشش کاربری اراضی کشاورزی با استفاده از سامانه های چندعامله مبتنی بر برنامه ریزی ریاضی (MP-MAS) در شهرستان بابلسر. *تحقیقات اقتصاد کشاورزی* ۱۱(۴۴): ۲۹۶-۲۶۹.
۱۱. عزیزی قلاتی، س؛ رنگزن، ک؛ تقی زاده، ا؛ احمدی، ش. (۱۳۹۳). مدل سازی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از روش رگرسیون لجستیک در مدل LCM (پژوهش موردی: منطقه کوهمره سرخی استان فارس). *تحقیقات جنگل و صنوبر ایران* ۲۲(۴): ۵۸۵-۵۹۶.
۱۲. مهندسین مشاور خازنی. (۱۳۵۰). طرح جامع مشهد. وزرات مسکن و شهرسازی، سازمان مسکن و شهرسازی خراسان.
۱۳. مهندسین مشاور فرهاد. (۱۳۹۵). طرح توسعه و عمران (جامع) کلان شهر مشهد مقدس، وزرات مسکن و شهرسازی، سازمان مسکن و شهرسازی خراسان.
۱۴. مهندسین مشاور مهران. (۱۳۷۲). طرح جامع مشهد. وزرات مسکن و شهرسازی، سازمان مسکن و شهرسازی خراسان.

15. Angel, S., Parent, J., Civco, D., Blei, A., Potere, D. (2011). The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries, 2000–2050. *Progress in Planning*, 75(2): 53-107.
16. Baghel, S., Kothari, M., Tripathi, M., Singh, P, K., Bhakar, S., Dave. V., Jane, S. k. (2024). Spatiotemporal LULC change detection and future prediction for the Mand catchment using MOLUSCE tool. *Environmental Earth Sciences*, 83(2): 66.
17. Bland, J. M. and D. G. Altman. (1995). Multiple significance tests: the Bonferroni method. *Bmj*, 310(6973): 170.
18. Butera F. M., Caputo P, Singh Adhikari R, Facchini, A. (2016). Urban Development and Energy Access in Informal Settlements. A Review for Latin America and Africa, *Procedia Engineering*, 161, 2093 – 2099.
19. Dou, Y., Yao, G., Herzberger, A., da Silva, R. F. B., Song, Q., Hovis, C., Batistella, M., Moran, E., Wu, W., & Liu, J. (2020). Land-use changes in distant places: implementation of a telecoupled agent-based model. *Journal of artificial societies and social simulation*, 23(1), 1-29.

20. Entwisle, B., Malanson, G., Rindfuss, R., Walsh, S. J. (2008). An agent-based model of household dynamics and land use change. *Journal of Land Use Science*, 3(1): 73-93.
21. Fleiss, J. L. (1971). Measuring nominal scale agreement among many raters. *Psychological bulletin* 76(5): 378.
22. Fontaine, C. M., Rounsevell, M. D. (2009). An agent-based approach to model future residential pressure on a regional landscape. *Landscape ecology*, 24(9): 1237-1254.
23. Gomes, E., et al. (2022). Future land use changes in a peri-urban context: Local stakeholder views. *Science of The Total Environment*. 718: 137381.
24. Hassen, F. S., Kalla, M., Dridi, H. (2022). Using agent-based model and Game Theory to monitor and curb informal houses: A case study of Hassi Bahbah city in Algeria. *Cities*, 125: 103617.
25. Hosseinali, F., Alesheikh, A. A., Nourian, F. (2015). Assessing urban land-use development: Developing an agent-based model. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(1): 285-295.
26. Huang, D., Huang, J., Liu, T. (2019). Delimiting urban growth boundaries using the CLUE-S model with village administrative boundaries. *Land use policy*, 82: 422-435.
27. Irwin, E. G. and J. Geoghegan. (2001). Theory, data, methods: developing spatially explicit economic models of land use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1-3): 7-24.
28. Isinkaralar, O. (2024). QGIS-based modeling and analysis of urban dynamics affecting land surface temperature towards climate hazards in coastal zones of Portugal. *Natural Hazards* 120(8): 7749-7764.
29. Iskandar, B., Kurnia, A. A., Jauhari, A., Zannah, F. (2024). Modeling Land Cover Change Using MOLUSCE in Kahayan Tengah Forest Management Unit, Kalimantan Tengah. *Jurnal Sylva Lestari* 12(2): 242-257.
30. Kamaraj, M., Rangarajan, S. (2022). Predicting the future land use and land cover changes for Bhavani basin, Tamil Nadu, India, using QGIS MOLUSCE plugin. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(57): 86337-86348.
31. Kamusoko C, Aniya M, Adi B, et al. (2009) Rural sustainability under threat in Zimbabwe—simulation of future land use/cover changes in the Bindura district based on the Markov-cellular automata model. *Applied Geography*, 29(3), 435-447.
32. Landis, J. R. and G. G. Koch. (1977). An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers. *Biometrics*, 12(2): 363-374.
33. Li, F., Yigitcanlar, T., Nepal, M., Nguyen, K., Dur, F. (2023). Machine learning and remote sensing integration for leveraging urban sustainability: A review and framework. *Sustainable Cities and Society*: 104653.
34. Lievano Martinez, F., Olaya Morales, Y. (2012). Agent-based simulation approach to urban dynamics modeling, *Dyna*, 79(173): 34-42.
35. Mahmoodzadeh, H., Naghdbishi, A. (2021). Comparative study of the efficiency of the urban development Agent based model and Markov chain Cellular

- Automata model for urban development simulation in the Neyshabur. *Geography and Development*, 19(64): 291-314.
36. Moosavi, V. (2015). Computational Urban Modeling: From Mainframes to Data Streams. *29th Conference on Artificial Intelligence*.
 37. Morshed, S. R., Fattah, M. A., Haque, M. N., Morshed, S. Y. (2022). Future ecosystem service value modelling with land cover dynamics by using machine learning based Artificial Neural Network model for Jashore city, Bangladesh. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c*, 126, 103021.
 38. Mungai, L. M., Messina, J. P., Zulu, L. C., Qi, J., Snapp, S. (2022). Modeling Spatiotemporal Patterns of Land Use/Land Cover Change in Central Malawi Using a Neural Network Model. *Remote sensing* 14(14): 3477.
 39. Nti, I. K., Nyarko-Boateng, O., Adekoya, A. F., Weyori, B. A., Adjei, H. P. (2023). Predicting diabetes using Cohen's Kappa blending ensemble learning. *International Journal of Electronic Healthcare*, 13(1): 57-70.
 40. Park, S., Jeon, S., Kim, S., Choi, C. (2011). Prediction and comparison of urban growth by land suitability index mapping using GIS and RS in South Korea. *Landscape and Urban Planning*, 99(2): 104-114.
 41. Pontius Jr, R. G., Millones, M. (2011). Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 32(15): 4407-4429.
 42. Qiu, R., Xu, W., Zhang, J., Staenz, K. (2018). Modelling and Simulating Urban Residential Land Development in Jiading New City, Shanghai. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 11(4): 753-777.
 43. Rahnama, M. R. (2021)^a. Forecasting land-use changes in Mashhad Metropolitan area using Cellular Automata and Markov chain model for 2016-2030. *Sustainable Cities and Society*, 64: 102548.
 44. Rahnama, M. R. (2021)^b. Simulation of land use land cover change in Melbourne metropolitan area from 2014 to 2030: Using multilayer perceptron neural networks and Markov chain model. *Australian Planner*, 57(1): 36-49.
 45. Rahnama, M. R., Wyatt, R. (2021). Projecting Land use change with neural network and GIS in northern Melbourne for 2014–2050. *Australian Geographer*, 52(2): 149-170.
 46. Ren, Y., Lü, Y., Comber, A., Fu, B., Harris, P., Wu, L. (2019). Spatially explicit simulation of land use/land cover changes: Current coverage and future prospects. *Earth-Science Reviews*, 190: 398-415.
 47. Sabri, N. Q., Khayyun, T. S. (2024). Spatiotemporal Prediction of Future LULC changes, Northern and Northeastern Parts of Iraq with MOLUSCE. *Journal of Ecohumanism*, 3(7): 2417–2433.
 48. Tayyebi, A., Pijanowski, B. C. (2014). Modeling multiple land use changes using ANN, CART and MARS: Comparing tradeoffs in goodness of fit and explanatory power of data mining tools. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 28: 102-116.
 49. United nations. (2018). Revision of world urbanization prospects: Revision of World Urbanization Prospects. U. D. o. E. a. S. Affairs.
 50. United nations. (2022). World Population Prospects2022: Summary of Results. D. o. E. a. S. Affairs.

51. van Vliet, J., Bregt, A. K., Hagen-Zanker, A. (2011). Revisiting Kappa to account for change in the accuracy assessment of land-use change models. *Ecological Modelling*, 222(8): 1367-1375.
52. Verburg, P. H., Alexander, P., Evans, T., Magliocca, N. R., Malek, Z., Rounsevell, M. D., & Van Vliet, J. (2019). Beyond land cover change: towards a new generation of land use models. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 38, 77-85.
53. Wafdan, L. (2021). Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification Data from Sentinel-2 & ASTER Imagery Interpretation using Unsupervised Classification Algorithm. *Proceeding International Conference on Science and Engineering*.
54. Walker, R. (2004). Theorizing land-cover and land-use change: the case of tropical deforestation. *International Regional Science Review*, 27(3): 247-270.
55. Wang, C., Zhan, J., & Xin, Z. (2020). Comparative analysis of urban ecological management models incorporating low-carbon transformation: technological *Forecasting and Social Change*, 159, 120190.
56. Warren, C. R. (2009). *Designed by zoning: Evaluating the spatial effects of land use regulation* (Doctoral dissertation, UC Berkeley).
57. Yousefi, S., Mirzaee, S., Almohamad, H., Al Dughairi, A. A., Gomez, C., Siamian, N., Alrasheedi, M., & Abdo, H. G. (2022). Image Classification and Land Cover Mapping Using Sentinel-2 Imagery: Optimization of SVM Parameters. *Land*, 11(7), 993.
58. Zarin, T. and M. Esraz-Ul-Zannat (2023). Assessing the potential impacts of LULC change on urban air quality in Dhaka city. *Ecological Indicators*, 154: 110746.
59. Zhang, L., Han, R., & Cao, H. (2021). Understanding urban land growth through a social-spatial perspective. *Land*, 10(4), 348.
60. Zhao, L., Liu, X., Xu, X., Liu, C., & Chen, K. (2022). Three-Dimensional Simulation Model for Synergistically Simulating Urban Horizontal Expansion and Vertical Growth. *Remote Sensing*, 14(6), 1503.
61. Zhong, T., Huang, X., Ye, L., & Scott, S. (2014). The impacts on illegal farmland conversion of adopting remote sensing technology for land inspection in China. *Sustainability*, 6(7), 4426-4451.
62. Zhou, Y., Huang, X., Chen, Y., Zhong, T., Xu, G., He, J., Xu, Y., Meng, H. (2017). The effect of land use planning (2006–2020) on construction land growth in China. *Cities*, 68: 37-47
63. Zhu, X., Zhang, P., Wei, Y., Li, Y., & Zhao, H. (2019). Measuring the efficiency and driving factors of urban land use based on the DEA method and the PLS-SEM model—A case study of 35 large and medium-sized cities in China. *Sustainable Cities and Society*, 50, 101646.
64. earthexplorer.usgs.gov