



Modeling urban development using Geographic Information System Technology & Geographic Weighted Regression (Case Study: Karaj City)

Saleh Arekhi^{1*}, Jafar Ajaklou²

¹Associate Professor, Department of Geography and GIS, Faculty of Human Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran

² MSc in Geographical Information System, Department of Civil Engineering, Non-Profit-Non-Governmental Institute, lamei Gorgani Non-profit Institute, Gorgan, Iran

Received Date: 18 January 2025 Accepted Date: 25 February 2025

Abstract

Background and Objective: Simulation and continuous review of dynamic processes and urban growth patterns with regard to past development and its prediction in the future, for planners and proponents of natural resource conservation in setting sustainable development strategies, achieving sustainable urban development as well as better decision making. In this regard, the city of Karaj with the approach of being the center of the province as being industrial and migrating has had an impact on all the internal structure of the surrounding cities and villages. As a result, the use of hybrid modeling with a deeper and local perspective for codified planning for the sustainable development of the city of Karaj is inevitable. The aim of this study was to model the growth patterns of Karaj city using heuristic statistical preprocessing (ER), ordinary least squares regression (OLS) and spatial weighted regression model (GWR) and also to predict its development using the model. CA-Markov considering the 20-year period 1381-1400.

Research Method: For this purpose, first, effective criteria in this process were collected, analyzed and prepared from relevant organizations, and land use maps were extracted from Landsat satellite images. In the next step, the maps were validated and changes were detected. The results of change detection show that the largest increase in area occurred in the built-up areas (2893.86 hectares) and the largest decrease in area occurred in barren lands (808.02 hectares). Based on these changes and to avoid the trial and error method in selecting the best combination of input criteria to the GWR model, pre-processing was performed on the criteria using the ER and OLS methods. In the next step, considering the output of ER and OLS methods, 8 independent variables were selected as inputs to the models. Then, modeling of urban growth patterns was performed using the GWR model.

Findings and Conclusions: results showed that out of 8 variables, two variables had the same direction of impact (negative or positive) in the studied space and the other variables change their impact in the whole region. Finally, using the CA-Markov model, the land use map for 1420 was predicted. The final results showed that the CA-Markov model predicts that the highest rate of development will occur in 1420 in the eastern and northeastern parts of Karaj.

Key words: Modeling, Ordinary least squares Regression, Spatial weight Regression, GIS, Karaj.

* **Corresponding Author Email:** S.arekhi@gu.ac.ir

Cite this article: Arekhi, S. and Ajaklou, J. (2025). Modeling urban development using Geographic Information Systems Technology & Geographic Weighted Regression (Case Study: Karaj City). *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 6(2), 333-361.



مدل سازی توسعه شهری با استفاده از فناوری سامانه اطلاعات جغرافیایی و رگرسیون وزن دار مکانی (مطالعه

موردی: شهر کرج)

صالح ارخی^{۱*}، جعفر اوجاقلو^۲

۱. دانشیار، گروه جغرافیا و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

۲. کارشناسی ارشد GIS، گروه نقشه‌برداری، موسسه غیرانتفاعی لامعی گرگانی، گرگان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

چکیده

زمینه و هدف: شبیه‌سازی و بازیابی دائمی فرآیندهای دینامیک و الگوهای رشد شهری با توجه به توسعه در گذشته و پیش‌بینی آن در آینده، برای برنامه‌ریزان و طرفداران حفظ منابع طبیعی در تنظیم کردن استراتژی‌های توسعه پایدار، رسیدن به توسعه پایدار شهری و همچنین تصمیم‌گیری بهتر برای جهت‌دهی توسعه در آینده، یک امر حیاتی است. در این راستا شهر کرج با رویکرد مرکز استان بودن به عنوان صنعتی بودن و مهاجرپذیر بودن بر کلیه ساختار داخلی شهرها و روستاهای اطراف تأثیرگذار بوده است. در نتیجه استفاده از مدل‌سازی‌های ترکیبی با نگاه عمیق‌تر و محلی جهت برنامه‌ریزی‌های مدون در راستای توسعه پایدار شهر کرج غیرقابل اجتناب می‌نماید. هدف این پژوهش، مدل‌سازی الگوهای رشد شهر کرج با استفاده از روش‌های پیش‌پردازش آماری رگرسیون اکتشافی (ER)، رگرسیون حداقل مربعات معمولی (OLS) و مدل رگرسیون وزن دار مکانی (GWR) و همچنین پیش‌بینی توسعه آن با استفاده از مدل CA-Markov با در نظر گرفتن دوره ۲۰ ساله ۱۴۰۰-۱۳۸۱ است.

روش بررسی: برای این منظور نخست، معیارهای مؤثر در این فرآیند از سازمان‌های مربوطه جمع‌آوری، آنالیز و آماده‌سازی شدند و نقشه‌های کاربری زمین از تصاویر ماهواره لندست استخراج گردید. در مرحله بعد صحت‌سنجی نقشه‌ها و آشکارسازی تغییرات صورت گرفت. نتایج آشکارسازی تغییرات نشان می‌دهد که بیشترین افزایش مساحت در مناطق ساخته شده (۲۸۹۳ هکتار) و بیش‌ترین کاهش مساحت در زمین‌های بایر (۸۰۸ هکتار) رخ داده است. بر مبنای این تغییرات و برای اجتناب از روش سعی و خطا در انتخاب بهترین ترکیب معیارهای ورودی به مدل GWR، با استفاده از روش ER و OLS، پیش‌پردازش روی معیارها صورت گرفت. در مرحله بعد با در نظر گرفتن خروجی روش ER و OLS، ۸ متغیر مستقل به عنوان ورودی به مدل‌ها انتخاب شدند. سپس مدل‌سازی الگوهای رشد شهری با استفاده از مدل GWR اجرا گردید.

یافته‌ها و نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد از ۸ متغیر، دو متغیر در عرض فضای مورد مطالعه دارای جهت تأثیر (منفی یا مثبت) یکسان بودند و بقیه متغیرها جهت تأثیرشان در کل منطقه تغییر می‌کند. در نهایت با استفاده از مدل CA-Markov نقشه کاربری اراضی برای سال ۱۴۲۰ پیش‌بینی شد. نتایج نهایی نشان داد که پیش‌بینی صورت گرفته با مدل CA-Markov، بیشترین میزان توسعه در سال ۱۴۲۰ در بخش‌های شرق و شمال شرقی شهر کرج رخ می‌دهد.

کلید واژه‌ها: مدلسازی، رگرسیون حداقل مربعات معمولی، رگرسیون وزن دار مکانی، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، کرج

* نویسنده مسئول: S.arekhi@gu.ac.ir

مقدمه و بیان مسأله

شهرنشینی با ایجاد گسترده‌ترین دستکاری‌های بشری در چهره طبیعی زمین، شرایط زندگی ساکنان شهری را در معرض تهدید و نابودی قرار داده است. امروزه گسترش فیزیکی روزافزون و بدون برنامه‌ریزی شهرها، رشد بی‌رویه جمعیت، توسعه اقتصادی و نیز مهاجرت روستانشینان به شهرها، باعث پیدایش و تداوم مخاطرات عظیم زیست محیطی و اجتماعی و کاهش کیفیت زندگی جوامع شهری و غیرشهری شده است. مراکز جمعیتی کوچک و منفرد در گذشته، به مراکز بزرگ، پیچیده و متصل به هم تبدیل شده‌اند (ملکی، ۱۳۸۹). ۱۰۰ سال قبل تقریباً ۱۵ درصد جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی می‌کردند و امروزه این آمار نزدیک به ۵۰ درصد شده است. طی ۲۰۰ سال اخیر با وجود اینکه جمعیت جهان ۶ برابر شده است اما جمعیت شهرنشین آن نزدیک به ۱۰۰ برابر گشته است و این در حالی است که طی یک دوره ۸۰ ساله، شهرنشینی در کشور ما بیش از ۲ برابر شده است (ثابت‌سروستانی و ابراهیم، ۲۰۱۱).

رشد شهری یک پدیده جهانی و یکی از مهمترین پدیده‌هایی است که به دلیل داشتن جنبه‌های زیاد اکولوژیکی و همچنین اجتماعی و اقتصادی، هم بر طبیعت و هم بر محیط زندگی انسان، تاثیرات زیادی داشته است. افزایش امکاناتی که در اختیار مردم قرار می‌گیرد، توأم با به حداقل رساندن هزینه‌های زیست محیطی و اقتصادی، تنها در سایه یک رشد شهری برنامه‌ریزی شده تحقق خواهد یافت (Verburg et al., 2004).

شهرها سیستم‌های پیچیده، باز، پویا و خودسامانده هستند که در فرایند توسعه آنها بسیاری از نشانه‌های پیچیدگی مانند خود سازماندهی وجود دارد (Thorrens, 2001). درک فرایند رشد شهری در برنامه‌ریزی و مدیریت شهری به منظور رسیدن به شکل شهری پایدار بسیار مهم است. از این رو از مدل‌های فضایی که ابزارهایی مفید برای درک فرایند توسعه شهری و ابزاری کمکی برای سیاستگذاری، مدیریت و برنامه‌ریزی شهری و فراهم کننده اطلاعات برای ارزیابی تاثیرات شهری بر محیط زیست هستند، می‌توان برای مدلسازی فرایند توسعه شهری استفاده کرد (He, 2008). مدلسازی الگوهای فضایی شهری می‌تواند دید مناسبی را در مورد اینکه چگونه شهرها تحت شرایط مختلف اجتماعی و اقتصادی و محیطی توسعه می‌یابند، ایجاد کند.

مدل رگرسیون وزن‌دار مکانی^۱ از مدل‌های فضایی پیش‌بینی کننده است که در آن از تکنیک‌های آماری برای مدل‌سازی ارتباطات بین تغییرات پوشش زمین و محرک‌ها بر مبنای داده‌های تاریخی استفاده می‌شوند. این مدل به طور گسترده برای توسعه نقشه‌های احتمالی تغییرات کاربری زمین در مناطق شهری به کار می‌رود. از مزایای این مدل، تعیین وزن عوامل محرک بر مبنای داده‌های تجربی و همچنین واردسازی متغیرهای بیشتر می‌باشد (Hoymann, 2010).

مطالعه روند گسترش و توسعه آبی شهر می‌تواند راهنمای برنامه‌ریزان جهت شناسایی روند توسعه و کمک به آنان برای ارائه برنامه‌های توسعه شهری و خدمات‌رسانی به شهروندان باشد؛ بنابراین، این پژوهش با رویکرد مدلسازی توسعه شهری آینده شهر کرج انجام می‌گیرد که در این راستا با توجه به توانایی‌های مدل GWR در ارائه مدل‌های پیش‌بینی کننده از این مدل استفاده می‌گردد.

پیشینه پژوهش

در علم محیط زیست، از GWR برای بررسی اثرات گسترش شهری و تغییرات در ساختار منظر (چشم انداز) و کیفیت زیستگاه‌های حیات وحش و شهرنشینی (زو و همکاران، ۲۰۲۰؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۲) استفاده شده است. در برنامه ریزی شهری، GWR به طور فزاینده‌ای برای شناسایی و تفسیر ناهمگونی فضایی روابط بین متغیرهای مختلف شهری مورد استفاده قرار گرفته است. این روش اجازه می‌دهد، برنامه‌ریزان شهری برای به دست آوردن بینش‌های دقیق‌تر در مورد تنوع فضایی روابط، که می‌تواند سیاست‌ها و استراتژی‌های مداخله شهری جامع‌تر و مؤثرتر را ارائه دهد، بکار رود (هو و زو، ۲۰۱۹؛ لی و همکاران، ۲۰۱۹؛ کوی و همکاران،

۲۰۲۱). همچنین به طور قابل توجهی در تحقیقات بهداشت عمومی، تنوع فضایی در پیامدهای سلامت و عوامل خطر استفاده شده است (ونده، ۲۰۱۹؛ شی و همکاران، ۲۰۲۳؛ جیائو و همکاران، ۲۰۲۱).

آیفنگ و همکاران (۲۰۱۶) برای تخمین بارش بر روی حوضه خشک کایدام در چین از داده‌های بارش زمین مبنا و ماهواره مبنا استفاده شده و یک مدل رگرسیون وزن دار جغرافیایی با کمترین میزان خطا ارائه کردند.

بوستن (۲۰۰۹) توزیع فضایی بارش و دما را با استفاده از تکنیک‌های درون‌یابی OLS، Co-Criging و WGR انجام داده است. در این مطالعه از متغیرهای مستقلی همانند ارتفاع، جهت دامنه فاصله تا رودخانه برای نشان دادن میزان اثرگذاری بر متغیرهای وابسته استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که بالاترین همبستگی بین متغیرهای مستقل و وابسته مربوط به تکنیک GWR بوده است.

پارک^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۱، با مقایسه نقشه‌های مطلوبیت زمین ایجاد شده با استفاده از GIS، نسبت فراوانی، مدل AHP، رگرسیون لجستیک (LR) و ANN اقدام به پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی شهری جنوب کره کردند. این محققان عوامل ارتفاع، شیب، جهت، فاصله از جاده و مناطق مسکونی، نسبت جاده، کاربری اراضی، امتیاز زیست‌محیطی و محدودیت‌های قانونی را به عنوان پیش‌بینی کننده‌های تغییرات کاربری اراضی بکار بردند. در نهایت با انجام آنالیزهای عامل مشخصه نسبی (ROC)، کاپا و دقت کلی برای بدست آوردن معنی‌داری و همبستگی بین نقشه‌های مطلوبیت زمین به این نتیجه رسیدند که نسبت فراوانی، مدل AHP، رگرسیون لجستیک (LR) و ANN نقشه‌های مطلوبیت زمین مشابهی را برای جنوب کره ایجاد کرده‌اند.

ون دی وورد^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۱، در تحقیقی با عنوان "تهیه نقشه فرم و عملکرد در مناطق شهری: یک روش مبتنی بر متریک‌های شهری و داده‌های سطح نفوذناپذیر پیوسته" مورفولوژی شهر دوبلین پایتخت ایرلند را با نقشه‌های سطح نفوذناپذیر پیوسته نمایش داده‌اند. این نقشه‌ها در سطح Sub-Pixel از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی متوسط مانند اسپات و لندست برای سال ۱۹۸۸ و ۲۰۰۰ استخراج کرده‌اند. برای این منظور، توزیع و پیکربندی فضایی سطح پوشش نفوذناپذیر در مقیاس از قبل تعریف شده فضایی با استفاده از متریک‌های شهری (شامل میانگین سطح پوشش نفوذناپذیر، ویژگی‌های شکل توزیع فراوانی و واریانس فضایی) به کمیت در آورده شده‌اند. در نهایت از نتایج داده‌های سطح پوشش نفوذناپذیر برای کالیبره کردن مدل‌های رشد شهری استفاده کرده‌اند زیرا در نشان دادن عوامل تغییر کاربری شهری مهم هستند.

لی و همکاران (۲۰۱۵) در تحقیق خود با هدف افزایش دقت شبیه‌سازی در مناطق با دقت پایین‌تر مدل فراگیر LR، مدلی از ترکیب دو مدل درخت رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی را مورد استفاده قرار دادند (لی و همکاران، ۲۰۱۵).

ثابت‌سروستانی و ابراهیم^۳ در سال ۲۰۱۱، به منظور بررسی رشد شهری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، مهمترین شهر در قسمت جنوبی ایران را انتخاب کردند. برای این مطالعه تصاویر ماهواره‌ای دوره زمانی بین ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵ و نتایج سرشماری جمعیت را استفاده کردند. با اعمال روش‌های طبقه‌بندی روی تصاویر ماهواره‌ای، چهار نوع اصلی کاربری اراضی شامل: آب، مناطق ساخته شده، پوشش گیاهی و زمین بایر را استخراج کردند. سپس مناطق پوشش برای کل کاربری‌ها را در نقاط مختلف اندازه‌گیری کردند و با مشخصات جمعیتی این نقاط تلفیق کردند. نتایج نشان داده است که در کل دوره زمانی مورد مطالعه، توسعه شهر شیراز به صورت پراکنده نبوده است اما از سال ۲۰۰۰ به بعد می‌توان شاهد پراکندگی در توسعه بود. این نتایج با استفاده از محاسبات آنترپی شانون مورد تایید قرار گرفتند.

طیبی^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۱، با استفاده از دو مدل رشد مرزهای شهری قانون مبنا (UGBs)، مدل وابسته فاصله (DDM) و مدل مستقل فاصله (DIM) و داده‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۰۰، به پیش‌بینی رشد مرزهای کلان‌شهر تهران در سال ۲۰۱۲ پرداختند. این مدل‌ها از فاصله‌ها و آزیموت‌ها، متغیرهای پیش‌بینی کننده برداری و فاصله از نقاط مرکزی در داخل مناطق شهری برای شبیه‌سازی تغییر رشد مرزهای شهری استفاده می‌کنند. مدل وابسته فاصله (DDM) تنها یک مرز شهری را در مرحله زمانی اولیه برای پیش‌بینی

¹- Park

²- Van de Voorde

³- Sabet Sarvestani & Ibrahim

⁴- Tayyebi

مرز شهری در هر مرحله زمانی بعدی، بر اساس افزایش فاصله از عرض آزمون‌های مختلف استفاده می‌کند. متشابهاً، مدل مستقل فاصله (DIM) تغییر در فاصله بین دو مرز، یکی در مرحله زمانی اولیه و دیگری در مرحله زمانی بعدی از عرض آزمون‌های مختلف، برای پیش‌بینی مرزهای آینده شهری استفاده می‌کند. آنها این مدل‌های شبیه‌سازی رشد مرزهای شهری قانون مبنا را با مدل‌های رشد مرز شهری صفر توسعه داده شده، با استفاده از درصد انطباق کمی و مکانی متریک‌ها مقایسه کردند. در نهایت نتایج نشان دادند که مدل‌های شبیه‌سازی رشد مرزهای شهری قانون مبنا میزان انطباق بهتری دارند.

خوش‌گفتار و همکاران در سال ۱۳۸۹، در مقاله‌ای با عنوان "مدل‌سازی مکانی- زمانی رشد شهری: روشی مبتنی بر تلفیق Cellular Automata و زنجیره مارکوف" تغییرات پوششی و کاربری زمین در بخشی از شهر تهران بر اساس تصاویر ماهواره‌ای Aster و نقشه‌های توپوگرافی، برای دوره زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۹ مورد بررسی قرار دادند. برای پیش‌بینی رشد شهری در آینده از مدل تلفیقی سلول‌اتوماتا- مارکوف استفاده کرده‌اند. در نهایت به این نتیجه رسید که شبیه‌سازی بیانگر کاهش زمین جنگلی و افزایش زمین شهری است و کاربری زمین بایر تا سال ۲۰۲۰ افزایش یافته و بخشی از زمین‌های کشاورزی و جنگل به زمین‌بایر تبدیل می‌شود.

کامیاب و همکاران در سال ۱۳۹۰، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، توسعه شهری شهر گرگان را در دوره زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۱ و با به کارگیری سه گروه متغیرها شامل متغیرهای بیوفیزیکی، اقتصادی- اجتماعی و کاربری زمین مدل‌سازی کرده‌اند. برای این منظور، ۱۰ متغیر موثر بر توسعه شهری از سه گروه یاد شده به عنوان لایه‌های ورودی و متغیر وابسته تغییرات شهری به عنوان نود خروجی مورد استفاده قرار داده‌اند. برای صحت‌سنجی آن از رویکرد آماری ROC (با مقدار صحت ۰/۷۵) استفاده کرده‌اند و الگوی توزیع شهری برای سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ را استخراج کرده‌اند. در نهایت، به این نتیجه رسید که با استفاده از روش‌های آماری می‌توان تهدیدات رشد و توسعه شهری برای زمین‌های کشاورزی و مرتعی را به وضوح نشان داد. و همچنین نوع کاربری منطقه تاثیر زیادی بر توسعه شهری در گرگان دارد.

حسینی و همکاران در سال ۱۳۹۰، با شناسایی عوامل تاثیرگذار و ارزیابی آنها، جهات بهینه توسعه فیزیکی شهر دیواندره به عنوان یک منطقه کاملاً کوهستانی کرده‌اند. برای این کار ۱۰ شاخص موثر استفاده شده و برای ارزیابی، مدل‌سازی و پیش‌بینی نواحی مناسب توسعه کالبدی شهر از منطق فازی استفاده کرده‌اند. بدین منظور هر کدام از لایه‌ها با توجه به توابع عضویتی فازی در نرم‌افزار ArcGIS 10.8 فازی‌سازی شده و سپس عملگر ضرب، جمع و مقادیر مختلف گامای فازی روی این لایه‌ها اجرا کرده‌اند. جهت انتخاب گامای بهینه فازی، مقایسه تحلیلی روی پهنه‌های مناسب وضع موجود شهر بر اساس نقاط بحرانی، با پهنه‌های مناسب حاصل از مقادیر گاما انجام گرفته و مشخص شده که گامای ۰/۸ فازی بیشترین تطابق را با اراضی مناسب وضع موجود شهر دارد. در نهایت نقشه نهایی به ۵ کلاس تناسب طبقه‌بندی کرده‌اند و مشخص شده که ۲۴ درصد منطقه مورد مطالعه در کلاس با تناسب اراضی مطلوب و ۵۶/۷ درصد از منطقه در کلاس نامطلوب قرار می‌گیرند. یافته‌ها نشان داده که پهنه‌های مساعد جهت توسعه فیزیکی آتی شهر دیواندره بیشتر در بخش شرقی، تا حدودی نیز بخش شمالی و جنوب شرقی به صورت پراکنده وجود دارد.

پورزیدی و همکاران (۱۳۹۸) برای بدست آوردن روند بارشی در استان مازندران از روش تحلیل رگرسیونی و برای شناسایی رفتار محلی بارش نیز از روش آمار فضایی استفاده نمودند. در پژوهش ایشان نتایج رگرسیون موزون جغرافیایی نشان داد که بارش استان مازندران و ارتفاع دارای یک رابطه معنادار می‌باشند. هدف از انجام این پژوهش مدل‌سازی توسعه شهر کرج با استفاده از مدل‌های رگرسیون وزن‌دار مکانی و مارکوف-سلول خودکار در یک دوره ۲۰ ساله می‌باشد که نتایج حاصل از آن به منظور پیش‌بینی توسعه فضایی و ارائه استراتژی‌های کالبدی- فضایی کاربری‌ها استفاده خواهد گردید.

روش شناسی

داده‌های مورد استفاده

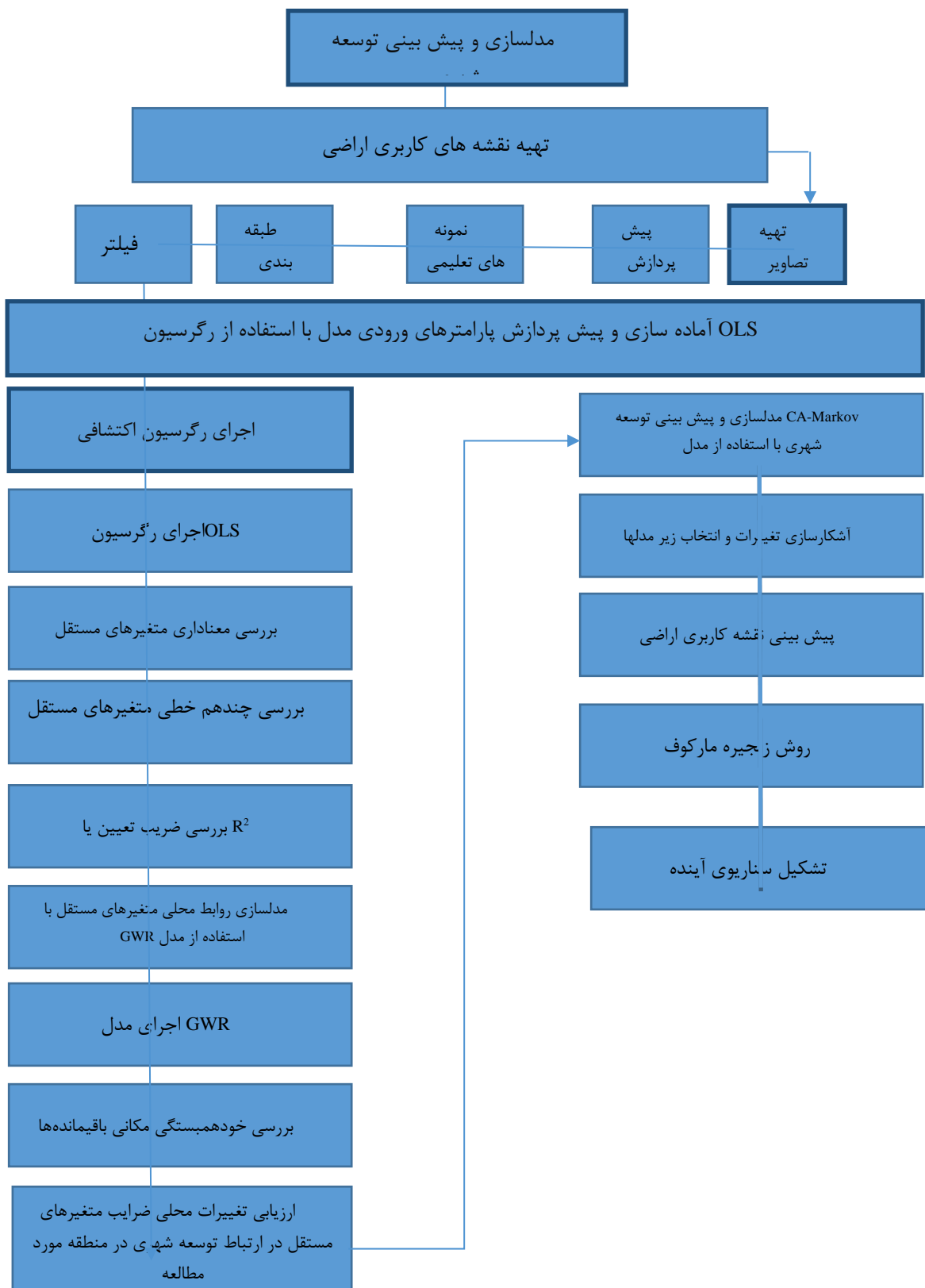
برای آشکارسازی تغییرات و استخراج نقشه‌های پوشش/کاربری اراضی، از داده‌های ماهواره‌ای TM، به تاریخ ۱۳۸۱/۵/۲۵، ETM⁺، به تاریخ ۱۳۸۹/۰۴/۰۱ و ETM⁺ به تاریخ ۱۴۰۰/۰۶/۳۰ (مسیر ۱۶۶، ردیف ۳۵- هر سه تصویر مشابه) استفاده گردید. در ضمن، نقشه توپوگرافی مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح برای بستن مرز حوزه مطالعاتی، GPS جهت تعیین مختصات نقاط نمونه‌برداری، عکس‌های هوایی ۱:۲۰۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای گوگل‌ارث و نمونه‌برداری زمینی جهت ارزیابی دقت و نرم‌افزارهای ENVI5.0، IDRISI Selva و ArcGIS10.8 جهت ارزیابی روند تغییرات و مشاهدات تغییرات کاربری اراضی استفاده شد. شکل ۱ نمودار جریان‌ی مراحل تحقیق را نشان می‌دهد.

تصحیح رادیومتریک

تصحیح رادیومتریک زمانی انجام می‌گیرد که از تصاویر چند زمانه یعنی تصاویری که مربوط به فصول یا سال‌های مختلف و یا سنجنده‌های مختلف هستند، استفاده شود. دو نوع تصحیح رادیومتریک وجود دارد، تصحیح رادیومتریک مطلق و تصحیح رادیومتریک نسبی. روش تصحیح رادیومتریک مطلق نیازمند ورود داده‌های مربوط به خصوصیات اتمسفریک و کالیبراسیون سنجنده است. انجام این تصحیح در اغلب موارد و به خصوص برای داده‌های قدیمی کار بسیار سختی است (McCoy, 2005: 46). در مقابل تصحیحات رادیومتریک نسبی با هدف کاهش متغیرهای اتمسفریک و غیره منتظره در میان تصاویر چندزمانه صورت می‌گیرد. یکی از روش‌های تصحیح رادیومتریک نسبی، کاهش تیرگی پدیده^۱ است. در حالت ایده‌آل پدیده‌های تیره رنگ دارای تابش صفر در همه طول موج‌ها هستند. در این روش فرض می‌شود که در هر باند از تصویر می‌توان پیکسل‌هایی یافت که مقادیر آنها صفر یا نزدیک به یک می‌باشد (مثل آب). به این ترتیب اثر اتمسفری تابش انحرافی به صورت یک مقدار ثابت به پیکسل‌ها در هر باند اضافه می‌گردد. به همین دلیل جهت حذف خطای رادیومتریک بایستی ارزش پیکسل‌های هر باند از حداقل DN مربوط به هر باند کم شود. کاهش تیرگی پدیده یک روش ساده است که به طور گسترده در بسیاری از موارد به کار گرفته می‌شود (Jensen, 2007: 28). در این مطالعه نیز از این روش جهت تصحیح رادیومتریک تصاویر ذکر شده در بالا استفاده شده است.

طبقه بندی تصاویر ماهواره ای و تهیه نقشه های کاربری اراضی

از آنجا که تفکیک و شناسایی پدیده‌ها به لحاظ رنگ نتایج بهتری ارائه میدهد ولی نمایش داده های حاصل از اسکنرها در تک باندها با استفاده از گام خاکستری است، تصویر رنگی کاذب هر تاریخ با استفاده از ترکیب باندهای ۲۳۴ به ترتیب با رنگ‌های مادون قرمز، قرمز و سبز تولید شد (Khoi & Murayama, 2010). این تصاویر به تجسم انواع کاربری‌ها در منطقه کمک می‌کنند. از روش طبقه بندی نظارت شده برای تهیه نقشه‌های پوشش اراضی استفاده شد. اولین گام در انجام دادن یک طبقه بندی نظارت شده تعریف مناطقی است که به مثابه نمونه‌های تعلیمی برای هر کلاس استفاده می‌شوند (Eastman, 2006). برای این مرحله با تفسیر بصری تصویر ترکیب رنگی کاذب و با استفاده از نقشه های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شده سازمان نقشه برداری کشور (<http://www.ncc.org.ir>)، نمونه‌های تعلیمی برای هر کلاس تعریف شدند (Rafiee et al., 2009). پنج کلاس کاربری اراضی در منطقه تعریف شدند: جنگل، مرتع، اراضی بایر، اراضی کشاورزی و مناطق مسکونی. سپس نمونه های تعلیمی به شیوه رقومی کردن روی صفحه رایانه رقومی شدند. در مرحله دوم، نمونه های تعلیمی تفکیک شدند و مرحله سوم طبقه بندی تصاویر ماهواره ای است (Eastman, 2006) که از روش طبقه بندی حداکثر احتمال استفاده شد (Schulz et al., 2010). در نهایت برای حذف قطعات کوچک و ساده سازی تصاویر حاصل از طبقه بندی ها از فیلتر مد استفاده شد.



شکل ۱. مدل مفهومی روش تحقیق

ارزیابی دقت نقشه‌ها

ارزیابی و بررسی صحت نتایج طبقه بندی از مراحل مهم طبقه بندی محسوب می شود که نشان دهنده میزان صحت در طبقه بندی انجام شده است. برای تعیین میزان صحت نقشه های تولیدی لازم است پیکسل های نمونه برداری شده به طور تصادفی انتخاب شوند، ولی اغلب باید محدود به مناطقی شوند که داده های کمی مانند عکس های هوایی موجود است یا مناطق قابل دسترس روی زمین باشند. برای ارزیابی صحت نقشه های طبقه بندی شده به روشهای مختلف، با قطع دادن هر یک از نقشه های طبقه بندی شده با نقشه واقعیت زمینی از دقت کل^۱ و ضریب کاپا^۲ استفاده گردید (Lu et al., 2004: 2365-2407).

تا اینجا به منظور تشریح فرآیند جمع آوری و آماده سازی نقشه ها و لایه های ورودی نحوه آماده سازی تصاویر ماهواره ای، روش های پیش پردازش تصاویر، روش های طبقه بندی و آنالیزهای مورد نیاز پس از طبقه بندی بیان شد. در مراحل بعدی این تحقیق تئوری های مدل سازی و رویکرد ترکیبی در مطالعات توسعه شهری شامل پیش پردازش متغیرهای ورودی به مدل GWR با استفاده از مدل رگرسیون کلی (رگرسیون^۳ OLS)، مدل GWR (به منظور مدل سازی و ارزیابی روابط و تاثیرات متغیرهای مستقل در ارتباط با متغیر وابسته در مکان های مختلف منطقه مورد مطالعه) و مدل CA-Markov (به منظور مدل سازی و پیش بینی تغییرات کاربری اراضی) ذکر می گردد.

مدلسازی تغییرات کاربری اراضی

مدل های تغییر کاربری اراضی، ابزارهایی برای پشتیبانی آنالیز عوامل موثر در تغییرات کاربری اراضی و نتایج آن، به منظور بهتر فهمیدن عملکرد سیستم کاربری اراضی و پشتیبانی برنامه ریزی و سیاست کاربری اراضی هستند. مدل ها برای رفع ابهام مجموعه پیچیده نیروهای اجتماعی - اقتصادی و بیوفیزیکی موثر در میزان و الگوی تغییر کاربری اراضی و همچنین برآورد اثرات تغییرات در کاربری اراضی مفید هستند. بنابراین، مدل ها می توانند کشف و شناسایی تغییرات کاربری اراضی آینده را در شرایط مختلف سناریو فراهم کنند. خلاصه، مدل های کاربری اراضی ابزارهای مفید، تکرارپذیر و مکمل توانایی های ذهنی موجود ما در تجزیه و تحلیل تغییر کاربری اراضی و تصمیم گیری آگاهانه تر هستند (وربورگ^۴ و همکاران، ۲۰۰۴؛ کانستانزا و روث^۵، ۲۰۰۴).

مدل ها تجربی بر اساس مشاهدات استوار هستند و معمولاً برای شرایط خاص و حتی مکان های خاص توسعه یافته اند و با ماهیت پویای توسعه شهری ارتباط اندکی داشته و یا هیچ ارتباطی ندارد. تغییر کاربری اراضی تحت تاثیر عوامل مختلفی است که مدل های کیفی و توصیفی به تنهایی نمی توانند یارای بیان کامل این عوامل باشد. فعالیت های انسان ها و عوامل طبیعی بر تغییر کاربری اراضی در گذر زمان تأثیر می گذارند. جزئیات فضایی نقش مهمی در این فرآیند دارند (وایت و اینجلین^۶، ۲۰۰۰). بنابراین مدل سازی فضایی^۷ مناسب ترین روش به منظور مدل سازی فرآیند تغییرات کاربری اراضی است (چن^۸ و همکاران، ۲۰۰۲). توسعه و پیشرفت سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و نیز سنجش از دور (RS) در فراهم آوردن اطلاعات فضایی مناسب، در سال های دهه ۱۹۹۰ و به کارگیری آن ها در مدل سازی فضایی تغییرات کاربری اراضی، مدل سازی تغییرات کاربری اراضی و توسعه شهری را تسهیل کرد (تاکایاما و کوکلیس، ۱۹۹۷). از این رو روش های مدل سازی و آمار فضایی توسعه پیدا کرد.

1 - Overall Accuracy

2 - Kappa Coefficient

3 - Ordinary Least Squares

4 - Verburg

5 - Costanza and Ruth

6 - White & Engelen

7 - Spatial Modeling

8 - Chen

آمار فضایی

در آمار فضایی، معمولاً با داده‌هایی روبرو هستیم که جنبه‌های مکانی در آنها مطرح است. لذا قبل از هر چیز باید به تعیین کمیت و مقدار عددی جنبه‌های مکانی پرداخت. برای انجام این موضوع دو منبع اطلاعاتی در اختیار است: یکی موقعیت در صفحه مختصات که بر این اساس می‌توان فاصله هر نقطه در فضا را یا فاصله هر مشاهده قرار گرفته در هر نقطه را نسبت به نقاط یا مشاهدات ثابت یا مرکزی محاسبه نمود. بنابراین مشاهداتی که نزدیک‌ترند نسبت به آنهایی که از هم دورترند، منعکس کننده وابستگی فضایی بالاتری هستند. دومین منبع اطلاعات مکانی، مجاورت و همسایگی است که منعکس کننده موقعیت نسبی در فضای یک واحد منطقه‌ای مشاهده شده، نسبت به واحدهای دیگری از این قبیل است. معیار نزدیکی و مجاورت بر اطلاعات به دست آمده از روی نقشه جامعه مورد مطالعه مبتنی خواهد بود و بر اساس این اطلاعات می‌توان تعیین کرد که کدام مناطق با هم همسایه یا مجاور هستند، یعنی دارای مرزهایی هستند که به هم می‌رسند. واحدهایی که دارای رابطه همسایگی یا مجاورت هستند نسبت به محل‌ها یا واحدهایی که دورترند درجه وابستگی فضایی بالاتری را نشان می‌دهند (سلطانی و همکاران، ۱۳۸۹).

مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی

هرگاه به کمک یک تابع، مقدار متغیر وابسته‌ای چون Y توسط یک یا چند متغیر دیگر به عنوان متغیرهای مستقل تعیین شود، یک تابع رگرسیونی بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل برقرار می‌شود. فرم ریاضی تابع خطی ساده به صورت زیر است:

$$Y = \alpha + \beta X \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن مقادیر α و β ضرایب ثابت هستند. ضریب α که عرض از مبدا نامیده می‌شود، مقدار Y به ازای X مساوی صفر را نشان می‌دهد. ضریب β که نمایانگر شیب خط است، میزان تغییرات Y را به ازای یک واحد تغییر X مشخص می‌کند. آمارگران بهترین برازش را عبارت از خطی می‌دانند که مجموع مربعات خطا ($\sum e_i^2$)، کمترین مقدار ممکن را داشته باشد. خطا عبارت است از فاصله عمودی بین مقدار واقعی مشاهده شده و مقداری که برای آن از خط برازش داده شده بدست می‌آید. برای مجموعه‌ای از مشاهدات آماری، خطوط مختلف دارای مجموع مربعات خطای متفاوتی خواهند بود. بهترین خط برازش داده شده خطی است که در آن $\sum e_i^2$ دارای کمترین مقدار باشد. این خط حداقل مربعات نامیده می‌شود و این روش، روش رگرسیون معمولی حداقل مربعات (OLS) نامیده می‌شود. ضرایب α و β مربوط به خط حداقل مربعات به صورت زیر به دست می‌آیند (قربانی، ۱۳۹۱):

$$\hat{\beta} = \frac{XY - n\bar{X}\bar{Y}}{\sum X^2 - n\bar{X}^2} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\hat{\alpha} = \bar{Y} - \hat{\beta}\bar{X} \quad \text{رابطه (۳)}$$

رگرسیون حداقل مربعات معمولی یک روش رگرسیون کلی (Global) یا مدل رگرسیون خطی چند متغیره است که با استفاده از فرمول زیر شرح داده می‌شود؛

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه فوق Y متغیر وابسته، X متغیرهای مستقل، β ضرایب متغیرهای مستقل در تشریح متغیر وابسته و ε میزان خطا یا بخشی از متغیر وابسته که توسط متغیرهای مستقل شرح داده نمی‌شود (استون و بروکس^۱، ۱۹۹۰).

مدل رگرسیون وزن دار مکانی (جغرافیایی)

روش رگرسیون سراسری معمولی، یک رابطه ثابت بین متغیرهای مکانی برای مدل سازی منطقه‌ای فرض می‌کند. مدل‌های رگرسیون معمول مانند روش حداقل مربعات معمولی، ناپایداری مکانی متغیرها را نادیده می‌گیرد. در حالی که، رگرسیون وزن دار مکانی یک تکنیک رگرسیون محلی برای بررسی ناپایداری یا تغییرات فضائی است، که اهداف آن برآورد پارامترهای مدل رگرسیون کلی با اعمال

برخی از دیگر ویژگی‌های نشان دهنده تغییرات فضائی است. این روش برای مدل کردن تغییر محلی پیچیده پارامترهای رگرسیون مناسب است، و همچنین پارامترها را برای هر مشاهده در مکان i با استفاده از کل مشاهدات و وزن اختصاص داده شده از طریق طرح وزن دهی به داده‌ها در دیگر مکان‌ها براساس مجاورت فضائی یا فاصله برآورد می‌کند (لیو و وی، ۲۰۰۹). عمده برتری GWR در مقابل مدل‌های رگرسیون معمولی، توانایی آن در بررسی و لحاظ کردن ناپایداری‌های مکانی است. ناپایداری‌های مکانی نشان می‌دهد که اندازه‌گیری یا تخمین روابط بین متغیرها از محلی به محل دیگر فرق می‌کند (منیس، ۲۰۰۶). روش GWR یک تکنیک رگرسیون محلی است که به طور معنی‌داری دقت رگرسیون معمولی را برای استفاده در داده‌های مکانی بهبود داده است. رگرسیون وزن دار مکانی قادر است بر مشکل پایداری در مدل‌سازی رگرسیونی با جداسازی آماره‌های سراسری و محاسبه روابط بین متغیرهای محلی برای هر نقطه به صورت جداگانه غلبه کند. پارامترهای محلی تخمین زده شده می‌توانند در محل‌های نقاط رگرسیونی ترسیم شوند. برخلاف مدل‌های رگرسیونی معمول که یک معادله رگرسیونی برای توصیف روابط کلی بین متغیرها برقرار می‌کنند، GWR اطلاعات مکانیابی تولید می‌کند که تغییرات مکانی بین روابط متغیرها را بیان کند. بنابراین نقشه‌های تولید شده از این تحلیل‌ها در توصیف و تفسیر ناپایداری مکانی نقش کلیدی را بازی می‌کنند (قربانی و همکاران، ۱۳۹۱). جزئیات کامل GWR بوسیله فودرینگهام و همکاران (۲۰۰۲) ارائه شده است. یک مدل رگرسیونی چند متغیره خطی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$Y_i = \beta_{0i} + \beta_{1i}X_{1i} + \beta_{2i}X_{2i} + \dots + \beta_{kn}X_{kn} + \varepsilon_i \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$Y_i = \beta_{0i} + \sum_k \beta_k X_{ik} + \varepsilon_i \quad \text{رابطه (۶)}$$

در اینجا Y_i متغیر وابسته در موقعیت i ، مقدار β_{0i} عرض از مبدا، β_{ik} برابر است با K امین پارامتر محلی در i امین موقعیت، X_{ik} نشان دهنده k امین متغیر مستقل در i امین موقعیت و n بیانگر موقعیت قبلی است. در GWR وزن اختصاص داده شده به هر یک از مشاهدات بر اساس یک تابع تنزل فاصله در مرکز مشاهده i است. مدل رگرسیون وزن دار مکانی موقعیت مکانی نمونه‌ها را در نظر می‌گیرد و این امکان را می‌دهد تا پارامترهای تخمین زده شده به صورت محلی تغییر کند، یک مدل GWR می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad \text{رابطه (۷)}$$

در اینجا (u_i, v_i) مختصات i امین موقعیت را نشان می‌دهد، $\beta_0(u_i, v_i)$ و $\beta_k(u_i, v_i)$ پارامترهای تخمین زده شده برای i امین موقعیت هستند که مقادیر آنها با موقعیت تغییر می‌کند. X_{ik} و ε_i به ترتیب متغیرهای مستقل و میزان خطا در موقعیت i هستند. پارامترهای مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی به صورت ماتریس زیر تخمین زده می‌شود:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad \text{رابطه (۸)}$$

در اینجا X ماتریس تشکیل شده بوسیله مقادیر X_T و Y بردار تشکیل شده بوسیله متغیر Y است. برای GWR، پارامترها با استفاده از یک تابع وزنی به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$\hat{\beta}(u_i, v_i) = (X^T W(u_i, v_i) X)^{-1} X^T W(u_i, v_i) Y \quad \text{رابطه ۹}$$

در اینجا $W(u_i, v_i)$ وزن‌های انتخاب شده هستند، بطوری که آن‌هایی که به نقطه تحت مطالعه نزدیک‌ترند نسبت به نقاط دورتر تأثیر بیشتری بر نتایج داشته باشند.

خود همبستگی مکانی^۲

نواحی جغرافیایی اغلب الگوهای مکانی مشخصی را نشان می‌دهند. در بررسی سطوحی که در مجاورت یا همسایگی هم قرار می‌گیرند گاه ویژگی‌های مشترکی دیده می‌شود به طوری که مقایر یک متغیر در یک موقعیت با مقادیر همان متغیر در موقعیت‌های مجاور همبستگی نشان می‌دهند. این پدیده که منجر به افزونگی داده‌ها نیز می‌شود تحت عنوان خود همبستگی فضایی شناخته شده

2- Luo & Wei

3- Mennis

1- Spatial Autocorrelation

و نتایج بدست آمده از تحلیل‌های غیرمکانی را هنگامی که از داده‌های مکانی استفاده شود تحت‌الشعاع قرار می‌دهد (گتیس^۱، ۲۰۰۷؛ فیچر و گتیس^۲، ۲۰۰۹). می‌توان گفت تقریباً تمامی داده‌های مکانی درجاتی از خود همبستگی مکانی را نشان می‌دهند. شاخص‌های آماری مختلفی نظیر Moran, s I, Geary C و Getis Ord به منظور ارزیابی وجود یا عدم وجود خود همبستگی مکانی ارائه شده‌اند اما مبنای همه، مدل کردن ارتباطات محلی نظیر مجاورت‌ها یا همسایگی‌هاست که از طریق تعریف ماتریس مجاورت یا همسایگی قابل حصول است (بانرجی و همکاران، ۲۰۰۳).

از میان شاخص‌های ارزیابی خود همبستگی مکانی برای یک متغیر، Moran, s I کلی به عنوان یکی از متداول‌ترین شاخص‌ها مطرح است که بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌گردد و مقدار آن بین -۱ و +۱ متغیر است (انسلاین، ۱۹۹۵).

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{(\sum_{i \neq j} w_{ij}) (\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2)} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که در آن n تعداد کل نمونه‌ها، \bar{y} مقدار متوسط کل نمونه‌ها، y_i تعداد متغیر مشاهده شده در موقعیت i، y_j تعداد متغیر مشاهده شده در موقعیت j و w_{ij} ماتریس وزن مکانی است. هر چه مقدار عدد Moran, s I بیشتر به سمت -۱ و +۱ میل کند به ترتیب خود همبستگی مکانی قوی‌تر منفی و مثبت خواهیم داشت (گتیس، ۲۰۰۷؛ اوسالیوان و آنوین، ۲۰۰۲). نتایج بدست آمده از آزمون Moran, s I با تکیه بر یک فرض صفر، مبنی بر وجود یک الگوی تصادفی در رویدادهای مشاهده شده قابل تفسیر است. اگر نتایج آزمون‌های آماری فرض صفر را رد کند، خود همبستگی مکانی معنادار خواهد بود. به منظور ارزیابی معناداری، از یک توزیع مرجع نرمال (نمایانگر فرض صفر که همان الگوی تصادفی رویدادهاست) استفاده می‌شود که میانگین و انحراف معیار آن بر اساس یک روند جایگشت تصادفی در سطوح اطمینان مختلف محاسبه می‌شوند. نتایج بدست آمده از شاخص Moran, s I از مشاهدات، با توجه به رابطه زیر با توزیع مرجع مقایسه شده و پارامتر Z، قابل حصول است.

$$Z = \frac{I_0 - I_E}{SD_{I_E}} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

که در آن I_0 مقدار مشاهداتی شاخص (مقدار بدست آمده از رابطه ۱)، I_E مقدار انتظاری (میانگین) و SD_{I_E} انحراف معیار بدست آمده از توزیع مرجع است (انسلاین، ۱۹۹۵).

آماره Moran, s I کلی که با رابطه ۱ نشان داده شد تنها معیاری است مبنی بر اینکه آیا به‌طور کلی خود همبستگی مکانی در الگوی رویدادها با مقادیر بالا یا پایین در نواحی مختلف منطقه مطالعاتی در اختیار ما قرار نمی‌دهد. برای مواجهه با این مساله شاخص Moran, s I محلی^۳ مورد استفاده قرار می‌گیرد که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_i = Z_i \sum_j W_{ij} Z_j \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

که در آن Z_i و Z_j مقادیر استاندارد شده ویژگی موردنظر در موقعیت‌های i و j می‌باشند و W_{ij} ماتریس وزن مکانی بر اساس نحوه تأثیرگذاری موقعیت‌ها بر موقعیت تعریف می‌شود (میچل^۴، ۲۰۰۵؛ گتیس، ۲۰۰۷).

ضریب تعیین (R^2)

در مدل‌سازی رگرسیون کلی، یک آمار تشخیصی یا ضریب تعیین است که نسبت واریانس را در داده‌های مشاهده شده که توسط مدل شرح داده شده‌اند را اندازه‌گیری می‌کند. تغییرات محلی ضریب تعیین می‌تواند به منظور ارائه درک درست از چگونگی توانایی مدل محلی در تکرار داده‌های ثبت شده در مجاورت نقطه رگرسیون محاسبه شود. فرمول ریاضی این شاخص آماری به صورت زیر است:

$$R_i^2 = \frac{TSS^w - RSS^w}{TSS^w} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

1- Getis

2- Fischer & Getis

3- Local

4- Mitchell

در اینجا TSS^w مجموع مربعات کل وزن‌های جغرافیایی است که به این صورت تعریف می‌شود:

$$TSS^w = \sum_j W_{ij}(y_j - \bar{y})^2 \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

در اینجا RSS^w مجموع مربعات باقی‌مانده‌های وزنی جغرافیایی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RSS^w = \sum_j W_{ij}(y_j - \hat{y})^2 \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

در اینجا W_{ij} وزن داده نقطه j در نقطه رگرسیونی i را تعریف می‌کند.

اگرچه ضریب تعیین محلی در گزارش خروجی GWR می‌آید، اما نیاز به تفسیر دقیق دارد (فادرینگهام و همکاران، ۲۰۰۲).

پیش‌بینی تغییرات آینده با روش زنجیره مارکف

مدل مارکوف، شامل زنجیره متوالی از متغیرهای تصادفی X_1, X_2, X_3, \dots می‌باشد، به عبارت دیگر اگر مجموعه‌ای از حالات را به

صورت $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_r\}$ داشته باشیم، P_{ij} از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{ij}^{(n)} = \sum_{k=1}^r P_{ik} P_{kj} \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

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

در این مدل دو نقشه مربوط به دو دوره زمانی به صورت ماتریسی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. به طوریکه براساس طبقه‌بندی حداکثر احتمال، پیش‌بینی می‌شود که هر پیکسل در هر کلاس با چه احتمالی در همان کلاس مانده یا به کلاسی دیگر تبدیل می‌شود (Eastman, 2006: 128). بنابراین در این طبقه‌بندی توزیع ارزش بازتابی در هر نمونه تعلیمی توسط یک تابع تراکم احتمال، که براساس تئوری احتمال بیس بنا شده، نشان داده خواهد شد. این طبقه‌بندی، احتمال اینکه هر سلول متعلق به یک کاربری باشد را بررسی نموده و سلول را به کاربری با بالاترین احتمال عضویت اختصاص می‌دهد. آنالیز مارکوف بر روی مطالعه انواع پوشش گیاهی و تغییر پوشش شهری و غیر شهری متمرکز شده است (خوش‌گفتار و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۰). خروجی مارکوف شامل احتمالات تبدیل وضعیت، ماتریس مساحت‌های تبدیل شده هر کلاس و در نهایت تصاویر احتمالات شرطی برای تبدیل کاربری‌های مختلف است.

خروجی‌های مرحله مدل‌سازی پتانسیل انتقال به عنوان ورودی‌های مرحله پیش‌بینی تغییرات بکار می‌روند. مقدار تغییر هر تبدیل کاربری با استفاده از زنجیره مارکف پیش‌بینی می‌شود و نقشه کل تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل CA-Markov تهیه خواهد شد. آنالیز زنجیره مارکف ابزاری مناسب جهت مدل‌سازی تغییرات کاربری و پوشش اراضی است و زمانی کاربرد دارد که تغییرات موجود در چشم‌اندازها به راحتی قابل توصیف نباشد. زنجیره مارکف مجموعه‌ای از مقادیر تصادفی است که احتمال آنها در فاصله زمانی داده شده به مقدار اعداد در زمان گذشته وابسته است (فان^۱ و همکاران، ۲۰۰۷). در این روش ماتریس تغییرات ناحیه نشان می‌دهد تغییر تعداد پیکسل‌هایی از یک کلاس کاربری اراضی به کلاس دیگر در یک دوره مشخص به چه میزان خواهد بود (هادوی، ۱۳۸۹).

مدل سلول خودکار

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

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

- ۱- **شبکه منظم سلولی:** این فضا از سلول های مستقل تشکیل شده است. از نظر تئوریک، این سلول ها می توانند اشکال هندسی متفاوتی داشته باشد ولی به طور معمول این فضا به صورت منظم از سلول های مربعی تشکیل شده است. دلیل انتخاب چنین ساختاری سادگی در همسایگی و عدم نیاز به الگوریتمای پیچیده می باشد.
- ۲- **مجموعه مقادیر ممکن برای هر سلول:** هر سلول می تواند مقداری را از بین مقادیر این مجموعه به خود بگیرد. این مقدار می تواند معرف نوع کاربری اراضی و پوشش زمین در محدوده آن سلول باشد.
- ۳- **همسایگی:** مجموعه سلول های مجاور هر سلول که در تغییر مقادیر سلول مرکزی موثر می باشند.
- ۴- **قوانین انتقال:** این قوانین قلب یک مدل CA محسوب می شوند که دینامیک پدیده مورد نظر را نمایش می دهد. این قوانین مقدار یا حالت هر سلول را بعد از یک مرحله زمانی و با توجه به مقادیر همسایه هایش قبل از انتقال، مشخص می سازد. در هر مدل CA هدف اصلی تعیین صحیح و مناسب قوانین انتقال می باشد و این قوانین هستند که کارایی مدل را تعیین می کنند.
- ۵- **فضای زمانی:** یک فضای گسسته در زمان که شامل مراحل زمانی است. در هر مرحله مقادیر سلول ها بر اساس قوانین انتقال تغییر می یابند.

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

پیش بینی روند تغییرات کاربری اراضی با استفاده از ترکیب روش زنجیره های مارکوف و مدل سلول خودکار

این روش براساس تلفیق مدل اتوماسیون سلولی (CA) و زنجیره های مارکوف و مکانیابی براساس تحلیل های چند معیاره برای پیش بینی روند تغییرات کاربری و پوشش اراضی می پردازد. از مزایای این روش استفاده از روش مجاورت فضایی و بعلاوه از دانش توزیع فضایی احتمالی به تحلیل زنجیره های مارکوف و در نهایت پیش بینی روند تغییرات کاربری اراضی می پردازد (شیر کلائی، ۱۳۸۷، ۱۴۲) در این پژوهش نیز برای انجام این روش با استفاده از نرم افزار Idrisi نقشه کاربری اراضی برای سال های ۱۹۷۵ و ۲۰۰۰ و ۲۰۰۵ تهیه شده در مراحل قبل را ابتدا با استفاده از روش زنجیره های مارکوف پیش بینی و سپس با مدل ترکیب و نقشه احتمالی تغییرات پهنه بندی برای سالهای ۲۰۲۰ و ۲۰۵۰ تهیه شده است. در مطالعه حاضر به منظور مدل سازی و پیش بینی تغییرات کاربری اراضی با مدل های CA مبنای، از مدل CA-Markov و ماژول تعبیه شده در نرم افزار IDRISI استفاده شده است.

تحلیل زنجیره مارکف

تحلیل زنجیره مارکف یک ابزار مناسب برای مدل سازی تغییرات کاربری زمین در جایی است که توصیف تغییرات و فرآیندهای سیمای سرزمین مشکل باشد. هر فرآیند مارکف در جایی استفاده می گردد که وضعیت آینده یک سیستم را بتوان به صورت کلی بر اساس وضعیت ما قبل آن سیستم مدل سازی کرد. تحلیل زنجیره مارکف تغییرات کاربری زمین را از یک دوره به دوره دیگر را بیان کرده و از آن به عنوان پایه ای برای نقشه سازی تغییرات آینده استفاده می کند. این کار با استفاده از توسعه یک ماتریس احتمال انتقال تغییرات کاربری زمین از زمان ۱ به زمان ۲ انجام می گیرد که به عنوان پایه ای برای نقشه سازی دوره های زمانی آینده مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

ماتریس احتمال انتقال، احتمال انتقال هر کدام از کاربری ها به کاربری دیگر را نشان می دهد. این ماتریس نتیجه جدول حاصل از تطابق نقشه های دو تصویر است که توسط خطای نسبی اصلاح شده است. ماتریس مساحت انتقال یافته تعداد سلول هایی را که برای تغییر از یک نوع پوشش زمین به نوع دیگر در دوره زمانی آینده مورد انتظار هستند، ثبت می کند. این ماتریس با ضرب هر ستون از

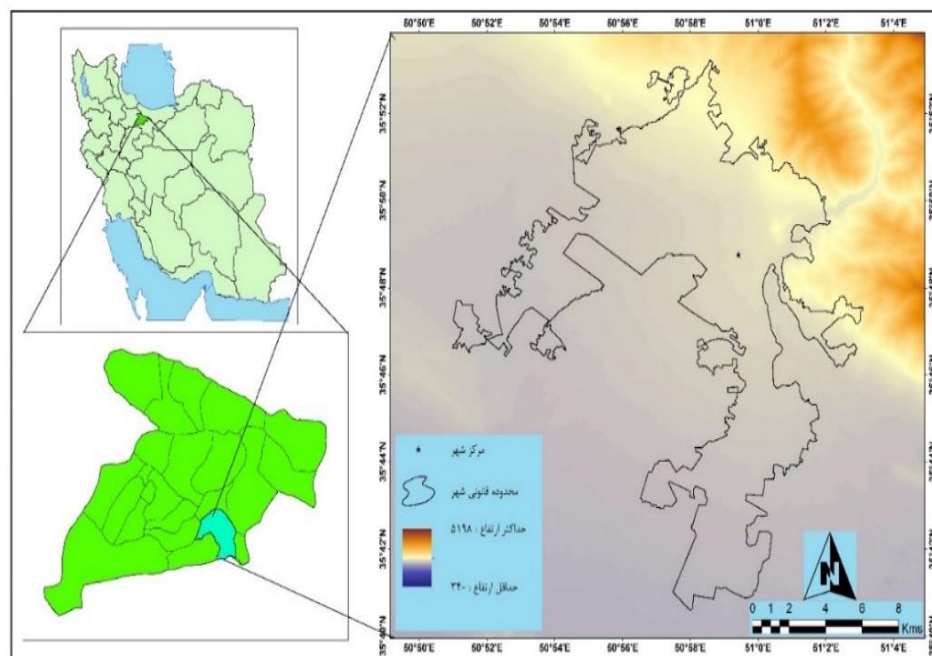
ماتریس احتمال انتقال در تعداد سلول‌های کاربری زمین مربوط به آن در تصویر دوم ایجاد شده است. در هر دوی این فایل‌ها، ردیف نشان‌دهنده پوشش زمین دوره اول و ستون نشان‌دهنده پوشش زمین در دوره دوم است (استمن، ۲۰۰۶).

اجرای مدل MARKOV چند تصویر احتمال (به صورت یک رستر حاوی نقطه‌های سیاه رنگ) را نیز ایجاد می‌نماید. این تصاویر که از ماتریس احتمال انتقال بدست آمده‌اند، احتمال اینکه هر نوع از پوشش زمین در هر موقعیت مکانی در آینده پیدا شود را بیان می‌کنند که بر اساس این دو تصویر پوشش زمین قبلی نقشه‌سازی شده است. اگر چه احتمالات انتقال در هر کاربری دارای دقت زیادی است، اما اطلاعاتی از توزیع مکانی مربوط به کاربری‌ها وجود ندارد. بنابراین، مدل تصادفی مارکوف فاقد هر گونه اطلاعات وابستگی مکانی است و در مقابل **سلول خودکار (CA)** عاملی است که توانایی تغییر وضعیتش را براساس به کارگیری قانونی که وضعیت جدید را مطابق با وضعیت قبلی و وضعیت همسایگانش نشان می‌دهد داراست. از فیلتر CA برای توسعه یک فاکتور وزن‌دهی-مجاورت مکانی برای تغییر وضعیت سلول‌ها براساس وضعیت همسایه‌اش استفاده خواهد شد. لذا به وضعیت مکانی اهمیت بیشتری داده می‌شود. بنابراین برای مرتفع ساختن مشکلات این دو روش، از روش CA-MARKOV استفاده می‌شود (استمن، ۲۰۰۶).

بنابراین CA-MARKOV هر دو توانایی فیلتر CA و فرآیند تغییر مارکوف را ترکیب می‌نماید. پس از اجرای مارکوف، CA-MARKOV از جداول مساحت انتقال یافته و تصاویر احتمال شرطی- که براساس قوانین انتقال در کاربری اراضی و ایجاد نقشه‌های مطلوبیت آماده‌سازی می‌شوند- برای پیش‌بینی تغییرات پوشش زمین در دوره زمانی مورد استفاده در تحلیل زنجیره مارکوف استفاده می‌کند (استمن، ۲۰۰۶).

معرفی محدوده مورد مطالعه

کرج در ۳۶ کیلومتری غرب تهران، در کرانه غربی رود کرج و در دامنه جنوبی رشته کوه البرز گسترده شده است. این شهرستان از شمال به استان مازندران، از شرق به شهرستان تهران، از جنوب به شهرستان شهریار و استان مرکزی و از غرب به شهرستان ساوجبلاغ و استان قزوین محدود است. شهر کرج با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۰ دقیقه و ۳۰ ثانیه خاوری و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه و ۴۵ ثانیه شمالی در فاصله ۴۸ کیلومتری شمال غربی تهران واقع شده است. این شهر با مساحتی معادل ۱۷۵۴ کیلومتر مربع و حریمی به وسعت ۱۷۸۹ کیلومتر مربع در دامنه جنوبی رشته کوه البرز مرکزی قرار دارد و مرکز شهرستان کرج می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۲. نقشه موقعیت شهر کرج در استان البرز و ایران

تجزیه و تحلیل داده‌ها

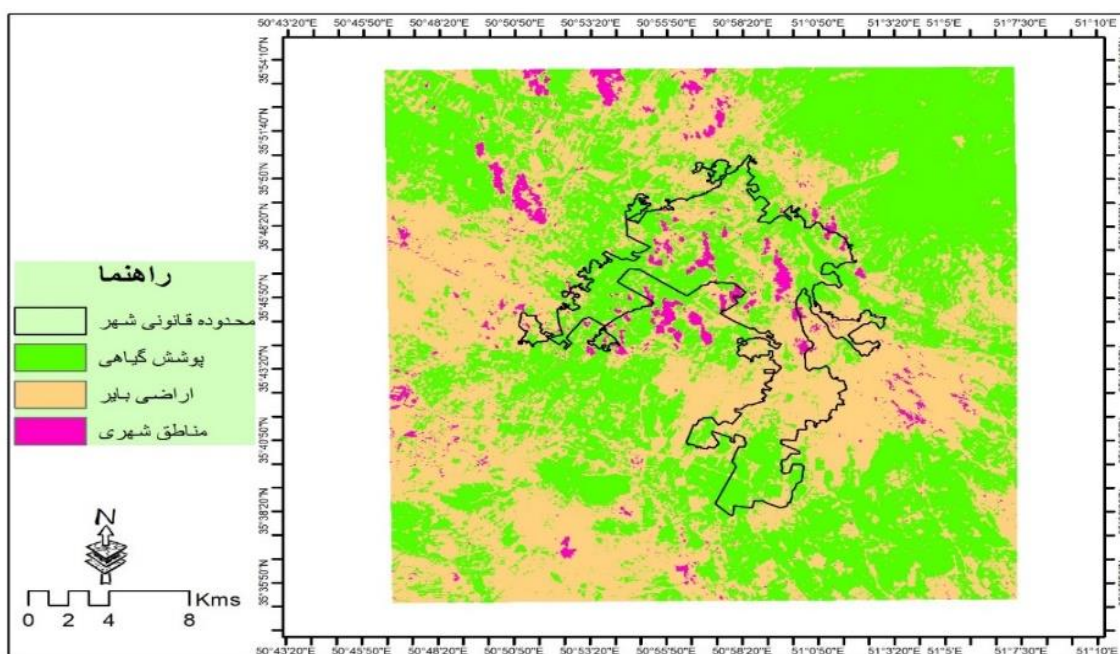
تهیه نقشه کاربری اراضی

در این مطالعه، برای مدل‌سازی تغییرات فضایی روابط متغیرها و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه یک دوره ۲۰ ساله (۱۳۸۱-۱۴۰۰) لحاظ شد. داده‌های کاربری اراضی در این تحقیق طی دو مرحله از تصاویر ماهواره لندست ۵ سنجنده TM و لندست ۷ سنجنده ETM⁺ بدست آورده شد. ابتدا، با توجه به اینکه داده‌های اخذ شده از ماهواره لندست نیاز به تصحیح هندسی ندارند بنابراین با انجام تصحیح رادیومتریک و پیش‌پردازش‌های اولیه، تصاویر ماهواره‌ای در دو نرم‌افزار ENVI5.3 و IDRISI 16.3 با استفاده از روش ماکزیمم احتمال (ML) طبقه‌بندی شدند.

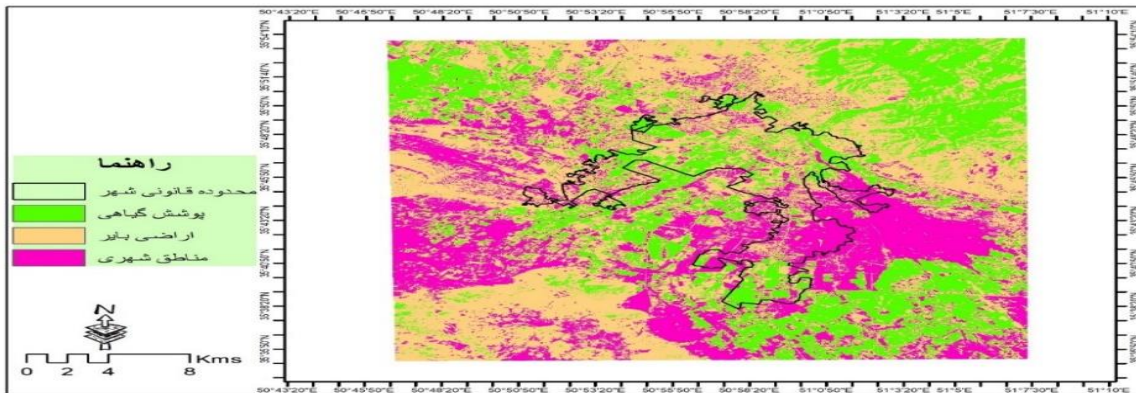
در نهایت نقشه‌های طبقه‌بندی شده (سه طبقه) با استفاده از ۲۳۰ نقطه کنترل زمینی صحت‌سنجی شدند و ضریب کاپای میانگین ۰/۹۲ برای دو نقشه بدست آمد. در مرحله بعد، با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی سازمان نقشه‌برداری (با مقیاس ۱:۲۰۰۰) سال ۱۳۸۱، نقشه‌های کاربری اراضی (با مقیاس ۱:۲۰۰۰) سال ۱۳۸۹ و نقشه‌های کاربری اراضی سازمان نقشه‌برداری (با مقیاس ۱:۲۰۰۰) سال ۱۴۰۰ نقشه‌های حاصل از مرحله اول بهبود داده شد و در ۳ کاربری شامل: مناطق ساخته شده، زمین‌های بایر و پوشش گیاهی طبقه‌بندی شدند. نقشه‌های حاصل از مرحله دوم با استفاده از نقاط کنترل زمینی مذکور ارزیابی صحت شدند و ضریب کاپای میانگین ۰/۸۸ برای هر نقشه به دست آمد (جدول ۱) (شکل‌های ۳، ۴ و ۵).

جدول ۱. ضریب کاپا و دقت ارزیابی داده‌های تحقیق

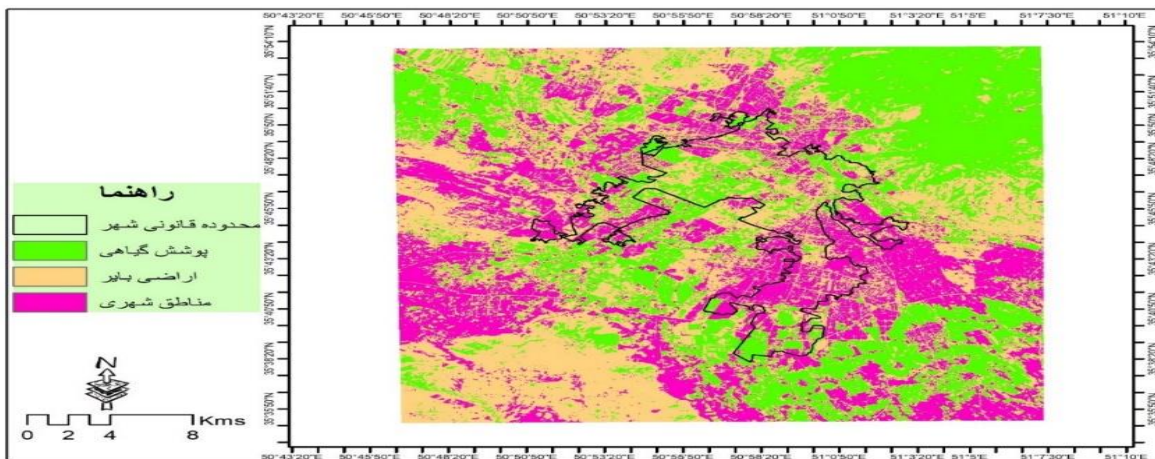
| | | | |
|-------------|--------|--------|--------|
| ارزیابی دقت | ۱۳۸۱ | ۱۳۸۹ | ۱۴۰۰ |
| ضریب کاپا | ۰/۹۲ | ۰/۸۹ | ۰/۹۵ |
| دقت کل (%) | ٪۹۱،۰۸ | ٪۹۳،۶۸ | ٪۹۵،۴۵ |



شکل ۳. نقشه کاربری اراضی سال ۱۳۸۱



شکل ۴. نقشه کاربری اراضی سال ۱۳۸۹



شکل ۵. نقشه کاربری اراضی سال ۱۴۰۰

آماده‌سازی و پیش‌پردازش پارامترهای ورودی به مدل‌ها متغیر وابسته و متغیرهای مستقل

در این مطالعه برای مدل‌سازی روابط و اثرات محلی متغیرها و انتقال کاربری اراضی غیرشهری به کاربری شهری با استفاده از مدل GWR و همچنین پیش‌پردازش پارامترهای ورودی برای پیش‌بینی توسعه شهری با استفاده از مدل CA-Markov، آنالیز آماری چند متغیره کلاسیک استفاده شد. برای این آنالیز، احتمال تبدیل کاربری غیرشهری به شهری طی دوره ۲۰ ساله ۱۴۰۰-۱۳۸۱ به صورت باینری به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد که در آن مقدار یک نشان دهنده مناطقی است که در این دوره به کاربری شهری تبدیل شده‌اند و صفر نشان دهنده مناطق بدون تغییر است. در این مطالعه متغیرهای مستقل گوناگونی در نظر گرفته شده‌اند که می‌توان آنها را به چند دسته تقسیم کرد:

الف) متغیرهای نزدیکی مانند مناطق ساخته شده، شبکه حمل‌ونقل، مناطق شهری اطراف، مراکز جمعیتی، نقاط روستایی اطراف و سایر کاربری‌ها

ب) متغیرهای ژئومورفولوژی مانند ارتفاع و شیب

ج) متغیرهای تراکم یا متغیرهای دارای ویژگی‌های همسایگی مکان کاربری اراضی، به این دلیل که توسعه کاربری اراضی تا حد زیادی به شرایط همسایگی کاربری اراضی بستگی دارد و متغیرهای همسایگی معمولاً تراکم گرا هستند (لو و وی، ۲۰۰۹). در این

مطالعه چندین ویژگی همسایگی کاربری اراضی شامل تراکم پوشش گیاهی، تراکم زمین ساخته شده و تراکم زمین‌های بایر انتخاب شد.

نمونه برداری داده‌ها

بعد از استخراج کاربری اراضی با استفاده از طبقه‌بندی تصاویر، در مجموع سه کاربری (سه متغیر تراکم) بدست آمد. تصویر طبقه‌بندی شده برای رشد شهری بین سالهای ۱۳۸۱ و ۱۴۰۰، تقریباً یک‌ونیم میلیون سلول با قدرت تفکیک ۳۰ متر دارد. اکثر نرم‌افزارها قادر به آنالیز چنین گروه داده‌های بزرگی نیستند. بنابراین در این تحقیق برای رفع این مشکل نمونه‌برداری داده صورت گرفت. با این حال، اگرچه نمونه‌برداری می‌تواند وابستگی فضایی را برای مدل‌های چند متغیره کلاسیک کاهش دهد اما اندازه نمونه کوچک می‌تواند روش‌های ماکزیمم احتمال کم اعتباری را ایجاد کند، بنابراین آنچه در اینجا خیلی اهمیت دارد، این است که یک اندازه نمونه مناسبی را در نظر بگیریم (لو و وی، ۲۰۰۹). برای اطمینان از اینکه نمونه‌برداری داده‌های کاربری اراضی به طور مشخص گویای منطقه مورد مطالعه باشد و اطلاعات کافی از تغییر کاربری اراضی فراهم می‌کند، ترکیبی از دو نوع نمونه‌برداری سیستماتیک و تصادفی برای نمونه‌برداری داده‌های کاربری اراضی مورد استفاده قرار گرفت. زیرا نمونه برداری سیستماتیک (نمونه‌برداری طبقه‌ای) در کاهش وابستگی فضایی (لو و وی، ۲۰۰۹) و نمونه‌برداری تصادفی در نمایندگی جمعیت کاراست (لانگلی و همکاران، ۲۰۰۵). برای این منظور، در مناطق ساخته شده در سال ۱۴۰۰ نمونه‌برداری سیستماتیک با اندازه پیکسل ۵۰۰×۵۰۰ صورت گرفت و تعداد ۲۰۰۰ نقطه انتخاب شد و در مناطق ساخته نشده با استفاده از نمونه برداری تصادفی ۸۴۰ نقطه انتخاب گردید که در مجموع ۳۰۰۰ نقطه نمونه در نظر گرفته شد.

اجرای مدل رگرسیون اکتشافی و رگرسیون OLS به منظور پیش‌پردازش متغیرها

برای رسیدن به بهترین مدل، یعنی بهترین ترکیب از متغیرهای توضیحی در مدلسازی روابط و تغییرات فضایی ضرایب این متغیرها در عرض فضا و همچنین پیش‌بینی این تغییرات برای دوره ۲۰ ساله آینده به ترتیب با استفاده از مدل GWR و مدل CA-Markov، یک رویکرد ترکیبی استفاده شد. در اینجا برای نیل به اهداف تعیین شده، دو نوع پیش‌پردازش آماری شامل: الف) اجرای رگرسیون اکتشافی و ب) اجرای مدل رگرسیون کلی (OLS) در طول هم بکار گرفته شد.

رگرسیون اکتشافی یک ابزار جدید داده‌کاوی و یک روش قوی است که برای ارزیابی بهترین ترکیبات معنادار ممکن متغیرهای توضیحی (مستقل) کاندید ورودی استفاده می‌شود و بهترین مدل رگرسیون OLS که بهترین تشریح از متغیر وابسته را داشته باشد، بر اساس آنالیز عامل تورم واریانس و به تبع چند هم‌خطی متغیرهای مستقل جستجو می‌کند. مقدار عامل تورم واریانس باید کوچکتر از ۷/۵ باشد، تا متغیر به عنوان ورودی مدل انتخاب شود (روزنشین و کارنیلی، ۲۰۱۱).

در این مطالعه به منظور پیش‌پردازش ورودی‌ها به مدل OLS و جلوگیری از افزونگی داده، رگرسیون اکتشافی بر روی متغیرهای در نظر گرفته شده که شامل تراکم مناطق ساخته شده، تراکم پوشش گیاهی، تراکم پارک‌ها، تراکم زمین بایر، فاصله از آزادراه و بزرگراه، فاصله از راه‌های اصلی، فاصله از راه‌های فرعی، فاصله از راه‌آهن، فاصله از شهرهای اطراف، فاصله از نقاط روستایی، فاصله از مناطق ساخته شده، فاصله از پوشش گیاهی، فاصله از پارک‌ها، فاصله از زمین بایر، تراکم جمعیت، شیب و ارتفاع هستند، در نرم‌افزار ArcGIS 10.8 اجرا شد و بهترین ترکیب از متغیرهای کاندید با توجه به مقادیر عامل تورم واریانس بدست آمد (جدول ۲).

جدول ۲. نتایج حاصل از اجرای رگرسیون اکتشافی

| ردیف | متغیر توضیحی (مستقل) | مقدار VIF | ردیف | متغیر توضیحی (مستقل) | مقدار VIF |
|------|-----------------------|-----------|------|----------------------|-----------|
| ۱ | تراکم مناطق ساخته شده | ۲/۱۳ | ۱۰ | فاصله از زمین بایر | ۱۸/۸ |
| ۲ | تراکم پوشش گیاهی | ۲/۰۱ | ۱۱ | تراکم جمعیت | ۳/۴۴ |
| ۳ | تراکم پارک‌ها | ۳/۳۸ | ۱۲ | شیب | ۱/۳۳۲ |
| ۴ | تراکم زمین بایر | ۱۶/۵۳ | ۱۳ | ارتفاع | ۳/۸۶ |

| | | | | | |
|---|----------------------------|-------|----|-----------------------|--------|
| ۵ | فاصله از آزادراه و بزرگراه | ۱۶/۷۲ | ۱۴ | فاصله از راه‌های اصلی | ۱/۰۱۱ |
| ۶ | فاصله از نقاط روستایی | ۱۵/۵۶ | ۱۵ | فاصله از راه‌های فرعی | ۱/۰۰۳۹ |
| ۷ | فاصله از ساخته شده | ۲۱/۳۹ | ۱۶ | فاصله از راه‌آهن | ۱۳/۹۹ |
| ۸ | فاصله از پوشش گیاهی | ۸ | ۱۷ | فاصله از شهرهای اطراف | ۱۷/۶۵ |
| ۹ | فاصله از پارک‌ها | ۱۰/۸۹ | | | |

همان‌طور که در جدول فوق آمده است، متغیرهای فاصله از مناطق ساخته شده، فاصله از پوشش گیاهی، تراکم زمین‌های بایر و فاصله از پارک‌ها مقدار VIF بالاتر از ۷/۵ دارند و به نوعی با هم دیگر دارای چند هم‌خطی کلی هستند. بعد از چند بار تکرار روش رگرسیون اکتشافی مشخص شد که متغیر فاصله از پارک در کنار سه متغیر دیگر که دارای مقدار VIF بالا هستند، ایجاد چند هم‌خطی کلی کرده لذا در مرحله بعد به عنوان ورودی مدل رگرسیون OLS حذف شد. چون مقدار VIF بالا و به تبع چند هم‌خطی کلی، گویای تشریح یکسان متغیرهای مستقل از متغیر وابسته بوده و باعث افزونگی داده می‌شود.

در این مرحله به منظور بررسی معنی‌داری آماری (آماره t)، به کمیت در آوردن اثرات متغیرهای مستقل بر روی احتمال گسترش زمین شهری و همچنین بر طرف کردن چند هم‌خطی‌های باقیمانده در متغیرهای مستقل، رگرسیون OLS بر روی متغیرهای خروجی رگرسیون اکتشافی در نرم‌افزار ArcGIS10.8 انجام می‌شود. بعد از چند بار اجرای رگرسیون کلی در نرم‌افزار ArcGIS10.8 و انجام پیش‌پردازش‌های لازم، متغیرهای زیر با توجه به معنی‌داری برای ورود به مدل GWR انتخاب شدند (جدول ۳).

جدول ۲. متغیرهای دارای شرایط ورود به مدل GWR

| ردیف | متغیرهای مستقل | ضریب | خطای معیار | آماره t |
|------|------------------------|---------|------------|---------|
| ۱ | تراکم مناطق ساخته شده | ۰/۱۵۶ | ۰/۰۰۶۱۴ | ۲۱/۳۶ |
| ۲ | تراکم مناطق پوشش گیاهی | -۰/۳۹۹ | ۰/۰۰۷۶۵ | -۲/۲۶ |
| ۳ | تراکم پارک‌ها | -۰/۱۶۷ | ۰/۰۰۹۷۱ | -۲/۱۹ |
| ۴ | DEM | ۰/۰۳۶۱ | ۰/۰۰۲۹۶ | ۱/۰۴ |
| ۵ | تراکم جمعیت | ۰/۰۲۲۲ | ۰/۰۰۳۴۹ | ۴/۱۵ |
| ۶ | فاصله از راه‌های فرعی | -۰/۵۸۱ | ۰/۰۰۳۱۹ | -۱/۰۲ |
| ۷ | فاصله از راه‌های اصلی | -۰/۳۰۳ | ۰/۰۰۵۶۸ | -۱/۱۷ |
| ۸ | شیب | -۰/۰۷۲۱ | ۰/۰۰۷۸۸ | -۲/۷۲ |

اجرای رگرسیون محلی (GWR)

در این مرحله رگرسیون محلی (GWR) بر مبنای فرمول زیر بر روی متغیرهای انتخاب شده اجرا شد:

$$\text{رابطه (۳۱)} \quad \ln\left(\frac{\text{ChangeProb}_i}{1-\text{ChangeProb}_i}\right) = c_i + \sum_k \beta_k x_{ki} \quad \text{رابطه (۳۰)} \quad \text{ChangeProb}_i = \frac{e^{(c_i + \sum_k \beta_k x_{ki})}}{1 + e^{(c_i + \sum_k \beta_k x_{ki})}}$$

در اینجا OLS ضرایب را برای هر متغیر مستقل در کل فضا ثابت در نظر می‌گیرد. اما GWR پارامترها را برای هر مشاهده در مکان i ، با استفاده از کل مشاهدات با وزن داده شده از طریق تابع وزن‌دهی (تطبیقی) به داده‌ها در دیگر مکان‌ها بر اساس نزدیکی مکانی هر مشاهده که در این مطالعه با فاصله اقلیدوسی نشان داده می‌شود، تعیین می‌کند. به این صورت که مکان‌های نزدیک‌تر، وزن بالاتر و مکان‌های دورتر، وزن پایین‌تری را دریافت می‌کنند (لو و وی، ۲۰۰۹). جدول زیر خلاصه نتایج آماری رگرسیون GWR را نشان می‌دهد (جدول ۴).

جدول ۳. خلاصه نتایج آماری برای تغییر ضرایب در رگرسیون محلی GWR

| ردیف | متغیرهای مستقل | انحراف معیار | حداقل | میانگین | حداکثر | دامنه |
|------|------------------------|--------------|---------|---------|--------|--------|
| ۱ | تراکم مناطق ساخته شده | ۰/۸۳۹ | -۴/۹۰۵ | -۲/۵۰۵ | -۰/۰۹۶ | ۴/۸۰۹ |
| ۲ | تراکم مناطق پوشش گیاهی | ۰/۱۱۸ | -۳/۶۱۲ | -۱/۲۳ | ۱/۱۵۲ | ۴/۷۶۴ |
| ۳ | تراکم پارک‌ها | ۰/۰۷۵ | -۰/۰۵۴۷ | -۰/۰۲۲۵ | ۰/۰۰۹۷ | ۰/۰۶۴۴ |
| ۴ | DEM | ۰/۲۹۵ | -۰/۰۵ | ۰/۲۱ | ۰/۴۶ | ۰/۴۱ |

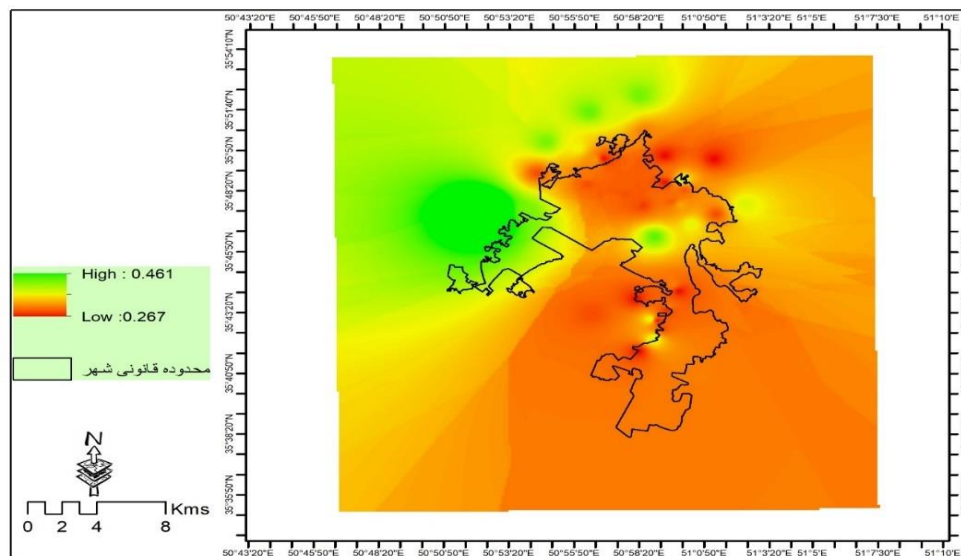
| | | | | | | |
|--------|--------|---------|---------|-------|-----------------------|---|
| ۰/۹۹۱۷ | ۰/۹۹۳۹ | ۰/۴۹۸۰ | ۰/۰۰۲۲ | ۰/۰۸۶ | تراکم جمعیت | ۵ |
| ۰/۷۱۱ | ۰/۱۷۶ | -۰/۱۷۹۵ | -۰/۵۳۵ | ۰/۰۵۸ | فاصله از راه‌های فرعی | ۶ |
| ۰/۵۱۳۹ | ۰/۴۹۶ | ۰/۲۳۹۰ | -۰/۰۱۷۹ | ۰/۰۲۴ | فاصله از راه‌های اصلی | ۷ |
| ۱/۴۸ | ۰/۸۵۱ | ۰/۱۱۱ | -۰/۶۲۹ | ۰/۰۱۸ | شیب | ۸ |

مقایسه نتایج رگرسیون GWR و رگرسیون OLS

رگرسیون محلی (GWR) و رگرسیون کلی (OLS) با توجه به شاخص‌های R^2 ، R^2 اصلاح شده و مجموع باقیمانده‌های مدل با هم مقایسه شدند که رگرسیون محلی (GWR) در همه موارد بالا نسبت به رگرسیون کلی (OLS) عملکرد بهتری را ارائه کرده است (جدول ۵).

جدول ۴. مقایسه رگرسیون کلی (OLS) و رگرسیون محلی (GWR)

| شاخص‌های مقایسه | رگرسیون کلی (OLS) | رگرسیون محلی (GWR) |
|-------------------------|-------------------|--------------------|
| R^2 | ۰/۴۴۶ | ۰/۹۳۲ |
| R^2 اصلاح شده | ۰/۳۶۴ | ۰/۸۶۲ |
| مجموع باقیمانده‌های مدل | ۲۲۸/۹۷ | ۱۰۳/۴۵ |



شکل ۶. نقشه سطوح رستری شاخص R^2 اصلاح شده در محدوده مورد مطالعه

در ادامه به شاخص‌های جدول بالا در ارتباط با دو مدل اجرا شده پرداخته می‌شود:

۱- شاخص R^2 اصلاح شده بیانگر این است که هر مدل چه میزان از تغییرات متغیر وابسته (تبدیل کاربری غیرشهری به شهری) را شرح می‌دهد. میزان قابل قبول R^2 برای مدل‌های رگرسیونی ۰/۵ است که در دو مدل فوق مقدار آن بالای ۰/۵ بوده و بنابراین از لحاظ آماری قابل قبول هستند. با توجه به جدول (۵) و شکل (۶) مدل GWR توانسته میزان بیشتری از تغییرات متغیر وابسته را تشریح کند.

۲- مجموع باقیمانده‌های مدل نشان‌دهنده مقداری از متغیر وابسته است که توسط مدل تشریح نمی‌شود که در اینجا رگرسیون محلی GWR توانسته به میزان ۷۱/۲۵۶ رگرسیون کلی (OLS) را بهبود داده و به نوعی تشریح بهتری از متغیر وابسته داشته باشد.

ارزیابی خود همبستگی مکانی باقیمانده ها

مقدار شاخص Moran's I کلی بین $[-1, 1]$ است و هر چه مقدار آن به ۱ و -۱ نزدیک باشد به ترتیب خود همبستگی مکانی مثبت قوی و منفی قوی را نشان می دهد و هر چه مقدار آن به صفر نزدیک باشد نشان دهنده کاهش و یا عدم خود همبستگی مکانی است. با توجه به جدول (۶) می توان این گونه بیان کرد که باقیمانده ها در مدل رگرسیون GWR نه تنها خوشه بندی نبوده بلکه به صورت تصادفی توزیع شده اند و عدم وجود خود همبستگی مکانی در باقیمانده های مدل را می رساند.

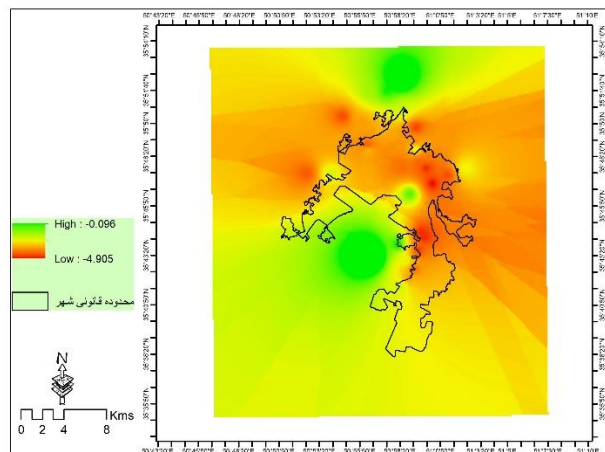
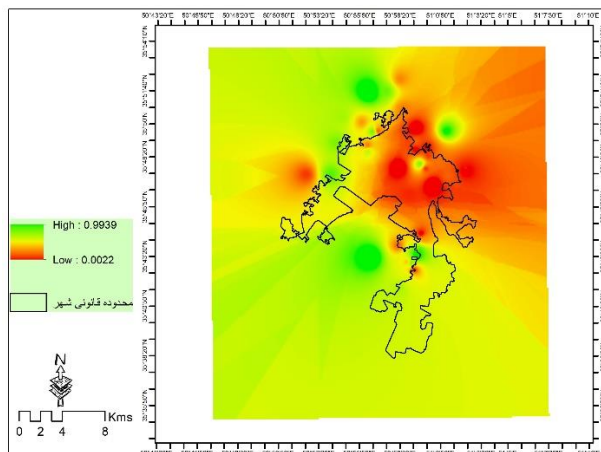
جدول ۵. نتایج اجرای خودهمبستگی فضایی بر روی باقیمانده های مدل

| مقدار | شاخص های خود همبستگی |
|--------|----------------------|
| ۰/۳۶۲۰ | Moran's Index |
| ۰/۰۱۵۸ | واریانس |
| ۰/۸۵۲۰ | z-score |
| ۰/۰۰۲۰ | p-value |

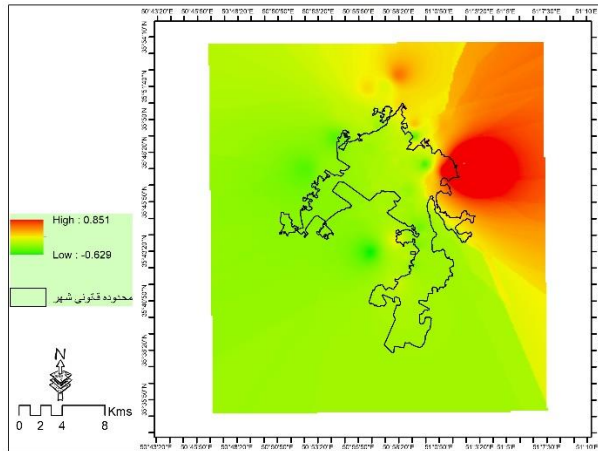
در تشریح نتایج مدل GWR در مقایسه با OLS می توان این گونه بیان کرد که مقادیر برآورد پارامترها یا ضرایب توسط GWR تغییرات معنی داری را نشان می دهد. همانطور که در جدول (۴) آمده است تمام متغیرهای توضیحی به استثناء تراکم جمعیت و فاصله از مناطق ساخته شده در عرض فضای مورد مطالعه هم مقدار ضریب مثبت و هم ضریب منفی را نشان می دهند. این شرایط بیان می کند که در نظر گرفتن ضریب ثابت برای متغیرها در کل فضا توسط رگرسیون های کلی (OLS) مسئله ساز بوده و می تواند گمراه کننده باشد، زیرا تغییرات فضایی معنی دار جهت (+، -) تأثیر متغیرهای توضیحی را در ارتباط با متغیر وابسته را نشان نمی دهند و چنین مسئله ای با استفاده از مدل GWR قابل حل است.

ارزیابی و تفسیر تغییرات فضایی الگوهای رشد شهری

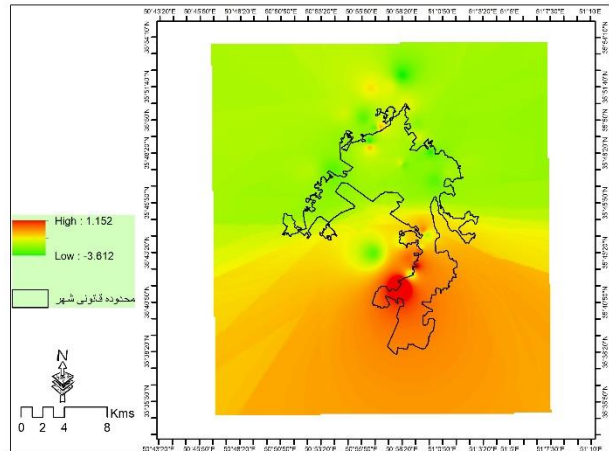
رگرسیون GWR مجموعه ای از برآوردهای ضرایب متغیرهای توضیحی برای هر نقطه نمونه کاربری اراضی تولید می کند که می تواند برای آنالیز تغییرات فضایی اثرات تعیین کننده های رشد شهری مورد استفاده قرار گیرد. بر مبنای نقاط نمونه با برآوردهای ضرایب و شاخص های آماری، یک مجموعه سطوح رستری آماری برای آشکارسازی الگوهای رشد شهری تولید شد که برای این کار از الگوریتم درونیابی IDW استفاده شده است. الگوریتم درونیابی IDW سطوح رستری را تحت تأثیر تغییرات محلی استخراج می کند که می تواند از طریق همسایگی ها به دست آید (لو و وی، ۲۰۰۹) و بنابراین یک روش مناسب برای ایجاد سطوح رستری در این مطالعه است. شکل های (۷) تا (۱۲) سطوح رستری برآورد پارامترها با پیکسل سایز 30×30 را نشان می دهند.



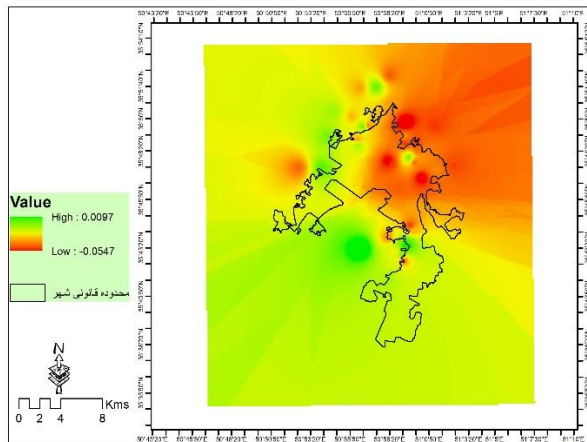
شکل ۸. نقشه ضریب تأثیر متغیر تراکم جمعیت



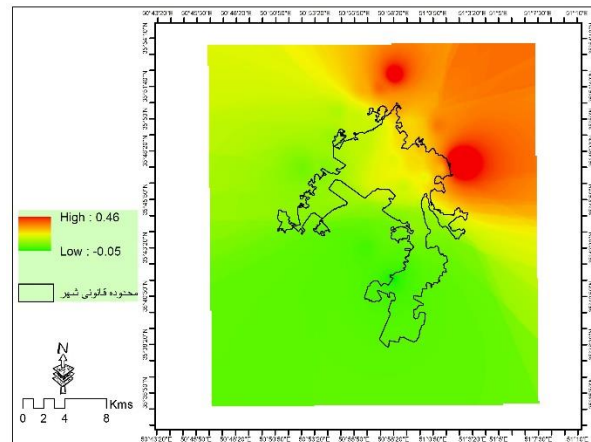
شکل ۷. نقشه ضریب تأثیر متغیر تراکم مناطق ساخته شده



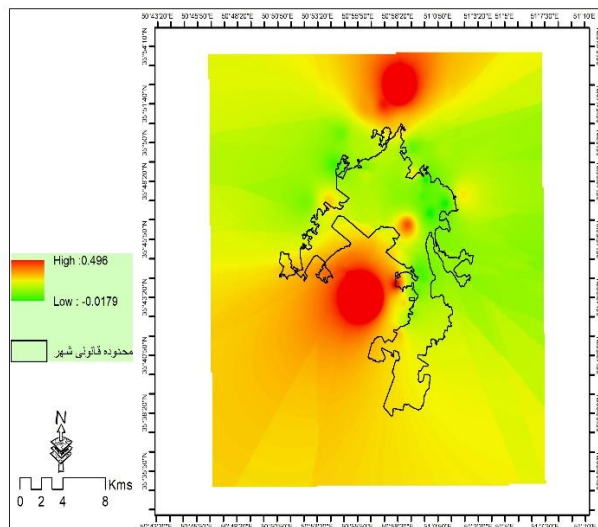
شکل ۱۰. نقشه ضریب تأثیر متغیر شیب



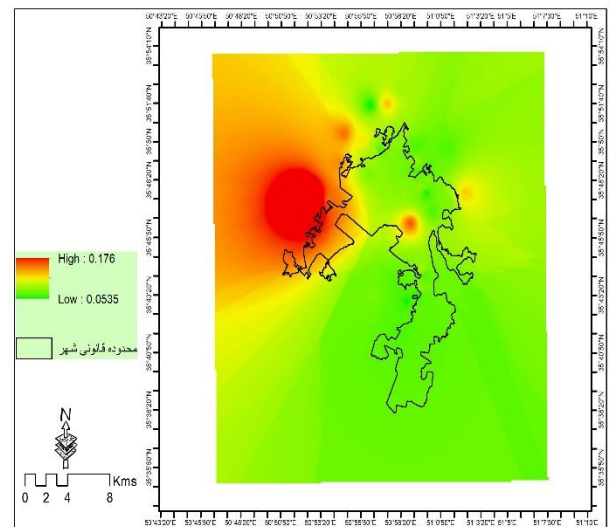
شکل ۹. نقشه ضریب تأثیر متغیر تراکم پوشش گیاهی



شکل ۱۲. نقشه ضریب تأثیر متغیر تراکم پارک



شکل ۱۱. نقشه ضریب تأثیر متغیر ارتفاع (DEM)



شکل ۱۴. نقشه ضریب تأثیر متغیر فاصله از راه‌های اصلی

شکل ۱۳. نقشه ضریب تأثیر متغیر فاصله از راه‌های فرعی

برخلاف رگرسیون کلی OLS که پارامترهای یکسانی در عرض فضا دارد، در رگرسیون GWR همان طور که در شکل های (۷) تا (۱۴) نشان داده شده است، کل پارامترها در عرض فضای مورد مطالعه به طور کلی با یک الگوی فضایی منظم تغییر می کنند. توزیع فضایی آماره های t به طور کلی منطبق بر توزیع فضایی پارامترها است. از بین ۸ متغیر توضیحی، تنها متغیرهای فاصله از مناطق ساخته شده و تراکم جمعیت در کل فضای مورد مطالعه فقط دارای یک جهت از تأثیرات منفی و مثبت هستند (شکل های ۷ و ۸) و ۶ متغیر دیگر جهات تأثیراتشان در عرض فضا تغییر می کند. به این صورت که در کل منطقه مورد مطالعه، متغیر فاصله از مناطق ساخته شده دارای ضریب تأثیر منفی است، یعنی با افزایش فاصله از مناطق ساخته شده تبدیل کاربری غیرشهری به شهری و به عبارت دیگر توسعه شهری کاهش پیدا می کند و با کاهش فاصله مناطق ساخته شده توسعه شهری افزایش پیدا می کند. به بیان دیگر همانطور که انتظار می رفت، با میزان توسعه شهری رابطه عکس دارد و بیشترین ضریب تأثیر را در مرکز منطقه مورد مطالعه داشته است. متغیر تراکم جمعیت در کل منطقه مورد مطالعه دارای ضریب تأثیر مثبت است، یعنی با افزایش تراکم جمعیت میزان توسعه شهری افزایش پیدا می کند و برعکس. همانطور که شکل (۸) نشان می دهد متغیر تراکم جمعیت در قسمت های مرکزی و جنوب منطقه مورد مطالعه بیشترین تأثیر مثبت را روی متغیر وابسته داشته است.

تأثیرات بقیه متغیر باقیمانده که در عرض فضا هم دارای تأثیر مثبت و هم تأثیر منفی بوده اند، با جزئیات بیشتری در زیر تفسیر می شوند:

- متغیر تراکم پوشش گیاهی در غرب و جنوب غربی و در حالت کلی در بخش جنوبی منطقه مورد مطالعه بر روی توسعه شهری ضریب تأثیر منفی داشته است و در بقیه مناطق با شدت کم دارای ضریب تأثیر مثبت بوده است (شکل ۹).

- متغیر شیب در بخش های شمال، شمال شرق و شرق منطقه در برخورد با شیب زیاد دارای ضریب تأثیر منفی بوده و به عنوان یک عامل بازدارنده در تبدیل کاربری غیرشهری به شهری عمل کرده است و در بقیه مناطق با ضریب تأثیر مثبت ضعیف عمل کرده است (شکل ۱۰).

- متغیر ارتفاع (DEM) در بیشتر بخش های منطقه مورد مطالعه دارای ضریب تأثیر منفی ضعیف بوده است. یعنی با افزایش ارتفاع میزان تبدیل کاربری غیرشهری به شهری کاهش پیدا کرده است و در بخش هایی از شمال و شمال شرق منطقه دارای تأثیر مثبت بوده است (شکل ۱۱).

- متغیر تراکم پارک در بخش های شمال غرب و جنوب منطقه مورد مطالعه به دلیل تراکم بالای واحدهای ساختمانی و کمبود زمین به عنوان عامل مثبتی در توسعه شهری داشته است و در بقیه بخش های منطقه مورد مطالعه بخصوص شمال شرق دارای تأثیر منفی بوده است. زیرا در این مناطق پارک های ایجاد شده تحت تمهیدات برنامه ریزی شهری به عنوان یک عامل دافعه عمل می کنند (شکل ۱۲).

- متغیر فاصله از راه های فرعی در بیشتر بخش های منطقه مورد مطالعه به جز قسمت های غربی شهر همان طور که انتظار می رفت با متغیر وابسته رابطه عکس را نشان داده است و این امری منطقی در ساخت و ساز های شهری است (شکل ۱۳).

- همان طور که در شکل (۱۴) نشان داده شده است، متغیر فاصله از راه های اصلی به استثناء بخش های شمالی و جنوب غربی در بقیه منطقه مورد مطالعه به عنوان یک عامل منفی در توسعه کاربری شهری عمل می کند و با تبدیل کاربری غیرشهری به شهری رابطه عکس دارد.

در این بخش با توجه به جدول (۳) نتایج رگرسیون OLS و رگرسیون GWR می توان این گونه بیان کرد که متغیرهای تراکم مناطق ساخته شده و تراکم جمعیت به ترتیب با ضریب معناداری ۲۱/۳۶ و ۴/۱۵ در طول دوره ۲۰ ساله ۱۳۸۱-۱۴۰۰ بیشترین تأثیر را در توسعه شهری و یا تبدیل کاربری غیرشهری به کاربری شهری داشته اند.

در ادامه بعد از مشخص شدن ۸ عامل تأثیرگذار و مقادیر معناداری آنها در توسعه شهری و همچنین تبیین روابط فضایی متغیرها در عرض فضای مورد مطالعه، با استفاده از یک رویکرد جدید (مدل CA-Markov) به مدل سازی و پیش بینی تغییرات کاربری اراضی برای دوره ۲۰ ساله بعدی در چشم انداز ۱۴۲۰ پرداخته می شود.

آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی و انتخاب زیر مدل‌ها

پس از تهیه نقشه‌های کاربری اراضی، آشکارسازی تغییرات و بررسی تغییرات اتفاق افتاده در طی دوره زمانی مورد مطالعه انجام شد. این تغییرات شامل کاهش‌ها، افزایش‌ها و تغییرات خالص برای هر کلاس و انتقال از یک کلاس به کلاس‌های دیگر است. در این تحقیق به منظور آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی از روش مقایسه پس از طبقه‌بندی استفاده شد. با اجرای این روش بر روی کاربری‌های اراضی در سال‌های مورد نظر، ضریب کاپا، ۹۲ درصد به دست آمد. ارزیابی تغییرات کاربری زمین بین سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۰ نشان داد که افزایش مساحت در مناطق ساخته شده (۴۸۸۴۴ هکتار) و کاهش مساحت در زمین‌های بایر (۸۴۲۹۳ هکتار) و پوشش گیاهی (۳۶۴۲۳ هکتار) رخ داده‌است (جدول ۷). همان‌طور که در جدول آمده، بیشترین افزایش مساحت در مناطق ساخته شده صورت گرفته است. این نتایج حاکی از آن است که شهر کرج به واسطه صنعتی بودن، تمرکز بازار کار و در نتیجه افزایش مهاجرپذیری به گونه‌ای شتاب‌آلود توسعه‌یافته و در ساختار و بافت داخلی آن تحولات اساسی صورت گرفته است و همچنین باعث تغییرات شگرفی در مرزهای بلافصل خود در پوشش گیاهی (که بیشتر شامل مناطق کشاورزی است) و زمین بایر شده است. گذشته از اینها، در دوره مذکور پوشش گیاهی معادل ۳۶۴۲۳ هکتار کاهش مساحت داشته که بیشترین میزان آن توسط مناطق ساخته شده تصرف شده است. بعد از انجام آشکارسازی تغییرات و ارزیابی آن، با توجه به نتایج آشکارسازی، زیر مدل‌هایی که بیشترین تغییرات را نشان می‌دادند انتخاب شدند که عبارتند از پوشش گیاهی به مناطق ساخته‌شده، زمین‌های بایر به مناطق ساخته‌شده، زمین‌های بایر به پوشش گیاهی.

جدول ۷. مساحت کاربری‌ها در سال ۱۳۸۱، ۱۳۸۹ و ۱۴۰۰ (به هکتار)

| پوشش گیاهی | مناطق ساخته‌شده | زمین بایر |
|-------------------------|-----------------|-----------|
| سال ۱۳۸۱ | ۴۴۸۳۱ | ۹۰۴۶۵ |
| سال ۱۳۸۹ | ۴۵۵۲۸ | ۸۳۷۹۱ |
| سال ۱۴۰۰ | ۳۷۸۷۷ | ۶۱۷۲ |
| تغییرات مساحت هر کاربری | ۴۸۸۴۴ | -۸۴۲۹۳ |

مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل CA-Markov

تحلیل زنجیره مارکف

در این مرحله بعد از تولید نقشه‌های کاربری برای سه سال ۱۳۸۱، ۱۳۸۹ و ۱۴۰۰ (بخش ۴-۱) به منظور پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی برای دوره ۲۰ ساله بعدی یعنی سال ۱۴۲۰ از تحلیل زنجیره مارکف استفاده شد. پیش‌بینی تغییرات با استفاده از تحلیل مارکف، به طور کلی بر وضعیت کاربری زمین در سال ۱۴۰۰ و تغییرات کاربری زمین در دوره ۲۰ ساله قبلی بین سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۸ متکی است. بعد از اجرای تحلیل زنجیره مارکف با خطای نسبتی ۰/۱۵ (بدان معنی که بیشتر نقشه‌های کاربری زمین دارای دقت ۸۵ درصد هستند) بر روی ۳ نقشه کاربری اراضی به دست آمده از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای، یک ماتریس احتمال انتقال و ماتریس مساحت انتقال یافته ایجاد شد (جدول ۸ و ۹). در هر دو جدول زیر، ردیف نشان‌دهنده پوشش زمین دوره اول و ستون نشان‌دهنده پوشش زمین در دوره دوم است. ماتریس احتمال انتقال، احتمال انتقال هر کدام از کاربری‌ها به کاربری دیگر را نشان می‌دهد. این ماتریس نتیجه جدول حاصل از تطابق نقشه‌های دو تصویر است که توسط خطای نسبتی اصلاح شده است (استمن، ۲۰۰۶).

جدول ۶. ماتریس احتمال انتقال

| پوشش گیاهی | زمین‌های بایر | ساخته شده |
|------------|---------------|-----------|
| پوشش گیاهی | ۰/۴۶۷۹ | ۰/۶۱۴۸ |
| ۰/۰۲۶۲ | | |

| | | | |
|--------|--------|---------|---------------|
| ۰/۵۵۶۰ | ۰/۰۳۹۵ | ۰/۰۴۰۴۵ | زمین های بایر |
| ۰/۵۰۵۸ | ۰/۰۴۰۴ | ۰/۳۴۴۹ | ساخته شده |

ماتریس مساحت انتقال یافته، تعداد سلول‌هایی را که برای تغییر از یک نوع پوشش زمین به نوع دیگر در دوره زمانی آینده مورد انتظار هستند، ثبت می‌کند. این ماتریس با ضرب هر ستون از ماتریس احتمال انتقال در تعداد سلول‌های کاربری زمین مربوط به آن در تصویر دوم ایجاد شده است (استمن، ۲۰۰۶).

جدول ۶. ماتریس مساحت انتقال یافته

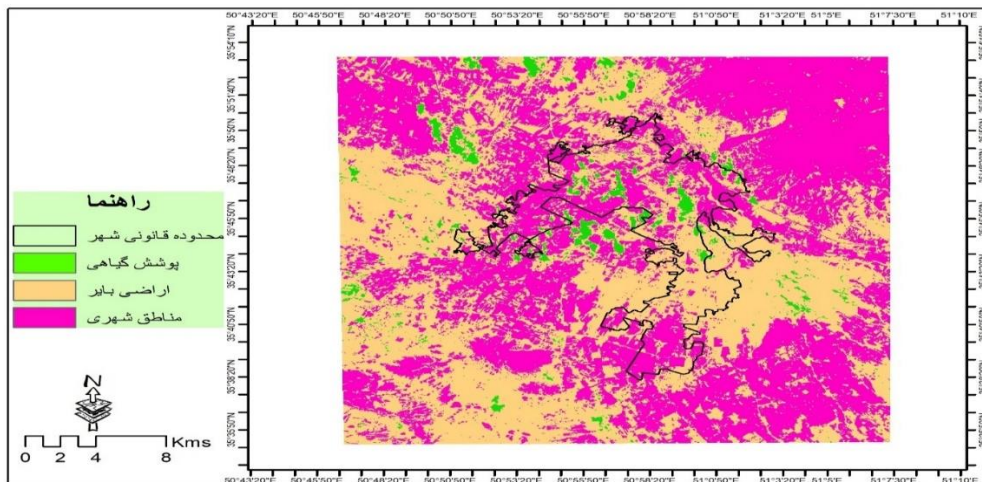
| ساخته شده | زمین های بایر | پوشش گیاهی | |
|-----------|---------------|------------|---------------|
| ۴۲۱۳۹ | ۳۸۶۰۸ | ۲۱۶۳۸ | پوشش گیاهی |
| ۵۷۸۳۰ | ۴۱۰۸۷ | ۴۲۰۷۴ | زمین های بایر |
| ۴۱۷۳۶ | ۲۷۶۶ | ۲۳۶۳۷ | ساخته شده |

اجرای مدل CA-Markov

در اجرای مدل CA-Markov به منظور پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی برای دوره ۲۰ ساله آینده یعنی سال ۱۴۲۰ از توانایی ترکیبی دو مدل مارکف و CA استفاده می‌شود. همان‌طور که در بالا ذکر شد، مدل تحلیل زنجیره مارکف پیش‌بینی‌هایی که انجام می‌دهد فاقد اطلاعات مکانی بوده و از سوی دیگر شبکه خودکار توانایی تغییر وضعیتش را براساس به کارگیری قانونی که وضعیت جدید را مطابق با وضعیت قبلی و وضعیت همسایگانش نشان می‌دهد، داراست. بنابراین، به وضعیت جغرافیایی اهمیت بیشتری می‌دهد. مدل CA-Markov با ادغام این دو روش مشکلات آنها را مرتفع می‌سازد. در اینجا به منظور پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده مدل CA-Markov، از ماتریس مساحت انتقال یافته استفاده می‌شود.

پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل CA-Markov

در اینجا با استفاده از ماتریس مساحت انتقال یافته (جدول ۹) به دست آمده از تحلیل زنجیره مارکف، تغییرات کاربری اراضی برای دوره ۲۰ ساله آینده یعنی سال ۱۴۲۰ پیش‌بینی شد (شکل ۱۵).



شکل ۱۵. نقشه پیش‌بینی کاربری اراضی سال ۱۴۲۰ با مدل CA-Markov

آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی برای پیش‌بینی صورت گرفته توسط زنجیره مارکوف

ارزیابی تغییرات کاربری زمین پیش‌بینی می‌کند که کاربری مناطق ساخته شده در سال ۱۴۲۰ نسبت به سال ۱۴۰۰- که ۶۱ درصد است- افزایش خواهد یافت و برای این سال به ۶۵ درصد خواهد رسید و با این حال این کلاس در منطقه مورد مطالعه، وسیع‌ترین کلاس خواهد ماند. در این سال کلاس پوشش گیاهی ۲۵ درصد در رده دومین کلاس می‌باشد و نسبت به سال پایه (۱۴۰۰) که میزان این طبقه ۲۸ درصد است، کاهش محسوسی خواهد داشت. همچنین کلاس اراضی بایر از ۱۱ درصد در سال ۱۴۰۰ پیش‌بینی می‌شود به ۱۰ درصد در سال ۱۴۲۰ کاهش خواهد یافت (جدول ۷).

جدول ۷. میزان تغییر مساحت طبقات مختلف به درصد

| کلاس | ۱۳۸۱ | ۱۳۸۹ | ۱۳۹۸ | ۱۴۰۸ |
|---------------|------|------|------|------|
| پوشش گیاهی | ۳۶ | ۲۶ | ۲۸ | ۲۵ |
| زمین های بایر | ۴۵ | ۴۸ | ۱۱ | ۱۰ |
| ساخته شده | ۱۹ | ۲۶ | ۶۱ | ۶۵ |
| مجموع | %۱۰۰ | %۱۰۰ | %۱۰۰ | %۱۰۰ |

نتیجه گیری و پیشنهادها

اخیراً، جهان توسعه یافته، رشد شهری را در مقیاس بی‌سابقه‌ای تجربه کرده است که اثر قابل توجهی بر روی فشردگی و تشدید کاربری اراضی داشته است. بنابراین شبیه‌سازی و پیش‌بینی الگوهای رشد شهری برای برنامه‌ریزان و طرفداران حفظ منابع طبیعی، در تنظیم کردن استراتژی‌های توسعه پایدار یک امر ضروری است. شبیه‌سازی توسعه مناطق ساخته شده می‌تواند اطلاعات مفید و ارزشمندی راجع به تقاضای زمین در آینده و چشم‌انداز تغییرات ارائه دهد. گذشته از این‌ها، به منظور بازبینی موضوع توسعه شهری با دیدگاه کنترلی بر روند تغییرات در طول زمان، باید موضوع را از زوایای متفاوت بررسی کرد. از طرف دیگر، پیدایش تفکر آمایش شهری به همراه فناوری‌های روز مانند GIS، RS و مدلسازی آماری برای دستیابی به برنامه‌ریزی‌های مناسب‌تر، اندیشه و فکر اندیشمندان را در سال‌های اخیر به خود مشغول داشته‌اند. یکی از نتایج، ترکیب قابلیت‌های مختلف فناوری‌های موجود را می‌توان در رویکردهای موجود در مدلسازی توسعه شهری یافت که هدف اصلی در آنها شناسایی عوامل و روند تغییرات شهری در آینده بر اساس تغییرات گذشته است. بنابراین در مطالعه حاضر، ترکیبی از مدل‌های مختلف شامل: رگرسیون اکتشافی، رگرسیون حداقل مربعات معمولی (OLS) و رگرسیون وزن‌دار فضایی (GWR) برای شناسایی و بهبود درک ما از نیروهای اجتماعی-اقتصادی، فیزیکی و کاربری زمین که بر توسعه شهری تأثیر می‌گذارند و نیز برای یافتن تأثیرات نابرابر این عوامل و محتمل‌ترین مکان‌ها برای توسعه شهری آینده شهر کرج مورد استفاده قرار گرفتند و در نهایت نتایج بدست آمده از مدل ترکیبی فوق، با مدل CA-Markov ترکیب شد.

در این قسمت نتایج به دست آمده به تبعیت از مراحل انجام تحقیق به صورت موردی آورده می‌شود:

الف) در ابتدای کار به منظور آماده‌سازی ساختار اولیه (نقشه‌های کاربری اراضی) و بدست آوردن متغیرهای تأثیرگذار در مدل‌سازی الگوهای رشد شهری شهر کرج، طبقه‌بندی با استفاده از نرم‌افزارهای IDRISI و ENVI و با به کارگیری روش ماکزیمم احتمال انجام شد. نتایج آن حاکی از این است که نرم‌افزار IDRISI و روش طبقه‌بندی ماکزیمم احتمال در این تحقیق کارایی بهتری در طبقه‌بندی تصویر و تهیه نقشه‌های کاربری داشته است.

ب) نتایج مرحله آنالیز داده‌های ورودی به مدل‌های GWR با استفاده از رگرسیون اکتشافی و رگرسیون OLS حاکی از آن است که انجام پیش‌پردازش پارامترهای ورودی به این مدل‌ها بسیار ضروری است. زیرا از ورود پارامترهای بی‌تأثیر و نادرست به مدل‌ها، افزونگی داده و به تبع بدست آوردن نتایج کم اعتبار جلوگیری می‌کند. با توجه به جدول ۲ و نتایج این مرحله، از ۱۷ متغیر در نظر گرفته شده

برای پیش‌پردازش پارامترهای ورودی، ۸ متغیر با توجه با شاخص آماری VIF و آماره t شرایط ورود و معنی‌داری مطلوب را داشتند. در نهایت از بین ۸ متغیر، مشخص شد که متغیرهای تراکم مناطق ساخته شده و تراکم جمعیت به ترتیب با ضریب معناداری ۲۱/۳۶ و ۴/۱۵ در طول دوره ۲۰ ساله ۱۳۸۱-۱۴۰۰ بیشترین تأثیر را در توسعه شهری و یا تبدیل کاربری غیرشهری به کاربری شهری داشته‌اند.

ج) در مرحله اجرای رگرسیون GWR نتایج حاکی از آن است که رگرسیون محلی GWR توانسته تا حد زیادی رگرسیون کلی OLS را بهبود داده و با R^2 اصلاح شده بالاتر، میزان انطباق بیشتر و همچنین کارایی بهتر، روابط و الگوهای فضایی رشد شهری کرج را مدل‌سازی کند. نتایج این مدل بیان‌کننده این است که متغیرهای تأثیرگذار در امر توسعه شهری و تبدیل کاربری غیرشهری به شهری برخلاف مدل رگرسیون کلی OLS در عرض فضای شهر کرج در مکان‌های مختلف دارای تأثیرات متفاوتی از لحاظ کمیت و نوع تأثیر (- یا +) هستند. به طوری که از میان ۸ متغیر ورودی به مدل GWR تنها دو متغیر تراکم جمعیت و فاصله از مناطق ساخته‌شده دارای جهت تأثیر یکسان در کل منطقه مورد مطالعه داشته‌اند و بقیه متغیرها در مکان‌های مختلف نوع تأثیر (- یا +) متفاوتی داشته‌اند. در نهایت مشخص شد که با توجه به متغیر وابسته (تبدیل کاربری غیرشهری به شهری) و مکان رخداد آن در طی دوره ۲۰ ساله، متغیرهای تراکم جمعیت و تراکم مناطق ساخته شده دارای ضریب تأثیر مثبت قوی و متغیرهای تراکم پوشش گیاهی، ارتفاع، فاصله از راه‌های فرعی و شیب دارای ضریب تأثیر منفی قوی بوده‌اند.

مهمتر از اینها، مدل رگرسیون GWR به واسطه فراهم کردن امکان تغییر پارامترها در عرض فضا، بینش عمیقی از تغییرات فضایی الگوهای رشد شهری ارائه می‌دهد. همچنین سطوح احتمال تولید شده (شکل‌های ۷ تا ۱۴) رشد شهری، که بر مبنای سطوح پارامتر برآوردهای رگرسیون GWR است دید بصری درستی از رشد شهری ارائه می‌دهد.

د) در مرحله آشکارسازی تغییرات مشخص شد که بیشترین افزایش مساحت در مناطق ساخته شده صورت گرفته است، به طوری که معادل ۴۸۸۴۴ هکتار از کاربری‌های دیگر به آن تبدیل شده که بیشترین مقدار آن با ۱۷ درصد از پوشش گیاهی و کمترین مقدار آن با ۶/۵ درصد از زمین‌های بایر بوده است. این نتایج حاکی از آن است که شهر کرج، به واسطه صنعتی شدن، تمرکز بازار کار و در نتیجه افزایش مهاجرپذیری به گونه‌ای شتاب‌آلود در دوره ۲۰ ساله توسعه‌یافته و در ساختار و بافت داخلی آن تحولات اساسی صورت گرفته است و همچنین باعث تغییرات شگرفی در مرزهای بلافاصل خود در پوشش گیاهی (که بیشتر شامل مناطق کشاورزی است) و زمین باز شده است.

نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که بیشترین میزان توسعه شهری شهر کرج برای چشم انداز ۱۴۲۰ در بخش‌های غربی و جنوب خواهد بود. این نتایج نشان‌دهنده اعتبار و صحت مدل بوده که با واقعیت کاملاً سازگار و منطبق است و می‌تواند به عنوان مدلی اجرایی در برنامه‌ریزی‌های چشم‌انداز آینده کلان‌شهر کرج بسیار راه‌گشا بوده و مورد استفاده قرار گیرد. اما استفاده از مدل‌هایی نظیر CA می‌تواند عامل بسیار مهمی بوده و نتایج پیش‌بینی را بسیار بهبود بخشد. انتقال زمین از کاربری غیر شهری به کاربری شهری در دوره ۲۰ ساله در شهر کرج گسترده بوده است، با توجه به جدول ۷ مورد تایید است. زیرا، با توجه به نتایج آشکارسازی تغییرات مشخص شد که بیشترین افزایش مساحت در مناطق ساخته شده صورت گرفته است، به طوری که معادل ۴۸۸۴۴ هکتار از کاربری‌های دیگر به آن تبدیل شده که بیشترین مقدار آن با ۱۷ درصد از پوشش گیاهی و کمترین مقدار آن با ۶/۵ درصد از زمین‌های بایر بوده است.

➤ با توجه به اهمیت آشکارسازی تغییرات و تأثیرگذاری بالای تک‌تک لایه‌های کاربری اراضی در تشریح متغیر وابسته (تبدیل کاربری غیرشهری به شهری)، پیشنهاد می‌گردد از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالاتر و دوره‌های واسنجی بیشتر جهت بالا بردن دقت مدل‌ها استفاده شود.

➤ در تغییرات کاربری اراضی شهر کرج غیر از ۸ متغیر انتخاب شده از طریق رگرسیون اکتشافی و رگرسیون OLS، متغیرهای اجتماعی-اقتصادی دیگری مانند قیمت زمین و مالکیت زمین تأثیرگذار هستند، بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده در صورت امکان لحاظ شوند.

➤ در نهایت بدلیل قابلیت منحصر به فرد GWR در شناسایی و تحلیل روابط میان متغیرها، استفاده از آن در تحلیل‌های کمی برنامه‌ریزی شهری توصیه می‌شود. در واقع، بهره‌گیری از این رویکرد می‌تواند گام نوینی در درک دقیق‌تر و علمی‌تر آن دسته از پدیده‌های شهری باشد که در بستر فضا رخ می‌دهند.



منابع و مأخذ

پورزیدی، ع؛ علیجانی، ب؛ سلیقه، م؛ و گرامی، م (۱۳۹۸). تحلیل فضایی بارش استان مازندران، نشریه تحقیقات علوم جغرافیایی سال ۱۹، شماره ۵۲، ۲۰-۱.

<https://jgs.khu.ac.ir/article-1-2764-en.pdf>

خوش گفتار، م.م؛ طالعی، م؛ و ملک‌پور، پ (۱۳۸۹). مدل‌سازی زمانی- مکانی رشد شهری: روشی مبتنی بر تلفیق Cellular Automata و زنجیره مارکوف. سنجش از دور و GIS ایران، شماره ۶، صفحه ۳۴-۱۷.

<https://www.sid.ir/paper/459293/fa>

سلطانی، ع؛ احمدیان، ع؛ و اسمعیلی ایواکی، ی (۱۳۸۹). کاربرد مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی در بررسی روابط بین متغیرهای فضایی در یک پهنه شهری، نمونه موردی: منطقه ۷ شهرداری تهران. مجله آرمانشهر، شماره ۴، صفحه ۹۹-۱۱۰.

https://www.armanshahrjournal.com/article_32646_e1b8fdf9ee6ee64da4652e8ae3ed452c.pdf

قربانی، خ. ۱۳۹۱، رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی: روشی برای ترسیم نقشه‌های هم‌بارش در استان گیلان. نشریه آب و خاک، شماره ۳، صفحه ۷۴۳-۷۵۲.

<https://www.sid.ir/paper/141898/fa>

کامیاب، ح؛ سلمان ماهینی، ع؛ حسینی، س.ح؛ و غلامعلی‌فرد، م. (۱۳۸۹). اتخاذ رهیافت اطلاعات محور با کاربرد روش رگرسیون لجستیک برای مدل‌سازی توسعه شهری گرگان. مجله محیط‌شناسی، سال سی و ششم، شماره ۵۴، صفحه ۹۶-۸۹.

https://jes.ut.ac.ir/article_21477_88d0e9d72f0914045721e39afa6b215a.pdf

ملکی، س؛ احمدی، ت. (۱۳۸۹). توسعه فضایی-کالبدی شهر ایلام. انتشارات دانشگاه ایلام، چاپ اول، صفحه ۴۵۶.

هادوی، ف (۱۳۸۹). بررسی توسعه کالبدی فضایی شهر زنجان جهت ساماندهی بهینه آن با استفاده از تکنیک GIS، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه پیام نور واحد ساری.

<https://www.virascience.com/en/thesis/797075>

Aifeng, L.V., & Zhou, L.(2016). A rainfall model Based on a geographically weighted regression algorithm for rainfall estimations over the arid Qaidam basin in China, Remote sens,8(11):2-17.

<https://doi.org/10.3390/rs8040311>

Anselin, L., 1995. Local Indicators of Spatial Association- LISA. Geographic Analysis, 27(2): 93-115.<https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>

Banerjee, S., Gelfand, A.E., & Carlin, B.P. (2003). Hierarchical Modeling and Analysis for Spatial Data (Chapman & Hall/CRC Monographs on Statistics & Applied Probability). CRC Press.

<https://www.amazon.com/Hierarchical-Modeling-Monographs-Statistics-Probability/dp/1439819173>

Bostan, P.A., & Akyurek, Z. (2009). Spatio-Temporal analysis of precipitation and temperature distribution over Turkey, The international archives of the photogrammetry, Remote and Spatial information Sciences, vol.38, part

2.https://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/part2/papers/29_paper.pdf

Chen, J., Gong, P., He, C., Luo, W., Tamura, M., & Shi, P. (2002). Assessment of Urban Development Plan of Beijing by Using a CA-Based Urban Growth Model, photogrammetric engineering and remote sensing, 68(10): 1063-1071.

https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/2002journal/october/2002_oct_1063-1071.pdf

- Costanza, R., & Ruth, M. (2004). Using Dynamic Modeling to Scope Environmental Problems and Build Consensus. *Geo-Journal*, 61:309–324. https://www.robertcostanza.com/wp-content/uploads/2017/02/1998_J_Costanza_ModelingProblems.pdf
- Cui, X., Liu, C., Shan, L., Lin, J., Zhang, J., Jiang, Y., & Zhang, G. (2021). Spatial-temporal responses of ecosystem services to land use transformation driven by rapid urbanization: a case study of Hubei Province, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19 (1), 178. <https://doi.org/10.3390/ijerph19010178>
- Eastman, J.R. (2006). IDRISI Andes. Tutorial. Clark-Labs, Clark University, Worcester, MA. https://gis.fns.uniba.sk/vyuka/DTM_ako_sucast_GIS/Kriging/1/Andes_Tutorial.pdf
- Eastman, J.R., Solorzano, L.A., & Van Fossen, M.E. (2005). "Transition Potential Modeling for Landcover Change, In D. J. Maguire, M. Batty, & M. F. Goodchild (Eds), GIS, spatial analysis and modeling. PP. 357-385. California: ESRI Press. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2001071>
- Fan, F., Wang, Q., & Wang, Y. (2007). Land use and land cover change in Guangzhou, China, from 1998 to 2003, based on land sat TM/ETM+ imagery. *Sensors*, 7: 1323-1342. <https://doi.org/10.3390/s7071323>
- Fischer, M. M., & Getis, A. (2009). *Handbook of Applied Spatial Analysis (Software Tools Methods and Applications)*: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03647-7>
- Fotheringham, A.S., Brunson, Ch., & Charlton, M. (2002). *Geographically Weighted Regression the analysis of spatially varying relationships*, University of Newcastle, UK, JOHN WILEY & SON S, LTD, P283. <https://www.wiley.com>
- Getis, A. (2007). Reflections on spatial autocorrelation. *Regional Science and Urban Economics*, 37(4), PP: 491–496.
- He, Ch., Okada, N., Zhang, Q., Shi, P., Zhang, J., 2006. Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China, *Applied Geography* 26: 323–345. DOI: 10.1016/j.apgeog.2006.09.006
- Hoymann, J. (2010). Spatial Allocation of Future Residential Land Use in the Elbe River Basin, *Environ Plan B: Planning and Design*, Vol. 37. <https://doi.org/10.1068/b36>
<http://www.ncc.org.ir>
- Hu, X., & Xu, H. (2019). Spatial variability of urban climate in response to quantitative trait of land cover based on GWR model. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191 (3), 194. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7343-1>
- Jensen, J.R. (2009). *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective 2/e*. Pearson Education India. <https://www.amazon.com/Remote-Sensing-Environment-Resource-Perspective/dp/9332518947>
- Khoi, D.D. & Murayama, Y. (2010). Forecasting Areas Vulnerable to Forest Conversion in the Tam Dao National Park Region, Vietnam. *Remote Sensing* 2 (5), 1249–1272. DOI: 10.3390/rs2051249
- Li, S., Zhou, C., Wang, S., GAO, S., & Liu, Z. (2019b). Spatial heterogeneity in the determinants of urban form: an analysis of chinese cities with a GWR approach. *Sustainability*, 11 (2), 479 DOI: 10.3390/su11020479
- Li, X., Liu, X., & P. Gong (2015). Integrating ensemble-urban cellular automata model with an uncertainty map to improve the performance of a single model, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 29, pp. 762-755. <https://doi.org/10.1080/13658816.2014.997237>
- Longley, P. A., Goodchild, M.F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2005). *Geographical Information, England: John Wiley & Sons,*

- Ltd.https://books.google.com/books/about/Geographical_Information_Systems_and_Sci.html?id=toobg6OwFPEC
- Luo, J., & Wei, Y.H.D. (2009). Modeling spatial variations of urban growth patterns in Chinese cities: The case of Nanjing, *Landscape and Urban Planning*, 91: 51–64.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.11.010>
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., & Moran, E. (2004). Change detection techniques, *International Journal of Remote Sensing*, 25, pp. 2365-2407.
<https://doi.org/10.1080/0143116031000139863>
- McCoy, R.M. (2005). *Field Methods in Remote Sensing*. The Guildford Press, New York, London, 41-54.
<https://www.amazon.com/Field-Methods-Remote-Sensing-Roger/dp/1593850794>
- Mitchell, A., 2005. *ESRI Guide to GIS Analysis, Volume 2: Spatial Measurements and Statistics*. ESRI Press, PP: 252.
https://books.google.com/books/about/The_ESRI_Guide_to_GIS_Analysis.html?id=T2WVmwEACAAJ
- O'Sullivan, D., & Unwin, D. (2002). *Geographic Information Analysis*. 2nd Edition, John & Wiley, P 432.
<https://www.wiley.com/en-us/Geographic+Information+Analysis%2C+2nd+Edition-p-9780470288573>
- Park, S., Jeon, S., Kim, Sh., & Choi, Ch. (2011). Prediction and comparison of urban growth by land suitability index mapping using GIS and RS in South Korea. *Landscape and Urban Planning*, 99: 104–114.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.09.001>
- Rafiee, R., Mahiny, A., & Khorasani, N. (2009). "Assessment of changes in urban green spaces of mashad city using satellite data", *International journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*: 431-438.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.08.005>
- Rozenstein, O., & Karnieli, A. (2011). Comparison of methods for land-use classification incorporating remote sensing and GIS inputs. *Applied Geography*, 31: 533-544.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.11.006>
- Sabet Sarvestania, M., & Ibrahim, A. L. (2011). Three decades of urban growth in the city of Shiraz, Iran: A remote sensing and geographic information systems application. *Cities*, 28: 320–329.
<https://doi.org/10.1016/j.cities.2011.03.002>
- Schulz, J.J., Cayuela, C., Echeverria, C., Salas, J., & Rey Benayas, J.M. (2010). "Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of Central Chile (1975–2008)," *Applied Geography*, 30: 436-447.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2009.12.003>
- Scott, L. M., & Janikas, M.V. (2010). "Spatial statistics in ArcGIS. In *Handbook of applied spatial analysis*", (pp. 27-41). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-03647-7_2
- Shi, B., Wang, Y., Bai, X., Lai, Y., Xiang, W., Wu, B., Xia, Q., Liu, X., & Li, Ye. (2023). Spatial effects of public health laboratory emergency testing institutions under COVID-19 in China. *International Journal for Equity in Health*, 22 (1), 88.
<https://doi.org/10.1186/s12939-023-01871-0>
- Stone, M., & Brooks, R.J. (1990). Continuum Regression: Cross-Validated Sequentially Constructed Prediction Embracing Ordinary Least Squares, Partial Least Squares and Principal Components Regression. *Journal of the Royal Statistical Society*, 2: 237-269.
<https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1990.tb01786.x>
- Takayama, M., & Couclelis, H. (1997). Map Dynamic Integrating Cellular Automata and GIS through Geo Algebra. *International Journal of Geographical Information Science*. 11 (1): 73-91.

<https://doi.org/10.1080/136588197242509>

Tayyebi, A., Pijanowski, B. Ch., & Pekin, B. (2011). Two rule-based Urban Growth Boundary Models applied to the Tehran Metropolitan Area, Iran, *Applied Geography*, 31: 908-918.

<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.01.018>

Tomal, M. (2020). Modelling housing rents using spatial autoregressive geographically weighted regression: a case study in Cracow, Poland. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9 (6), 346. <https://doi.org/10.3390/ijgi9060346>

Torrens, P.M., & Osullivan, D. (2001). Cellular automata and urban simulation: where do we go from here? *Environment and Planning B*, 28: 163-168. DOI: 10.1068/b2802ed

Van de Voorde, T., Jacquet, W., & Canters, F. (2011). Mapping form and function in urban areas: An approach based on urban metrics and continuous impervious surface data, *Landscape and Urban Planning*, 102: 143– 155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.017>

Verburg, p., Schot, p., Dijst, m., & Veldkamp, A. (2004). Land use change modelling: current practice and research priorities. *Geo Journal*, 6: 309-324. DOI: 10.1007/s10708-004-4946-y

Verburg, P.H., Veldkamp, W.S., & Mastura, SH. (2002). Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. *Environmental management*, 30: 391-405. <https://doi.org/10.1007/s00267-002-2630-x>

Wende, D. (2019). Spatial risk adjustment between health insurances: using GWR in risk adjustment models to conserve incentives for service optimisation and reduce MAUP. *The European Journal of Health Economics*, 20 (7), 1079–1091. <https://doi.org/10.1007/s10198-019-01079-6>

Whitea, R., & Engelen, G. (2000). High resolution integrated modeling of the spatial dynamics of urban and regional systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24: 383-400. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(00\)00012-0](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(00)00012-0)

Zhang, S., Wang, L., & Lu, F. (2019). Exploring housing rent by mixed geographically weighted regression: a case study in Nanjing. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8 (10), 431. <https://doi.org/10.3390/ijgi8100431>

Zhu, C., Zhang, X., Zhou, M., He, S., Gan, M., Yang, L., & Wang, K. (2020). Impacts of urbanization and landscape pattern on habitat quality using OLS and GWR models in Hangzhou, China. *Ecological Indicators*, 117, 106654. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106654>

Zhu, H., et al., 2022. Spatiotemporal dynamics and driving forces of land urbanization in the Yangtze river delta urban agglomeration. *Land*, 11 (8), 1365. <https://doi.org/10.3390/land11081365>.