



# سنجش از دور & GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران / سال ششم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۳  
Iranian Remote Sensing & GIS / Vol. 6, No. 2, Summer 2014

۳۷-۵۴

## توسعه خودکارهای سلولی بر مبنای نظریه فازی برای مدل سازی توسعه شهری

محمد رضا ملک\*<sup>۱</sup>، نازنین عبدالقادری بوکانی<sup>۲</sup>، محمد سعیدی مسگری<sup>۳</sup>

۱ و ۳. دانشیار، گروه سیستم های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
۲. کارشناس ارشد GIS، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱/۳۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۵/۱۶

### چکیده

در طول ۱۰ سال اخیر، خودکارهای سلولی به صورت گسترده ای در شبیه سازی پدیده های مکانی مورد توجه و استفاده قرار گرفته اند. با این حال، به دلیل ماهیت قطعی و توجه نکردن به عدم قطعیت در خودکارهای سلولی کلاسیک، محدودیت های گوناگونی برای شبیه سازی این گونه پدیده ها به وجود آمده است. در پژوهش حاضر، خودکارهای سلولی کلاسیک از طریق تلفیق آن با نظریه فازی معرفی شده اند. در این تحقیق، قوانین انتقال به صورت فازی بیان شده و بر مبنای آن مدل خودکارهای سلولی فازی ارائه شده است. مدل مذکور به منظور شبیه سازی فرایند توسعه شهری اصفهان در طول سال های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۹ به کار گرفته شده است.

کلیدواژه ها: خودکار سلولی، نظریه مجموعه فازی، توسعه شهری، ماتریس خطا.

\* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، خیابان ولی عصر (عج)، تقاطع میرداماد، دانشکده مهندسی نقشه برداری، گروه GIS، تلفن: ۸۸۸۷۶۲۱۲

## ۱- مقدمه

خروجی‌های باثبات می‌انجامد. این در حالی است که مدل‌های CA به‌کار گرفته‌شده در شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده مکانی برای شبیه‌سازی واقعی به داده‌های مکانی بسیار زیادی نیاز دارند که همین مسئله موجب تأثیرپذیری این‌گونه مدل‌ها از مجموعه خطای داده‌ها و نیز عدم قطعیت ناشی از ساختار مدل می‌شود. استفاده از سامانه اطلاعات مکانی در مدل‌های CA فرایندهای مکانی، داده‌ها و اطلاعات دقیق‌تری در مقایسه با سایر روش‌های سنتی به‌دست می‌دهد. خطای ناشی از منابع داده در طول فرایند شبیه‌سازی به‌دلیل اعمال تأثیرات همسایگی کاهش می‌یابد ( Yeh et al., 2006).

بسیاری از خطاهای مدل CA، فرایندهای مکانی ناشی از عدم قطعیت مدل به‌دلیل محدودیت دانش، پیچیدگی فرایند و محدودیت فناوری است. همانند سایر مدل‌های کامپیوتری، فرض‌عاری از خطا بودن داده‌های استفاده‌شده در مدل، تطبیق کامل آن را با واقعیت خدشه‌دار می‌کند. این خطا و عدم قطعیت، ناشی از چگونگی تعریف المان‌های اصلی CA است. بنابراین چگونگی بیان المان‌های CA نقش مهمی در مدل‌سازی واقعی‌تر فرایندهای مکانی دارد. در این زمینه، نسل جدیدی از مدل CA از طریق توسعه المان‌های اصلی آن با روش‌های دیگر به‌وجود آمده است. فضای سلولی در CA کلاسیک، شبکه‌ای منظم از سلول‌ها با قدرت تفکیک مکانی کوچک یا بزرگ است. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که به‌رغم سادگی محاسبات و انطباق مدل‌های CA کلاسیک با سامانه‌های اطلاعات مکانی، این مدل‌ها به ابعاد سلول‌های خودشان حساس‌اند، به‌طوری‌که ابعاد سلول‌ها بر نتایج مدل‌سازی تأثیر می‌گذارند ( Ménard et al., 2005; Kocabas et al., 2006; Jantz et al., 2005). روش‌های دیگری نیز در بیان شبکه سلولی

خودکاره‌های سلولی<sup>۱</sup> (CA) کلاسیک، سامانه پویای گسسته با فضای تقسیم‌شده به سلول‌های مکانی یکسان هستند که زمان نیز در آن، در بازه‌های گسسته در نظر گرفته شده است. در این سیستم هر سلول می‌تواند یک وضعیت از مجموعه متناهی وضعیت‌ها را داشته باشد. وضعیت هر سلول در گام زمانی بعدی براساس وضعیت خود سلول و سلول‌های همسایه‌اش در گام زمانی قبل و به‌وسیله قوانین محلی که قوانین انتقال نیز نامیده می‌شوند، تعیین می‌شود ( Wolfram, 1984; 1994; 2002; Benenson et al., 2004; Torren, 2000; Schiff, 2007).

براساس تعریف مذکور، خودکاره‌های سلولی، سیستمی دینامیک متشکل از المان‌هایی در مقیاس محلی و در تعامل با یکدیگرند که با تخصیص قوانین محلی، قابلیت مدل‌سازی وقایع پیچیده را دارند. خصوصیات بیان‌شده توانمندی خودکاره‌های سلولی در مدل‌سازی وقایع پیچیده مکانی را نشان می‌دهند. در دهه اخیر مدل‌های CA به‌صورت گسترده برای شبیه‌سازی وقایع مکانی گوناگون نظیر تغییرات پوشش زمین و کاربری اراضی ( Li et al., 2002; Ménard et al., 2003; Wu, 2002; Almeida et al., 2003; Almeida et al., 2008; Batty et al., 1999; شهری ( Dietzel et al., 2006; White et al., 2000b انتشار آتش ( Berjak and Hearne, 2002; Favier et al., 2008; Yassemi et al., 2004), رقابت اجزا ( Arii and Parrott, 2006; Chen et al., 2002; Matsinos et al., 2004; Rietkerk et al., 2002), جریان ترافیک ( Sun et al., 2001; Wahle et al., 2007), به‌کار گرفته شدند. با این حال، استفاده از مدل CA در شبیه‌سازی فرایندهای پیچیده مکانی توأم با خطا و عدم قطعیت‌های بسیار است. این امر به‌دلیل متفاوت بودن کاربرد کنونی آن با خودکاره‌های سلولی است که در الفرام<sup>۲</sup> تعریف شده است ( Yeh et al., 2006). مدل خودکاره‌های سلولی والفرام تعاریف قطعی و داده‌های ورودی بسیار محدودی دارد که به تولید

1. Cellular Automata  
2. Wolfram

توصیف سیستم‌های پیچیده واقعی - مانند توسعه شهری - می‌توان از قابلیت‌های استدلال تقریبی سود جست. این میزان ابهام و کلیت برای فهم انسان از سیستم‌های پیچیده کافی است. بر همین اساس، زاده در سال ۱۹۶۵ نظریه مجموعه‌های فازی را ارائه کرد (Zadeh, 1965). ویژگی اصلی نظریه سیستم‌های فازی، توانایی تقریب رفتارهای سیستم در جایی است که روابط ریاضی و توابع تحلیلی حضور ندارند (Timothy, 2004). سیستم‌های فازی پتانسیل بالایی در فهم سیستم‌های فاقد فرمول‌بندی تحلیلی - نظیر سیستم‌های پیچیده - دارند. بنابراین کاربرد نظریه فازی در مدل CA و در برخورد با عدم قطعیت موجود در فرایندهای مکانی، می‌تواند مدل‌سازی بهتری ارائه کند. و بدون اشاره به مبحث واسنجش، طرح استفاده از فازی را در CA پیشنهاد کرد (Wu, 1998b). در سالیان بعد این امکان به صورت عملی در شبیه‌سازی روند توسعه شهری در برخی مناطق به کار گرفته شد (Liu et al., 2009; Al-Ahmadi, 2008). در این تحقیقات هنوز مباحث کنترل فازی، تعیین توابع عضویت و واسنجش مدل با نقیصه و کمبود مواجه‌اند. علاوه بر کمبود یادشده، عدم ارزیابی و بررسی دقت نیز از کاستی‌های آنهاست.

هدف پژوهش حاضر، مدل‌سازی فرایندهای مکانی به وسیله مدل CA توسعه‌یافته با نظریه فازی است. برای این منظور، مدل خودکاره‌های سلولی فازی<sup>۱</sup> (FCA) پیشنهاد برای مدل‌سازی فرایند توسعه شهری اصفهان، با نام «مدل توسعه شهری خودکاره‌های سلولی فازی»<sup>۲</sup> (FCAUGM) به کار گرفته شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- داده و منطقه مورد مطالعه

در پژوهش حاضر به منظور جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های مربوط به متغیرهای مؤثر، از نرم‌افزار

نامنظم نظیر دیاگرام ورونوی (Flache et al., 2001; Semboloni, Shi et al., 2000)، مثلث‌بندی دلونی (Semboloni, Moreno, O'Sullivan, 2001) و مدل بردارمبنا (Moreno et al., 2006) به وجود آمده است. سلول‌های همسایه در CA کلاسیک فقط شامل سلول‌های مجاورند و تأثیر سایر سلول‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. این نگرش در کل فضای سلولی یکسان اعمال می‌شود. مطالعات مرتبط، تأثیر همسایگی در مدل‌های CA و حساسیت نتایج حاصل از مدل‌سازی را به آن بیان می‌کنند (Kocabas et al., 2006). بدین منظور روش‌های دیگری نظیر تکنیک جبر مکانی (Takeyama et al., 1997)، گراف‌های مسطح (O'Sullivan, 2001)، چندضلعی‌های ورونوی (Hu et al., 2004) و همسایگی دینامیکی (Moreno et al., 2008) برای بیان همسایگی به وجود آمده است.

یکی از اجزای بسیار مهم CA قوانین انتقال است، که چگونگی تعریف و بیان آن تأثیر بسیار زیادی بر ساختار مدل و خروجی‌های آن خواهد داشت (White et al., 2000b). قوانین انتقال در مدل‌های CA کلاسیک و بسیاری از مدل‌های توسعه‌یافته امروزی به صورت جبری و بر پایه روش‌های ریاضی کلاسیک بیان شده‌اند (Batty and Xie, 1994; Wu et al., 1998; Ward et al., 2000; White et al., 1997; Yeh et al., 2001; Li et al., 2002; 2000a). بیان جبری قوانین انتقال در جهت مدل‌سازی واقعی فرایندهای مکانی نیازمند داده‌های بسیار زیادی است. دسترسی به داده‌های دقیق، کافی و عاری از ابهام به دلیل گستردگی و حجم بالای عوامل مؤثر بر فرایندهای مکانی چندان ساده نیست. از سوی دیگر، بسیاری از این قوانین منشأ تجربی و درک انسانی دارند که بیان آنها با روابط قطعی ریاضی اگر ناممکن نباشد، بسیار دشوار است. بنابراین، بیان جبری قوانین انتقال مدل‌های CA نمی‌تواند در مدل‌سازی این گونه فرایندها مفید باشد. برای فائق آمدن بر ناتوانی حسابگری‌های رایج در بررسی این گونه پیچیدگی‌ها و بهبود مدل‌سازی و

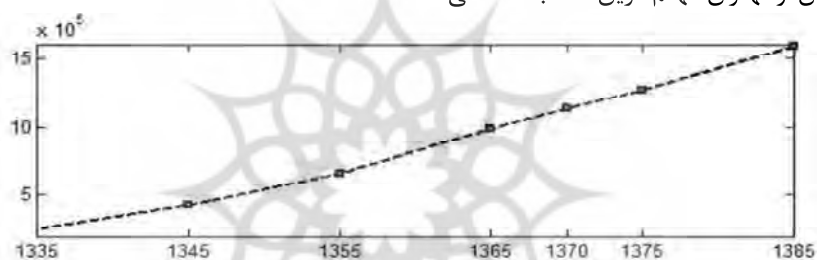
1. Fuzzy Cellular Automata

2. Fuzzy Cellular Automata Urban Growth Model

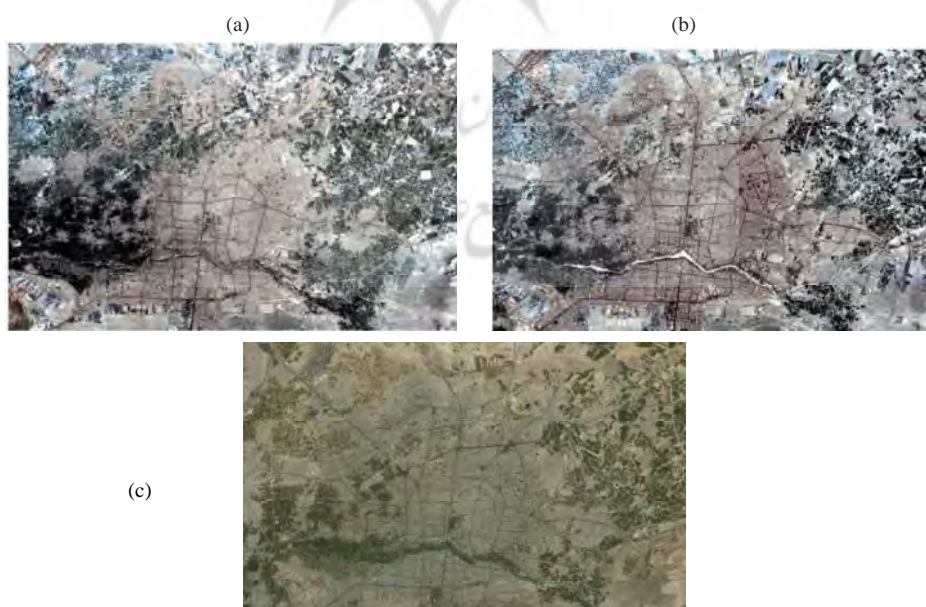
کشور به شمار می آید. صنعت، مهم ترین دلیل افزایش جمعیت و رشد شهرنشینی در اصفهان محسوب می شود. شکل ۱ روند افزایش جمعیت شهر را در طول سال های ۱۳۳۵-۱۳۸۵ نشان می دهد.

این روند روبه رشد، برنامه ریزی های شهری و عمرانی بسیاری را طلب می کند. بررسی روند توسعه شهری از طریق شبیه سازی آن می تواند نقش مهمی در آنالیز عوامل و مؤلفه های مختلف مؤثر بر فرایند توسعه شهری داشته باشد. افزون بر این، شبیه سازی می تواند امکان پیش بینی فرایند توسعه شهری را در سال های آینده فراهم کند. به منظور شبیه سازی فرایند توسعه شهری اصفهان، از تصاویر ماهواره ای مربوط به سال های ۱۹۹۰، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۹ استفاده شده است (شکل ۲).

ArcGis9.3 استفاده شد و کلاسه بندی تصاویر ماهواره ای شهر اصفهان با نرم افزار ENVI 4.3 انجام گرفت. شهر اصفهان با مختصات جغرافیایی "۳۲°۳۹'۵" شمالی و "۵۱°۴۰'۴۵" شرقی مرکز استان اصفهان است. این شهر بعد از شهرهای تهران و مشهد، سومین شهر بزرگ ایران به شمار می آید. اصفهان با ارتفاع متوسط ۱۵۸۰ متر از سطح دریا، در شرق سلسله جبال زاگرس واقع شده است. منطقه بزرگ اصفهان از قسمت شمالی و شرقی به کویر و از قسمت غربی و جنوبی به ارتفاعات زاگرس منتهی می شود. این شهر در دو طرف زاینده رود و روی دشتی نسبتاً صاف با شیب متوسط سه درصد واقع شده است. با گذشت سال ها، توسعه شهر به خاطر دسترسی بیشتر به آب و نیز آلودگی کمتر، متمایل به جنوب غربی شده است. این شهر پس از تهران مهم ترین قطب صنعتی



شکل ۱. جمعیت شهر اصفهان بین سال های ۱۳۳۵-۱۳۸۵

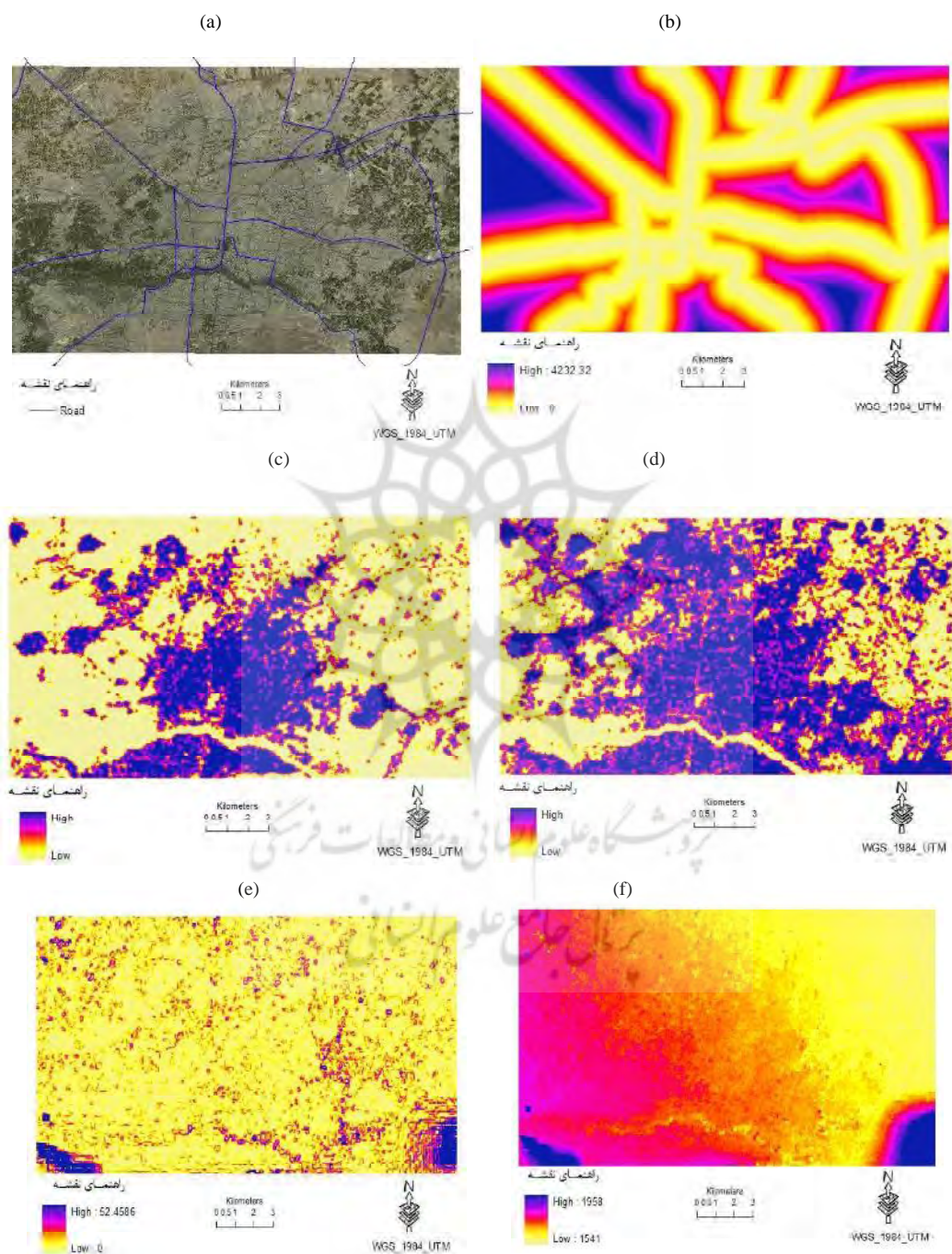


شکل ۲. تصاویر ماهواره ای از شهر اصفهان در سال: (a) ۱۹۹۰ (Landsat, 30)، (b) ۲۰۰۱ (Landsat, 30)، (c) 2009 (SPOT, 30)

### توسعه خودکارهای سلولی بر مبنای نظریه فازی برای مدل‌سازی توسعه شهری

(UD) سال ۱۹۹۰ و ۲۰۰۱، شیب S، ارتفاع از سطح دریا A و نواحی برنامه‌ریزی‌شده شهری و غیرشهری PPR (شکل ۳).

مجموعه‌ای از عناصر مؤثر بر فرایند توسعه، وارد مدل شده‌اند. مجموعه عناصر مؤثر شامل اینها هستند: دسترسی به آزادراه‌ها و بزرگراه‌ها AMJR، تراکم شهری



شکل ۳. مؤلفه‌های مکانی مؤثر بر توسعه شهری: (a) شبکه راه، (b) دسترسی به آزادراه‌ها و بزرگراه‌ها، (c) تراکم شهری سال ۱۹۹۰، (d) تراکم شهری سال ۲۰۰۱، (e) شیب، (f) ارتفاع از سطح دریا

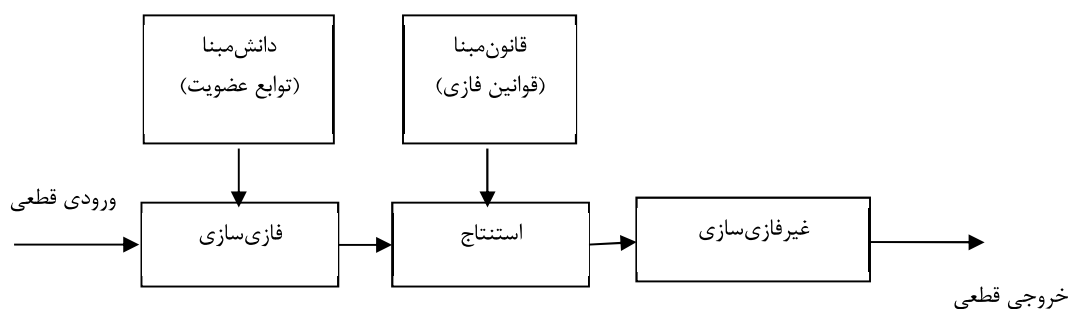
## ۲-۲- روش

قانون مبنا، قواعد به شکل اگر- آنگاه بر مبنای اطلاعات ورودی نادقیق، مبهم و مشوش جایگزین مدل سازی رایج می شود. مجموعه قوانین کنترل فازی، توصیف کننده راهبرد کنترل کننده عاملی هستند که از طریق آن الگوریتم کنترل کننده ای ایجاد می شود. منطق فازی در این الگوریتم، قوانین کنترل شهودی تعیین شده به دست عامل انسانی را به راهبرد کنترل خودکار تبدیل می کند. مدل منطق فازی ارائه شده از سه بخش فازی سازی، استنتاج و غیر فازی سازی تشکیل شده است (شکل ۴).

بخش نخست، فرایند فازی سازی است. در این مرحله، مقادیر ورودی قطعی به مقادیر فازی تبدیل می شوند. ورودی این مرحله شامل مقادیر عددی عناصر مؤثر بر فرایند در قالب لایه های اطلاعاتی است. در این بخش، هر عنصر به عنوان یک متغیر فازی در نظر گرفته می شود. هر متغیر فازی به جای مقادیر عددی شامل مجموعه ای از اصطلاحات زبانی است که همانند مجموعه های فازی عمل می کنند. در این مرحله، مقادیر عددی مؤلفه مؤثر از طریق توابع عضویت تعریف شده برای هر اصطلاح زبانی به مقادیر فازی تبدیل می شوند. مقادیر فازی بیان کننده میزان تعلق مقادیر عددی مربوط به یک عنصر به مجموعه های فازی، اصطلاحات زبانی را شکل می دهند.

به طور معمول، قوانین خودکار سلولی در قالب گزاره های اگر- آنگاه و بر اساس منطق کلاسیک بیان می شوند. این قوانین روابط منطقی میان عناصر تأثیرگذار بر فرایند مکانی مورد نظر را بیان می کنند. ابتدا وضعیت سلول و وضعیت همسایگان آن و سایر عناصر تأثیرگذار وارد قوانین مذکور می شوند. با اعمال این قوانین، خروجی مشخص کننده وضعیت هر سلول در مرحله زمانی بعد خواهد بود. این فرایند نظیر سیستم کنترلی مبتنی بر منطق کلاسیک عمل می کند. سیستم های کنترلی دارای سه مؤلفه اصلی ورودی، خروجی و کار گزار کنترل هستند. بیان قطعی قوانین انتقال خودکار سلولی، در شرایطی که شناخت کافی از عناصر تأثیرگذار و روابط میان شان وجود ندارد، نتایج مناسبی از مدل سازی فرایند به دست نخواهد داد. در این زمینه می توان از کاربرد نظریه فازی در بیان غیر قطعی قوانین انتقال استفاده کرد. به طور مشخص می توان از سیستم کنترل فازی به جای سیستم کنترل قطعی موجود در خودکار سلولی استفاده کرد.

کنترل منطق فازی به معنی استفاده از مجموعه فازی و منطق فازی در مبحث کنترل سیستم هاست. کنترل فازی به صورت گسترده ای در مسائل مربوط به سیستم های پیچیده به کار برده می شود. در این سیستم



شکل ۴. ساختار سیستم کنترل منطق فازی

مدل CA است. در مرحله بعد این ماتریس به نقشه وضعیت سلولی تبدیل می‌شود. به همین منظور آرایه‌های این ماتریس بر اساس قانون تعریف‌شده در مدل CA، به مجموعه وضعیت‌های تعریف‌شده تبدیل خواهند شد. در نهایت هر سلول، وضعیت جدید متناظر خود را دریافت می‌کند. در پایان این فرایند نقشه جدیدی از فرایند مکانی به نام نقشه شبیه‌سازی شده SM به دست می‌آید. بر اساس مراحل تکرار مورد نیاز و مشخص شده، SM تولید شده به همراه سایر داده‌ها به عنوان ورودی وارد مدل FL می‌شود و مراحل تکرار خواهند شد.

#### ۲-۴- واسنجش مدل

تعیین و آزمایش میزان انطباق مدل با واقعیت و همچنین کاهش و کنترل خطای مدل، دو بخش مهم در ساختار مدل‌سازی به شمار می‌آیند (Naylor et al., 1967). واسنجش، فرایند محاسبه و تعیین پارامترهایی است که باعث بیشترین انطباق مدل با واقعیت می‌شوند (Bell et al., 2000). به دلیل پیچیدگی الگوی رفتاری در خودکارهای سلولی از تکنیک‌های واسنجش خودکار به ندرت استفاده شده و کاربردهای آنها در ارزیابی دقت مدل شبیه‌سازی شده مشخص نشده است. از جمله می‌توان به کاربرد تکنیک الگوریتم ژنتیک در واسنجش مدل خودکار سلولی توسعه شهری اشاره کرد (Al-Ahmadi et al., 2008). با این حال، کاربردپذیری روش‌های واسنجش غیر خودکار در واسنجش یا کالیبره کردن مدل CA مورد استفاده در مدل‌سازی فرایندهای مکانی اثبات شده و همچنان به عنوان روش اصلی واسنجش باقی مانده است. به منظور آزمون درجه انطباق مقادیر شبیه‌سازی شده با واقعیت از برخی روش‌ها و تکنیک‌های آماری نظیر آنالیز مؤلفه‌های اصلی، آنالیز فاکتور و وایزای استفاده

بخش دوم، پردازش اطلاعات بر اساس مجموعه‌ای از قوانین فازی است و موتور استنتاج فازی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. قوانین استنتاج فازی مجموعه‌ای از گزاره‌های ساده و منطقی فازی در چارچوب اگر-آنگاه و متشکل از متغیرهای زبانی هستند. خروجی‌های فازی مرحله قبل، وارد قوانین فازی از پیش تعریف‌شده می‌شوند. پس از پردازش خودکار قوانین، خروجی هر قانون تابع فازی خواهد بود. در نهایت خروجی حاصل از تمام قوانین بر اساس روش اجتماع تعریف‌شده‌ای پردازش می‌شود. حاصل این پردازش، تابع فازی است که ورودی مرحله بعد خواهد بود.

بخش سوم و نهایی، فرایند غیرفازی‌سازی است که در آن نتایج حاصل از سیستم به مقادیر غیرفازی تبدیل می‌شوند. در فرایندهای فازی از یک سو نحوه محاسبه، استدلال و مدل‌سازی به وسیله اطلاعات فازی اهمیت دارد و از سوی دیگر کاربرد مقادیر فازی به دست آمده مطرح است. به رغم فازی بودن بخش عمده‌ای از اطلاعات پیرامون ما، بیشتر فعالیت‌ها و تصمیمات اجرا شده به صورت قطعی و در حالت دودویی انجام می‌شوند. بنابراین در بیشتر کاربردها به غیرفازی‌سازی نتایج فازی حاصل از آنالیز سیستم‌های فازی نیاز است. در این مرحله بر اساس توابع عضویت فازی، نتایج حاصل از سیستم به مقادیر غیرفازی تبدیل می‌شوند.

#### ۲-۳- عملکرد مدل CA و مدل منطق فازی

پس از انتخاب مؤلفه‌های اصلی تشکیل دهنده مدل CA و نیز مدل منطق فازی، اطلاعات آماده شده وارد موتور فازی می‌شوند. در طول مراحل بیان شده مدل منطق فازی، قوانین فازی تشکیل شده از عناصر مؤثر بر لایه‌های اطلاعاتی و مقادیرشان اعمال می‌شوند. خروجی مدل منطق فازی، ماتریسی به نام ماتریس امکان توسعه (DP) را تشکیل می‌دهد. این ماتریس هم‌ارز نقشه اولیه وضعیت سلولی است، با این تفاوت که آرایه‌های آن، مقادیر بازه [0,1] حاصل از استنتاج فازی است. هر آرایه متناظر با یک سلول از شبکه سلولی

1. Fuzzy Inference Engine

شده است (Naylor et al., 1967).

در سال‌های اخیر، روش‌های فرایندهای مرتبه‌ای تحلیلی و ارزیابی چندمعیاره به‌منظور ارزیابی پارامترهای مدل‌های CA به‌کار گرفته شده است (Wu, 1998a). در پژوهش حاضر از روش پیش‌بینی بازنگرانه<sup>۱</sup> که در سال‌های اخیر بسیار به آن توجه شده، استفاده شده است (Liu, 2009; Al-Ahmadi, 2008; 2009). اساس این روش، پیش‌بینی داده‌های موجود در بازه‌های زمانی گذشته و حال است. تعیین قوانین کنترل‌کننده فرایندهای مکانی به‌دلیل تأثیر عناصر متعدد در آنها، فرایند ساده‌ای نخواهد بود. از این‌رو لازم است که در آغاز روند مدل‌سازی، قوانین ساده‌ای تعریف و نتایج مدل ارزیابی شوند و این روند تا مرحله حصول بهترین نتایج ادامه یابد. با توضیحات ارائه‌شده، اصولی که در پی می‌آیند در طول فرایند واسنجش به‌کار می‌روند.

۱. شروع در ساده‌ترین حالت، استفاده از ساده‌ترین قوانین ممکن و اعمال این فرض که قوانین به‌طور یکسان اعمال می‌شوند؛
۲. تغییر پارامترهای قوانین در هر مرحله؛
۳. تغییر تعادل بین قوانین؛
۴. بالابردن پیچیدگی قوانین؛ و
۵. معرفی قوانین جدید در صورت لزوم.

این اصول پی‌درپی و مرحله‌به‌مرحله انجام می‌شوند و مرحله جدید فقط زمانی آغاز می‌شود که مرحله قبل برای مدل‌سازی ناقص باشد. آنچه در این روش اهمیت دارد، انجام واسنجش منظم است. نتایج مدل از طریق مقایسه آنها با روند واقعی و به دو روش واسنجش بصری و واسنجش آماری ارزیابی خواهد شد. واسنجش بصری، مقایسه بین نقشه واقعی و نقشه شبیه‌سازی شده روند ازسوی بیننده است و به اشتباهات موجود بسیار حساس است. بیننده از این طریق می‌تواند اشتباهات موجود در فرایند شبیه‌سازی را به‌راحتی و با مقایسه کشف کند. واسنجش بصری از منظر بررسی تکرار الگوهای مکانی و میزان توسعه مدل اهمیت دارد، به‌طوری‌که واسنجش آماری به‌تنهایی نمی‌تواند

جایگزین آن باشد (Clarek et al., 1998). پس از انجام واسنجش بصری، ادامه بررسی دقت نتایج شبیه‌سازی از طریق ارزیابی دقت شبیه‌سازی انجام خواهد گرفت. یکی از جنبه‌های مهم واسنجش مدل، بررسی نتایج مدل و مقایسه میزان انطباق آنها با واقعیت است و ماتریس خطا یکی از روش‌های این بررسی به‌شمار می‌آید. روش ماتریس خطا یکی از ابزارهای متداول تعیین دقت کلاسه‌بندی پوشش زمین برای داده‌های سنجنش از دور است (Jensen et al., 1996). این ماتریس، داده‌های دو منبع مختلف یعنی داده‌های مرجع و داده‌های تولیدشده به‌وسیله مدل را کلاسه‌بندی و روابط بین این دو منبع را سلول به سلول مقایسه می‌کند. به‌دلیل کارکرد مهم الگوهای سلولی در ایجاد فرایند شبیه‌سازی سیستم‌های مکانی، ارزیابی میزان انطباق الگوهای شبیه‌سازی شده با الگوهای واقعی اهمیت زیادی دارد. به همین دلیل از پنجره متحرکی به نام پنجره کرنل استفاده می‌شود که بر اساس آن، ماتریس خطای جدیدی تشکیل می‌گردد. با این حال استفاده از مقداری کلی به‌جای ماتریس بیان‌شده به‌منظور ارزیابی نتایج، فهم‌شدنی‌تر و راحت‌تر است. مقدار مذکور می‌بایست بیانگر دقت کلی و نیز خطاهای موجود باشند. محتمل‌ترین روش در اجتماع مقادیر ماتریس خطای اصلاح‌شده، استفاده از ضریب کاپاست. رابطه (۱) بیان ریاضی ضریب کاپا را نشان می‌دهد.

رابطه (۱)

$$K_{\text{hat}} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}$$

- r: تعداد کلاس‌های موجود در ماتریس خطا
- x<sub>ii</sub>: تعداد سلول‌های موجود در سطر و ستون
- x<sub>i+</sub>: تعداد کل سلول‌های موجود در سطر
- x<sub>+i</sub>: تعداد کل سلول‌های موجود در ستون
- N: تعداد کل سلول‌های موجود در ماتریس

## 1. Retrospective Prediction Approach



فضای سلولی به کار گرفته شده در این مدل، یک شبکه دویبعدی با ابعاد سلولی  $50 \times 50$  متر است. به منظور بررسی روند توسعه شهری و میزان گسترش آن، از مجموعه وضعیت دوتایی {شهری - غیرشهری} استفاده شد، که در آن هر سلول از فضای سلولی در هر زمان فقط یکی از دو وضعیت شهری یا غیرشهری را خواهد داشت. به منظور کلاسه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای به دو کلاس شهری و غیرشهری، از روش بیشترین احتمال استفاده شد. شکل ۵، تصاویر ماهواره‌ای کلاسه‌بندی شده را نشان می‌دهد. در این مدل‌سازی از همسایگی ۸ سلولی مستطیل‌شکل استفاده شد. با بررسی تحقیقات گذشته و مدل‌های CA استفاده شده در زمینه توسعه شهری، بهترین بازه زمانی برای تکرار، بازه زمانی یک‌ساله است (Lahti, 2008). در پژوهش حاضر از بازه زمانی یک‌ساله به منظور پیاده‌سازی مدل استفاده شد. قوانین انتقال بر اساس سیستم کنترل فازی بیان شدند. دسته روابط (۲)، وابستگی بین متغیرهای بیان شده و چهار عامل اصلی بیان قوانین مؤثر بر توسعه شهری را نشان می‌دهد.

UAAFi,jt: شاخص تراکم شهری و جذابیت شهری در سلول i,jt در زمان t

UDi,jt: فاکتور تراکم شهری در سلول i,jt در زمان t

AECSESi,jt: فاکتور دسترسی به مراکز اشتغال و سرویس‌های اقتصادی-اجتماعی در سلول i,jt در زمان t

ATCi,jt: فاکتور دسترسی به مراکز شهری در سلول i,jt در زمان t

TCLi,jt: شاخص محدودیت توپوگرافی در سلول i,jt در زمان t

Ai,jt: فاکتور ارتفاع از سطح دریا در سلول i,jt در زمان t

SGi,jt: فاکتور شیب در سلول i,jt در زمان t

PPRi,jt: شاخص سیاست‌های برنامه‌ریزی و آیین‌نامه‌های در سلول i,jt در زمان t

EAI,jt: فاکتور نواحی مستثنا در سلول i,jt در زمان t

PAI,jt: فاکتور نواحی برنامه‌ریزی شده در سلول i,jt در زمان t

در پژوهش حاضر، سیستم استنتاج ممدانی<sup>۱</sup> به عنوان سیستم استنتاج انتخاب شد. در نهایت بر اساس روش واسنجش بیان شده و بررسی دقت‌های به دست آمده، مؤلفه‌های مربوط به سیستم کنترل فازی تعیین شدند.

در بخش فازی‌سازی، متغیرهای AMJR, UD, SG, به عنوان مجموعه‌های فازی در نظر گرفته شدند، که هر یک شامل توابع عضویت و متغیرهای زبانی خود هستند. در بخش استنتاج فازی، از عملگرهای مینیمم و مینیمم ماکزیمم به ترتیب برای بیان عملیات And, Or, Aggregation استفاده شد. در بخش غیرفازی‌سازی، از روش Centroid به منظور تبدیل مقادیر فازی به دست آمده از فرایند استنتاج به مقادیر قطعی استفاده شد. در نهایت، مقادیر به دست آمده بر اساس قانون شرطی به وضعیت شهری یا غیرشهری تبدیل شدند.

فضای سلولی به کار گرفته شده در این مدل، یک شبکه دویبعدی با ابعاد سلولی  $50 \times 50$  متر است. به منظور بررسی روند توسعه شهری و میزان گسترش آن، از مجموعه وضعیت دوتایی {شهری - غیرشهری} استفاده شد، که در آن هر سلول از فضای سلولی در هر زمان فقط یکی از دو وضعیت شهری یا غیرشهری را خواهد داشت. به منظور کلاسه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای به دو کلاس شهری و غیرشهری، از روش بیشترین احتمال استفاده شد. شکل ۵، تصاویر ماهواره‌ای کلاسه‌بندی شده را نشان می‌دهد. در این مدل‌سازی از همسایگی ۸ سلولی مستطیل‌شکل استفاده شد. با بررسی تحقیقات گذشته و مدل‌های CA استفاده شده در زمینه توسعه شهری، بهترین بازه زمانی برای تکرار، بازه زمانی یک‌ساله است (Lahti, 2008). در پژوهش حاضر از بازه زمانی یک‌ساله به منظور پیاده‌سازی مدل استفاده شد. قوانین انتقال بر اساس سیستم کنترل فازی بیان شدند. دسته روابط (۲)، وابستگی بین متغیرهای بیان شده و چهار عامل اصلی بیان قوانین مؤثر بر توسعه شهری را نشان می‌دهد.

$$TAi,jt = f(PDIi,jt; ALRi,jt; AMRi,jt; AMJRI,jt)$$

رابطه (۲)

$$UAAFi,jt = f(UDi,jt; AECSESi,jt; ATCi,jt)$$

$$TCLi,jt = f(SGi,jt; Ai,jt)$$

$$PPRi,jt = f(PAI,jt; EAI,jt)$$

TAi,jt: شاخص دسترسی به شبکه حمل‌ونقل در

سلول i,jt در زمان t

PDIi,jt: شاخص نمایه چگالی نقطه‌ای در سلول i,jt

در زمان t

ALRi,jt: فاکتور دسترسی به خیابان‌های فرعی در

سلول i,jt در زمان t

AMRi,jt: فاکتور دسترسی به خیابان‌های اصلی در

سلول i,jt در زمان t

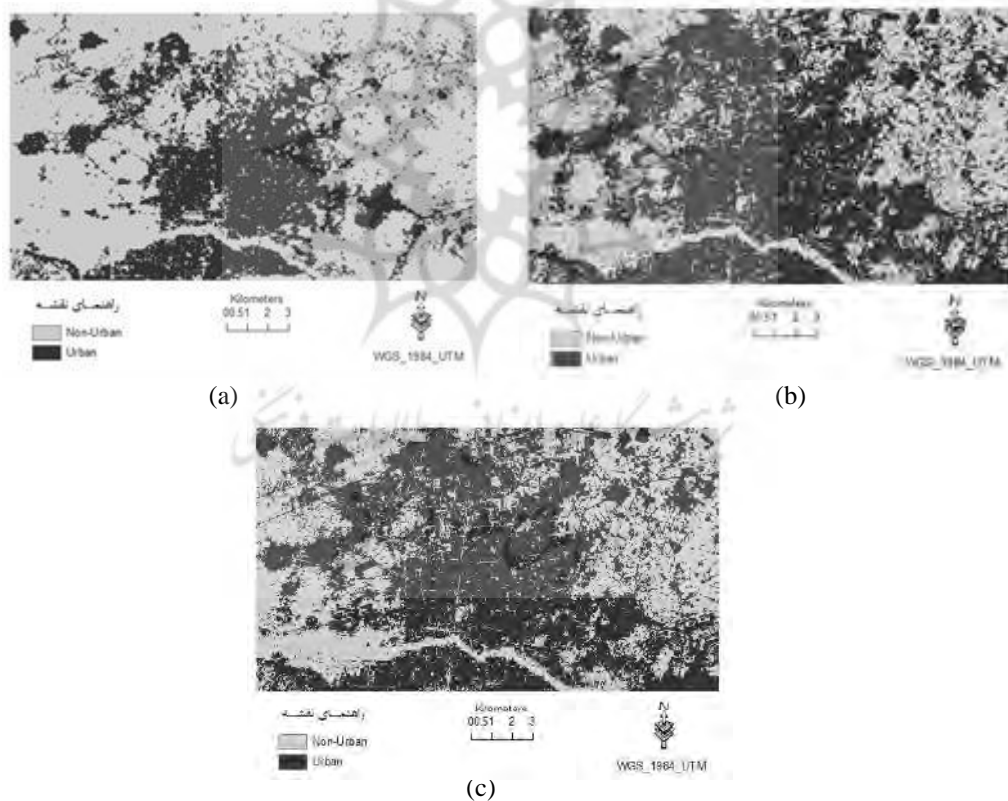
AMJRI,jt: فاکتور دسترسی به آزادراه‌ها و

بزرگراه‌ها در سلول i,jt در زمان t

1. Mamdani

جدول ۱. دقت‌های شبیه‌سازی مدل توسعه شهری با اعمال کلیه قوانین انتقال

		1990		2001		2009	
		واقعی	واقعی	شبیه‌سازی شده	واقعی	شبیه‌سازی شده	
درصد سلول‌های هر کلاس	شهری	۳۲/۷	۵۷/۰	۶۱/۶	۶۵/۸	۷۰/۳	
	غیرشهری	۶۷/۳	۴۳/۰	۳۸/۴	۳۴/۲	۲۹/۷	
دقت کاربر	شهری	—	۸۶/۹		۸۸/۵		
	غیرشهری	—	۹۱/۱		۸۸/۰		
دقت تولیدکننده	شهری	—	۹۴/۰		۹۴/۶		
	غیرشهری	—	۸۱/۳		۷۶/۵		
	دقت کلی	—	۸۸/۵		۸۸/۴		
	ضریب K	—	۷۶/۳		۷۳/۴		



شکل ۵. تصاویر ماهواره‌ای کلاسه‌بندی شده با ابعاد ۵۰×۵۰ از شهر اصفهان در سال (a) ۱۹۹۰، (b) ۲۰۰۱، (c) ۲۰۰۹

### ۳- نتایج و بحث

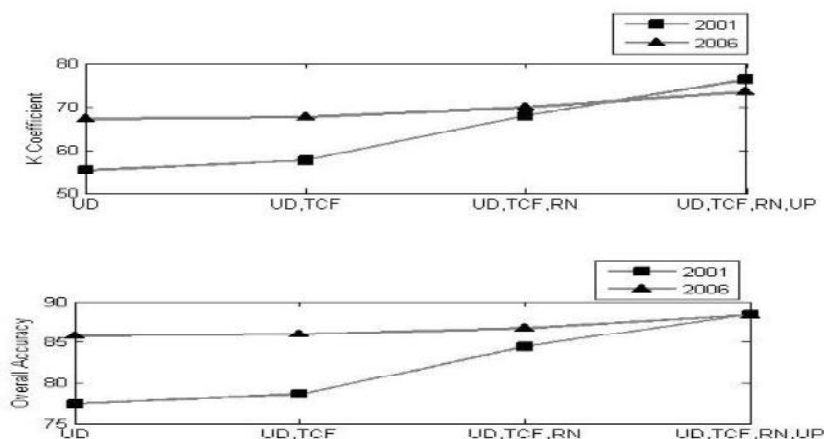
در جدول ۱ دقت حاصل از فرایند شبیه‌سازی آمده‌اند. نتایج جدول نشان می‌دهند که مدل واسنجیده، توسعه شهری سال ۲۰۰۹ اصفهان را با دقت کلی ۸۸/۴ درصد شبیه‌سازی می‌کند. این درحالی است که ضریب کاپای حاصل از این شبیه‌سازی ۷۳/۴ درصد است. ضریب کاپا برخلاف دقت کلی که فقط مقادیر قطری ماتریس خطا را به کار می‌گیرد و از خطای Omission و Comission صرف‌نظر می‌کند، از تمام مقادیر موجود در ماتریس خطا استفاده می‌کند. بنابراین مقادیر به‌دست‌آمده از ضریب کاپا همواره کمتر از مقادیر مشابه حاصل از دقت کلی است. اختلاف ۱۵ درصد موجود بین دقت کلی و ضریب کاپا در جدول ۱ نیز همین مطلب را بیان می‌کند. این اختلاف به دلیل وجود خطای Omission و Comission موجود در کلاسه‌بندی سلول‌های نقشه شبیه‌سازی شده در مقایسه با نقشه واقعی مربوط به سال ۲۰۰۹ است. خطای Omission و Comission به ترتیب با دقت تولیدکننده و دقت کاربر نسبت عکس دارند و کاهش آنها موجب افزایش این دقت‌ها خواهد شد. کاهش این دو خطا موجب افزایش دقت کلی و ضریب کاپا نیز می‌شود. میزان تأثیر خطای Omission و Comission بر ضریب کاپا به مراتب بیشتر از تأثیرشان بر دقت کلی است، بنابراین دقت کلی به تنهایی شاخص مناسبی برای ارزیابی نتایج مدل‌سازی نخواهد بود و بالابودن دقت کلی نمی‌تواند نشان مدل‌سازی صحیح باشد. آنچه در ارزیابی نتایج مدل‌سازی اهمیت دارد، میزان انطباق سلول کلاس‌های مختلف نقشه شبیه‌سازی شده در مقایسه با نقشه واقعی است.

بنابراین ارزیابی نتایج مدل‌سازی نیازمند بررسی دقت کلی، خطای Omission، خطای Comission و ضریب کاپا خواهد بود. جدول ۲، این تفسیر را تأیید می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با وجود برابری دقت کلی

نقشه شبیه‌سازی شده سال ۲۰۰۱ و ۲۰۰۹، میان ضرایب کاپای آنها ۳ درصد اختلاف وجود دارد، که به دلیل بزرگ‌تری خطای Omission و Comission مربوط به سلول‌های کلاس غیرشهری است. بنابراین ملاحظه می‌شود که مدل واسنجیده‌شده در شبیه‌سازی فرایند توسعه شهری سال ۲۰۰۱ از سال ۲۰۰۹ موفق‌تر بوده است. دلیل این امر را می‌توان در وجود عناصر مکانی و المان‌های تصمیم‌گیرنده انسانی دیگری دانست که تأثیر آنها در مدل ارائه‌شده در نظر گرفته نشده است.

شکل ۶، نتایج شبیه‌سازی حاصل از اعمال قوانین انتقال فازی را در طول زمان نشان می‌دهد. با اینکه عناصر ذکر شده تأثیرات متفاوتی بر فرایند شبیه‌سازی دارند، دقت کلی و ضریب کاپا روند افزایشی در طول فرایند داشته که گویای مؤثر بودن عناصر انتخابی است. چگونگی و میزان این تأثیرات در جدول ۲ تفسیر شده‌اند.

در ابتدا فرایند توسعه شهری صرفاً بر مبنای متغیر تراکم شهری مدل‌سازی شد و فقط به پتانسیل توسعه هر سلول و همسایگان آن توجه گردید و تأثیر هیچ‌یک از شرایط فیزیکی و رفتارهای تصمیم‌گیرنده انسانی وارد نشد. دقت‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهند که به‌رغم دقت کلی ۷۷/۴ درصد، تفاوت‌های زیادی میان نقشه شبیه‌سازی شده و واقعی وجود دارد. برای مثال، براساس نتایج شبیه‌سازی ۴۵ درصد نواحی شهری و ۵۵ درصد غیرشهری بودند، درحالی‌که این اعداد در واقعیت به ترتیب ۵۷ درصد و ۴۳ درصدند. افزون بر این، مقایسه خطاهای Omission و Comission هر کلاس به تنهایی نشان می‌دهد که در کلاس شهری خطای Omission و در کلاس غیرشهری خطای Comission، خطای غالب است. در فرایند شبیه‌سازی، ۳۰ درصد از سلول‌هایی که در واقعیت شهری بودند به کلاس شهری تعلق نگرفتند و ۳۱ درصد سلول‌ها به اشتباه به کلاس غیرشهری تعلق گرفتند. بنابراین، مدل به‌خوبی قادر به شبیه‌سازی توسعه شهری نبوده است.



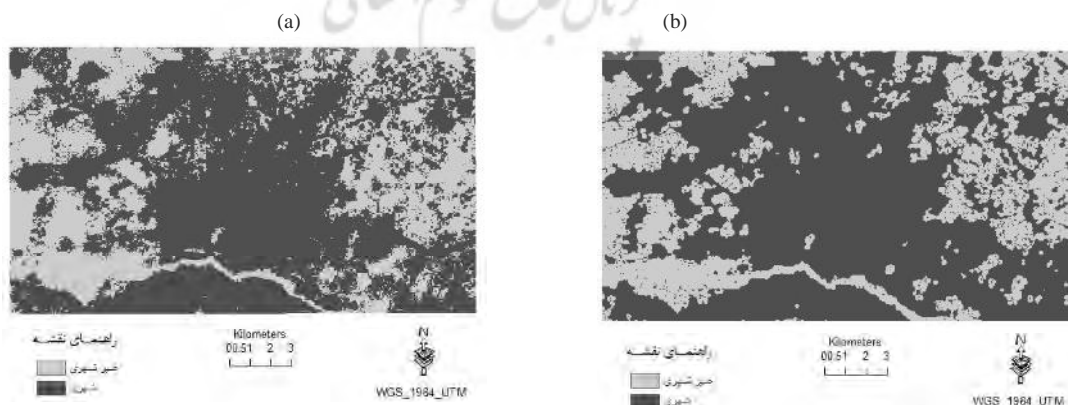
شکل ۶. (a) دقت کلی و (b) ضرب کاپا، براساس قوانین انتقال مختلف در طول زمان

جدول ۲. دقت‌های شبیه‌سازی مدل توسعه شهری با اعمال قوانین انتقال مختلف، سال ۲۰۰۹

		actual	UD	UD Plus	Urban Density UD	Urban Density UD Plus
		2009		S & A	Plus S&A Plus	S&A Plus AMJR Plus
درصد سلول‌های هر کلاس	شهری	۶۵/۸	۷۱/۱	۷۱/۰	۷۰/۴	۷۰/۳
	غیرشهری	۳۴/۲	۲۸/۹	۲۹/۰	۲۹/۶	۲۹/۷
دقت کاربر	شهری	—	۸۶/۲	۸۶/۴	۸۷/۳	۸۸/۵
	غیرشهری	—	۸۴/۷	۸۴/۸	۸۵/۶	۸۸/۰
دقت تولیدکننده	شهری	—	۹۳/۳	۹۳/۳	۹۳/۵	۹۴/۶
	غیرشهری	—	۷۱/۱	۷۱/۸	۷۳/۹	۷۶/۵
دقت کلی			۸۵/۸	۸۶/۰	۸۶/۸	۸۸/۴
ضریب K			۶۷/۲	۶۷/۶	۶۹/۸	۷۳/۴

درصدی کاپا حاکی از کاهش جدی خطای Omission و Commission است. خطای Omission کلاس شهری، ۱۸/۴ درصد و خطای Commission کلاس غیرشهری، ۱۶/۱ درصد کاهش یافته است. این دقت‌ها تأثیر شبکه حمل‌ونقل را بر توسعه شهری اصفهان نشان می‌دهند. ۵/۶ درصد افزایش خطای Commission در کلاس شهری و ۱۲ درصد خطای Omission در کلاس غیرشهری، نشان می‌دهد که در طول فرایند شبیه‌سازی، تعدادی از سلول‌های غیرشهری به‌اشتباه شهری شده‌اند. این مسئله نشان از حضور مؤلفه دیگری در فرایند توسعه دارد. سیاست‌های برنامه‌ریزی شهری آخرین عامل مؤثر به‌کار گرفته‌شده در این مدل‌سازی هستند. بررسی دقت‌های حاصل از شبیه‌سازی، تأثیر زیاد این عامل را در افزایش دقت شبیه‌سازی فرایند توسعه شهری نشان می‌دهد. این عامل ضمن آنکه موجب افزایش ۴ درصد دقت کلی و ۸/۴ درصد ضریب کاپا می‌شود، تمامی خطاها را نیز کاهش می‌دهد. با وجود اعمال تمامی این مؤلفه‌ها و در نظر گرفتن تأثیرات‌شان بر فرایند شبیه‌سازی توسعه شهری در قالب قوانین انتقال، باز هم خطای Commission کلاس شهری و Omission کلاس غیرشهری به‌میزان ۱۳/۱ درصد و ۱۸/۷ درصد وجود دارد. وجود ضریب کاپای ۷۶/۳ درصد در مقابل دقت کلی ۸۸/۵ درصد حاکی از وجود مؤلفه‌های مؤثر دیگری است که تأثیرشان در مدل در نظر گرفته نشده است.

ضریب کاپای ۵۵/۴ درصد نشان می‌دهد که متغیر تراکم شهری به‌تنهایی قادر به مدل‌سازی دقیق نبوده است. دلیل این امر را می‌توان در وجود مؤلفه‌های دیگری دانست. شرایط توپوگرافی، مؤلفه مؤثر دیگری است که در مدل‌سازی وارد می‌شود. افزایش دقت کلی و ضریب کاپا به‌ترتیب به میزان ۰/۲ و ۰/۶ نشان از تأثیر مثبت بسیار کم این مؤلفه بر نتایج مدل‌سازی دارد. بررسی تصاویر ماهواره‌ای و DEM منطقه نشان‌دهنده توسعه شهری اصفهان روی منطقه‌ای نسبتاً صاف با شیب متوسط ۳ درصد است. بنابراین منطقی است که این المان تأثیر زیادی بر نتایج شبیه‌سازی نداشته باشد. این مؤلفه تمامی دقت‌های شبیه‌سازی را افزایش داده است و بیشترین تأثیر را بر کاهش خطای Omission کلاس شهری و خطای Commission کلاس غیرشهری به‌میزان ۱/۵ درصد و ۱/۳ درصد دارد. با این حال، بررسی خطاها نشان می‌دهد که همچنان خطای Omission در کلاس شهری و خطای Commission در کلاس غیرشهری، خطای غالب‌اند. مدل‌سازی بر اساس این دو مؤلفه، نتایج مناسبی نداشته و حاکی از وجود مؤلفه‌های دیگری است که در روند توسعه شهری اصفهان نقش بسزایی دارند. دسترسی به شبکه راه‌ها، مؤلفه مؤثر دیگری بر فرایند توسعه شهری است که تأثیر آن بر شبیه‌سازی در اینجا بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی حاصل از اعمال این مؤلفه، نشان‌دهنده افزایش شدید ضریب کاپاست. افزایش ۱۰



شکل ۷. نقشه‌های حاصل از شبیه‌سازی فرایند توسعه شهری اصفهان در سال ۲۰۰۱ (a)، ۲۰۰۹ (b)

Al-Ahmadi, K., See, L., Heppenstall, A. & Hogg, J., 2008, **Calibration of a Fuzzy Cellular Automata Model of Urban Dynamics in Saudi Arabia**, Ecological Complexity.

Almeida, C.M., Batty, M., Monteiro, A.M.V., Câmara, G., Soares-Filho, B.S., Cerqueira, G.C. et al., 2003, **Stochastic Cellular Automata Modeling of Urban Land Use Dynamics: Empirical development and estimation**, Computers, Environment and Urban Systems, 27, PP. 481–509.

Almeida, C.M., Gleriani, J.M., Castejon, E.F. & Soares-Filho, B.S., 2008, **Using Neural Networks and Cellular Automata for Modelling Intra-urban Land-use Dynamics**, International Journal of Geographical Information Science, 22(9), PP. 943–963.

Arii, K. & Parrott, L., 2006, **Examining the Colonization Process of Exotic Species Varying in Competitive Abilities Using a Cellular Automaton Model**, Ecological Modelling, 199, PP. 219–228.

Batty, M. & Xie, Y., 1994, **From Cells to Cities**, Environment and Planning B 21, PP. 531–548.

Batty, M., Xie, Y. & Sun, Z., 1999, **Modeling Urban Dynamics through GIS-based Cellular Automata**, Computers, Environment and Urban Systems, 23, PP. 205–233.

Bell, M., Dean, C. & Blake, M., 2000, **Forecasting the Pattern of Urban Growth with PUP?: A web-based model interfaced with GIS and 3D Animation**, Computers, Environment and Urban systems 24: b559-81.

واضح است که افزایش شرایط مختلف فیزیکی و رفتارهای تصمیم گیرنده انسانی، فرایند توسعه شهری را واقعی تر شبیه سازی می کند. در نهایت، از میان تمام نتایج حاصل از واسنجش، بهترین نتایج به دست آمده از مدل سازی در قالب نقشه های شبیه سازی شده مربوط به سال های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۹ در شکل ۷ نشان داده شده است.

در پژوهش حاضر، کاربرد نظریه فازی در بیان قوانین انتقال مدل CA بررسی شد. بر این اساس، مدل خودکارهای سلولی فازی بر مبنای روش کنترل منطق فازی پیشنهاد شد. عملکرد مدل پیشنهادی در مقایسه با مدل های CA کلاسیک برای شبیه سازی فرایندهای مکانی بهتر است. دلایل این امر متفاوت است. عمده ترین دلیل، افزایش انعطاف CA در مقابل اطلاعات مبهم و غیرقطعی موجود در فرایندهای مکانی است، که به دلیل ماهیت غیرقطعی نظریه فازی و توانایی تقریب رفتارهای سیستم های پیچیده بدون نیاز به وجود داده های قطعی و دقیق است. شبیه سازی مناسب فرایند توسعه شهری اصفهان با وجود محدودیت داده ها و نیز نبود شناخت کافی از روابط میان عناصر مؤثر بر فرایند توسعه، مؤید مطلب بیان شده است. افزون بر این، بیان فازی قوانین انتقال موجب نزدیکی هرچه بیشتر قوانین و رفتارهای تصمیم گیرنده انسانی می شود، که درک بیشتر پژوهشگران را از مؤلفه های مؤثر بر فرایند مکانی و روابط میان آنها به دنبال خواهد داشت و امکان بررسی آسان تر نظریه های مختلف و تأثیر آنها بر فرایندهای مکانی را فراهم می کند. شبیه سازی فرایند توسعه شهری اصفهان بر اساس مدل ارائه شده بیانگر توانایی بالای این مدل در برخورد با فرایندهای مکانی است.

#### ۴- منابع

Al-Ahmadi, K., Heppenstall, A., Hogg, J. & See, L., 2009, **A Fuzzy Cellular Automata Urban Growth Model (FCAUGM) for the City of Riyadh**, Saudi Arabia, Part 1: Model Structure and Validation.

- Berjak, S.G. & Hearne, J.W., 2002, **An Improved Cellular Automata Model for Simulating Fire in a Spatially Heterogeneous Savanna System**, *Ecological Modelling*, 148(2), PP. 133–151.
- Benenson, I. & Torrens, P.M., 2004, **Geosimulation Automata-based Modelling of Urban Phenomena**, UK: John Wiley and Sons Ltd.
- Chen, Q., Mynett, A.E. & Minns, A.W., 2002, **Application of Cellular Automata to Modelling Competitive Growths of Two Underwater Species Chara Aspera and Potamogeton Pectinatus in Lake Veluwe**, *Ecological Modelling*, 147(3), PP. 253–265.
- Clark, 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, PP. 699-74.
- Dietzel, C. & Clarke, K.C., 2006, **The Effect of Disaggregating Land Use Categories in Cellular Automata during Model Calibration and Forecasting**, *Computers, Environment and Urban Systems*, 30(1), PP. 78–101.
- Favier, C., Chave, J., Fabing, A., Schwartz, D. & Dubois, M.A., 2004, **Modelling Forest–Savanna Mosaic Dynamics in Man-influenced Environments: Effects of fire, Climate and Soil Heterogeneity**, *Ecological Modelling*, 171, PP. 85–102.
- Flache, A. & Hegselmann, R., 2001, **Do Irregular Grids Make a Difference? Relaxing the Spatial Regularity Assumption in Cellular Models of Social Dynamics**, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 4(4), PP. 6.1–6.27.
- Hu, S. & Li, D., 2004, **Vector Cellular Automata based Geographical Entity**, In *Proceedings of the 12th international conference on geoinformatics – geospatial information research: Bridging the Pacific and Atlantic (June 7–9, PP. 249–256)*, Sweden: University of Gvle.
- Jantz, C.A. & Goetz, S.J., 2005, **Analysis of Scale Dependencies in an Urban Land-use Change Model**, *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2), PP. 217–241.
- Jensen, J.R., 1996, **Introductory Digital Image Processing: a Remote Sensing Perspective**, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Kocabas, V. & Dragicevic, S., 2006, **Assessing Cellular Automata Model Behavior Using a Sensitivity Analysis Approach**, *Computers, Environment and Urban Systems*, 30(6), PP. 921–953.
- Lahti, J., 2008, **Modelling Urban Growth Using Cellular Automata: A case study of Sydney**, Australia.
- Li, X. & Yeh, A.G., 2002, **Neural-network-based Cellular Automata for Simulating Multiple Land use Changes Using GIS**, *International Journal of Geographical Information Science*, 16(4), PP. 323–343.

- Liu, Y., 2009, **Modelling Urban Development with Geographical Information Systems and Cellular Automata**, CRC Press, Printed in the United States of America.
- Liu, Y. & Phinn, S.R., 2003, **Modelling Urban Development with Cellular Automata Incorporating Fuzzy-set Approaches**, Computers, Environment and Urban Systems 27, PP. 637–658.
- Naylor, T.H. & Finger, J.M., 1967, **Verification of Computer Simulation Models**, Management Science 114: B92-B106.
- Matsinos, Y.G. & Troumbis, A.Y., 2002, **Modeling Competition, Dispersal and Effects of Disturbance in the Dynamics of a Grassland Community using a Cellular Automaton Model**, Ecological Modelling, 149, PP. 71–83.
- Ménard, A. & Marceau, D.J., 2005, **Exploration of Spatial Scale Sensitivity in Geographical Cellular Automata**, Environment and Planning B: Planning and Design, 32, PP. 693–714.
- Ménard, A. & Marceau, D.J., 2007, **Simulating the Impact of Forest Management Scenarios in an Agricultural Landscape of Southern Quebec, Canada, using a Geographic Cellular Automata**, Landscape and Urban Planning, 79(3–4), PP. 253–265.
- Moreno, N. & Marceau, D.J., 2006, **A Vector-based Cellular Automata Model to Allow Changes of Polygon Shape**, In Proceedings of the 2006 SCS international conference on modeling and simulation – methodology, tools, software applications (July 31–August 2, PP. 85–92), Canada: Calgary.
- Moreno, N., Wang, F. & Marceau, D.J., 2008, **Implementation of a Dynamic Neighborhood in a Land-use Vector-based Cellular Automata Model**, Computers, Environment and Urban Systems.
- O'Sullivan, D., 2001, **Graph-cellular Automata: A generalised discrete urban and regional model**, Environment and Planning B: Planning and Design, 28, PP. 687–705.
- Rietkerk, M., Dekker, S.C., Ruiten, P.C. & Koppel, J., 2004, **Self-organized Patchiness and Catastrophic Shifts in Ecosystems**, Science, 305(5692), PP. 1926–1929.
- Schiff, J.L., 2007, **Cellular Automata, A Discrete View of the World**, Wiley-Interscience Series in Discrete Mathematics and Optimization.
- Semoloni, F., 2000, **The Growth of an Urban Cluster into a Dynamic Self-modifying Spatial Pattern**, Environment and Planning B: Planning and Design, 27(4), PP. 549–564.
- Shi, W. & Pang, M.Y.C., 2000, **Development of Voronoi-based Cellular Automata – an integrated dynamic model for geographical information systems**.
- Sun, T. & Wang, J., 2007, **A Traffic Cellular Automata Model based on Road Network Grids and its Spatial and Temporal Resolution's Influences on Simulation+**, Simulation Modelling Practice and Theory, 15, PP. 864–878.



- Takeyama, M. & Couclelis, H., 1997, **Map Dynamics: Integrating cellular automata and GIS through geoalgebra**, International Journal of Geographical Information Science, 11(1), PP. 73-91.
- Timothy, J.R., 2004, **Fuzzy Logic with Engineering Application**.
- Torrens, P.M., 2000, **How Cellular Models of Urban Systems Work**, CASA Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London, working paper 28, URL: <http://www.casa.ucl.ac.uk/publications/workingPaperDetail.asp?ID=28>, [Accessed 2005].
- Wahle, J., Neubert, L., Esser, J. & Schreckenber, M., 2001, **A Cellular Automata Traffic Flow Model for Online Simulation of Traffic**, Parallel Computing, 27(5), PP. 719-735.
- Ward, D.P., Murray, A.T. & Phinn, S.R., 2000, **A Stochastically Constrained Cellular Model of Urban Growth**, Computer, Environment and Urban Systems 24, PP. 539-558.
- White, R. & Engelen, G., 1997, **Cellular Automata as the Basis of Integrated Dynamic Regional Modeling**, Environment and Planning B: Planning and Design 24, PP. 235-246.
- White, R. & Engelen, G., 2000a, **High-resolution Integrated Modeling of the Spatial Dynamics of Urban and Regional Systems**, Computer, Environment and Urban Systems 24, PP. 383-400.
- White, R., Engelen, G. & Ujce, I., 2000b, **Modelling Land-use Change with Linked Cellular Automata and Socio-economic Models: A tool for exploring the impact of climate change on the island of St. Lucia**, In M.J. Hill & R.J. Aspinell (Eds.), Spatial information for land-use management (PP. 189-204), Amsterdam: Gordon and Breach.
- Wolfram, S., 1984, **Cellular Automata as Models of Complexity**, Nature, 311, PP. 419-424
- Wolfram, S., 1994, **Cellular Automata and Complexity**, MA: Addison-Wesley, Reading.
- Wolfram, S., 2002, **A New Kind of Science**, London: Champaign, Wolfram Media.
- Wu, F., 1998a, **An Experiment on the Generic Polycentricity of Urban Growth in a Cellular Automatic**, Environment and Planning B: Planning and Design 25, PP. 731-52.
- 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, PP. 293-308.
- Wu, F., 2002, **Calibration of Stochastic Cellular Automata: The application to rural-urban land conversions**, International Journal of Geographical Information Science, 16(8), PP. 795-818.
- Wu, F. & Webster, C.J., 1998, **Simulation of Land Development through the**

- Integration of Cellular Automata and Multi-criteria Evaluation**, Environment and Planning B 25, PP. 103–126.
- Yassemi, S., Dragicevic, S. & Schmidt, M., 2008, **Design and Implementation of an Integrated GIS-based Cellular Automata Model to Characterize Forest Fire Behaviour**, Ecological Modelling, 210, PP. 71–84.
- Yeh, A., Li, X., 2001, **A Constrained CA Model for the Simulation and Planning of Sustainable Urban Forms by Using GIS**, Environment and Planning B: Planning and Design 28, PP. 733– 753.
- Yeh, A.G.O. & Li, X., 2006, **Errors and Uncertainties in Urban Cellular Automata**, Computers, Environment and Urban Systems, 30, PP. 10–28.
- Zadeh, L.A., 1965, **Fuzzy Sets**, Information and Control 8, PP. 338– 353.

