

مقاله علمی پژوهشی

شبیه‌سازی تغییرات کاربری زمین در بافت‌های شهری با تلفیق رهیافت مونت کارلو، منطق فازی و سلول‌های خودکار، مطالعه موردی: منطقه ۷ شهر اصفهان

*علیرضا صاحبقرانی^۱، محمود محمدی^۲

۱. دانشجوی دکتری شهرسازی، گروه شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران.

۲. دانشیار شهرسازی، گروه شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۴

Simulation of Land Use Changes in Urban Fabrics with Integration of Monte Carlo Approach, Fuzzy Logic and Cellular Automata, Case Study: District 7th of Isfahan

Alireza Sahebgharani^{*1}, Mahmoud Mohammadi²

1. Ph.D. Candidate of Urban Planning, Department of Urban Planning, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran.

2. Associate Professor of Urban Planning, Department of Urban Planning, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran.

Accepted: 2019/02/02

Received: 2021/12/05

Abstract

The aim of this study was to simulate land use change in urban contexts using a combination of Monte Carlo model, fuzzy logic and automated cells in District 7 of Isfahan. The research method was descriptive-analytical, and usage of Monte Carlo approach, application of more land types, more comprehensive transition rules, and more complete factors in the land use change process are of its contribution. In this study first the framework of the automated cell model integrated with fuzzy logic and the Monte Carlo approach was described. Two time periods of 1390-1400 and 1400-1410 were used. Finally, to compare the developed model with the models of automatic cells integrated with fuzzy logic and traditional automatic cells, three indicators of compatibility, compactness and land susceptibility were used. According to the research results of the cellular model combined with fuzzy logic and the Monte Carlo approach had a more satisfactory output than the other two models.

Keywords:

Urban Textures, Automated Cells, District 7 of Esfahan.

چکیده

هدف از این مطالعه، شبیه‌سازی تغییرات کاربری زمین در بافت‌های شهری با استفاده از تلفیق مدل مونت کارلو، منطق فازی و سلول‌های خودکار در منطقه ۷ شهر اصفهان بوده است. روش تحقیق توصیفی-تحلیلی بوده و از نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به استفاده از رهیافت مونت کارلو، تدارک تعداد بالاتر انواع کاربری‌ها، تعریف قوانین انتقال جامع‌تر و استفاده از عوامل و شاخص‌های کامل‌تر در فرایند تغییر کاربری‌ها اشاره نمود. در این مطالعه ابتدا چارچوب مدل سلول‌های خودکار تلفیقی با منطق فازی و رهیافت مونت کارلو تشریح گردید و پس از تنظیم پارامترهای اولیه، این مدل برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی در منطقه هفت شهر اصفهان در دو سناریوی توسعه درونی و پیرامونی و در دو دوره زمانی ۱۳۹۰-۱۴۰۰ و ۱۴۰۰-۱۴۱۰ به کار گرفته شد. در نهایت، جهت مقایسه مدل توسعه یافته با مدل‌های سلول‌های خودکار تلفیق شده با منطق فازی و سلول‌های خودکار سنتی، سه شاخص سازگاری، فشردگی و تناسب زمین مورد استفاده قرار گرفت. طبق نتایج تحقیق مدل سلول‌های خودکار تلفیقی با منطق فازی و رهیافت مونت کارلو خروجی رضایت‌بخش‌تری نسبت به دو مدل دیگر داشته است.

واژگان کلیدی

تغییرات کاربری زمین، بافت‌های شهری، سلول‌های خودکار، اصفهان.

مقدمه

شبیه‌سازی تغییرات کاربری زمین یکی از موضوعات قابل توجه در حوزه برنامه‌ریزی شهری بوده و نقشی کلیدی را برای دستیابی به توسعه پایدار ایفا می‌کند (Huang et al., 2015: 1). علت اهمیت یافتن شبیه‌سازی روند تغییرات کاربری اراضی در محافل علمی و دانشگاهی، در ضرورت آگاهی تصمیم‌گیران و تصمیم‌سازان شهری از تاثیر سیاست‌های اتخاذ شده و یا پیشنهادی خود بر وضعیت آبی توسعه شهری نهفته است. از آن‌جا که شهر سیستمی بسیار پیچیده بوده و روند تغییرات کاربری اراضی شهری با حجم وسیعی از داده‌ها و متغیرها در سطوح و لایه‌های گوناگون (از جمله: اقتصادی، کالبدی و جز آن) سروکار دارد، به‌کارگیری مدل‌های ریاضی و روش‌های پیشرفته مبتنی بر رایانه به منظور بازنمایی تحولات ذکر شده اجتناب ناپذیر است. از این رو، تاکنون فنون و روش‌های متعددی به منظور شبیه‌سازی تحولات کاربری زمین توسعه یافته است (مدل یوپلان^۱ (Johnston. et al, 2003)، متروسیم^۲ (Anas, 1994)، کلو-اس^۳ (Verburg. et al, 2002)، اسلیوت^۴ (Clarke. et al, 1997) و جز آن). در میان مدل‌های توسعه یافته در این زمینه، مدل سلول‌های خودکار به دلیل برخورداری از ویژگی‌هایی چون: سادگی، انعطاف‌پذیری، توانایی در بازنمایی پدیده‌های گسسته، امکان تطابق با ابعاد پیچیده و متعدد زمانی و فضایی، قابلیت تعریف و مدل‌سازی آینده در قالب قوانین "چه می‌شود-اگر" یا "اگر-آن‌گاه" که پیامدهای حاصل از اتخاذ مجموعه‌ای از پیش‌فرض‌ها را تحلیل و پیشگویی می‌نماید، و امکان تلفیق این مدل با سایر روش‌های ریاضی به طور گسترده‌ای مورد توجه محققان قرار گرفته است (Santé. et al, 2010: 110).

اولین رهیافت‌های نظری مدل سلول‌های خودکار در ارتباط با پدیده‌های شهری در سال ۱۹۸۰ شکل گرفته و سابقه‌ی نخستین به‌کارگیری آن در یک محیط حقیقی شهری به سال ۱۹۹۰ بازمی‌گردد. پس از تلاش‌های اولیه برای انطباق سلول‌های خودکار با شرایط واقعی، تحقیقات متعددی، هم در زمینه‌ی گونه‌های مدل‌سازی و هم در زمینه‌ی بهبود عملکرد و افزایش دقت نتایج حاصل از این مدل‌ها صورت گرفته است. در اغلب مطالعات، تقسیم‌بندی کاربری زمین در مدل تنها به دو دسته‌ی ساخته شده و ساخته نشده محدود می‌شود. این در حالی است که استقرار گونه‌های مختلف کاربری اراضی بر روند آبی توسعه شهری و تغییرات کاربری اراضی تاثیر قابل توجهی داشته و طبقه‌بندی آن به طور همفزون و تنها در دو دسته منجر به کاهش انطباق خروجی مدل با واقعیت می‌شود. به علاوه، تنها ساختار بخش اندکی از پژوهش‌های پیشین امکان ورود کاربری‌های چندگانه به فرآیند مدل‌سازی را فراهم می‌نماید. بنابراین، لازم است مدل‌های جدیدی با قابلیت مدل‌سازی چندین کاربری به طور همزمان توسعه یابند. به علاوه، با توجه به این واقعیت که تغییرات کاربری زمین محصول میانکنش پیچیده‌ی تعداد زیادی از عوامل سیاسی، مدیریتی، اقتصادی، فرهنگی، انسانی و محیطی است، می‌توان گفت که مدل‌سازی تغییر وضعیت کاربری‌ها تنها با قوانین احتمالی تعیین نشده و لازم است تا با اجزای تصادفی مرتبط گردد. این مطلب موید آن است که مدل‌های توسعه یافته در زمینه‌ی شبیه‌سازی تغییرات کاربری زمین بایستی به گونه‌ای طراحی شوند که از قابلیت گنجاندن اجزای تصادفی و قطعی در کنار یکدیگر را برخوردار باشند. در پژوهشی که توسط الخدر و همکاران (۲۰۰۸) انجام شده است، مدل سلول‌های خودکار مبتنی بر منطق فازی برای مدل‌سازی رشد شهری بر اساس تصاویر چندزمانه ماهواره‌ای توسعه یافته است. در این مطالعه، مطابق با مدل‌های مرسوم سلول خودکار، وضعیت کاربری تنها به دو دسته ساخته شده و ساخته نشده تقسیم‌بندی، و علیرغم پیچیدگی و تعدد عوامل اثرگذار بر گسترش شهری به تعریف دو قانون انتقال اکتفا شده است. مضافاً، مدل ارائه شده در این تحقیق فاقد جزء تصادفی است. در پژوهشی دیگر، الاحمدی و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از مدل سلول‌های خودکار فازی به مدل‌سازی پویایی‌های نهفته در فرآیند رشد شهری پرداخته‌اند. در این تحقیق نیز مشابه با تحقیق اول، دو گونه کاربری زمین (شهری و غیر شهری) در نظر گرفته شده و مدل‌سازی رشد شهری با استفاده از یک قانون انتقال صورت می‌پذیرد. بنابراین، هدف کلی پژوهش حاضر ارائه مدل بهبود یافته سلول‌های خودکار فازی بوده که خلاءهای نظری و فنی شناسایی و اشاره شده در بالا را برطرف نماید. به این ترتیب، نوآوری‌های مطالعه به طور خلاصه عبارتند از:

- تلفیق رهیافت مونت کارلو با مدل سلول‌های خودکار فازی جهت در نظر گرفتن جزء قطعی و تصادفی در مدل به طور همزمان؛
- تعریف کاربری‌های چندگانه در ساختار مدل سلول‌های خودکار فازی برای افزایش انطباق مدل با فرآیندهای واقعی موجود در تغییر کاربری زمین؛
- تعریف قوانین انتقال فازی متعدد به منظور لحاظ نمودن عدم قطعیت موجود در فرآیند تغییر کاربری زمین در ساختار مدل و بازنمایی دقیق‌تر شرایط حقیقی؛
- معرفی عوامل و شاخص‌های جدید برای تعریف قوانین انتقال؛
- توسعه‌ی مدلی با قابلیت به‌کارگیری به صورت هنجاری (تجویزی) و پیش‌بین (روندی) جهت افزایش انطباق آن برای کاربرد در مراحل مختلف فرآیند برنامه‌ریزی از جمله: ارزیابی (مانند: ارزیابی تاثیر تصمیمات اتخاذ شده بر الگوی آبی کاربری زمین)، پیش‌بینی

(نظیر: پیش‌بینی وضعیت آینده‌ی استقرار کاربری‌ها بر اساس ادامه‌ی روند و شرایط موجود) و تجویز (مانند: پیشنهاد الگوهای متنوع استقرار کاربری زمین بر مبنای قوانین تعریف شده توسط برنامه‌ریز).

مبانی نظری

چارچوب نظری

مدل‌سازی تغییر کاربری زمین

تغییر کاربری زمین فرایندی پویا بوده که ابعاد فضایی و زمانی رو به صورت توأمان در بر داشته و مورد توجه گروه‌های مختلف از جمله بوم‌شناسان، مدیران منابع و برنامه‌ریزان قرار دارد (Dietzel & Clarke, 2006: 79). با توجه به آنکه رشد و تغییر کاربری‌های شهری می‌تواند مشکلات محیط زیستی، اجتماعی و اقتصادی را به همراه داشته باشد (Munroe & York, 2003: 300)، مدل‌سازی تغییر کاربری زمین به عنوان یکی از اجزا اساسی برنامه‌ریزی و مدیریت شهری در نظر گرفته می‌شود (حسینی و همکاران، ۱۳۹۵: ۷۱). به این ترتیب، تاکنون مدل‌های مختلفی در زمینه‌ی مطالعه و تحلیل تغییرات کاربری اراضی توسعه یافته است. مدل‌های موجود در این حوزه‌ی موضوعی را می‌توان بر اساس معیارهای مختلفی از قبیل: گونه‌ی مدل (نظریه-مبنا، روندی و هنجاری)، روش تلفیقی با مدل اولیه‌ی سلول‌های خودکار (آمار، شبکه عصبی، فازی، ابتکاری و پویایی سیستم)، و تعداد گونه‌ی کاربری مورد مدل‌سازی (دوگانه-چندگانه) طبقه‌بندی نمود.

سلول‌های خودکار

اولین جزء تشکیل‌دهنده سلول‌های خودکار، شبکه یا سلول است. شکل سلول‌های تشکیل‌دهنده‌ی شبکه، عموماً هندسی بوده و اختیار نمودن اشکال مختلفی چون مربع و شش ضلعی برای سلول‌ها امکان‌پذیر است. لازم به ذکر است که در برنامه‌ریزی شهری به دلیل شباهت شبکه‌ی مربعی با داده‌های رستری در GIS، معمولاً از شکل مربعی شبکه استفاده می‌شود. شبکه و سلول در شکل ۱، نشان داده شده است.



شکل ۱. تنظیم شکل سلول‌ها (ماخذ: محمدی و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۸۲)

وضعیت هر سلول، بیانگر متغیرهای فضایی مرتبط با هر سلول است. به طور مثال، انواع مختلف کاربری زمین می‌تواند به عنوان یک متغیر تعریف شده و مقادیر مختلفی (۱: مسکونی، ۲: تجاری و جز آن) به عنوان وضعیت سلول تلقی گردد (شکل ۲).

0	0
1	0

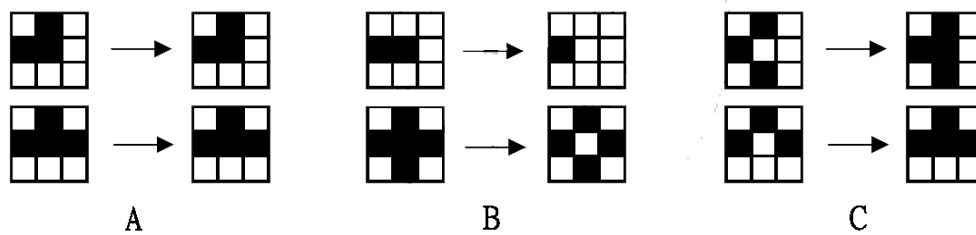
شکل ۲. وضعیت سلول‌های خودکار (ماخذ: محمدی و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۸۲)

همسایگی به مفهوم آرایش سلول‌های موجود در اطراف یک سلول مرکزی در شبکه می‌باشد. در یک شبکه‌ی یک بعدی (شکل ۳-الف)، هر سلول حداکثر دارای دو سلول همسایه است. در شبکه دو بعدی، همسایگی سلول به دو شیوه‌ی کلی مور (شکل ۳-الف) و ون‌نیومن (شکل ۳-پ) تعریف می‌شود. در همسایگی ون‌نیومن سلول‌های واقع در سلول‌های واقع در شمال، جنوب، شرق و غرب سلول مرکزی مورد نظر قرار گرفته در همسایگی مور نه سلول واقع در اطراف سلول مرکزی، مجموعه سلول‌های مورد نظر را تشکیل می‌دهد.



شکل ۳. بعد و همسایگی در سلول‌های خودکار

رفتار جهان حقیقی، به وسیله‌ی قوانین انتقال در مدل سلول‌های خودکار تعریف شده و قابلیت پردازش پیدا می‌کند. قوانین انتقال از ساختار شرطی "اگر-آن‌گاه" تبعیت کرده که امکان تبدیل پیچیدگی‌ها به روابط ساده را فراهم می‌نماید (Wu, 1998b). شکل ۴ نمونه‌ای از قوانین انتقال را نشان می‌دهد.



شکل ۴. قوانین انتقال (ماخذ: (Lee, et al, 2009: 509))

ارتباط اجزای مدل سلول‌های خودکار را می‌توان در قالب دو رابطه‌ی ۱ و ۲ نشان داد.

(۱)

$$(L, S, N, T)$$

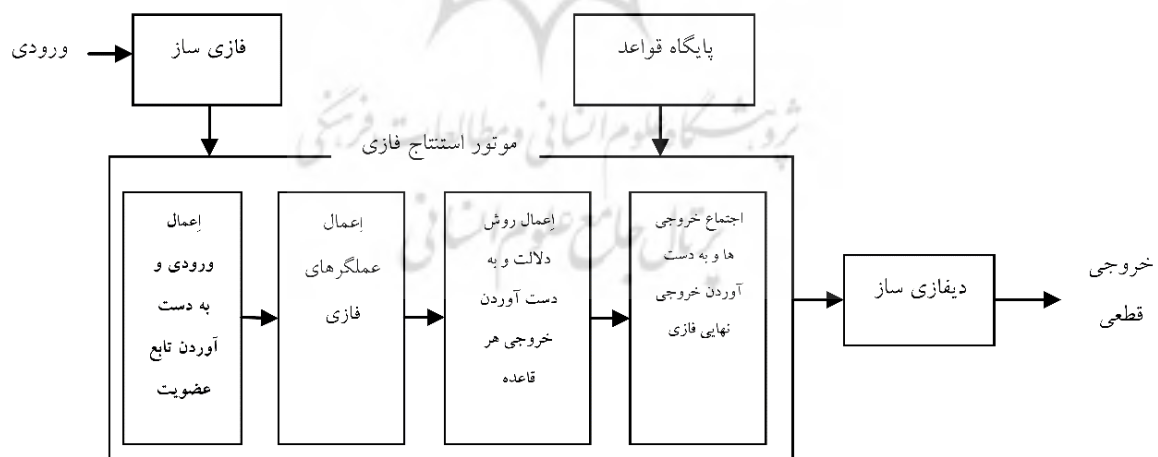
(۲)

$$S_{t+1} = f(S_t, N, T)$$

در روابط ۱ و ۲، L نمایانگر شبکه، S نمایانگر وضعیت‌های ممکن برای هر سلول، N نمایانگر همسایگی‌های سلول، و T نمایانگر مجموعه قوانین انتقال است. همچنین، S_{t+1} وضعیت سلول در زمان $t+1$ و S_t وضعیت سلول در زمان t را نشان می‌دهد (Kumar, 2003: 16).

منطق فازی

سیستم‌های فازی چارچوبی محاسباتی بر اساس سه مفهوم: مجموعه‌های فازی، قواعد استنتاج و استدلال فازی هستند. اولین بخش، مرحله‌ی گزینش و انتخاب قواعد فازی را در بر می‌گیرد. دومین بخش، بستر تعریف قواعد فازی را فراهم می‌آورد. سومین بخش، مسیر استنتاج از ورودی‌ها و حقایق موجود به کمک قواعد فازی برای رسیدن به یک خروجی منطقی را هموار می‌سازد. لازم به ذکر است که ورودی مجموعه‌های فازی می‌تواند به صورت فازی و یا غیر فازی باشد، اما خروجی همواره یک مقدار فازی است. بنابراین، خروجی هر فرآیند فازی نیاز به روالی برای غیرفازی‌سازی داشته، تا خروجی حاصل، قابلیت تفسیر را بیابد (Zadeh, 1965). فرآیند استنتاج فازی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. فرآیند کلی استنتاج فازی (ماخذ: (Kadkhodazade & Morovati, 2013: 119))

در مرحله‌ی فازی‌سازی مقادیر متغیرهای ورودی، برای هر متغیر یک تابع عضویت (مثلثی، دوزنقه‌ای و جز آن) در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از تابع تعریف شده، مقادیر قطعی به مقادیر فازی تبدیل می‌شوند تا امکان تفسیر در سیستم استنتاج فازی را بیابند. قواعد فازی در قالب کلی $If X then Y$ تدوین می‌شوند. بنابراین، هر قاعده‌ی فازی از دو بخش تشکیل می‌شود (X و Y). بخش اول (X) مقدم، و بخش دوم (Y) نتیجه نامیده شود. در بخش اول ورودی‌های فازی‌سازی شده که می‌توانند یک یا بیش از دو متغیر را در بر داشته باشند، به قاعده وارد شده و با استفاده از عملگرهای مختلف فازی نظیر And ، Or و Not فازی با یکدیگر ترکیب می‌شوند و در نهایت تابع خروجی هر قاعده برش خورده و تعیین می‌شود.

در مرحله‌ی تجمیع خروجی‌های حاصل از قواعد فازی، خروجی‌های قواعد فازی (Yهای تعیین شده توسط قواعد) با یکدیگر تلفیق می‌شوند. فرآیند تلفیق، فرآیندی است که در طی آن مجموعه و یا تابع فازی ارائه‌دهنده‌ی خروجی هر قاعده با خروجی سایر توابع در قالب یک مجموعه‌ی فازی یا یک تابع فازی تجمیع می‌شود. به منظور تجمیع خروجی‌ها از روش‌های ماکزیمم، Or احتمالی و محاسبه‌ی مجموع استفاده می‌شود.

در نهایت، نوبت به غیرفازی‌سازی مجموعه‌ی فازی می‌رسد تا از این طریق به یک عدد غیر فازی قابل تفسیر دست یافته شود. روش‌های متعددی به منظور غیرفازی‌سازی مجموعه‌های فازی از قبیل: محاسبه‌ی نیمساز، میانه‌ی ماکزیمم، بزرگ‌ترین ماکزیمم، کوچک‌ترین ماکزیمم و مرکز جرم وجود دارد. لازم به ذکر است که آخرین روش پرتعدادترین روش غیرفازی‌سازی در میان محققان می‌باشد.

رهیافت مونت کارلو

مونت کارلو رهیافتی است که با استفاده از آن به شبیه‌سازی واقعیت پرداخته می‌شود. در این رهیافت شبیه‌سازی واقعیت از طریق اعمال فرآیندی تصادفی برای انتخاب نمونه‌ی مورد مطالعه و گزینش اتفاقی آن صورت می‌پذیرد (Deal. et al, 2013: 113). در مدل‌های مرتبط با سلول‌های خودکار، پس از محاسبه‌ی احتمال نهایی تبدیل یک سلول بر اساس قوانین انتقال تعریف شده، از یک تابع توزیع یکنواخت برای تولید اعداد تصادفی در فاصله‌ی صفر تا یک استفاده می‌شود. در گام بعد، میان احتمال نهایی تبدیل سلول به یک وضعیت خاص و عدد تصادفی حاصل از توزیع یکنواخت مقایسه به عمل آمده و در صورت بیشتر بودن احتمال تبدیل، وضعیت سلول به حالت تعیین شده در محاسبات تغییر می‌کند (فیروزآبادی و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۴۲).

توسعه مدل پیشنهادی شبیه‌سازی تغییرات کاربری زمین

در مدل توسعه یافته، رهیافت احتمالی برای مدل‌سازی تبدیل وضعیت یک سلول به نوعی خاص از کاربری زمین در نظر گرفته شده است. به این ترتیب می‌توان مطلوبیت تغییر وضعیت یک سلول به یک گونه‌ی کاربری زمین را به شکل تابعی از همسایگان مستقر در اطراف سلول و فاکتورهای اثرگذار بر آن (نظیر دسترسی، شیب و جز آن) تعریف نمود. بیان ریاضی این مفاهیم در رابطه‌ی ۳ نشان داده شده است.

$$(۳) \quad U_i^{j,t} = f(N_i^j, IF_i^{k,j}) \\ i \in \{1,2, \dots, n\}, j \in \{1,2, \dots, m\}, t \in \{1,2, \dots, T\}$$

در رابطه‌ی ۳، $U_i^{j,t}$ میزان مطلوبیت سلول i برای تبدیل به کاربری j در زمان t ، N_i^j همسایگان سلول i با کاربری j ، $IF_i^{k,j}$ میزان تاثیر عامل k بر سلول i برای تبدیل به کاربری j و f تابعی است که ارتباط میان این سه متغیر کلان را برقرار می‌سازد. این تابع می‌تواند اشکال متنوعی از جمله شکل خطی و یا غیر خطی را اختیار نماید در این مطالعه، شکل خطی تابع f با ضرایب یکسان و برابر در نظر گرفته شده است (رابطه ۴).

$$(۴) \quad U_i^{j,t} = f(N_i^j, IF_i^{k,j}) = \mu_1 f^1(N_i^j) + \mu_2 f^2(IF_i^{k,j}) \xrightarrow{\mu_1 = \mu_2 = 1} U_i^{j,t} = f^1(N_i^j) + f^2(IF_i^{k,j})$$

توابع تعریف‌کننده‌ی تاثیر همسایگی و عوامل اثرگذار نیز می‌توانند طیف متنوعی از اشکال را اختیار نمایند. در مطالعه‌ی حاضر، همسایگی، همسایگی مور با شعاع یک است. به همین جهت، تاثیر همسایگی به طور کلی از این قاعده پیروی خواهد کرد که هر چه تعداد همسایگان با کاربری مشابه در اطراف یک سلول بیش تر باشد، مطلوبیت تبدیل کاربری آن سلول به این نوع کاربری افزایش خواهد یافت. بنابراین، تاثیر همسایگی با استفاده از رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود:

$$(۵) \quad f^1(N_i^j) = \frac{1}{9 - \sum_{l=1}^8 C(l)}, \begin{cases} \text{if } C(l) = j, C = 1 \\ \text{otherwise, } C = 0 \end{cases}$$

تاثیر عوامل تاثیرگذار بر تبدیل وضعیت سلول به نوع خاصی از کاربری زمین نیز از طریق رابطه‌ی ۶ مدل‌سازی می‌شود:

$$(۶) \quad f^2(IF_i^{k,j}) = \sum_{p=1}^K V(IF_i^k)$$

در این معادله، $V(IF_i^k)$ مقدار سلول i در نقشه‌ی عامل k است. لازم به ذکر است که تمامی عملیات صورت گرفته برای محاسبه‌ی خودکار در نظر گرفته شده و از این طریق مقدار مطلوبیت نهایی تبدیل سلول i به کاربری j محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که برای هر گونه‌ی کاربری j یک سیستم استنتاج فازی جداگانه در نظر گرفته می‌شود. شکل کلی این قوانین به صورت زیر خواهد بود. لازم به یادآوری است که وزن قواعد پیش از انجام عمل استنتاج از دو روش خبرگی و عصبی قابل حصول است.

اگر مقدار عامل اول برای سلول i بالا و ... و مقدار عامل k ام برای سلول i بالا باشد،
 آن‌گاه مطلوبیت تبدیل سلول i به کاربری ۱ در زمان t پایین است.
 :
 اگر مقدار عامل اول برای سلول i پایین و ... و مقدار عامل k ام برای سلول i بالا
 باشد، آن‌گاه مطلوبیت تبدیل سلول i به کاربری ۱ در زمان t پایین است.

 :

 اگر مقدار عامل اول برای سلول i بالا و ... و مقدار عامل k ام برای سلول i بالا باشد،
 آن‌گاه مطلوبیت تبدیل سلول i به کاربری m در زمان t پایین است.
 :
 اگر مقدار عامل اول برای سلول i پایین و ... و مقدار عامل k ام برای سلول i پایین
 باشد، آن‌گاه مطلوبیت تبدیل سلول i به کاربری m در زمان t بالا است.

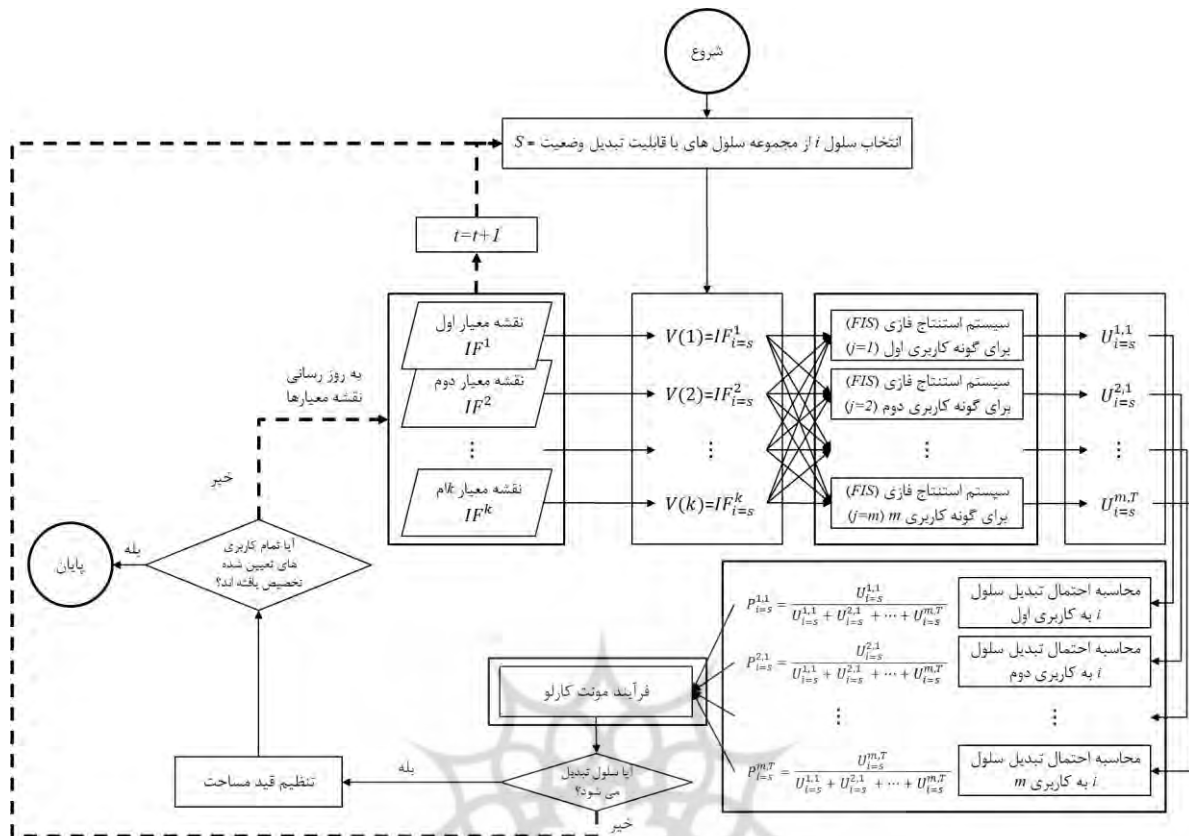
پس از محاسبه‌ی مقادیر $U_i^{j,t}$ ، نوبت به محاسبه‌ی احتمال تبدیل سلول i به کاربری j می‌رسد. این احتمال از طریق رابطه‌ی ۷ تعیین می‌شود.

$$(۷) \quad P_i^{j,t} = \frac{U_i^{j,t}}{\sum_{j=1}^m U_i^{j,t}}$$

در نهایت، مقادیر احتمال به فرآیند مونت کارلو وارد می‌شوند. در این فرآیند، گونه‌های مختلف کاربری برای اشغال سلول i با یکدیگر و با یک عدد تصادفی به رقابت می‌پردازند. در این رقابت، گونه‌ای برنده خواهد شد که مقدار احتمال تبدیل آن از احتمال سایر گونه‌ها و عدد تصادفی تولید شده بزرگ‌تر باشد. فرآیند مونت کارلو با استفاده از رابطه‌ی ۸ فرموله می‌شود.

$$(۸) \quad P_i^{j=a,t} = \left(P_i^{j \in \{1, \dots, m\} - \{a\}, t}, P_i^{j \in \{1, \dots, m\} - \{a\}, t}, \dots, P_i^{j \in \{1, \dots, m\} - \{a\}, t}, \rho \right)$$

در رابطه‌ی ۸، ρ عددی تصادفی میان ۰ و ۱ است. خلاصه‌ی فرآیند مدل سلول‌های خودکار تلفیقی با منطق فازی و رهیافت مونت کارلو که در این پژوهش توسعه یافته، در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. فرآیند مدل‌سازی

پیشینه پژوهش

الاحمدی و همکاران (۲۰۰۹) در مقاله‌ی خود با به‌کارگیری روش سلول‌های خودکار و منطق فازی به مطالعه و بررسی پویایی‌های شهری پرداخته‌اند. در این پژوهش، وضعیت کاربری‌ها به دو گونه تقسیم بندی شده است. الخدر و همکاران (۲۰۰۸)، رشد شهری را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چند زمانه و به‌کارگیری سلول‌های خودکار مدل‌سازی نموده‌اند. در این تحقیق نیز تعداد گونه‌های مورد استفاده به سه دسته تقسیم شده است. هه و همکاران (۲۰۰۶a) به تحلیل پدیده‌ی گسترش شهری با استفاده از مدل سلول‌های خودکار پرداخته‌اند که در آن به رغم تعریف دو گونه‌ی کاربری، از مدل‌های آماری به عنوان مکمل استفاده شده و سلول‌های خودکار به شیوه‌ی روندی مورد استفاده قرار گرفته است. هه و همکاران در پژوهشی دیگر (۲۰۰۶b) با ترکیب مدل سیستم‌های پویا و سلول‌های خودکار، سناریوهای مختلف گسترش شهری را مدل‌سازی نموده‌اند. جدول ۱- الف و ب، روش‌ها و مدل‌های بررسی شده در مطالعات مشابه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- الف. روش‌ها و مدل‌های بررسی شده در مطالعات مشابه

تعداد کاربری	روش تلفیقی		گونه‌ی مدل					پژوهشگر		
	سایر	پویایی سیستم	انتکالی	فازی	عصبی	آماری	نظریه مینا		هجاری	روندی
۲						*			*	(هه و همکاران، ۲۰۰۶a)
۲	*								*	(هه و همکاران، ۲۰۰۶b)
۲			*						*	(زنرت و وو، ۲۰۰۱)
۲						*	*		*	(سویی و ژانگ، ۲۰۰۱)
۲				*						(الاحمدی و همکاران، ۲۰۰۹)
۳				*						(الخدر و همکاران، ۲۰۰۸)
۵				*				*		(وو، ۱۹۹۸b)

جدول ۱- ب. روش‌ها و مدل‌های بررسی شده در مطالعات مشابه

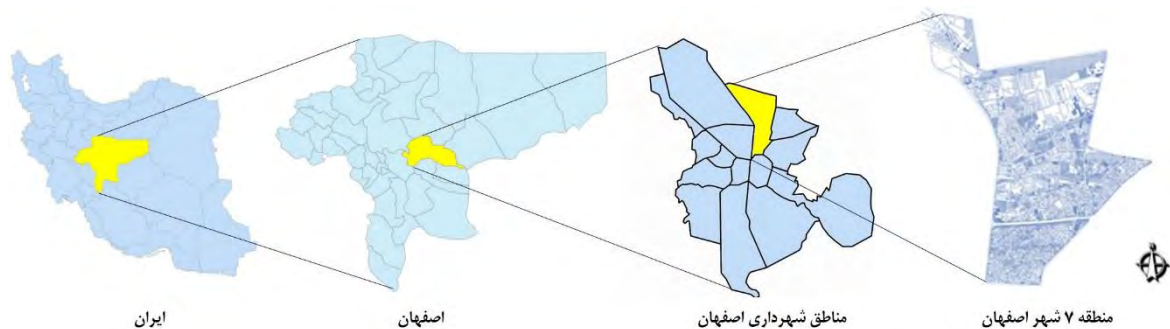
۵		*	(یوزر، ۲۰۰۴)
۵	*	*	(وو، ۱۹۹۸)
۲		*	(کلارک و گیدوس، ۱۹۹۸)
۶		*	(وایت و همکاران، ۱۹۹۷)
۱۶		*	(وایت و انگلن، ۲۰۰۰)
۲		*	(وارد و همکاران، ۲۰۰۰)
۲	*	*	(یه و لی، ۲۰۰۳)
۵	*	*	(وو، ۱۹۹۸)
۲	*	*	(لی و یه، ۲۰۰۱)
۲	*	*	(لی و یه، ۲۰۰۰)
۲	*	*	(محمدی و همکاران، ۱۳۹۲)
۲	*	*	(علی‌محمدی و همکاران، ۱۳۸۹)
۲	*	*	(فیروزآبادی و همکاران، ۱۳۸۸)
۲	*	*	(کامیاب و همکاران، ۱۳۹۰)
۲	*	*	(داداش‌پور و جهانزاد، ۱۳۹۴)
	*	*	(کیانی، ۱۳۸۳)

روش انجام پژوهش

روش تحقیق حاضر توصیفی-تحلیلی بوده و با استفاده از تلفیق رهیافت مونت کارلو، تدارک تعداد بالاتر انواع کاربری‌ها، تعریف قوانین انتقال جامع‌تر و استفاده از عوامل و شاخص‌های کامل‌تر در فرایند تغییر کاربری‌ها به شبیه‌سازی تغییرات کاربری زمین در بافت‌های شهری منطقه ۷ شهر اصفهان پرداخته است. در همین راستا ابتدا چارچوب مدل سلول‌های خودکار تلفیقی با منطق فازی و رهیافت مونت کارلو تشریح گردید و پس از تنظیم پارامترهای اولیه، این مدل برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی در منطقه هفت شهر اصفهان در دو سناریوی توسعه درونی و پیرامونی و در دو دوره زمانی ۱۳۹۰-۱۴۰۰ و ۱۴۰۰-۱۴۱۰ به کار گرفته شد. در نهایت، جهت مقایسه مدل توسعه یافته با مدل‌های سلول‌های خودکار تلفیق شده با منطق فازی و سلول‌های خودکار سنتی، سه شاخص سازگاری، فشردگی و تناسب زمین مورد استفاده قرار گرفت.

محدوده مورد مطالعه

منطقه ۷ اصفهان در اثر افزایش جمعیت و مهاجرت، تخصیص کاربری‌های بدون برنامه و خودرو و فقدان خدمات مورد نیاز و ضروری، طی سه دهه‌ی گذشته به شدت در معرض گسترش قرار گرفته است (Shahr-O-Khaneh, 2005: 78). این منطقه دارای پتانسیل-های قوی جذب جمعیت است، به گونه‌ای که حاصل آن افزایش رشد کالبدی و تغییرات کاربری اراضی می‌باشد. این منطقه از اصفهان در قسمت‌های شمالی، فاقد محدودیت گسترش بوده و با توجه به رشد جمعیت در آینده، امکان تغییر در بخش‌های شمالی وجود خواهد داشت. با توجه به ویژگی‌های ارائه شده در این بخش، منطقه‌ی ۷ شهر اصفهان به عنوان مورد مطالعه انتخاب شده است (شکل ۷).



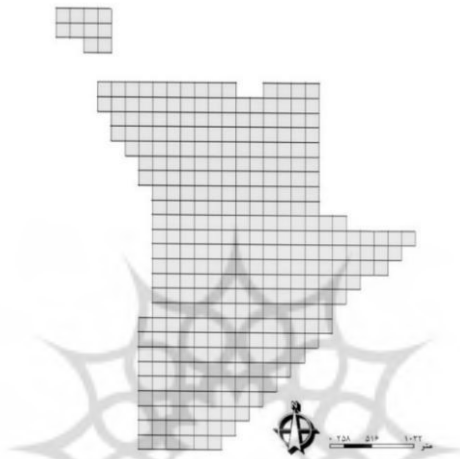
شکل ۷. محدوده مورد مطالعه

یافته‌ها

در این قسمت، مدل ارائه شده در بخش روش انجام پژوهش پیاده‌سازی شده و نتایج مرتبط ارائه می‌شود. در این گام، ابتدا پارامترهای مورد استفاده در مدل تشریح و پس از آن خروجی‌های مرتبط نمایش داده می‌شود.

تعریف شبکه، گونه‌های کاربری و همسایگی

نوع شبکه مربعی بوده و تعداد سلول‌های آن برابر با ۳۴۰ می‌باشد. شکل ۸، شبکه تعیین شده را نشان می‌دهد. کاربری‌های تعریف شده گونه‌های مسکونی، بهداشتی، آموزشی، فرهنگی، ورزشی و فضای سبز بوده و همسایگی، به صورت همسایگی مور با اندازه ۳ در ۳ در نظر گرفته شده است.



شکل ۸. شبکه مورد استفاده در مدل

طراحی سیستم استنتاج فازی

سیستم استنتاج فازی طراحی شده از نوع ممدانی^۵ بوده که در آن، قسمت اول یا مقدم و قسمت دوم یا نتیجه‌ی قوانین فازی هر دو دارای ماهیت و قواعد فازی هستند. توابع عضویت از شکل ناقوسی سه سطحی پیروی می‌کنند. روش فازی زدایی به صورت مرکز جرم تعریف شده و تعداد قوانین برای هر کاربری ۲۷ مورد و تعداد کل قوانین تعیین شده برابر ۱۶۲ مورد است. وزن ترکیبی برای قوانین نیز برابر با واحد تعیین شده است. لازم به ذکر است که قوانین انتقال بر اساس مطالعه روندهای حاکم بر منطقه، دوره‌های زمانی مختلف و همچنین نظرات کارشناسی به دست می‌آید. جدول ۲، نمونه‌ای از قوانین تعریف شده برای کاربری مسکونی را نشان می‌دهد.

جدول ۲. قوانین فازی تعریف شده برای کاربری مسکونی

احتمال تغییر	عوامل اثرگذار بر تغییر کاربری زمین				
	دسترسی	تناسب زمین	قیمت زمین	آن‌گاه	
متوسط	بالا	و	بالا	و	متوسط
متوسط	بالا	و	متوسط	و	متوسط
بالا	بالا	و	کم	و	بالا
⋮	⋮	و	⋮	و	⋮

تعیین دوره و سناریوهای شبیه‌سازی

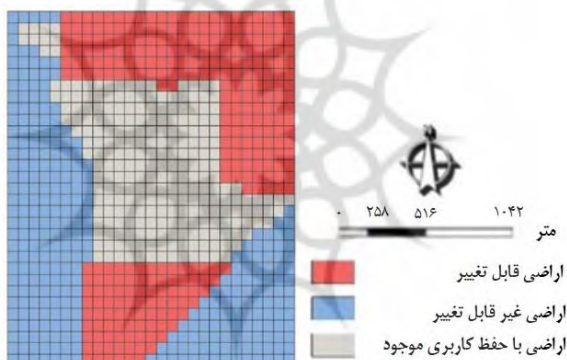
دوره‌های در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی دو دوره و طول هر یک ۱۰ سال است. با توجه به قرار گیری سال ۱۳۹۰ به عنوان سال پایه، دوره‌های شبیه‌سازی، ۱۳۹۰-۱۴۰۰ و ۱۴۰۰-۱۴۱۰ خواهد بود. به منظور تعیین مقادیر تغییرات کاربری اراضی، با استفاده از سرانه‌های تعیین شده برای هر گونه‌ی کاربری در طرح تفصیلی و پیش‌بینی جمعیت در سال‌های افق شبیه‌سازی، مقدار تغییرات به تفکیک کاربری‌ها مطابق با جدول ۳ تعیین شده است. با توجه به مساحت محدوده‌ی قابل تغییر (در حدود ۱۷۱۷ هکتار) و تعداد تعیین شده برای سلول‌های تخصیص (۲۵۸ سلول)، مساحت هر واحد تخصیص برابر با ۶/۶۵ هکتار محاسبه شده است. تعداد سلول‌های تخصیص برای گونه‌های

کاربری بر اساس تقسیم مساحت به مساحت سلول تخصیص تعیین شده و از آن‌جا که تعداد سلول‌های تخصیص تنها می‌تواند مقادیر طبیعی را اختیار نماید، مقادیر سلول‌های تخصیص رو به بالا گرد شده است.

جدول ۳. تغییرات کاربری در هر دوره‌ی شبیه‌سازی

کاربری	دوره اول شبیه‌سازی ($t1 = 1400$)		دوره دوم شبیه‌سازی ($t2 = 1410$)		مجموع
	تعداد سلول	تعداد سلول	تعداد سلول	تعداد سلول	
مسکونی	۵۰	۵۸	۱۰۸		
بهداشتی	۱	۱	۲		
آموزشی	۲	۴	۶		
فرهنگی	۱	۱	۲		
ورزشی	۴	۳	۷		
فضای سبز	۲۱	۲۱	۴۲		

سناریوهای شبیه‌سازی، توسعه‌ی درونی و پیرامونی است. در سناریوی اول، تغییرات کاربری زمین ابتدا در محدوده‌های مجاز برای تغییر در درون بافت که از پاکسازی اراضی واقع در محدوده‌ی بافت فرسوده حاصل می‌شود، صورت می‌گیرد. در صورت کم‌تر بودن اراضی قابل توسعه از میزان نیاز به تبدیل در دوره‌ی شبیه‌سازی، استفاده از اراضی پیرامونی امکان‌پذیر است. در سناریوی دوم، تغییرات کاربری زمین در محدوده‌های مجاز برای تغییر واقع در پیرامون بافت صورت می‌گیرد. شکل ۹، محدوده‌ی قابل تغییر را نشان می‌دهد.



شکل ۹. محدوده‌ی قابل تغییر

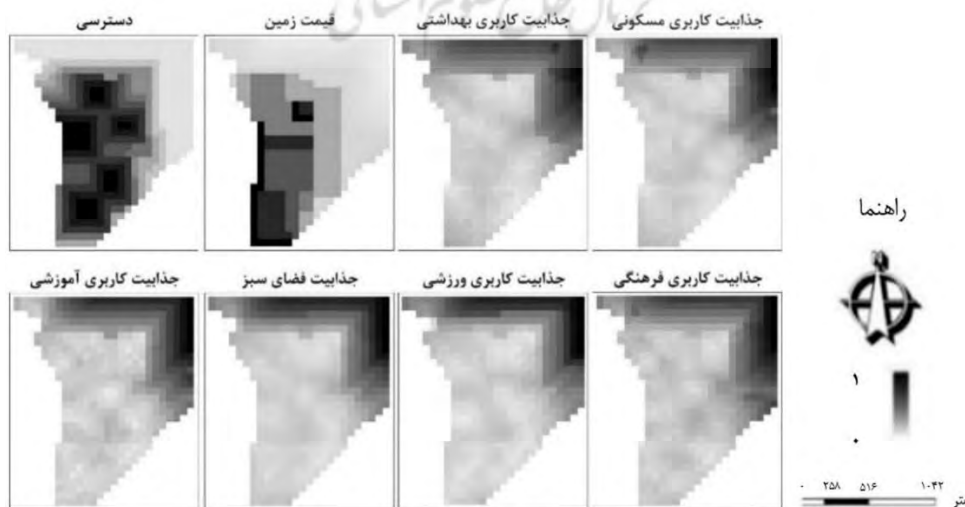
تعریف عوامل اثرگذار بر تغییرات کاربری زمین

تاکنون عوامل مختلفی به منظور شبیه‌سازی تغییرات کاربری زمین مورد استفاده قرار گرفته است. از آن‌جا که دخیل نمودن پارامترهای متعدد در فرآیند شبیه‌سازی نه تنها منجر به افزایش پیچیدگی مسئله شده بلکه بهبود نتایج را نیز در بر نداشته (Benenson & Torrens, 2004: 49) و سبب انحراف خروجی‌های مدل می‌گردد (Waddell, 2001: 5)، در این پژوهش و مطابق با تحقیق انجام شده توسط حسینعلی و همکاران (۱۳۹۱)، سه عامل: دسترسی، جذابیت و قیمت زمین، که خود برآیند چندین زیر معیار هستند، به عنوان عوامل اصلی اثرگذار بر تغییرات کاربری اراضی در نظر گرفته شده‌اند. نقشه‌ی قیمت زمین با استفاده از برداشت‌های میدانی تهیه شده است. برای تولید نقشه‌ی جذابیت، مطابق با ویژگی‌های حاکم بر محدوده و با استفاده از نظرات کارشناسی، زیر معیارهای نشان داده شده در شکل ۱۰ برای کاربری‌های انتخابی، انتخاب شده و نقشه‌ی جذابیت به تفکیک کاربری‌ها و با استفاده از جمع وزنی تولید شده است.



شکل ۱۰. عوامل تدوین شده برای تولید نقشه‌ی جذابیت تغییر کاربری‌ها

به منظور تولید نقشه‌ی عامل دسترسی، پس از شناسایی مراکز خدماتی و با استفاده از شبکه معابر موجود در بافت، فاصله زمانی هر سلول با توجه به مسافت و سرعت رفت‌وآمد در هر معبر نسبت به مراکز خدماتی محاسبه و کم‌ترین آن به عنوان مقدار دسترسی سلول‌ها تعیین شده است (شکل ۱۱).

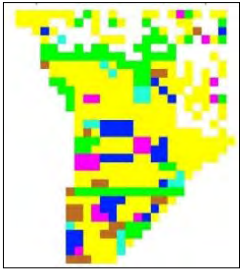
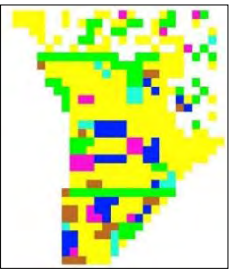

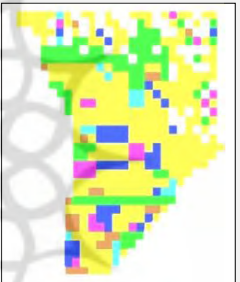
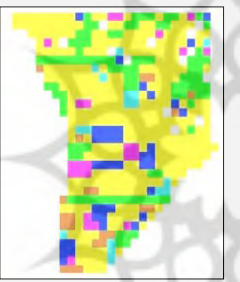
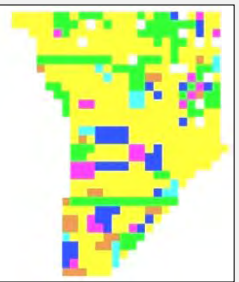
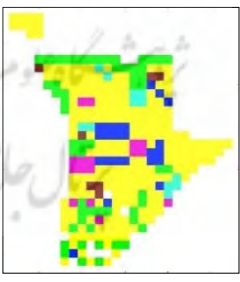
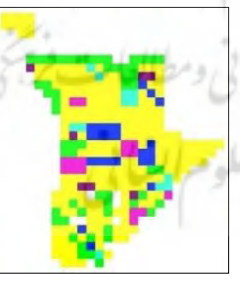
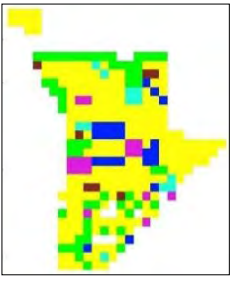
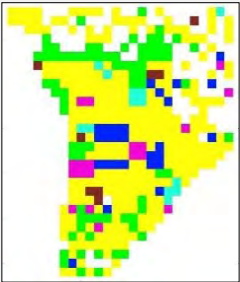
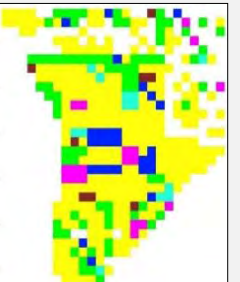



شکل ۱۱. نقشه عوامل اثر گذار بر تغییر کاربری زمین تولید شده در نرم افزار متلب (مقادیر استاندارد شده)

خروجی‌های مدل

مبتنی بر پارامترهای تعریف شده در بخش‌های قبل، شبیه‌سازی تغییرات کاربری زمین در محدوده‌ی مورد مطالعه و بر اساس مدل‌های معرفی شده صورت گرفت. جدول ۴، نتایج شبیه‌سازی را با استفاده از مدل پیشنهادی و دو مدل دیگر نشان می‌دهد.

جدول ۴. نتایج حاصل از مدل‌های توسعه یافته

سناریوهای شبیه‌سازی	دوره	مدل سلول‌های خودکار ساده (ستتی)	مدل سلول‌های خودکار تلفیق‌شده با منطق فازی	مدل سلول‌های خودکار تلفیق‌شده با منطق فازی و رهیافت مونت کارلو
سناریو توسعه پیراوانی	دوره اول			
	دوره دوم			
سناریو توسعه درونی	دوره اول			
	دوره دوم			

برای مقایسه‌ی نتایج این سه مدل، سه شاخص فشردگی، سازگاری و تناسب اراضی به ترتیب از طریق روابط ۹، ۱۰ و ۱۱ محاسبه می‌شود. که در آن n تعداد سلول‌های شبیه‌سازی، MS سلول‌های واقع در همسایگی مور سلول i ، Y_j متغیر باینری با مقادیر یک در صورتی که کاربری سلول j با کاربری سلول مرکزی i مشابه باشد و صفر در صورتی که کاربری سلول j با کاربری سلول مرکزی i مشابه نباشد، CV_{ij} مقدار سازگاری کاربری سلول j واقع در همسایگی مور سلول مرکزی i ، و SV_i مقدار تناسب زمین با کاربری قرار گرفته در سلول i است. مقادیر این شاخص‌ها به طور جداگانه برای هر نقشه اندازه‌گیری و از آن‌جا که جهت تاثیر هر یک از این شاخص‌ها مثبت می‌باشد (مقدار بالاتر، بهتر است) با استفاده از رابطه‌ی ۱۲ مقادیر استاندارد شده‌ی این شاخص‌ها نسبت به بهترین مقدار محاسبه شده است. جدول ۵ نتایج این قسمت را نشان می‌دهد.

$$(۹) \quad Compactness = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in MS} Y_j$$

$$(۱۰) \quad Compatibility = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in MS} CV_{ij}$$

$$(۱۱) \quad Suitability = \sum_{i=1}^n SV_i$$

$$(۱۲) \quad Standard_Value = \frac{V}{V_{max}}$$

همانگونه که مقادیر محاسبه شده در جدول ۵ نشان می‌دهد، در مدل سلول‌های خودکار ساده، مقدار شاخص‌های سازگاری و فشردگی در سناریوی اول روند کاهشی و در سناریوی دوم روند افزایشی، و مقدار شاخص تناسب در سناریوی اول روند افزایشی و در سناریوی دوم روندی کاهشی داشته است. در مدل سلول‌های خودکار فازی تلفیق شده با منطق فازی، شاخص‌های فشردگی و سازگاری در سناریوی اول و دوم از روندی کاهشی و شاخص تناسب در سناریوی اول و دوم از روندی افزایشی تبعیت کرده‌اند. در مدل سلول‌های خودکار تلفیق شده با منطق فازی و رهیافت مونت کارلو، شاخص تناسب اراضی در سناریوی اول و شاخص سازگاری در سناریوی دوم روندی کاهشی داشته و شاخص تناسب اراضی در سناریوی دوم از روندی افزایشی تبعیت کرده است. به علاوه، نتایج این محاسبات نشان داد که در آزمایش‌های انجام شده، مدل سلول‌های خودکار تلفیقی با منطق فازی و رهیافت مونت کارلو در نه مورد از دوازده مورد اشاره شده در جدول ۵ (سطرهای این جدول که مقادیر برابر با یک در آن نشان‌دهنده‌ی بهترین مقدار است)، مدل سلول‌های خودکار تلفیقی با منطق فازی تنها در یک مورد و مدل سلول‌های خودکار ساده در دو مورد از دوازده مقدار محاسبه شده، بالاترین مقدار را برای شاخص‌های فشردگی، سازگاری و تناسب به خود اختصاص داده‌اند. به بیان دیگر، مدل سلول‌های خودکار تلفیقی با منطق فازی و رهیافت مونت کارلو از عملکرد مناسب‌تری برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی در دو سناریوی توسعه‌ی پیرامونی و درونی نسبت به دو مدل دیگر برخوردار است. به علاوه، مقدار شاخص‌های محاسبه شده برای مدل سلول‌های خودکار فازی در هفت مورد مقادیر بالاتری را نسبت به مدل سلول‌های خودکار ساده ایجاد نموده است.

جدول ۵. مقادیر شاخص‌های محاسبه شده برای ارزیابی خروجی مدل‌ها (مقادیر استاندارد شده نسبت به بهترین مقدار)

سناریوهای شبیه‌سازی	دوره	شاخص	مدل سلول‌های خودکار ساده (ستتی)	مدل سلول‌های خودکار تلفیق‌شده با منطق فازی	مدل سلول‌های خودکار تلفیق‌شده با منطق فازی و رهیافت مونت کارلو
سناریو توسعه پیرامونی	دوره اول	سازگاری	۰/۷۵	۰/۵۰	۱
		فشرده‌گی	۰/۷۲	۰/۶۰	۱
		تناسب	۰/۵۴	۰/۶۵	۱
	دوره دوم	سازگاری	۰/۴۵	۰/۶۳	۱
		فشرده‌گی	۰/۷۰	۰/۵۵	۱
		تناسب	۰/۶۱	۱	۰/۸۰
سناریو توسعه درونی	دوره اول	سازگاری	۰/۶۹	۰/۸۳	۱
		فشرده‌گی	۰/۳۱	۰/۴۸	۱
		تناسب	۱	۰/۵۷	۰/۷۰
	دوره دوم	سازگاری	۱	۰/۴۳	۰/۶۸
		فشرده‌گی	۰/۳۸	۰/۷۷	۱
		تناسب	۰/۵۳	۰/۶۰	۱

بحث و نتیجه‌گیری

شهر به عنوان سیستمی پیچیده، غیرقطعی و پویا به طور مداوم در حال تغییر و تحول است. کاربری زمین نیز به عنوان یکی از زیرسیستم‌های اصلی شهری که تبلور فضایی فعالیت‌ها و ویژگی‌های اقتصادی-اجتماعی می‌باشد، از این قاعده مستثنی نبوده و در طول زمان متحول می‌شود. از آن‌جا که تغییرات این زیر سیستم با مجموعه‌ی بزرگی از داده‌ها و متغیرها سر و کار دارد، تحلیل و پیش‌بینی آن نیازمند بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته مدل‌سازی و محاسباتی است. به همین دلیل تاکنون تلاش‌های گوناگونی در ارتباط با مدل‌سازی تغییرات کاربری زمین صورت گرفته است. با توجه به عدم قطعیت موجود در سیستم‌های شهری و همچنین رقابت کاربری‌ها با یکدیگر برای اشغال زمین، لازم است روشی مورد استفاده قرار گیرد که هم عدم قطعیت و هم فرآیند رقابت کاربری‌ها در فرآیند مدل‌سازی را بازنمایی نماید. از آن‌جا که تاکنون در ادبیات موضوع، روشی جامع که این موارد را در کنار یکدیگر و برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی به کار گیرد، معرفی نشده است، پرسش اصلی و به تبع آن هدف تحقیق بر توسعه‌ی روشی نوین برای مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی شهری تمرکز یافته است. به همین علت در پژوهش حاضر، روشی نوین بر پایه‌ی مدل سلول‌های خودکار و به طور تلفیقی با منطق فازی و رهیافت مونت کارلو توسعه یافته است. این مدل به طور عملیاتی به منظور شبیه‌سازی فرآیند تغییرات کاربری زمین در منطقه هفت شهر اصفهان و برای شبیه‌سازی دو سناریوی توسعه‌ی درونی و پیرامونی در دو دوره مورد استفاده قرار گرفته است.

علاوه بر مدل سلول‌های خودکار تلفیقی با منطق فازی و رهیافت مونت کارلو، دو مدل: سلول‌های خودکار تلفیقی با منطق فازی و سلول‌های خودکار ساده بر روی محدوده‌ی مورد مطالعه پیاده‌سازی شده تا زمینه‌ی ارزیابی مدل سلول‌های خودکار تلفیقی با منطق فازی و رهیافت مونت کارلو فراهم گردد. در نهایت، خروجی حاصل از این سه مدل بر اساس سه شاخص: فشرده‌گی، سازگاری و تناسب اراضی با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج بیانگر آن است که مدل سلول‌های خودکار تلفیقی با منطق فازی و رهیافت مونت کارلو خروجی رضایت‌بخشی نسبت به دو مدل دیگر برای حل مسئله‌ی تعریف شده در این پژوهش داشته و مدل سلول‌های خودکار تلفیق‌شده با منطق فازی، نتایج قابل قبول‌تری نسبت به مدل سلول‌های خودکار ساده، بر اساس سه شاخص ارزیابی در نظر گرفته شده، ایجاد نموده است. در مجموع، عملکرد مدل پیشنهادی در شاخص فشرده‌گی به طور متوسط و به ترتیب ۴۰ و ۴۷/۲ درصد از مدل سلول‌های خودکار تلفیقی با منطق فازی و مدل سلول‌های خودکار ساده بالاتر بوده و در شاخص‌های تناسب و سازگاری این مقادیر به ۱۷ و ۲۰/۵، و ۳۵/۲ و ۱۹/۷ درصد می‌رسد. به طور خلاصه، تعداد مواردی که مدل پیشنهادی موفق به تولید گزینه‌های قابل قبول‌تر در شاخص‌های سازگاری، تناسب و فشرده‌گی شده است، به ترتیب برابر با ۳ (۷۵ درصد)، ۲ (۵۰ درصد) و ۴ (تمامی موارد) می‌باشد. به طور کلی، خروجی‌های مدل سلول‌های خودکار تلفیقی با رهیافت

مونت کارلو و منطق فازی ۲۹/۱ درصد از مدل سلول‌های خودکار ساده و ۲۹/۷ درصد از مدل سلول‌های خودکار تلفیقی مناسب‌تر بوده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که علی‌رغم ماهیت پویا و پیچیده‌ی شهر، با کاربست مدل‌های پیچیده می‌توان پدیده‌های شهری را مدل‌سازی، شبیه‌سازی و پیش‌بینی نمود. هم‌چنین، مدل حاضر، مدلی با چارچوب منعطف و با رویکردی پایین به بالا است که از ماهیتی پویا بهره برده و قابلیت کاربرد به طور هنجارین و روندی را دارد. به عنوان نمونه، در صورت استخراج قوانین انتقال از مطالعه‌ی زمانی تحولات کاربری‌ها و آینده‌نگری میزان تبدیل زمین به گونه‌های مختلف، امکان تحلیل و پیش‌بینی تغییر کاربری‌ها در آینده، و در صورت تعریف قوانین انتقال از طریق اهداف و مبانی برنامه‌ریزی، امکان به‌کارگیری مدل در حوزه‌ی تدوین برنامه، فراهم می‌شود. به بیان دیگر، مدل پیشنهادی ارزیابی سناریوهای مختلف را امکان‌پذیر نموده و می‌تواند به عنوان سیستم پشتیبان برنامه‌ریزی در اختیار مدیران و تصمیم‌گیران شهری قرار گیرد. به علاوه، به‌کارگیری سیستم‌های فازی در محیط نرم‌افزار متلب، افزایش سرعت و سهولت تعریف قوانین انتقال برای گونه‌های مختلف کاربری که هم با معیارهای زمانی و کیفی و هم با معیارهای کمی سازگار هستند را به دنبال دارد. به صورتی که در پژوهش حاضر، بر خلاف مطالعات رایج که گونه‌های کاربری را به دو بخش اشغال شده و اشغال نشده تقسیم‌بندی می‌کنند، گونه‌های تعریف شده، شش طبقه را به خود اختصاص داده و تعداد قوانین انتقال به ۱۶۲ مورد می‌رسد. این خصوصیت، با کاربرد مدل سلول‌های خودکار در حوزه‌ی برنامه‌ریزی هماهنگی داشته و به سبب ناهمفزون بودن نسبت به مدل‌های رایج، نتایج را با سطح تفکیک‌پذیری بالاتری نشان می‌دهد.

راهکارها

با توجه به یافته‌های پژوهش، راهکارهای زیر پیشنهاد می‌شود:

- ✓ پیگیری سناریوی توسعه درونی محدوده‌ی مورد مطالعه با توجه به الگوی توسعه‌ی فضایی حاصل از مدل پیشنهادی؛
- ✓ تدوین سیاست‌های مدیریت و کنترل رشد محدوده‌ی مورد مطالعه متناسب با شکل و نحوه‌ی تغییرات فعالیت‌های شهری در بازه‌های زمانی ذکر شده؛
- ✓ برنامه‌ریزی در جهت ارتقای شاخص سازگاری کاربری‌های محدوده‌ی مورد مطالعه در فرایند توسعه با توجه به پراکنش کاربری‌های ارائه شده توسط مدل در دو دوره‌ی زمانی؛
- ✓ تهیه‌ی برنامه‌ی هدایت و کنترل استفاده از اراضی با عنایت به نحوه‌ی توزیع کاربری‌ها در محدوده در راستای بهبود تناسب فعالیت‌ها با بستر استقرار.

منابع

۱. حسین علی، فرهاد؛ آل شیخ، علی اصغر و نوریان، فرشاد (۱۳۹۱)، توسعه‌ی مدلی عامل-مبنا برای شبیه‌سازی گسترش کاربری اراضی شهری (مطالعه موردی: قزوین)، مطالعات و پژوهش‌های شهری و منطقه‌ای، شماره ۱۴: ۱-۲۲.
۲. حسینی، مریم؛ کریمی، محمد؛ مسگری، محمدسعدی و حیدری، مهدی (۱۳۹۵)، طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم بیارچه مدل‌سازی تغییر کاربری اراضی شهری، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره ۴۰: ۶۹-۹۱.
۳. داداش‌پور، هاشم و جهانزاد، نریمان (۱۳۹۴)، شبیه‌سازی تغییرات آبی کاربری زمین بر اساس الگوی بهینه اکولوژیک در مجموعه شهری مشهد، پژوهش‌های جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، شماره ۳: ۳۴۳-۳۵۹.
۴. شهر و خانه (۱۳۸۳)، طرح تفصیلی مناطق ۷ و ۸ شهر اصفهان، شهرداری اصفهان.
۵. ضیاییان فیروزآبادی، پرویز؛ شکبیا، علیرضا؛ متکان، علی اکبر و صادقی، علی (۱۳۸۸)، سنجش از دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل سلول‌های خودکار به عنوان ابزاری برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی شهری (مطالعه موردی: شهر شهرکرد)، علوم محیطی، شماره ۱: ۱۴۸-۱۳۳.
۶. علی محمدی، عباس؛ متکان، علی اکبر و میرباقری، بابک (۱۳۸۹)، ارزیابی کارایی مدل سلول‌های خودکار در شبیه‌سازی گسترش اراضی شهری در حومه جنوب غرب تهران، برنامه‌ریزی و آمایش فضا، شماره ۲: ۸۲-۱۰۲.
۷. کامیاب، حمیدرضا؛ ماهینی، سلمان؛ حسینی، محسن و غلامعلی‌فرد، مهدی (۱۳۹۰)، کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در مدل‌سازی توسعه شهری (مطالعه موردی: شهر گرگان)، پژوهش‌های جغرافیای انسانی، شماره ۷۶: ۹۹-۱۱۳.
۸. کیانی، اکبر (۱۳۸۳)، شبیه‌سازی و ارزیابی کارایی سنسورهای هوشمند و اتوماتای سلولی در تحلیل کاربری فیزیکی ابر نقشه شهر (مطالعه موردی: کلانشهر تهران)، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.

۹. محمدی، محمود؛ مالکی‌پور، احسان و صاحبقرانی، علیرضا (۱۳۹۲)، مدل‌سازی گسترش شهر در اراضی پیرامونی با استفاده از سلول‌های خودکار و فرایند تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه مورد: منطقه ۷ اصفهان)، مطالعات و پژوهش‌های شهری و منطقه‌ای، شماره ۱۸: ۱۷۵-۱۹۲.
10. Al-Ahmadi, K; See, L; Heppenstall, A; Hogg, J, (2009), Calibration of a fuzzy cellular automata model of urban dynamics in Saudi Arabia, *Ecological Complexity*, 6(2): 80-101.
11. Al-Kheder, S; Wang, J; & Shan, J, (2008), Fuzzy inference guided cellular automata urban-growth modelling using multi-temporal satellite images, *International Journal of Geographical Information Science*, 22(11-12): 1271-1293.
12. Anas, A, (1994), METROSIM: A unified economic model of transportation and land-use, *Alex Anas & Associates, Williamsville, NY*.
13. Benenson, I., & Torrens, P. M. (2004). *Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena*: John Wiley & Sons.
14. Clarke, K. C; Gaydos, L. J, (1998), Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore, *International Journal of Geographical Information Science*, 12(7): 699-714.
15. Clarke, K. C; Hoppen, S; Gaydos, L, (1997), A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2): 247-261.
16. Deal, B; Kim, J; Hewings, G; Kim, Y, (2013), Complex Urban Systems Integration, *Advances in Spatial Sciences*.
17. Dietzel, C; Clarke, K, (2006), The effect of disaggregating land use categories in cellular automata during model calibration and forecasting, *Computers, environment and urban systems*, 30(1): 78-101.
18. He, C; Okada, N., Zhang, Q; Shi, P; Li, J, (2008a), Modelling dynamic urban expansion processes incorporating a potential model with cellular automata, *Landscape and Urban Planning*, 86(1): 79-91.
19. He, C; Okada, N; Zhang, Q; Shi, P; Zhang, J, (2006b), Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China. *Applied Geography*, 26(3): 323-345.
20. Huang, J; Wu, Y; Gao, T; Zhan, Y; Cui, W, (2015), An Integrated Approach based on Markov Chain and Cellular Automata to Simulation of Urban Land Use Changes, *Appl. Math*, 9(2):769-775.
21. Jenerette, G. D; Wu, J, (2001), Analysis and simulation of land-use change in the central Arizona-Phoenix region, USA, *Landscape ecology*, 16(7): 611-626.
22. Johnston, R; Shabazian, D; Gao, S, (2003), UPlan: a versatile urban growth model for transportation planning, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (1831): 202-209.
23. Kadkhodazade, H; Morovati, A, (2013), Supplier Selection by Fuzzy Inference System, *Production and Operation Management*, (7)2: 113-132.
24. Kumar, S, (2003), Modelling Land Use Land Cover Changes Using Cellular Automata in a Geo-Spatial Environment, *International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands*: 6-24.
25. Lee, S-T; Lei, T-C; Wu, C-W, (2009), *Artificial Neural Network and Cellular Automata As A Modeling Simulation for Night Market Spatial Development*, Paper presented at the 4th Design, Rigor and Relevance conference of International Association of Societies of Design Research.
26. Li, X; Yeh, A.G-O, (2000), Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS, *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2): 131-152.
27. Li, X; Yeh, A.G-O, (2001), Calibration of cellular automata by using neural networks for the simulation of complex urban systems, *Environment and Planning A*, 33(8): 1445-1462.

28. Munroe, D. K; York, A. M, (2003), Jobs, Houses, and Trees: Changing Regional Structure, Local Land Use Patterns, and Forest Cover in Southern Indiana, *Growth and Change*, 34(3): 299-320.
29. Santé, I; García, A. M; Miranda, D; Crecente, R, (2010), Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis, *Landscape and Urban Planning*, 96(2): 108-122.
30. Sui, D. Z; Zeng, H, (2001), Modeling the dynamics of landscape structure in Asia's emerging desakota regions: a case study in Shenzhen, *Landscape and Urban Planning*, 53(1): 37-52.
31. Verburg, P. H; Soepboer, W., Veldkamp, A; Limpiada, R; Espaldon, V; Mastura, S. S, (2002), Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model, *Environmental management*, 30(3): 391-405.
32. Waddell, P, (2001), Towards a Behavioral Integration of Land Use and Transportation Modeling.
33. Ward, D. P; Murray, A. T; Phinn, S. R, (2000), A stochastically constrained cellular model of urban growth, *Computers, Environment and Urban Systems*, 24(6): 539-558.
34. White, R; Engelen, G, (2000), High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems, *Computers, Environment and Urban Systems*, 24(5): 383-400.
35. White, R; Engelen, G; Uljee, I, (1997), The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(3): 323-343.
36. Wu, F, (1998a), An experiment on the generic polycentricity of urban growth in a cellular automatic city, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25(5): 731-752..
37. Wu, F, (1998b), Simulating urban encroachment on rural land with fuzzy-logic-controlled cellular automata in a geographical information system, *Journal of Environmental Management*, 53(4): 293-308.
38. Yeh, A.G-O; Li, X, (2003), Simulation of development alternatives using neural networks, cellular automata, and GIS for urban planning, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(9): 1043-1052.
39. Yüzer, M.A, (2004), Growth estimations in settlement planning using a land use cellular automata model (LUCAM), *European Planning Studies*, 12(4): 551-561.
40. Zadeh, L.A, (1965), Fuzzy sets, *Information and control*, 8(3): 338-353.

ترجمه منابع فارسی

1. Ali Mohammadi, A; Natkan, A.A; Mir Bagheri, B, (2011), Evaluation of Cellular Automaton Models in Urban Land Expansion in the Southwest Suburban Area of Tehran, *The Journal of Spatial Planning*, 2: 82-102.
2. Dadashpoor, H; Jahanzad, N, (2016), Simulation of Future Land Use Changes Based on an Ecological Optimal Pattern in Mashhad Metropolitan Area, *Geography and Urban Planning Research*, 3:343-359.
3. Hosseinali, F; Alesheikh, A. A; Nourian, F, (2012), Developing an Agent-Based Model to Simulate Urban Land-Use Expansion (Case Study: Qazvin), *Urban - Regional Studies and Research Journal*, 14: 1-22.
4. Hoseini, M; Karimi, M; SaadiMesgari, M; Heydary, M, (2016), Design and Implementation of Integrated System for Urban Land Use Change Modeling, *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 16(40) :69-91.
5. Kamyab, H; Mahiny, S; Hoseini, M; Gholamalifard, M, (2012), Using Neural Network for Urban Growth Modeling (Case Study: Gorgan City), *Human Geography Research Quarterly*, 76: 99-113.
6. Kiyani, A, (2005), Simulating and Evaluating the Application of the Smart Sensors and Cellular Automata in Analysis of the City Mega Maps. Doctoral Dissertation: Trabiati Modarres University.
7. Mohammadi, M; Malekipour, E; Sahebgharani, A, (2013), Modeling Urban Expansion in Peripheral Lands Through Cellular Automata (CA) and Analytic Hierarchical Process, Case Study of Isfahan's 7th Municipal District, *Urban - Regional Studies and Research Journal*, 5(18): 175-192.

8. Shar-o-Khaneh, (2015). Detailed Plan of Isfahan's 7th and 8th Districts, Municipality of Isfahan.
9. Zeaian Firouzabadi, P; Shakiba, A; Matkan, A.A; Sadeghi, A, (2010), 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, *Environmental Science*, 1: 133-148.

