



علوم محیطی

علوم محیطی سال هفتم، شماره اول، پاییز ۱۳۸۸
ENVIRONMENTAL SCIENCES Vol.7, No.1, Autumn 2009

۱۳۳-۱۴۸

سنجش از دور (RS)، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل سلول‌های خودکار (CA) به عنوان ابزاری برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی شهری (مطالعه موردی: شهر شهرکرد)

پرویز ضیائی‌ان فیروزآبادی^۱، علیرضا شکیبیا^۱، علی‌اکبر متکان^۲، علی صادقی^{*۲}

۱- گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه تربیت معلم

۲- گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

Remote Sensing (RS), Geographic Information System (GIS) and Cellular Automata Model (CA) as Tools for the Simulation of Urban Land Use Change – A Case Study of Shahr-e-Kord

Parviz Zeaian Firouzabadi¹, Alireza Shakiba², Aliakbar Matkan², Ali Sadeghi^{*2}

1- Department of Geography, Faculty of Letters and Humanities, Tarbiat Moallem University

2- Department of RS & GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University G.C., Tehran-Iran

Abstract

This research is committed to providing methodological guidelines for the simulation of urban land use dynamics using GIS, RS and CA models. Urban-CA modeling experiments have been conducted for a medium-sized city (Shahr-e-Kord) in Iran over a thirty-five year time span. Global transition probabilities obtained from the Markov chain model and Unique Conditions Map were derived from WoE. Local transition probabilities were estimated using infrastructural factors by two different probabilistic empirical methods: the WoE approach, based on Bayesian theory, and logistic regression. The final land use transition rules drove an Urban-CA model, built upon basis of stochastic land use allocation algorithms. These Urban-CA models drive a CA model based on eight cell Moore neighborhoods. The simulation outputs were statistically validated according to a new compound method based on a Multiple Resolution Model (MRM). After achieving simulations for the 1999-2002 and 2002-2006 time periods along the whole time series, forecast simulations were carried out up to 2025 (1404) and for various urban planning scenarios. For all simulation periods, the best results were obtained from a combined Markov chain and logistic regression with 0.5 Gama to derive the transition rules. Different simulation outputs for the case study indicate their possible further applicability for generating simulation of growth trends both for Iranian cities and cities world-wide.

Keywords: urban-cellular automata (urban-CA), simulation, transition rules, weights of evidence (WoE), logistic regression, markov chain.

چکیده

این تحقیق در صدد است الگوی روش شناختی جدیدی را برای شبیه‌سازی دینامیک کاربری اراضی شهری با استفاده از سنجش از دور، GIS و مدل سلول‌های خودکار فراهم نماید. آزمایش این مدل برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی شهری یکی از شهرهای میانی ایران (شهرکرد) و برای یک دوره زمانی ۳۵ ساله انجام گرفت. احتمالات تبدیل کلی از روش زنجیره‌های مارکف و همچنین جداول شرایط منحصربه‌فرد حاصل از روش WoE به دست آمد. احتمالات تبدیل محلی به وسیله متغیرهای مربوط به عوامل زیرساختی شهر و با استفاده از دو روش احتمالاتی تجربی روش وزن‌های شاهد (WoE) بر اساس تئوری بیس و همچنین مدل رگرسیون لجستیک، محاسبه گردید. قوانین تبدیل کاربری اراضی نهایی وارد مدل Urban-CA گردید و بر اساس الگوریتم‌های اختصاص کاربری اراضی تصادفی، شبیه‌سازی صورت گرفت. این مدل Urban-CA تغییر کاربری اراضی یک مدل CA که بر پایه همسایگی هشت تایی موراست را اجرا می‌کند. خروجی‌های شبیه‌سازی به صورت آماری با یک روش ترکیبی جدید که بر پایه روش‌های تحلیل چندگانه است، ارزیابی گردید. بعد از آنکه شبیه‌سازی برای دوره‌های زمانی ۱۹۹۹-۲۰۰۲ و ۲۰۰۲-۲۰۰۶ اجرا شد، مدل شبیه‌سازی برای پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی شهری تا سال ۲۰۲۵ (۱۴۰۴) و برای سناریوهای مختلف برنامه‌ریزی شهری اجرا شد. برای تمام دوره‌های شبیه‌سازی، بهترین نتایج در استفاده از ترکیب روش مارکف و روش رگرسیون لجستیک با گامای ۰/۵ برای استخراج قوانین تبدیل حاصل شد. نتایج مختلف شبیه‌سازی برای منطقه مورد مطالعه، کاربردی بودن آتی مدل برای شبیه‌سازی روند رشد شهرهای ایران و سایر نقاط جهان را اثبات می‌کند.

کلیدواژه‌ها: سلول‌های خودکار شهری (Urban-CA)، شبیه‌سازی، قوانین تبدیل، احتمالات تبدیل، وزن‌های شاهد (WoE)، رگرسیون لجستیک، زنجیره‌های مارکف.

* Corresponding author. E-mail Address: sadeghi.ali2020@gmail.com

مقدمه

به منظور به دست آوردن درک بهتر درباره سیستم‌های شهری، محققان روش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی را به خدمت می‌گیرند؛ اما به دلیل پیچیدگی‌های سیستم‌های شهری روش‌های مدل‌سازی قدیمی کارآمد نیستند. اخیراً، محققان در یک زمینه جدید مدل‌سازی شهری که به روش سلول‌های خودکار (Cellular Automata) معروف است با هم به رقابت پرداخته‌اند. مدل‌سازی زمانی و مکانی رشد شهر راهی برای کشف فرایندها و الگوهای زمانی-مکانی تحول پوشش و کاربری اراضی¹ (LULC) در سطوح چشم‌اندازهای شهری است. این مدل‌ها قادر هستند یک ابزار کمی برای کمک به تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی‌های شهری و مدیریت قابلیت و تناسب اراضی برای توسعه ارائه دهند (Batty, 2005).

مدل CA یک تکنیک مدل‌سازی است که در فضای رستری تعریف می‌شود. وضعیت سلول معمولاً پوشش و کاربری زمین آن سلول را ارائه می‌دهد و تغییر در شکل یک سلول به شکل دیگر وابسته به وضعیت سلول در زمان حال و وضعیت سلول‌های همسایه است. مدل CA به دلیل قرابت طبیعی با داده‌های رستری، در GIS مورد توجه قرار گرفته است. همانطور که بیشتر محققان مانند (Batty et al., 1997; Couclelis, 1997; Torrens, 2003) بحث کرده‌اند، مدل‌های CA شهری هنوز در مرحله ابتدائی قرار دارند و بیشتر مدل‌های اکتشافی هستند.

این تحقیق تلاش دارد یک مدل CA شهری (Urban-CA) را توسعه دهد؛ که با توجه به ویژگی‌های ساختاری رشد فیزیکی شهرکرد و عوامل دخیل در این رشد، به شبیه‌سازی تغییرات گذشته آن پردازد؛ سپس با بررسی روند طی شده در گذشته و با توجه به شرایط موجود در این ناحیه شهری؛ به شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات آن در آینده پردازد.

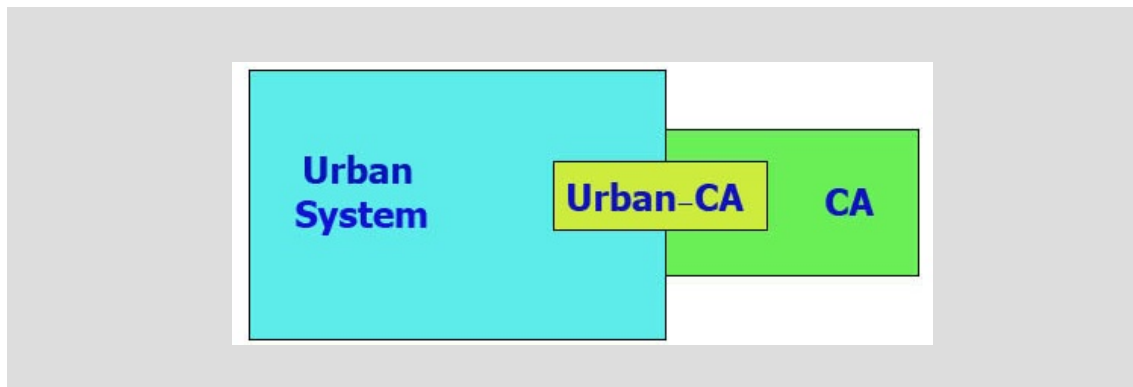
سیستم‌های شهری و مدل‌های CA

شهرها ترکیب پیچیده‌ای از عناصر اجتماعی، اقتصادی، مکانی و... هستند؛ که این عناصر تأثیرات گوناگون روی فرایند رشد شهری دارند و ارتباط متقابل این عناصر بسیار پیچیده است (Junfeng, 2003). بنابراین، این پیچیدگی‌ها استفاده از مدل‌های قدیمی برای مدل‌سازی را سخت می‌کند؛ زیرا آنها ایستا، خطی، تجمعی، به هم پیوسته و بر اساس تئوری سیستم‌های ساده بالا به پائین² هستند (Cheng, 2003). پس به منظور مدل‌سازی سیستم‌های شهری ما باید روش‌های جدید را به خدمت بگیریم که دینامیک، غیر خطی، غیر تجمعی، گسسته و پائین به بالا³ باشند (Junfeng, 2003).

شهرها و مدل CA هر دو سیستم‌های پیچیده هستند که هر یک دارای قوانین و ویژگی‌های خاص خود هستند؛ متخصصان درصدد هستند که مدل‌های CA را برای شبیه‌سازی⁴ تغییرات فیزیکی شهرها استفاده کنند؛ بنابراین، انواع مدل‌های Urban-CA بوجود آمدند.

طبق نظریه سیستم‌های پیچیده، فعل و انفعالاتی که در سطح کوچک‌ترین اجزاء یک سیستم رخ می‌دهد، اساس رفتار کل سیستم را شکل می‌دهد. در نتیجه مدل‌های Urban-CA که شهرها را به صورت اجزاء کوچکتری به نام پیکسل تقسیم می‌کنند و قوانین خاصی را برای تک‌تک این اجزاء اعمال می‌کنند؛ می‌توانند به عنوان ابزاری برای ارزیابی توسعه شهری مورد استفاده قرار گیرند. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، مدل Urban-CA از تلاقی سیستم‌های شهری و سیستم CA بوجود می‌آید و در واقع ویژگی‌های هر دو آنها را در بر می‌گیرد.

مدل‌های CA پایه، برای کاربردهای شهری مناسب نیستند؛ چارچوب اولیه آنها ساده و برای نمایش و مدل‌سازی شهرهای واقعی محدودیت زیادی دارند؛ لذا برای کاربرد موفقیت‌آمیز این مدل‌ها در شبیه‌سازی رشد شهری باید آنها را اصلاح کرد.



شکل ۱- رابطه بین سیستم شهری، سیستم CA و Urban-CA

پیشینه تحقیقاتی مدل‌های CA و Urban-CA

اصطلاح Automata برای اولین بار در دهه ۱۹۳۰ توسط ریاضیدان انگلیسی، آلن تورینگ^۵ ارائه شد (Benenson and Torrens, 2004). مفهوم سلول‌های خودکار برای اولین بار در دهه ۱۹۴۰ در رشته کامپیوتر نمود پیدا کرد؛ که^۶ Newman و^۷ Ulam این مفهوم را بوجود آوردند (Junfeng, 2003 ; Singh, 2003). بعدها^۸ Conway، ریاضیدان، در دانشگاه کمبریج این مفهوم را توسعه داد که نظریه او به نام بازی زندگی^۹ مشهور شد.

با وجود اینکه کارهای تئوریک زیادی بعد از دهه ۱۹۷۰ و قبل از ۱۹۸۰ انجام گرفت، اما کاربردهای خاص مدل CA در مدلسازی شهری تا قبل از دهه ۱۹۸۰ اتفاق نیفتاد (Sui and Zeng, 2001). ورود مدل‌های CA محض به علم جغرافیا، بیشتر پیامد کارهای^{۱۰} Tobler در دهه ۱۹۷۰ در دانشگاه میشیگان است؛ او حاصل مطالعات خود را در مقاله‌ای تحت عنوان جغرافیای سلولی^{۱۱} در سال ۱۹۷۹ منتشر کرد.

بعد از آن در دهه ۱۹۸۰، Couclelis در دانشگاه سانتا باربارا مطالعات زیادی در این زمینه انجام داد (Batty et al ۱۹۹۷). دهه ۱۹۹۰ اوج موفقیت‌ها در زمینه توسعه مدل‌های Urban-CA بوده است. Clarke و (Gaydos, 1998)؛ (Couclelis, 1997)؛ و Batty و

همکاران (۱۹۹۷) مدل CA را در مدلسازی‌های شهری استفاده کردند. بیشتر مطالعات اخیر در زمینه مدلسازی و شبیه‌سازی رشد شهری در شهرهای ایالات متحده، شهرهای اروپایی و در آسیا نیز بخصوص در شهرهای در حال رشد سریع چین انجام شده است (Henriquez et al., 2006). در ایران، (Kiani, 2003) در رساله دکترای خود مدل CA را برای پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در منطقه ۵ تهران و برای سال‌های ۴۳ تا ۸۲ به کار برده است. (Mirbagheri, 2006) در رساله کارشناسی ارشد خود مدل CA را برای شبیه‌سازی نحوه گسترش کاربری‌های شهری در شهرستان اسلامشهر و قسمت‌هایی از شهرستان رباط کریم تهران استفاده نموده است.

مواد و روش

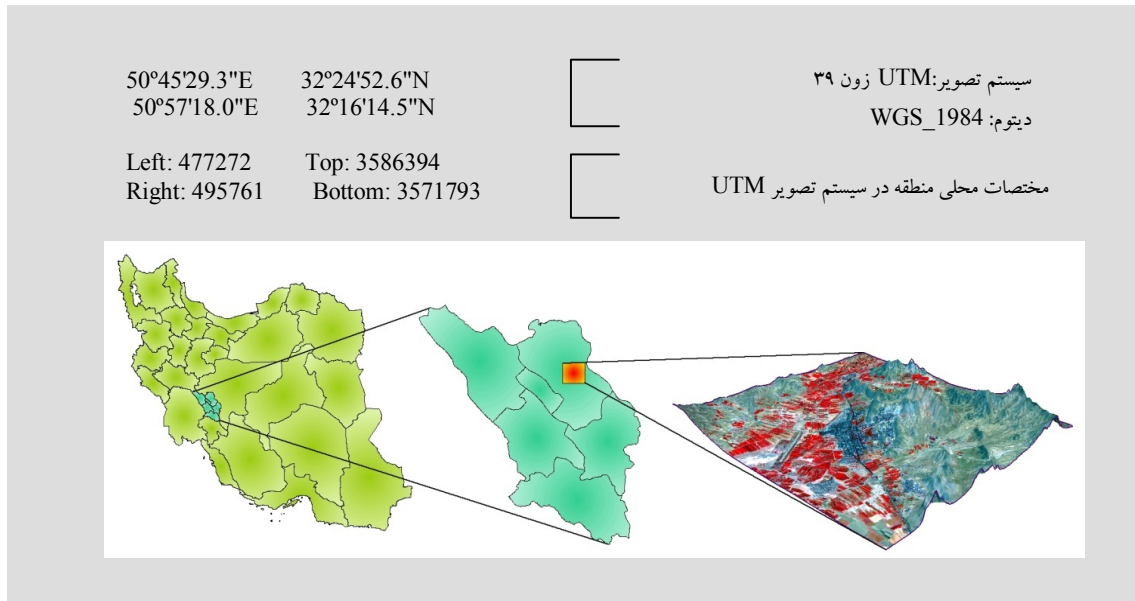
متدولوژی مورد استفاده در این تحقیق به مفاهیم مورد استفاده، روش‌های انتخاب شده و مهم‌تر از همه داده‌های قابل دسترس استوار است. در تحقیق حاضر تلاش می‌شود با ترکیب تکنولوژی سنجنش از دور، GIS، مدل سلول‌های خودکار (CA) و مدل‌های آماری WoE و رگرسیون لجستیک رشد فیزیکی شهر شهر کرد در دوره مورد مطالعه مدلسازی و شبیه‌سازی شود.

منطقه مورد مطالعه

ناحیه مطالعاتی در این تحقیق شهر شهرکرد و حومه اطراف آن، در قسمت شرقی استان چهارمحال و

بختیاری انتخاب گردید (شکل ۲).

محدوده مورد مطالعه به وسیله مختصات زیر محدود می شود:



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

داده‌های مورد استفاده در تحقیق

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد:

داده‌های سنجش از دور: در بسیاری از مدل‌های شبیه‌سازی CA که تاکنون در جهان اجرا گردیده‌اند، از تصاویر ماهواره‌ای برای به روزرسانی نقشه‌های شهری استفاده شده است. در این تحقیق از چهار تصویر چندزمانه استفاده گردید؛ که مشخصات این تصاویر در جدول (۱) آمده است.

داده‌های کارتوگرافی: این داده‌ها شامل نقشه‌های کاغذی و نقشه‌های رقومی می‌باشد. این داده‌های اولیه عبارتند از: الف) نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ شهرکرد؛

تهیه شده در سال ۱۳۷۵، که از سازمان نقشه‌برداری تهیه شده است؛ ب) نقشه‌های شهری ۱:۱۰۰۰۰ طرح جامع شهرکرد؛ تهیه شده در سال ۱۳۸۲، که از شهرداری شهرکرد تهیه شد.

عملیات پیش پردازش و آماده‌سازی داده‌های ورودی مدل Urban-CA داده‌های سنجش از دور

ماهیت نامتجانس نواحی شهری پیچیدگی‌های طیفی زیادی را ایجاد می‌نماید، که به واسطه این واقعیت است که این طیف‌ها نمایشگر موادی با رفتارهای طیفی بسیار گوناگون بوده که اغلب ناشی از کاربری‌های

جدول ۱- تصاویر مورد استفاده و مشخصات آن‌ها

شماره تصویر	ماهواره	نوع سنجنده	تاریخ اخذ تصویر	شماره ردیف و گذر	قدرت تفکیک مکانی	قدرت تفکیک رادبومتری
۱	لندست-۵	TM	۱۹۹۰/۹/۱۷	p164 r 38	۲۸/۵ متر	۸ بیت
۲	لندست-۷	ETM ⁺	۱۹۹۹/۶/۳۰	p164 r 38	۲۸/۵ متر	۸ بیت
۳	لندست-۷	ETM ⁺	۲۰۰۲/۷/۲۴	p164 r 38	۲۸/۵ متر	۸ بیت
۴	IRS-P6	Liss-III	۲۰۰۶/۷/۲۰	P70 r 48	۲۳/۵ متر	۱۰ بیت

غیر شهری در کالبد شهری است. این پیچیدگی‌های طیفی مسائل زیادی را در طبقه‌بندی بوجود می‌آورد.

برای ایجاد کنتراست بالاتر نواحی ساخته شده با نواحی اطراف، عمل بهبود کنتراست^{۱۲} روی تصاویر انجام شد که از روش بارزسازی بسط تباین خطی^{۱۳} استفاده شد. برای تصحیح هندسی تصاویر از دو روش استفاده شد: الف) روش تصحیح با نقشه و ب) روش تصحیح با تصویر. برای تصحیح هندسی کلیه تصاویر تابع چند جمله‌ای درجه اول به کار گرفته شد. به دلیل متفاوت بودن اندازه پیکسل تصاویر، در کلیه تصاویر اندازه سلولی^{۱۴} ۳۰ × ۳۰ متر انتخاب گردید.

در این تحقیق برای به دست آوردن ترکیب‌های بانندی بهینه از شاخص OIF و فاکتور I استفاده گردید؛ که برای تصاویر TM⁺ و ETM⁺ ترکیب بانندی (RGB:741) و در مورد تصویر Liss-III، ترکیب بانندی (RGB:432)؛ که بیشترین شباهت را با ترکیب بانندی تصاویر لندست دارا می‌باشد، به کار برده شد.

در این مطالعه از یک شیوه جدید و بهینه شده برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره لندست و IRS استفاده گردید، که در آن از پارامترها و داده‌های جانبی و بیرونی نیز استفاده شد. در واقع یک روش دانش مبتنا^{۱۵} به کار برده شد که ضمن افزایش دقت در طبقه‌بندی تصاویر و

استخراج مناسب عوارض ساخته شده، زمان عملیات طبقه‌بندی را نیز کاهش می‌دهد. به این منظور از چهار نوع اطلاعات جانبی عمومی استفاده گردید که عبارتند از: الف) مدل ارتفاعی رقومی (DEM)؛ ب) نقشه شیب؛ ج) محدوده مناطق ساخته شده د) نقشه‌های شهری.

برای انجام طبقه‌بندی از روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال (MLC^{۱۶})، استفاده شد. الگوهای طبقه‌بندی زیادی وجود دارد؛ که در این تحقیق از روش طبقه‌بندی Anderson Level I که توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا^{۱۷} توسعه داده شده است، استفاده گردید. با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه و کلاس‌های مورد نیاز؛ برای استخراج کلاس‌های مورد نظر روش طبقه‌بندی Anderson Level I اصلاح شد. کلاس‌هایی که در نهایت برای طبقه‌بندی انتخاب گردید عبارتند از: اراضی ساخته شده، اراضی کشاورزی، اراضی پارک و فضای سبز، اراضی بایر و پهنه‌های آبی.

برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی از ضرایب دقت کلی و شاخص کاپا استفاده گردید. با توجه به نتایج به دست آمده (جدول ۲) و بر اساس استانداردهای سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS)، دقت‌های به دست آمده از طبقه‌بندی پذیرفته شد*.

جدول ۲- دقت کلی و شاخص کاپای بدست آمده در طبقه بندی تصاویر

شاخص کاپا	دقت کلی	تصویر
۰/۸۵	۰/۸۸	(TM1990)
۰/۸۶	۰/۸۹	(ETM1999 ⁺)
۰/۸۶	۰/۹۰	(ETM2002 ⁺)
۰/۸۷	۰/۹۰	(Liss-III 2006)

روش های آماری محاسبه احتمالات تبدیل در

مدل شبیه سازی

در این تحقیق، از روش وزن های شاهد^{۱۹} (WoE) و روش رگرسیون لجستیک، که بر اساس ایده احتمالات اتفاقات یا لجیت ها می باشند، برای محاسبه احتمالات تبدیل محلی؛ و از روش زنجیره های مارکوف و روش موارد مشاهده شده در نمونه های آموزشی برای محاسبه احتمالات تبدیل کلی استفاده گردید. همه محاسبات با استفاده از متغیرهای فضایی که در محیط GIS تولید شدند، انجام گرفت.

روش وزن های شاهد (WoE)

روش WoE بر اساس تئوری بیزین در احتمالات شرطی است. در اصل، این تئوری بر روی قابلیت پیدا کردن یک واقعه خاص تمرکز دارد؛ که این واقعه در مطالعه حاضر

در این تحقیق رشد شهری به عنوان تبدیل اراضی ساخته نشده و محیط های طبیعی به اراضی ساخته شده و ساختارهای با کالبد شهری قلمداد گردید و در شبیه سازی رشد شهری تغییرات این دو کاربری مد نظر قرار گرفت؛ لذا بعد از طبقه بندی تصاویر همه آنها به دو کلاس اصلی ساخته شده و ساخته نشده کلاسه بندی مجدد^{۱۸} گردید.

داده های کارتوگرافی

بیشتر داده های کارتوگرافی موجود آماده ورود به محیط نرم افزارهای GIS نبودند؛ که GISReady گردیدند. همچنین، کلیه لایه های اطلاعاتی به سیستم تصویر UTM (زون ۳۹ شمالی، بیضوی WGS-1984) تبدیل گردید. سرانجام، بر اساس عوامل دخیل در تغییرات کاربری اراضی شهری در منطقه مورد مطالعه ورودی های مدل Urban-CA به صورت زیر انتخاب گردید (جدول ۳).

جدول ۳- متغیرهای ورودی در مدل شبیه سازی Urban-CA

علامت اختصاری	متغیر مؤثر در تبدیل کاربری اراضی
DEM	ارتفاع
Slope	شیب
Dis-Rds	فاصله از جاده های اصلی موجود
Dis-Bultup	فاصله از کاربری های ساخته شده در دوره قبل
Dis-Dev	فاصله از کاربری های توسعه یافته در دوره قبل

متغیر وابسته مورد نظر به صورت یک متغیر دو مقوله‌ای (احتمال تبدیل به کاربری ساخته شده = ۱ و احتمال عدم تبدیل به کاربری ساخته شده = ۰) در نظر گرفته شد؛ سپس متغیرهای مستقل وارد مدل شدند. در این مدل می‌توان متغیر وابسته را به این صورت تعریف کرد:

$$y = \begin{cases} \text{تبدیل کاربری به کاربری ساخته شده} = ۱ \\ \text{عدم تبدیل کاربری به کاربری ساخته شده} = ۰ \end{cases}$$

استخراج قوانین تبدیل مدل Urban-CA

فرایند تغییرات کاربری اراضی شهری در دو مقیاس کلی (Global) و محلی (Local) رخ می‌دهد؛ لذا در مدل‌های Urban-CA این دو نوع تغییرات مد نظر قرار می‌گیرد. بنابراین، در این مدل‌ها برای احتمالات تبدیل سلول‌ها همواره دو نوع احتمال کلی و محلی محاسبه می‌گردد.

محاسبه مقادیر احتمال کلی $P_G\{R\}$

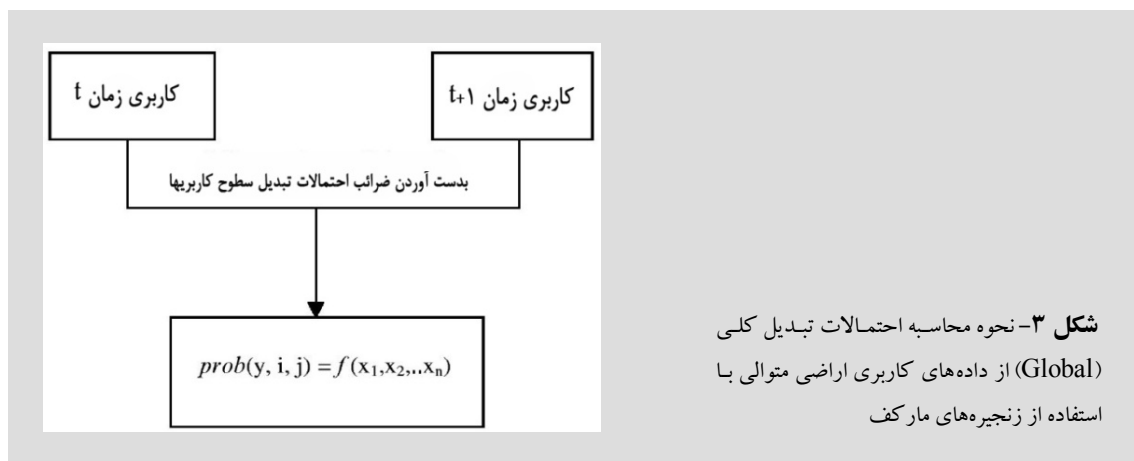
احتمالات تبدیل کلی به همه مقدار تغییر در یک نوع کاربری در یک دوره معین از شبیه‌سازی اطلاق می‌شود. برای محاسبه احتمالات تبدیل کلی سلول‌ها از دو روش استفاده شد:

الف- زنجیره‌های مارکف^{۲۶}: هنگامی که داده‌های کاربری اراضی، حداقل برای محدوده‌های شروع و پایان دوره، قابل دسترس باشد، برای محاسبه $P_G\{R\}$ ، می‌توان از این روش استفاده کرد (شکل ۳).

نوع خاصی از تغییر کاربری اراضی (کاربری ساخته‌نشده^{۱۹} به کاربری ساخته‌شده^{۲۰}) به شرط وجود یا عدم وجود متغیرهای اکتشافی یا شواهد^{۲۱} (مانند شیب) می‌باشد. به منظور آزمون استقلال شرطی^{۲۲} بین جفت متغیرها ضریب کرمر^{۲۳} (V) استفاده گردید که بر اساس ضریب کای-اسکور می‌باشد. (Bonham Carter 1994) گزارش می‌دهد که ارزش‌های کمتر از ۰/۵ برای ضریب V اشاره بر عدم وابستگی بین دو متغیر دارد. نتایج نشان داد که در واکنش بین متغیرها ضریب کرمر برای تمامی زوج‌ها کمتر از حد آستانه می‌باشد. در جداول حاصل از اعمال روش WoE روی متغیرها، ضرائب و پارامترهایی به دست می‌آید که برای تحلیل متغیرهای مستقل و ارتباط آنها با متغیر وابسته از این ضرائب استفاده می‌شود؛ که مهم‌ترین این ضرائب عبارتند از: ضریب کنتراست^{۲۴} (C)، وزن‌های مثبت w^+ و منفی w^- و انحراف از معیار کنتراست $Stdu(C)$. برای ترکیب لایه‌ها از روش شرایط منحصربه‌فرد^{۲۵} استفاده شد؛ که از نتایج آن برای بررسی انطباق فضایی نواحی توسعه‌یافته با لایه‌های شاهد و به منظور استخراج احتمالات تبدیل محلی استفاده گردید.

روش رگرسیون لجستیک

در تحقیق حاضر برای تبیین متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل با استفاده از رگرسیون لجستیک، ابتدا



شکل ۳- نحوه محاسبه احتمالات تبدیل کلی (Global) از داده‌های کاربری اراضی متوالی با استفاده از زنجیره‌های مارکف

که نحوه محاسبه این قوانین به صورت زیر است:
 الف) روش WoE: وزن‌های مثبت متغیرها در به دست آوردن مقادیر احتمال محلی $P_L\{R\}$ استفاده شد؛ مقادیر $\sum w^+$ بین صفر و یک نرمال‌سازی شد و این اعداد به عنوان احتمال محلی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۵-ا). در این روش احتمالات تبدیل محلی برای هر سلول محاسبه شد؛ به وسیله مختصات x و y نمایش داده شد و معادله نهایی که مورد استفاده قرار گرفت، حاصل تبدیل معادله لجیت به احتمال شرطی می‌باشد (رابطه ۱). اتفاقات R برای بالا بردن ارزش احتمال پسین، ۱ قرار داده شد. در مخرج کسر، برای به دست آوردن اعداد صحیح برای احتمالات تبدیل، ارزش e به وسیله مجموع وزن‌های مثبت شواهد به توان رسید.

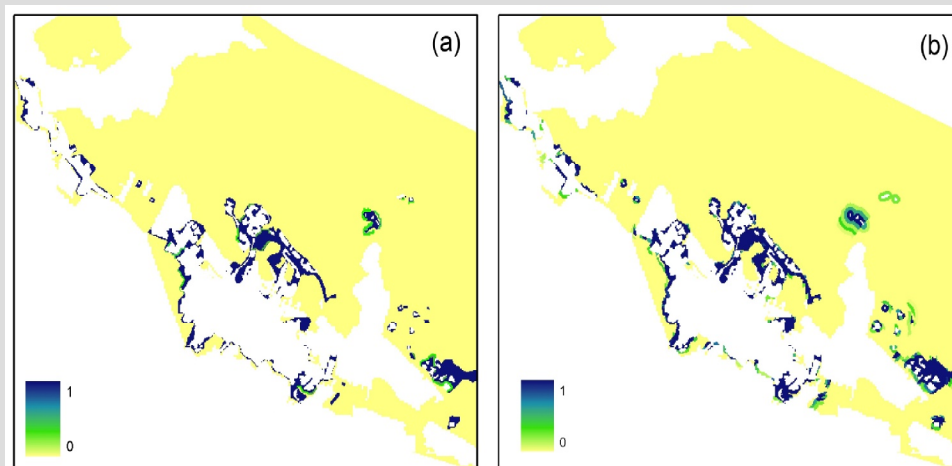
$$P_{x,y}\{R / S_1 \cap S_2 \cap \dots S_n\} = \text{(رابطه ۱)}$$

$$= \frac{O\{R\} \cdot e^{\sum_{i=1}^n w^+_{x,y}}}{1 + O\{R\} \cdot \sum_{j=1}^t e^{\sum_{i=1}^n w^+_{x,y}}}$$

ب- استفاده از موارد مشاهده شده در نمونه‌های آموزشی: در این روش ابتدا منطقه مورد مطالعه به کلاس‌های مختلف تقسیم می‌گردد؛ سپس بر اساس روش‌های مختلف به سلول‌های موجود در آن کلاس یک مقدار احتمال کلی اختصاص داده می‌شود. اساس این روش، استفاده از تعداد نقاط آموزشی (توسعه یافته) در هر کلاس می‌باشد؛ که به همین دلیل می‌توانیم آن را احتمال کلی مشاهده شده نیز بنامیم.
 در نتیجه اجرای دو روش فوق دو لایه رستری تولید گردید؛ که در آن هر سلول دارای مقداری از احتمال کلی می‌باشد (شکل ۴ a و b).

محاسبه مقادیر احتمال محلی $P_L\{R\}$

احتمالات تبدیل محلی $P_L\{R\}$ پتانسیل تغییر کاربری هر سلول بر اساس عوامل و شرایط موجود در همسایه‌های آن سلول است. در این مطالعه از روش‌های WoE و رگرسیون لجستیک برای محاسبه احتمالات تبدیل محلی استفاده شد؛



شکل ۴- (a) احتمالات کلی مشاهده شده؛ (b) احتمالات کلی حاصل از زنجیره‌های مارکف (دوره ۲۰۰۲-۱۹۹۹)

به پارامترها مانند $\gamma = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\}$ و $V_{(x,y)}$ بردار متغیرهای مستقل می‌باشد.

محاسبه مقادیر احتمال نهایی $P_F\{R\}$

برای ایجاد یک مدل Urban-CA که تغییرات کلی و محلی را در شبیه‌سازی اعمال نماید، مقادیر احتمال نهایی برای هر سلول از ضرب احتمال کلی و احتمال محلی با گام‌های مختلف به دست آمد (رابطه ۳) و (اشکال ۵-b و ۵-d).

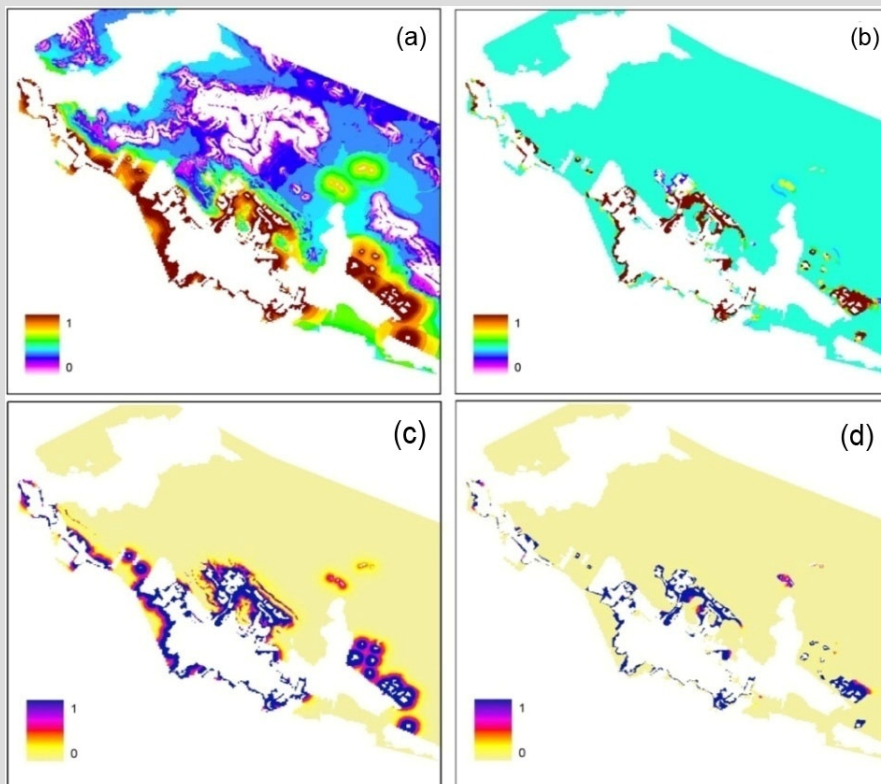
$$P_F\{R\} = (P_G\{R\})^{\gamma} \cdot (P_L\{R\})^{\gamma} \quad (\text{رابطه ۳})$$

و بالاخره، این احتمالات نهایی به دست آمده به فایل‌های با فرمت ASCII تبدیل شدند؛ تا به عنوان قوانین تبدیل وارد مدل Urban-CA شوند.

ب- روش رگرسیون لجستیک: اگرچه روش باینری برای محاسبه پارامترهای رگرسیون در این تحقیق پذیرفته شد؛ معادله‌ای که برای محاسبه احتمالات تبدیل سلول‌ها مورد استفاده قرار گرفت (رابطه ۲)، بسیار شبیه مدل رگرسیون چندگانه است؛ که در آن مقادیر e در مخرج، به وسیله مدل رگرسیون خطی با توجه به تبدیل کاربری اراضی (t) به توان می‌رسد. این کار باعث می‌شود از اتمام ارزش‌های احتمالاتی در یک خط جلوگیری شود و ارزش‌های معقول‌تری برای احتمالات تبدیل ایجاد گردد.

$$P_{i,j}(x,y) = \frac{e^{\beta_0 + \gamma_{i,j} * V_{(x,y)}}}{1 + \sum_{i=1}^t e^{\beta_0 + \gamma_{i,j} * V_{(x,y)}}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که t تبدیلات از i به j ؛ $\gamma_{i,j}$ بردارهای ضرائب مربوط



شکل ۵- (a) احتمالات محلی حاصل از WoE؛ (b) احتمالات نهایی حاصل از WoE؛ (c) احتمالات محلی حاصل از روش رگرسیون لجستیک و (d) احتمالات نهایی حاصل از روش رگرسیون لجستیک

می‌شود). در هر مرحله تکرار عملیات شبیه‌سازی یک ضریب همسایگی (Ω) که در ۹ سلول محاسبه می‌شود، به دلیل استفاده از همسایگی مور، در احتمالات نهایی ضرب می‌شود و بروزرسانی وضعیت سلول‌ها بر اساس این ضریب صورت می‌گیرد.

مدل ارزیابی نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی در این مطالعه، از یک روش جدید که از ترکیب روش تحلیل چندگانه و روش Lee-Sallee بوجود آمد استفاده گردید. برای اجرای این روش ترکیبی، از ابزار مدل‌سازی^{۳۰} در نرم‌افزار ArcGIS 9.2 استفاده شد. به دلیل استفاده از تئوری روش تحلیل چندگانه، مدل ایجاد شده در این تحقیق MRM Validation^{۳۱} نامگذاری شد. اساس این مدل به این صورت است که از پنجره‌های با اندازه‌های ۱*۱، ۳*۳، ۵*۵ و ۷*۷ استفاده می‌کند؛ که این پنجره‌ها بر روی صحنه واقعی و صحنه شبیه‌سازی شده حرکت کرده و بر اساس تعداد سلول‌هایی که درست شبیه‌سازی شده‌اند دقت را ارزیابی می‌نماید (شکل ۶). این مدل نتایج شبیه‌سازی و کاربری ساخته‌شده واقعی را به عنوان ورودی‌های مدل دریافت می‌کند؛ سپس با اعمال ۳۳ مرحله عملیات مختلف بر روی این داده‌ها دقت‌های نهایی را به صورت درصد ارائه می‌نماید.

نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی ۲۰۰۲-۱۹۹۹

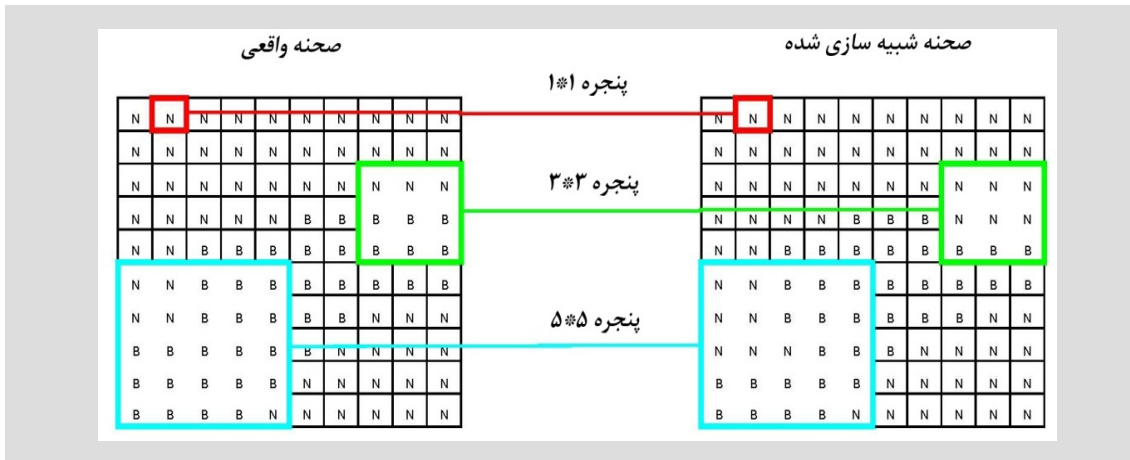
در شبیه‌سازی بر پایه روش WoE احتمالات تبدیل کلی با مقادیر گامای مختلف با احتمالات محلی ترکیب شده و به عنوان احتمالات تبدیل نهایی وارد برنامه شبیه‌سازی شدند. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از این احتمالات نشان می‌دهد؛ بالاترین دقت‌ها در گامای ۰/۵ حاصل می‌شود (جدول ۴). شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی، در قسمتی از منطقه مورد مطالعه، با این قوانین تبدیل، را نشان می‌دهد.

مدل Urban-CA توسعه یافته برای عملیات شبیه‌سازی

عموماً دو روش برای کاربرد مدل‌های Urban-CA بر پایه GIS و سنجش از دور وجود دارد: الف) روش با در نظر گرفتن عوامل محدود کننده^{۲۷}، که در آن محدودیت‌های جغرافیایی برای رشد شهر در احتمالات سلول‌ها برای تبدیل مؤثرند، پس تبدیل فقط در سلول‌هایی صورت می‌گیرد که از یک سری معیارها برخوردار باشند و ب) روش بدون در نظر گرفتن فاکتورهای محدود کننده^{۲۸}، که در آن همه سلول‌ها دارای احتمال برابری برای تغییر وضعیت هستند و یک سلول برای توسعه خود با هیچ مانعی مواجه نیست، پس هر سلولی در شبکه یک داوطلب برای تغییر به کاربری شهری است. در مدل و نرم‌افزاری که در این تحقیق توسعه داده شد؛ دو نوع CA با هم ترکیب شد، به این صورت که برای به‌دست آوردن احتمالات تبدیل Global از مدل CA مبتنی بر وضعیت استفاده شد؛ اما برای استخراج و اعمال احتمالات تبدیل Local مدل CA مبتنی بر محدودیت به کار برده شد.

اجرای شبیه‌سازی با مدل Urban-CA در منطقه مورد مطالعه، به دلیل دارا بودن شرایط محیطی خاص و استفاده از پارامترهای متفاوت در مدل، مستلزم طراحی یک برنامه و نرم‌افزار رایانه‌ای بود؛ بنابراین، یک برنامه رایانه‌ای موسوم به Urban-Sim 1.0 طراحی گردید. در شبیه‌سازی رشد شهر در این مدل و برنامه، یک دوره تکرار دلالت بر یک ماه در جهان واقعی دارد.

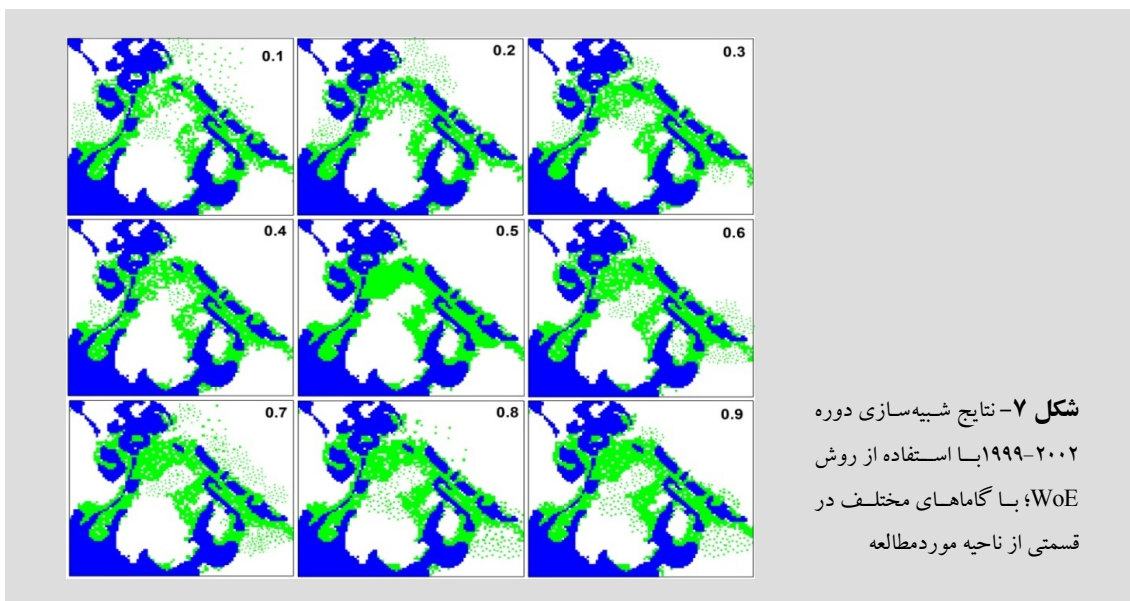
قابلیت‌های تبدیل فضایی برای هر سلول با موقعیت x و y از وضعیت i به j؛ در نقشه چشم‌انداز سال مبدأ و بر اساس قوانین تبدیل محاسبه می‌شود. در این برنامه احتمال نهایی ارائه شده برای یک سلول معین، طی یک فرایند مونت کارلو^{۲۹}، با تابع توزیع یکنواخت بین صفر و یک مقایسه می‌شود، اگر مقدار احتمال نهایی سلول بیشتر از مقدار تصادفی تابع باشد، آنگاه آن سلول به سلول با کاربری ساخته‌شده تبدیل می‌شود (به رنگ سبز تبدیل



شکل ۶- نمایشی از نحوه عملکرد مدل MRM Validation روی نقشه‌های با دو کاربری ساخته شده (B) و ساخته نشده (N)

جدول ۴- نتایج شبیه‌سازی دوره ۲۰۰۲-۱۹۹۹ با استفاده از روش WoE؛ با گام‌های مختلف

پنجره ۷*۷	پنجره ۵*۵	پنجره ۳*۳	پنجره ۱*۱	مقادیر گاما
۹۷/۶۵	۹۵/۸۵	۹۲/۳۴	۷۸/۶۷	۰/۹
۹۷/۴۷	۹۵/۵۰	۶۰/۹۲	۷۹/۰۶	۰/۸
۹۵/۰۷	۹۵/۲۵	۹۲/۲۴	۷۸/۴۴	۰/۷
۹۶/۷۲	۹۴/۳۸	۹۱/۵۶	۷۷/۲۴	۰/۶
۹۷/۷۴	۹۶/۰۶	۹۳/۱۴	۷۹/۲۳	۰/۵
۹۶/۰۰	۹۳/۰۵	۸۹/۳۵	۷۴/۲۳	۰/۴
۹۵/۵۰	۹۲/۵۴	۸۸/۲۷	۷۲/۹۲	۰/۳
۹۵/۷۷	۹۲/۴۱	۸۸/۱۲	۷۱/۸۰	۰/۲
۹۴/۷۷	۹۱/۱۵	۸۶/۹۰	۷۰/۵۵	۰/۱



شکل ۷- نتایج شبیه‌سازی دوره ۲۰۰۲-۱۹۹۹ با استفاده از روش WoE؛ با گام‌های مختلف در قسمتی از ناحیه مورد مطالعه

جدول ۵- نتایج شبیه‌سازی دوره ۲۰۰۲-۱۹۹۹ با استفاده از رگرسیون

لجستیک؛ با الف) احتمالات کلی مشاهده شده و ب) مارکف

نوع	پنجره ۱*۱	پنجره ۳*۳	پنجره ۵*۵	پنجره ۷*۷
الف	۸۹/۷۴	۹۶/۱۳	۹۶/۱۶	۹۶/۹۹
ب	۸۰/۸۳	۹۴/۵۳	۹۶/۴۱	۹۷/۷۶

جدول ۶- نتایج شبیه‌سازی دوره ۲۰۰۶-۲۰۰۲ با استفاده از روش

WoE؛ با گامای ۰/۵

مقدار	پنجره ۱*۱	پنجره ۳*۳	پنجره ۵*۵	پنجره ۷*۷
گاما	۶۹/۸۹	۷۸/۲۰	۹۰/۴۳	۹۱/۱۴

جدول ۷- نتایج شبیه‌سازی دوره ۲۰۰۶-۲۰۰۲ با استفاده از

رگرسیون لجستیک؛ با گاماهای مختلف

مقادیر	پنجره ۱*۱	پنجره ۳*۳	پنجره ۵*۵	پنجره ۷*۷
گاما	۸۴/۵۱	۸۴/۹۱	۸۵/۲۲	۸۵/۵۶
	۸۳/۶۵	۸۴/۸۸	۸۵/۹۳	۸۶/۵۹
	۸۰/۳۰	۸۲/۱۲	۸۳/۵۰	۸۴/۸۷
	۷۶/۹۰	۸۰/۲۱	۸۱/۵۰	۸۳/۱۱
	۸۵/۴۰	۸۹/۳۷	۹۱/۰۳	۹۲/۴۵
	۶۵/۱۴	۶۹/۶۷	۷۲/۳۶	۷۵/۰۱
	۵۷/۶۷	۶۳/۷۴	۶۷/۰۸	۷۰/۳۳
	۴۹/۳۰	۵۵/۷۲	۵۹/۴۷	۶۴/۲۰
	۴۲/۶۳	۵۰/۱۵	۵۴/۴۴	۵۹/۴۱

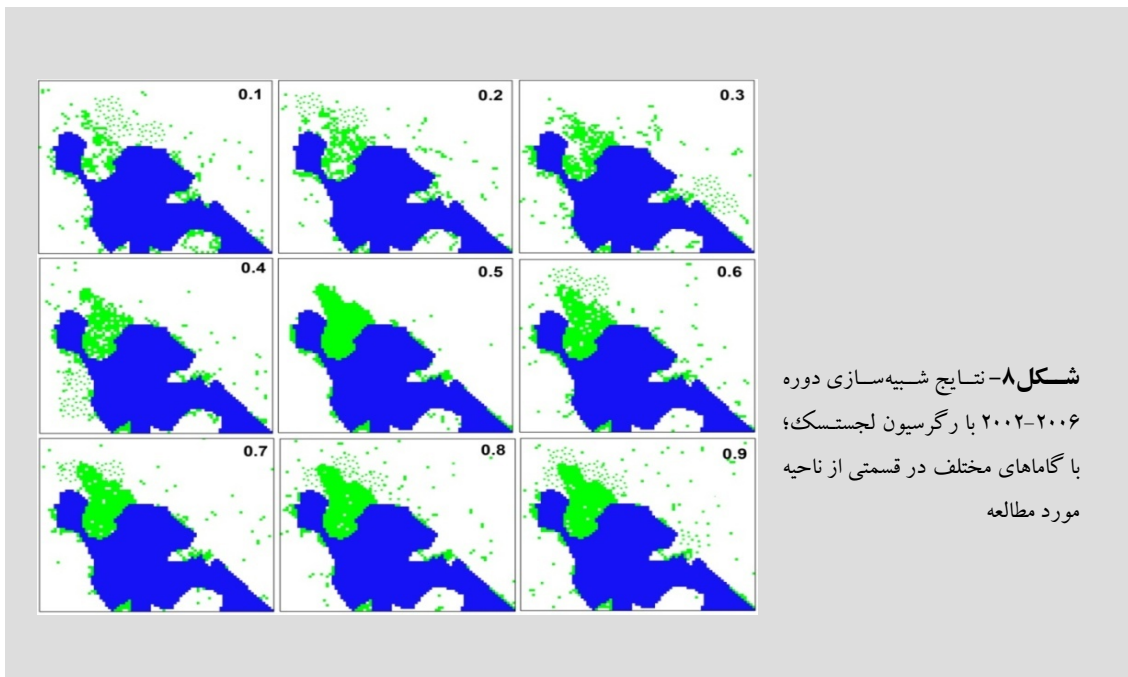
همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در مقادیر گامای پایین به دلیل حاکم بودن شرایط Local، پراکندگی داخلی در سلول‌های شبیه‌سازی شده بالاست. در حالی که با افزایش مقادیر گاما و غالب شدن شرایط Global، پراکندگی خارجی سلول‌های شبیه‌سازی شده در تصویر بیشتر می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی با احتمالات تبدیل نهایی حاصل از روش رگرسیون لجستیک در جدول (۵) نشان داده شده است؛ که در این جدول احتمالات تبدیل محلی حاصل از رگرسیون لجستیک با احتمالات تبدیل کلی حاصل از الف) موارد مشاهده شده و ب) روش زنجیره‌های مارکف آمده است.

بر اساس نتایج به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای و نتایج شبیه‌سازی برای سال‌های فوق، ناحیه ساخته‌شده سال ۱۹۹۹ نزدیک به ۱۱۷۹ هکتار بوده، که در سال ۲۰۰۲ این رقم به ۱۶۴۴ هکتار رسیده است، که ۴۶۵ هکتار افزایش مساحت را نشان می‌دهد؛ که این ارقام به طور متوسط ۱۵۵ هکتار در سال با نرخ رشد سالانه حدود ۳۳ درصد را نشان می‌دهد.

شبیه‌سازی ۲۰۰۶-۲۰۰۲

برای این دوره در شبیه‌سازی بر پایه روش WoE؛ با توجه به نتایج دوره قبل، احتمالات تبدیل کلی تنها با گامای ۰/۵ با احتمالات تبدیل محلی مشاهده شده ترکیب گردید (جدول ۶).

در روش رگرسیون لجستیک برای این دوره، به منظور آزمون نحوه ترکیب احتمالات کلی و محلی؛ احتمالات تبدیل کلی با مقادیر گامای مختلف با احتمالات تبدیل محلی ترکیب شدند (جدول ۷). همانطور که مشاهده می‌شود گامای ۰/۵ بهترین نتایج را موجب می‌شود (شکل ۸).



شکل ۸- نتایج شبیه‌سازی دوره ۲۰۰۶-۲۰۰۲ با رگرسیون لجستیک؛ با گام‌های مختلف در قسمتی از ناحیه مورد مطالعه

هدف از مدلسازی تغییرات برای آینده این است که با در نظر گرفتن افق‌های برنامه‌ریزی، رشد کاربری‌های ساخته شده به چه صورت خواهد بود؛ لذا برای پیش‌بینی تغییرات کاربری‌ها، سناریوهای زمانی متفاوت در برنامه‌ریزی شهری مد نظر قرار گرفت. از نتایج شبیه‌سازی در دوره‌های گذشته برای ارزیابی نحوه پیش‌بینی مدل استفاده گردید، که نمایانگر دقت‌های بالا در پیش‌بینی بود؛ لذا از آن برای شبیه‌سازی سالانه تغییرات کاربری‌ها تا سال ۲۰۲۵ استفاده شد. نتایج مربوط به این پیش‌بینی‌ها در جدول (۸) و شکل (۹) نشان داده شده است.

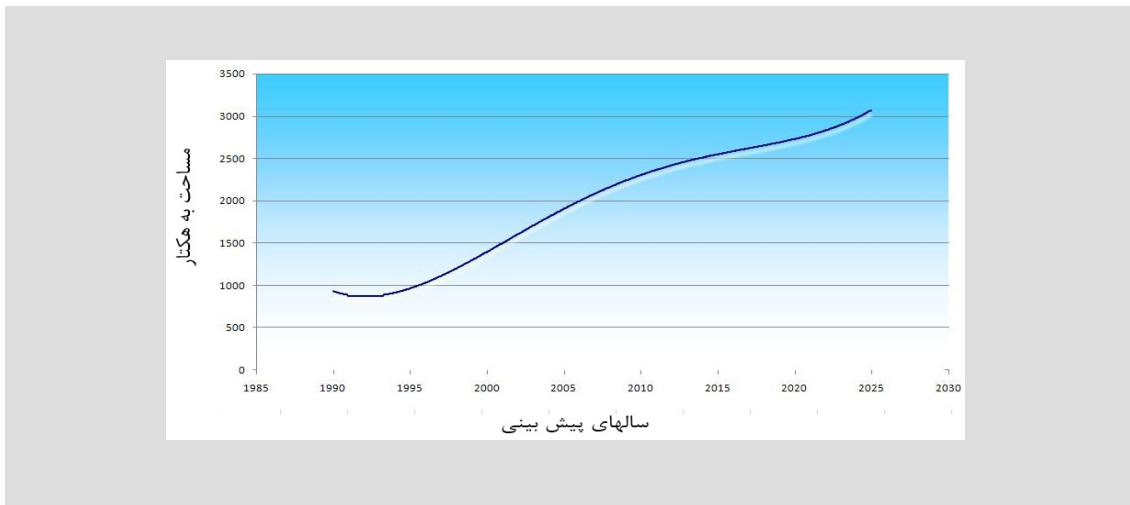
نتایج

نتایج نشان داد، سنجش از دور و GIS به آسانی می‌توانند با مدل‌های CA همراه شوند و اطلاعات بروز و ابزارهای پردازش مکانی قدرتمندی را در مدلسازی ایجاد نمایند. در شبیه‌سازی برای دوره ۲۰۰۲-۱۹۹۹؛ در روش WoE، بیشترین دقت مربوط به گامی ۰/۵ است که از

بر اساس نتایج حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و نتایج شبیه‌سازی برای سال‌های فوق، ناحیه ساخته شده سال ۲۰۰۲ نزدیک به ۱۶۴۴ هکتار بوده، که در سال ۲۰۰۶ این رقم به ۲۰۶۲ هکتار رسیده است، که ۴۱۸ هکتار افزایش مساحت را نشان می‌دهد؛ که این ارقام به طور متوسط ۱۰۴/۵ هکتار در سال با نرخ رشد سالانه حدود ۲۵ درصد را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی برای این دوره علاوه بر اینکه مبنای ارزیابی دقت مدل شبیه‌سازی است؛ مبنای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل نیز می‌باشد.

پیش‌بینی رشد شهری در آینده

در مدل توسعه داده شده در این تحقیق، پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی بر پایه روش زنجیره‌های مارکف و روش‌های رگرسیونی انجام گرفت. مدل موجود در برنامه Urban-Sim 1.0 قادر است با دوره‌های تکرار متفاوت عمل نماید و شبیه‌سازی را برای هر سالی انجام دهد.



شکل ۹- روند افزایش مساحت کاربری‌های ساخته شده در دوره‌های پیش‌بینی تا سال ۲۰۲۵

جدول ۸- پیش‌بینی افزایش مساحت کاربری‌های ساخته شده در دوره‌های شبیه‌سازی تا سال ۲۰۲۵

سال	مساحت (هکتار)
۱۹۹۰	۸۷۲
۱۹۹۱	۹۱۵
۱۹۹۲	۹۵۳
۱۹۹۳	۹۸۶
۱۹۹۴	۱۰۰۸
۱۹۹۵	۱۰۲۰
۱۹۹۶	۱۰۲۸
۱۹۹۷	۱۰۴۶
۱۹۹۸	۱۰۹۱
۱۹۹۹	۱۱۷۹
۲۰۰۰	۱۳۱۳
۲۰۰۱	۱۴۷۸
۲۰۰۲	۱۶۴۴
۲۰۰۳	۱۷۸۸
۲۰۰۴	۱۹۰۳
۲۰۰۵	۱۹۹۱
۲۰۰۶	۲۰۶۲
۲۰۰۷	۲۱۲۲
۲۰۰۸	۲۱۷۶
۲۰۰۹	۲۲۲۶
۲۰۱۰	۲۲۷۵
۲۰۱۱	۲۳۲۳
۲۰۱۲	۲۳۷۱
۲۰۱۳	۲۴۱۹
۲۰۱۴	۲۴۶۸
۲۰۱۵	۲۵۱۶
۲۰۱۶	۲۵۶۵
۲۰۱۷	۲۶۱۵
۲۰۱۸	۲۶۶۵
۲۰۱۹	۲۷۱۵
۲۰۲۰	۲۷۶۵
۲۰۲۱	۲۸۱۶
۲۰۲۲	۲۸۶۶
۲۰۲۳	۲۹۱۷
۲۰۲۴	۲۹۶۹
۲۰۲۵	۳۰۲۰

دوره قبل ارقام پائین تری را نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی برای این دوره نیز بیشترین دقت مربوط به قوانین تبدیل به دست آمده از روش رگرسیون لجستیک و در گامای ۰/۵ است.

مدل‌های WoE و رگرسیون لجستیک نتایج بسیار مشابهی را ارائه می‌دهند ولی شبیه‌سازی با استفاده از قوانین تبدیل به دست آمده از مدل رگرسیون لجستیک نتایج نسبتاً دقیق تری را منجر می‌شود. در روش رگرسیون لجستیک، تعیین و ارزیابی پارامترهای رگرسیون به طور همزمان برای همه متغیرهای موجود در مدل انجام می‌شود؛ محاسبه پارامترها به صورت یک فرایند پی‌درپی

۷۹/۲۳ درصد در پنجره ۱* تا ۹۷/۷۴ درصد در پنجره ۷*۷ می‌باشد. که این نتایج مطلوب و قابل توجه می‌باشد. در این دوره بیشترین دقت مربوط به زمانی است که از ترکیب احتمالات محلی حاصل از روش رگرسیون لجستیک و احتمالات کلی مشاهده شده استفاده گردید. به طور کلی در روش رگرسیون لجستیک دقت شبیه‌سازی برای این دوره بیشتر است.

در شبیه‌سازی برای دوره ۲۰۰۶-۲۰۰۲؛ در روش WoE بیشترین دقت شبیه‌سازی در گامای ۰/۵ و از ۶۹/۸۹ درصد در پنجره ۱* و ۹۱/۱۴ درصد در پنجره ۷*۷ می‌باشد که این دقت‌ها نسبت به نتایج مشابه در

پی‌نوشت‌ها

- 1) Land Use/Land Cover
 - 2) top-down
 - 3) bottom-up
 - 4) Simulation
 - 5) Alan Turing
 - 6) Von Newman
 - 7) Stanislaw Ulam
 - 8) John Conway
 - 9) Game Of Life
 - 10) Waldo Tobler
 - 11) Cellular Geography
 - 12) Contrast Enhancement
 - 13) Linear Streching
 - 14) Cellsize
 - 15) Knowledg Driven or Knowledge Base
 - 16) Maximum Likelihood Classification
 - 17) USGS
 - 18) Reclass
 - 19) Non-Builtup
 - 20) Builtup
 - 21) Evidence
 - 22) Conditional Independent
 - 23) Cramer's Coefficient
 - 24) Contrast
 - 25) Unique Conditions Map
 - 26) Markov chain
 - 27) Constrained-Based Method
 - 28) Unconstrained- Based Method
 - 29) Monte Carlo
 - 30) Model Builder
 - 31) Multiple Resolution Method
- * بر اساس استاندارد USGS حداقل مقدار قابل قبول شاخص کاپا ۸۵ درصد می‌باشد؛ و چون دقت کلی نیز همواره مقادیر بیشتر از شاخص کاپا را دارد می‌توان رقم ۸۵ درصد را به عنوان آستانه دقت کلی نیز در نظر گرفت.

و همزمان انجام می‌شود و کمتر تحت تأثیر همبستگی داخلی متغیرهای مستقل قرار می‌گیرد و این باعث بهبود نتایج و افزایش دقت‌های شبیه‌سازی می‌گردد.

تحلیل نتایج

بررسی نتایج حاصل از اجرای مدل Urban-CA، می‌تواند تغییرات آینده کالبد شهر را با توجه به شرایط محیط طبیعی نمایش دهد؛ یعنی با توجه به وضعیت یک سلول در زمان حال، با برقرار بودن شرایط محیطی کنونی، وضعیت آن در آینده را پیش‌بینی می‌کند؛ لذا با استفاده از این مدل می‌توان روند تخریب محیط طبیعی در گذشته و تغییرات آن در آینده را شبیه‌سازی کرد. مهم‌ترین مسئله‌ای که در کاربرد مدل‌های CA در مدلسازی تغییرات کاربری اراضی شهری وجود دارد، استخراج قوانین تبدیل مدل می‌باشد؛ که امری پیچیده و مشکل است. همچنین، نحوه استفاده از قوانین Local و Global در مدل‌های Urban-CA بسیار مهم می‌باشد و نتایج شبیه‌سازی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. که این تحقیق به نتایج بسیار مطلوب و قابل توجهی در این زمینه‌ها دست یافت.

در زمینه پیش‌بینی مدل، با توجه به سناریوهای برنامه‌ریزی شهری؛ نتایج مطلوبی به دست آمد. نتایج پیش‌بینی مدل، نشان داد که روند شهرنشینی و شهرگرایی سریع در ناحیه شهر کرد بیشتر در اطراف مرزهای شهر و در نزدیکی مراکز شهری ساخته شده و همچنین به صورت قطعه قطعه در شمال و شمال شرقی شهر رخ خواهد داد. علاوه بر این می‌توان پیش‌بینی کرد که با توجه به روند گسترش شهر، این شهر می‌تواند در یک دوره برنامه‌ریزی بلندمدت (حدود بیست سال) به یک ناحیه شهری متمرکز و تجمعی تغییر شکل دهد.

- Clarke, K.C. and L.J. Gaydos (1998). Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: longterm urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographic Information Science*, 12: 699-714.
- Henriquez, C., G. Azocar and H. Romero (2006). *Monitoring and modeling the urban growth of two mid-sized Chilean cities. Habitat International*, 30: 945-964.
- Junfeng, J. (2003). *Transition Rule Elicitation for Urban Cellular Automata models. Case Study: Wuhan-China*, MSc.thesis, International institute for geo-information science and earth observation (ITC).The Netherlands.
- Kiani, A. (2003). *Intelligent Sensor and Cellular Automata Simulation and Evaluation in Urban Landuse Hiperap Analysis*. Ph.D Thesis. Modarres University, Iran.
- Mirbagheri, B. (2006). *Urban Landuse Change Simulation Using Remote Sensing Data And Cellular Automata Model*. MSc. Thesis. Shahid Beheshti University. Iran.
- Singh, A.K. (2003). *Modeling Land Use/Land Cover Changes Using Cellular Automata in a Geo-Spatial Environment*. MSc.thesis. International institute for geo-information science and earth observation (ITC). The Netherlands.
- Sui, D.Z. and H. Zeng (2001). Modeling the dynamics of landscape structure in Asia's merging desakota regions: a case study in henzhen. *Landscape and Urban Planning*, 53: 37-52.
- Torrens, P.M. (2003). Automata-based models of urban systems. *Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA)*. ESRI Press: 61-79.
- Almeida, C.M. and J.M. Gleriani (2005). *Cellular Automata and Neural Network as a Modeling Framwork for the Simulation of Land Use Change*. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil. 16-21 abril, pp 3697-3705.
- Almeida, C.M., A.M.V. Monteiro, G. Câmara, B.S.S. Filho, G.C. Cerqueira, C.L. Pennachin and M. Batty (2002). Empiricism and Stochastic in Cellular Automaton Modeling of Urban Land Use Dynamics. *Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA)*. paper series-paper 42.
- Batty, M. and Y. Xie (1997). Possible urban automata. *Environment and Planning B*, 24(2):175-192.
- Batty, M. (2005). Agents, cells, and cities: new representational models for simulating multiscale urban dynamics. *Environment and Planning A*, 37: 1373-1394.
- Batty, M., H. Couclelis and M. Eichen (1997). Urban systems as cellular automata. *Environment and Planning B*, 24(2): 159-164.
- Benenson, I. and P.M.Torrens (2004). *Geosimulation, Automata-Based Modeling Of Urban Phenomena*. England: John Wiley & Sons, Ltd.
- Bonham-Carter, G. (1994). *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. New York: Pergamon.
- Cheng, J. (2003). *Modelling Spatial and Temporal Urban Growth. Doctoral Dissertation*. Ph.D Thesis. International institute for geo-information science and earth observation(ITC). the Netherlands.
- Couclelis, H. (1997). From cellular automata to urban models: new principles for development and implementation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2): 165-174.

