

# ارزیابی کارایی مدل سلول‌های خودکار در شبیه‌سازی گسترش اراضی شهری در حومه جنوب غرب تهران

عباس علیمحمدی سراب<sup>۱</sup>، علی اکبر متکان<sup>۲</sup>، بابک میرباقری<sup>۳\*</sup>

- ۱- استادیار گروه GIS، دانشکده نقشه برداری، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران
- ۲- دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
- ۳- مربی گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

دریافت: ۸۷/۲/۸ پذیرش: ۸۷/۱۰/۱۵

## چکیده

مدل سلول‌های خودکار<sup>۱</sup> با اختصار CA در سال‌های اخیر کارایی زیادی برای شبیه‌سازی توسعه اراضی شهری در مناطق مختلف جهان نشان داده است. در تحقیق حاضر گسترش اراضی مسکونی در حومه جنوب غرب تهران با استفاده از این مدل شبیه‌سازی شد. با استفاده از مدل وزن‌های شاهد<sup>۲</sup>، همبستگی توسعه اراضی مسکونی با داده‌های مکانی مختلف بررسی و از نتایج آن در شبیه‌سازی استفاده شد. سال ۷۱ به عنوان مبدأ شبیه‌سازی انتخاب شد و سه مدل Direct، WoE و Hybrid با پارامترهای مختلف در نرم‌افزار طراحی شده اجرا و نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های انجام شده برای سال‌های ۷۵، ۸۱ و ۱۴۰۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. دقت این مدل با خطای حداکثر ۶۰ متر برای سال ۷۵ معادل ۸۳ درصد و با تیرانس ۵ سلول (خطای حداکثر ۱۰۰ متر) برای سال ۸۱ معادل ۷۸ درصد است.

نتایج حاصل از این تحقیق قابلیت‌های مدل CA برای پیش‌بینی و مدل‌سازی تغییرات کاربری در شرایط منطقه مطالعه را نشان می‌دهد و ارزیابی و بررسی‌های بیشتر برای بهینه‌سازی این مدل در شرایط مختلف توصیه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی، سلول‌های خودکار، مدل وزن‌های شاهد.

E-mail: B\_Mirbagheri@sbu.ac.ir

\* نویسنده مسؤل مقاله:

2. Cellular automata

3. Weights of evidence



## ۱- مقدمه

گسترش بی‌رویه اراضی شهری از مهم‌ترین مسائل و معضلات برای مدیران و برنامه‌ریزان شهرها در سطوح گوناگون است. از آن جایی که امروزه بررسی روند تغییرات کاربری اراضی به کاربری شهری و شناسایی پارامترهایی که در این تغییرات مؤثر می‌باشند، نقش اساسی را در تصمیم‌گیری‌ها و برنامه‌ریزی‌های بلندمدت بازی می‌کنند، در این صورت کشف قوانین و روابط مؤثر در تغییر سایر کاربری‌ها به کاربری‌های شهری و هم‌چنین پیش‌بینی روند توسعه شهرها در آینده با روش‌های دقیق و کارآمد بیش از پیش ضرورت دارد. از آن جایی که در منابع علمی داخلی از مدل‌های پویا<sup>۱</sup> در مسائل شهری - به‌خصوص گسترش شهرها - کم‌تر استفاده شده است، بنابراین ارزیابی قابلیت استفاده این مدل‌ها در مناطق مختلف می‌تواند گام مهمی در جهت توسعه آن‌ها باشد. مدل سلول‌های خودکار<sup>۲</sup> یا به اختصار (CA) به دلیل داشتن ماهیت دینامیک و هم‌چنین خصوصیات منحصر به فرد آن در مدلسازی عوارض طبیعی و فیزیکی سطح زمین، کاربرد وسیعی در پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و هم‌چنین توسعه اراضی شهری پیدا کرده است. در این تحقیق مدل سلول‌های خودکار برای شبیه‌سازی گسترش اراضی شهری در شهرستان اسلامشهر و قسمتی از شهرستان رباط کریم طراحی شده و کارایی آن مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲- سوابق تحقیق

اولین مدل‌هایی که برای توصیف اشکال و فرم‌های مختلف شهرها مورد استفاده قرار گرفتند، در اوایل قرن نوزدهم ابداع شدند. برای اولین بار Von Thunen در سال ۱۸۲۶ مدلی را ارائه کرد که هدف آن بیان چگونگی گسترش کاربری‌های مختلف تحت تأثیر فرایندهای مرتبط با بازار بود (Candau, 2002) و مدل‌های دیگری نظیر مدل مکان مرکزی، مدل قطاعی و مدل چندهسته‌ای نیز به دنبال آن‌ها ارائه شد. اما این مدل‌ها اغلب مدل‌هایی توصیفی و استاتیک

---

1. Dynamic.  
2. Cellular Automata.

بودند (Junfeng, 2002) و با در نظر گرفتن تعداد محدودی از عوامل تأثیرگذار در شکل‌گیری شهرها ایجاد شدند. ماهیت استاتیکی آن‌ها قابلیت پیش‌بینی توسعه اراضی شهری را از آن‌ها سلب می‌کرد.

به طور کلی مدل CA در دو مرحله به علم جغرافیا معرفی شد: یک بار در اواخر دهه ۵۰ میلادی که در آن زمان پدیده‌های جغرافیایی به عنوان شبکه‌ای از سلول‌های مشابه فرض شد و از رایانه‌ها نیز در این میان کمک گرفته شد. هر چند در این مطالعات به یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مدل CA (که تأثیر همسایگی است) توجه نشده بود (Benenson and Torrens, 2004)، با ورود نظریه سیستم‌های پیچیده و پذیرفته شدن آن به وسیله جغرافی دانان، دوباره در اواخر دهه ۸۰ میلادی، مدل‌های CA مشابه مدل‌های کنونی مطرح شدند.

مدل‌های CA طراحی شده برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی و گسترش اراضی شهری از تنوع زیادی در جهان برخوردار است که از آن جمله می‌توان به مدل‌های ذیل اشاره کرد:

کلارک و همکاران (Clark & et al., 1997) مدل خود را (که مشهورترین مدل CA در شبیه‌سازی توسعه اراضی شهری است) و در سال‌های بعد به نام مدل SLEUTH شناخته شد - معرفی کردند. این مدل تاکنون در مناطق گوناگونی مانند سواحل سان‌فرانسیسکو، منطقه واشینگتن - بالتیمور (Jantzo, 2002)، مکزیکو سیتی و شهرهای لیسبون و پورتو پرتغال اجرا شده است. (Wu, 1998) مدلی ارائه کرد که در آن الگوی توسعه چند مرکزی یا چند هسته‌ای شهرها قابل پیاده‌سازی است. (Sui and zeng, 2001) مدلی را برای توسعه اراضی شهری در منطقه اقتصادی Shenzhen چین ارائه کردند. (Wu, 2000) توسعه شهرها را به دو فرایند خودبه‌خودی<sup>۱</sup> که فرایندی است مستقل از مدل CA و خود سازمان‌ده<sup>۲</sup> که به طور مستقیم به وسیله مدل CA کنترل می‌شود، تقسیم کرد و برای آزمون نظریات خود مدل CA را در فضایی مجازی اجرا نمود. هم‌چنین (Wu, 2002) مدل جدیدی از سلول‌های خودکار را برای شهر Guangzhou چین به کار برد که در واقع مکمل مدل

---

1. Spontaneous.  
2. Self-organizing.



سال ۲۰۰۰ وی بود و در دنیای واقعی اجرا می‌شد. او در مدل خود هم از عوامل کلی و هم از عوامل محلی برای پیش‌بینی توسعه اراضی شهری استفاده کرد. هم‌چنین در این مدل، در هر تکرار تعداد سلول مشخصی شبیه‌سازی می‌شود که در اصطلاح این نوع مدل‌ها را مدل سلول‌های خودکار محدود یا Constrained CA می‌نامند. (Liu and Phinn, 2001) مدل CA فازی را ارائه کردند که در آن درجه توسعه یافتگی اراضی شهری براساس جمعیت آن منطقه و براساس یک تابع عضویت فازی تعیین می‌شود.

(Almeida et al., 2002) در سال ۲۰۰۲ مدل CA خود را با نام DINAMICA برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری‌های مختلف در شهر Bauru در ایالت Sao Paulo برزیل و براساس مدل Weights of Evidence ارائه کردند. در ایران نیز (کیانی، ۱۳۸۳) در رساله دکتری خود مدل CA را برای پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در منطقه ۵ تهران برای سال‌های ۴۳ تا ۸۲ به کار برد. در تحقیق حاضر مدل مورد نظر با توجه به نوع داده‌های موجود از منطقه، انعطاف‌پذیری موجود برای استفاده از پارامترهای عمومی<sup>۱</sup> و محلی و امکان پیاده‌سازی مدل Constrained CA انتخاب شد.

### ۳- منطقه مورد مطالعه

از آن جایی که شهرها و شهرک‌های حومه جنوب‌غرب تهران با سرعت زیادی در حال گسترش هستند، در این صورت شهرستان اسلامشهر و قسمتی از شهرستان رباط کریم با مساحت در حدود ۳۰۶ کیلومتر مربع برای شبیه‌سازی و پیاده‌سازی مدل سلول‌های خودکار انتخاب شد (شکل ۱). در منطقه مورد مطالعه قسمت عمده اراضی، شهری است. با این وجود در این تحقیق رشد کلیه اراضی مسکونی اعم از شهری و روستایی شبیه‌سازی شد به دلیل این که توسعه روستاها اغلب با تبدیل آن به شهر منجر می‌شود.

---

1. Global.

## ۴- مواد و روش‌ها

### ۴-۱- منابع داده‌ها

منابع داده مورد استفاده در این تحقیق مطابق جدول ۱ است:

جدول ۱ منابع داده (تصاویر ماهواره‌ای) مورد استفاده

تاریخ اخذ تصویر	نوع تصویر ماهواره‌ای
۶۵/۴/۲۲	SPOT-1
۷۱/۴/۰۷	SPOT-2
۷۵/۳/۳۰	SPOT-3
۸۱/۴/۲۲	SPOT-4 و ETM <sup>+</sup> (فیوز شده)
۸۳/۳/۱۵	SPOT-5

سال ۷۱، به عنوان مبدأ زمانی شبیه‌سازی و سال‌های ۷۵، ۸۱ و ۱۴۰۰ به عنوان زمان‌های اتمام شبیه‌سازی انتخاب شدند. ضمن این که از تصویر SPOT-5 سال ۸۳ به علت قدرت تفکیک مکانی بالا و همچنین نقشه ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری نیز به عنوان منبعی کمکی برای شناسایی کاربری‌ها به خصوص اراضی صنعتی و مسکونی استفاده شد. ابعاد هر سلول در مدل CA نیز ۲۰ متر در نظر گرفته شد.

### ۴-۲- بررسی و تحلیل لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در مدل CA

با توجه به منابع اطلاعاتی موجود و انتخاب سال ۷۱ به عنوان مبدأ زمانی شبیه‌سازی، لایه‌های ذیل برای انجام تحلیل‌های مکانی استخراج شد:

الف - فاصله از کاربری مسکونی موجود در سال ۶۵؛

ب - فاصله از کاربری مسکونی توسعه یافته در دوره زمانی ۶۵ تا ۷۱؛



ج - فاصله از کاربری صنعتی؛

د - فاصله از معابر ارتباطی (آزادراه، بزرگراه، راه آسفالت‌شده درجه ۱ و ۲)؛

ه- تراکم<sup>۱</sup>. لایه‌های الف تا د به شش کلاس که کلاس‌های اول تا پنجم در بازه‌های ۱۰۰ متری و کلاس ششم با فاصله بیش از ۵۰۰ متر می‌باشد، تقسیم شد. هدف از تولید لایه تراکم نیز یافتن رابطه بین توسعه اراضی مسکونی با وسعت شهرها و فاصله از آن‌ها به صورت توأم بود. شکل ۲ به طور شماتیک نحوه محاسبه تراکم را برای یک سلول نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر تراکم با نزدیکی یا دوری از پلی‌گونهای بزرگ یا کوچک (به نسبت مساحت آن‌ها) تغییر می‌کند. برای تحلیل لایه‌های فوق از متغیرهای W<sup>+</sup>، W<sup>-</sup> و Contrast (C)، استفاده شد [Bonham-Carter, 1994] که در آن:

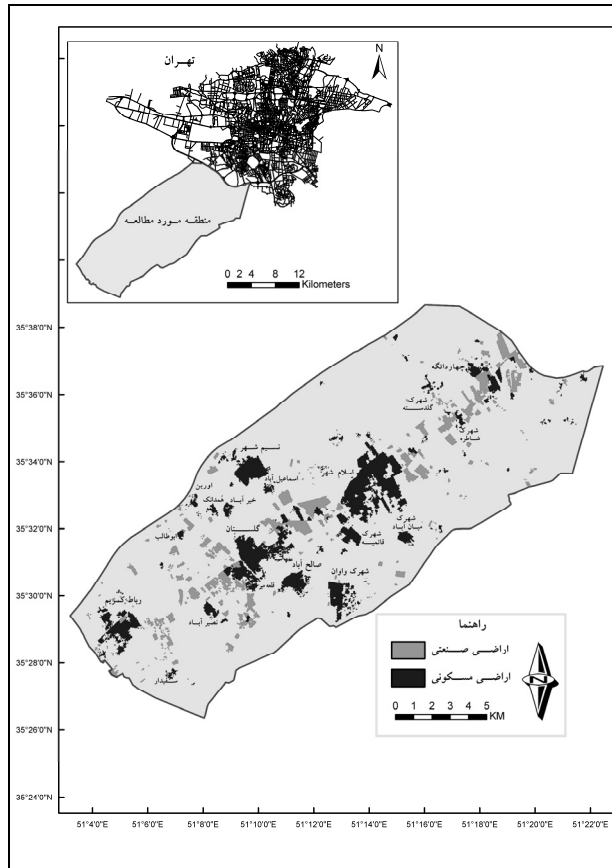
$$W^{-} = \ln \frac{P(\bar{B}|D)}{P(\bar{B}|\bar{D})} \quad W^{+} = \ln \frac{P(B|D)}{P(B|\bar{D})} \quad \text{رابطه ۱ و ۲}$$

$$\text{Contrast} = W^{+} - W^{-} \quad \text{رابطه ۳}$$

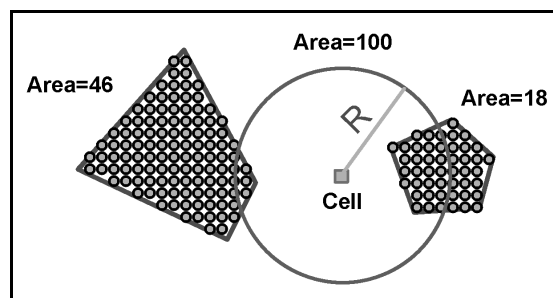
می‌باشد. عبارت‌های فوق معیارهایی برای بررسی رابطه بین پیشامد تبدیل سلول‌ها به کاربری مسکونی (D) و کلاسهای لایه‌های اطلاعاتی مختلف (B) می‌باشند. جدول ۲ به طور خلاصه نتایج حاصل از اعمال روش WoE را بر روی کلاس‌های لایه‌های اطلاعاتی نشان می‌دهد. مثبت بودن Contrast نشان‌دهنده همبستگی مثبت بین لایه توسعه اراضی هر کلاس است.

---

1. Density



شکل ۱ منطقه مورد مطالعه



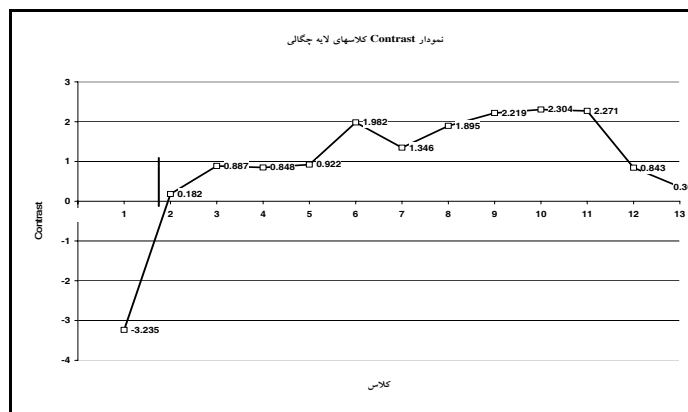
شکل ۲ نحوه محاسبه تراکم در تحقیق حاضر



**جدول ۲** مقادیر کنتراست محاسبه شده برای چهار لایه اطلاعاتی مربوط به فاصله

فاصله از راه‌های ارتباطی	فاصله از کاربری صنعتی	فاصله از اراضی توسعه یافته ۶۵ تا ۷۱	فاصله از کاربری مسکونی ۶۵	کلاس‌ها
۰/۷۳۳۸	-۰/۶۶۱۱	۴/۰۶۱۳	۲/۳۵۲۴	۱
۰/۵۴۰۱	۰/۰۱۶۴	۱/۷۸۷۳	۱/۷۰۸۱	۲
۰/۳۵۰۷	۰/۳۷۳۲	۰/۴۴۹۲	۰/۹۵۳۹	۳
۰/۱۲۵	۰/۳۶۱	-۰/۶۱۹۷	۰/۰۹۸۸	۴
-۰/۲۶۷	۰/۱۶۷۲	-۰/۸۵۳۳	-۰/۳۳۳۷	۵
-۱/۴۶۵۶	-۰/۱۶۰۸	-۳/۷۵۲۳	-۳/۴۵۷۳	۶

شکل ۳ نیز نتایج حاصل از اعمال مدل Woe را بر کلاس‌های لایه تراکم نشان می‌دهد. با دقت در این نمودار مشاهده می‌شود که بالاترین مقادیر کنتراست مربوط به کلاس ۱۰ و سپس دو کلاس ۹ و ۱۱ است که نماینده شهرهای رباط کریم، گلستان و نسیم شهر می‌باشند و بیانگر گسترش بیش‌تر اراضی مسکونی در اطراف این شهرهاست (شهرهای متوسط). ضمن این که کنتراست در کلاس ۳ نیز نشان می‌دهد که رشد اراضی اطراف روستاهایی مانند نصیرآباد و خیرآباد با توسعه اراضی در اطراف شهرهایی مانند چهاردانگه و حومه شهرهایی مانند رباط کریم یا صالح‌آباد برابری می‌کند. کلاس ۱۳ (که نماینده اسلام‌شهر است) کنتراست پایینی در مقابل سایر کلاس‌ها دارد که نشان می‌دهد رشد اراضی مسکونی در اطراف این شهر - علی‌رغم وسعت و امکانات موجود - نسبت به شهرهای کوچک‌تر از خود پایین‌تر است.



**شکل ۳** نمودار کنتراست کلاس‌های لایه تراکم



پس از استخراج لایه‌های اطلاعاتی فوق و کلاس‌های مربوط به هریک از آن‌ها اقدام به هم‌پوشی لایه‌ها و ایجاد یک لایه ترکیبی جدید شد که از ترکیب این لایه‌های اطلاعاتی، ۷۶۵۸ کلاس مختلف تولید شد.

#### ۴-۳- مدل CA به کار گرفته شده در عملیات شبیه‌سازی

در مدل CA منطقه مورد مطالعه به سلول‌های عموماً مربع شکل یکسان (همانند مدل داده رستری) تقسیم‌بندی شده و مدل در بستر زمان اجرا می‌شود. تغییر وضعیت سلول  $C_{ij}$  (سلول موجود در سطر  $i$  و ستون  $j$ ) در زمان  $t+1$  به چهار عامل اساسی بستگی دارد که عبارتند از: وضعیت سلول در زمان  $t$ :  $S_t(C_{ij})$ ؛ پنجره همسایگی؛ وضعیت همسایگان سلول در زمان  $t$ :  $\Omega_t(C_{ij})$  و قوانین تبدیل<sup>۱</sup> وضعیت هر کدام از سلول‌ها در بستر زمان با توجه به قوانین تبدیل، به صورت خودکار به روز می‌شود. به گام‌های به روزرسانی از زمان  $t^0$  (مبدأ زمانی) تا  $t^n$  (زمان پایان عملیات) در اصطلاح تکرار<sup>۲</sup> اطلاق می‌شود. در مدل مورد استفاده در این تحقیق که به طور اساسی بر مبنای مدل ارائه شده به وسیله Wu در سال ۲۰۰۲ است از سه پارامتر مقادیر احتمال عمومی<sup>۳</sup>، ضریب همسایگی ( $\Omega$ ) و تابع نمایی استفاده شد. البته در مدل مورد استفاده در این تحقیق بر خلاف مدل ارائه شده به وسیله Wu روش متفاوتی برای محاسبه مقادیر احتمال عمومی به کار گرفته شد.

#### ۴-۴-۱- روش‌های محاسبه مقادیر احتمال عمومی

##### ۴-۴-۱-۱- روش Direct

در این روش پس از شناسایی کلیه سلول‌های توسعه یافته در یک دوره زمانی مثلاً در دوره ۷۱ تا ۷۵ و همچنین کلاس‌بندی منطقه مورد مطالعه براساس لایه‌های اطلاعاتی، تعداد سلول‌های توسعه یافته بر تعداد کل سلول‌های موجود در هر کلاس تقسیم شده و به این ترتیب برای کلیه سلول‌های موجود در آن کلاس (کلاس لایه ترکیبی)، مقادیر احتمال عمومی یکسانی

- 
1. Transition Rules.
  2. Iteration.
  3. Global



محاسبه می‌شود. به دلیل این که محاسبات انجام شده به طور مستقیم بر مبنای نمونه‌های مشاهده شده می‌باشد، در نتیجه این مقادیر احتمال با عنوان Pdirect نام‌گذاری شد و برای کلاس nام از لایه ترکیبی در صورتی که تعداد سلول‌های توسعه یافته در این کلاس  $M_n$  و تعداد کل سلول‌های موجود در آن  $S_n$  نامیده شود، مطابق رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$P_{direct}^n = M_n / S_n \quad \text{رابطه ۴}$$

#### ۴-۱-۲- روش Weights of Evidence

بر اساس این روش، مقادیر احتمال عمومی برای هر کلاس لایه ترکیبی از مجموع W+ هر یک از کلاس‌های لایه‌های اطلاعاتی تشکیل دهنده آن به دست می‌آید که خود شاخصی برای اندازه‌گیری پتانسیل توسعه است. در نتیجه برای هر یک از کلاس‌های لایه ترکیبی مقادیر  $\sum_{i=1}^n W_i^+$  (i: کلاس‌های لایه‌های اطلاعاتی مختلف) محاسبه شده و پس از Reclass کردن آن‌ها به ۳۴ رده (رده یک ماکزیمم و رده ۳۴ مینیمم)، مقدار PwoE برای کلاس n ام از لایه ترکیبی در صورتی که رده m را کسب کرده باشد، مطابق رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$P_{WoE}^n = (n / m) \quad \text{رابطه ۵}$$

#### ۴-۱-۳- روش ترکیبی

در روش ترکیبی، مقادیر احتمال با عنوان هیبرید<sup>۱</sup> با استفاده از پارامتر  $\lambda$  از ترکیب Pdirect و PwoE به صورت رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$P_{hybrid} = (P_{direct})^\lambda (P_{WoE})^{1-\lambda} \quad \text{رابطه ۶}$$

---

1. Hybrid

که در آن:  $0 < \lambda < 1$  از مزیت‌های مهم تابع فوق این است که بر اساس آن مشخص می‌شود آیا روند توسعه از نظر مکانی دنباله همان تغییرات دوره قبل است و بر اساس Pdirect به رشد خود ادامه می‌دهد و یا به سمت سایر مناطقی که بر اساس  $\sum_{i=1}^n W_i^+$  دارای پتانسیل بالای تغییر هستند، نیز متمایل می‌شود. برای بالا بردن دقت شبیه‌سازی در سطح محلی<sup>۱</sup> ضریب همسایگی ( $\Omega$ )، در مقادیر احتمال Global ضرب می‌شود. مقدار این ضریب از  $\frac{1}{9}$  تا ۱ متغیر است که بستگی به تعداد سلول‌های توسعه یافته در ۸ همسایه موجود در اطراف یک سلول دارد (همسایگی Moore). تابع نمایی آخرین ضریبی است که با ضرب شدن در مقادیر احتمال عمومی و ضریب همسایگی، مقدار احتمال نهایی سلول cij را تعیین می‌کند. اگر داشته باشیم:

$$P'(c_{ij}) = P_{Global} \times \Omega(c_{ij}) \quad \text{رابطه ۷}$$

آن‌گاه تابع نمایی مطابق رابطه (۸) تعریف می‌شود:

$$Y(P'(c_{ij})) = \exp\left[-\delta\left(1 - \frac{P'(c_{ij})}{P'_{MAX}}\right)\right] \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن  $\delta$  یک پارامتر ثابت به نام پارامتر انتشار<sup>۲</sup> و  $P'_{MAX}$  مقدار ماکزیمم  $P'$  در هر تکرار است. در مدل طراحی شده در این تحقیق هر تکرار معادل یک ماه است و در هر ماه مقدار  $P'$  به روز می‌شود. فاصله  $P'$  ها از  $P'_{MAX}$  نقش اساسی را در مقدار تابع نمایی بازی می‌کند. مقادیر احتمال نزدیک‌تر به مقدار ماکزیمم، تقویت شده و مقادیر دورتر تضعیف می‌شوند. شدت این تقویت و تضعیف را پارامتر  $\delta$  تعیین می‌کند.

1. Local  
2. Dispersion



#### ۴-۵- محاسبه مقدار احتمال نهایی برای هر سلول

با توجه به این که در هر تکرار، مقدار احتمال برای هر سلول تغییر می‌کند، در نتیجه  $P'$  و  $\Omega$  با اندیس  $t$  که نشان‌دهنده شماره تکرار است، نشان داده می‌شوند. در نتیجه داریم:

$$P'_t(c_{ij}) = P_{Global} \times \Omega_t(c_{ij}) \quad \text{رابطه ۹}$$

با اضافه شدن تابع نمایی برای هر سلول خواهیم داشت:

$$P''_t(c_{ij}) = P_{Global} \times \Omega_t(c_{ij}) \times \exp[-\delta(1 - P'_t(c_{ij}) / P'_t(MAX))] \quad \text{رابطه ۱۰}$$

پس احتمال این که هر سلول در تکرار  $t$  ام به سلول مسکونی تبدیل شود، برابر خواهد بود با  $P''_t(c_{ij})$ . [Wu, 2002] پیشنهاد کرده است که  $P''_t(c_{ij})$  بر مجموع تمام  $P''_t$  ها تقسیم و در تعدادی که برای هر تکرار نیاز است ضرب شود. چنان چه  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P''_t(c_{ij})$  نامیده شود، آن گاه برای این که  $q_t$  در هر تکرار شبیه‌سازی شود، مقدار احتمال نهایی برای هر سلول برابر خواهد بود با:

$$P_t^{final}(c_{ij}) = P''_t(c_{ij}) \times \frac{q_t}{s_t} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

در نهایت در نرم‌افزار شبیه‌سازی احتمال تغییر هر سلول با تابع توزیع یکنواخت بین صفر و یک، مقایسه می‌شود (روش Monte Carlo). در صورتی که  $P_t^{final}(c_{ij}) > \text{Random}[0,1]$  باشد آن گاه سلول  $c_{ij}$  به یک سلول توسعه یافته مسکونی تبدیل می‌شود و در غیر این

صورت به همان وضعیت اولیه باقی خواهد ماند. در این مدل چنان چه در محاسبات نهایی مقدار  $P_i^{final}(C_{ij})$  بزرگ‌تر از یک باشد، این مقدار برابر یک فرض می‌شود. در این تحقیق نرم‌افزار مناسب برای انجام عملیات شبیه‌سازی نیز طراحی شد. این برنامه دارای واسط کاربری است که به کاربر اجازه می‌دهد تا پارامترهای دلخواه خود را برای اجرای مدل وارد کرده و نتیجه را به صورت یک تصویر از نرم‌افزار دریافت کند (شکل ۴).



شکل ۴ واسط کاربری نرم‌افزار طراحی شده برای شبیه‌سازی

#### ۴-۶- مراحل انجام عملیات شبیه‌سازی

سال ۷۱ به عنوان مبدأ زمانی عملیات شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. سپس مدل برای سال‌های ۷۵، ۸۱ و ۱۴۰۰ نیز اجرا شد و علاوه بر آن که دقت شبیه‌سازی در گام اول (سال ۷۵)، بررسی



شد، براساس همان اطلاعات دوره قبل (سال‌های ۷۱ تا ۷۵) شبیه‌سازی تا سال ۸۱ ادامه پیدا کرد و دقت خروجی در این سال نیز بررسی شد.

در واقع در این تحقیق سال ۸۱ و وضعیت اراضی مسکونی موجود در آن نمادی از آینده است و مقایسه آن با پیش‌بینی‌های انجام شده به وسیله نرم‌افزار شبیه‌سازی، نقش اساسی را در پذیرفتن مدل به عنوان مدلی کارا و قابل اطمینان بازی می‌کند. در این صورت عملیات شبیه‌سازی به ترتیب ذیل انجام شد:

الف- شبیه‌سازی سال ۷۵: شامل شبیه‌سازی با مدل Direct (منظور از مدل Direct مدلی است که در آن در مقادیر احتمال عمومی آن از Pdirect استفاده شود) و با مقادیر  $\delta$  از ۱ تا ۳۵ و همچنین شبیه‌سازی با مدل‌های WoE و Hybrid؛

ب- شبیه‌سازی سال ۸۱: شامل شبیه‌سازی با مدل‌های WoE, Direct و مدل Hybrid با مقادیر  $\lambda = 0/9$  تا  $0/1$  همراه با کلاس‌های قدیمی و به موقع شده می‌باشد.

ج- شبیه‌سازی سال ۱۴۰۰: شامل شبیه‌سازی با مدل WoE و  $\delta = 20$  و با همان نرخ رشد در دوره زمانی ۷۵ - ۸۱

#### ۴-۷- روش ارزیابی دقت

مهم‌ترین معیار برای ارزیابی دقت شبیه‌سازی در این تحقیق میزان اشتراک موجود بین لایه پیش‌بینی و واقعیت موجود در منطقه در نظر گرفته شد ضمن این که برای ارزیابی دقت پارامتری به نام تلرانس نیز تعریف شد. اگر لایه نقطه‌ای تغییرات واقعی کاربری مسکونی را در نظر بگیریم و به ازای هر نقطه یک حریم با شعاعی معین بزنیم، آن گاه اگر نقاط پیش‌بینی شده در داخل پلیگونیهای حاصل از عملیات حریم‌گذاری قرار گیرند، این نقاط نیز به عنوان نقاط درست پیش‌بینی شده تلقی خواهند شد و شعاع حریم نیز به عنوان تلرانس (میزان حداکثر خطا) در نظر گرفته می‌شود. از مهم‌ترین دلایل استفاده از تلرانس به طور اساسی لحاظ کردن خطاها و عدم تطابق هندسی بین لایه‌ها می‌باشد، در ضمن ارزیابی نتایج با این روش امکان ارائه سطوح مختلفی از دقت پیش‌بینی تغییرات کاربری را در برنامه‌ریزی‌های محیطی در سطوح مختلف (کوچک و بزرگ مقیاس) امکان‌پذیر می‌سازد.

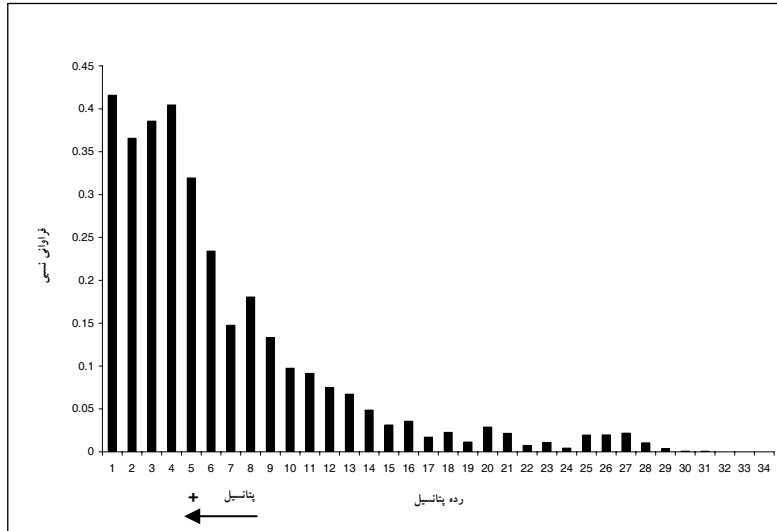
## ۵- یافته‌های تحقیق

### ۵-۱- سال ۷۵

در این مرحله تعداد سلول‌های درست پیش‌بینی شده حاصل از ۳ بار شبیه‌سازی گسترش اراضی مسکونی در سال ۷۵ با مدل Direct و با مضارب ۵، از ۱ تا ۳۵ برای  $\delta$  اجرا شد. هم‌چنین مشاهده گردید که از  $\delta = 15$  به بعد دقت به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد و از آن به بعد در دقت شبیه‌سازی تغییر چشمگیری حاصل نمی‌شود. در نتیجه برای نمونه، دقت مدل در  $\delta = 25$  مورد بررسی قرار گرفت (به عنوان مدل بهینه). در این حالت دقت شبیه‌سازی برابر  $61/47$  درصد است. چنان‌چه تفرانس را به اندازه یک سلول (افقی و اریب) در نظر گرفته شود، دقت شبیه‌سازی برابر با  $76/78$  درصد و با تفرانس دو سلول برابر با  $83/45$  درصد خواهد بود. ضمن این که دقت مدل‌های WoE و Hybrid نسبت به مدل Direct پایین‌تر است.

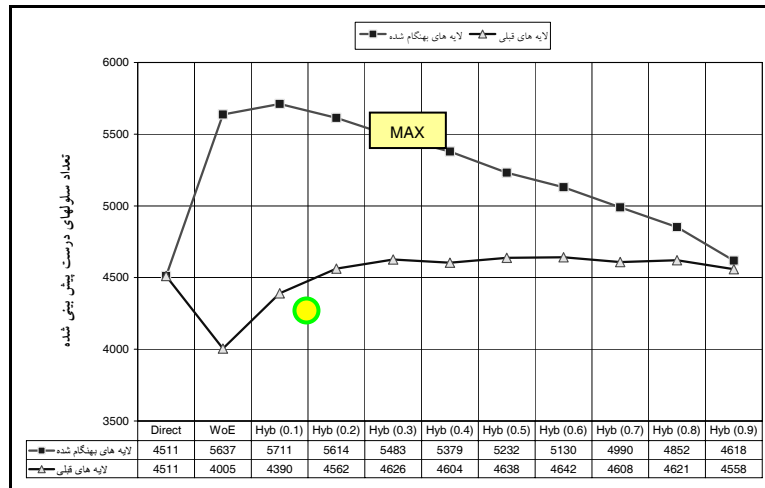
### ۵-۲- سال ۸۱

در شبیه‌سازی برای سال ۸۱ مبدأ شبیه‌سازی واقعیت موجود در سال ۷۵ انتخاب شد. مقادیر احتمال WoE محاسبه شده برای شبیه‌سازی سال ۷۵، براساس مجموع W+ کلاس‌های لایه‌های اطلاعاتی سال‌های ۶۵ و ۷۱ محاسبه شد و از آن جایی که مبدأ شبیه‌سازی برای سال ۸۱، براساس واقعیت موجود در سال ۷۵ است، در این صورت به نظر می‌رسد مقادیر احتمال WoE نیاز به بهنگام شدن دارند؛ یعنی لایه فاصله از کاربری مسکونی سال ۷۱ جایگزین لایه فاصله از کاربری مسکونی سال ۶۵ و لایه فاصله از کاربری مسکونی توسعه یافته در دوره زمانی ۷۱ تا ۷۵ جایگزین لایه فاصله از کاربری مسکونی توسعه یافته در دوره زمانی ۶۵ تا ۷۱ می‌شود. همان‌طور که پیش از این نیز اشاره شد، سال ۸۱ نمادی از آینده است؛ در نتیجه فرض بر این است که از چگونگی پراکندگی توسعه اراضی مسکونی در این سال اطلاعی در دست نیست، در این صورت برای کلاس‌های جدید نیز از همان وزن‌های دوره قبل استفاده شد. اگر نمودار فراوانی نسبی سلول‌های توسعه یافته سال ۸۱ در کلاس‌های به روز شده که بر اساس  $\sum_{i=1}^n W_i^+$  رده‌بندی شده‌اند و به اصطلاح کلاس‌های پتانسیل نامیده شده‌اند، ترسیم شود (شکل ۵)، روشن می‌شود که فراوانی نسبی توسعه اراضی مسکونی در سال ۸۱ در کلاس‌های با رده بالاتر بیش‌تر است.



شکل ۵ فراوانی نسبی سلول‌های توسعه یافته در کلاس‌های رده‌بندی شده پتانسیل

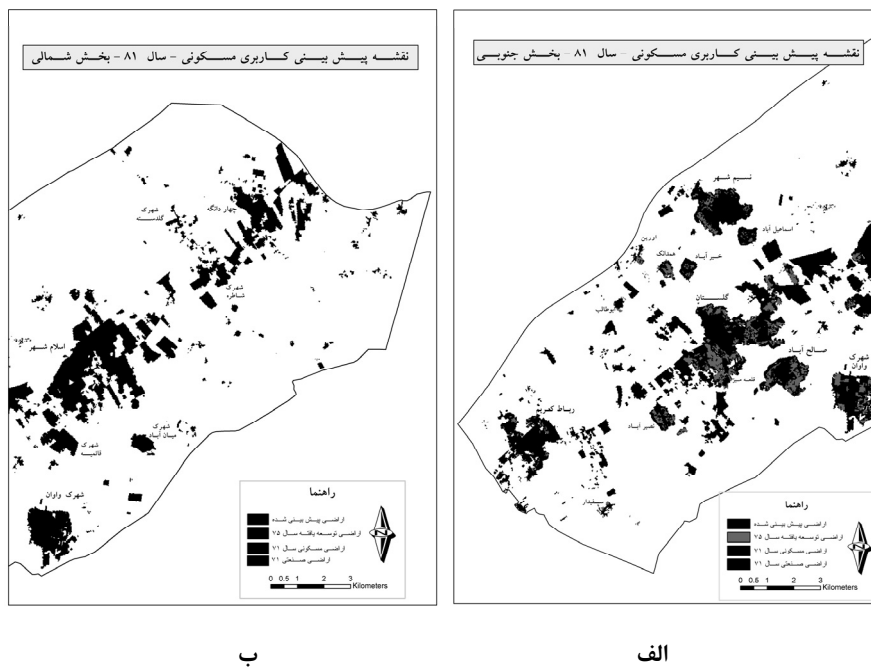
برای سال ۸۱ هر سه مدل WoE, Direct و Hybrid ( $\lambda = 0.1$  تا  $0.9$ ) در حالت لایه‌های قدیمی و به روز شده و با پارامتر  $\delta = 20$  اجرا شد که نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶ نمودار نتایج شبیه‌سازی سال ۸۱ با کلاس‌های قدیمی و به روز شده

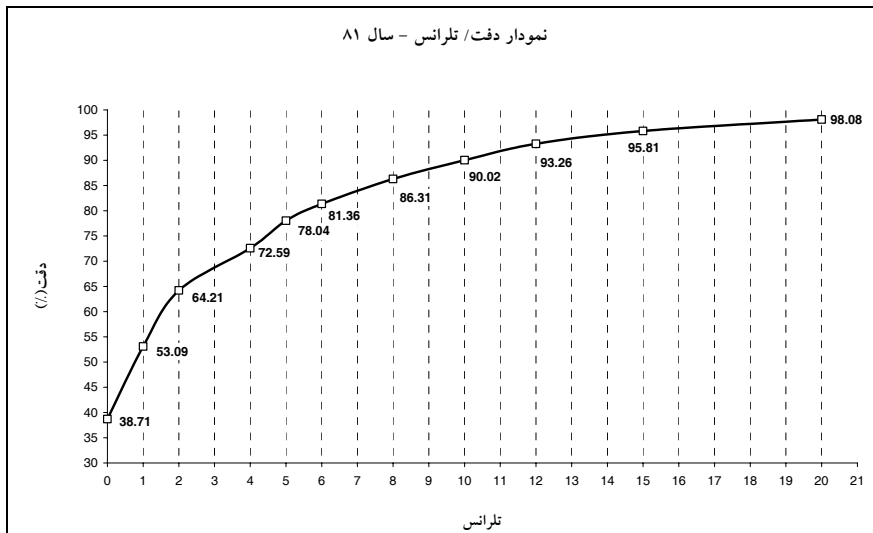


نتایج نشان از بالاتر بودن دقت شبیه‌سازی در حالت لایه‌های به روز شده است ضمن این که مدل (۰/۱) Hybrid، مدل بهینه می‌باشد که نتیجه شبیه‌سازی آن در شکل ۷ ارائه شده است.

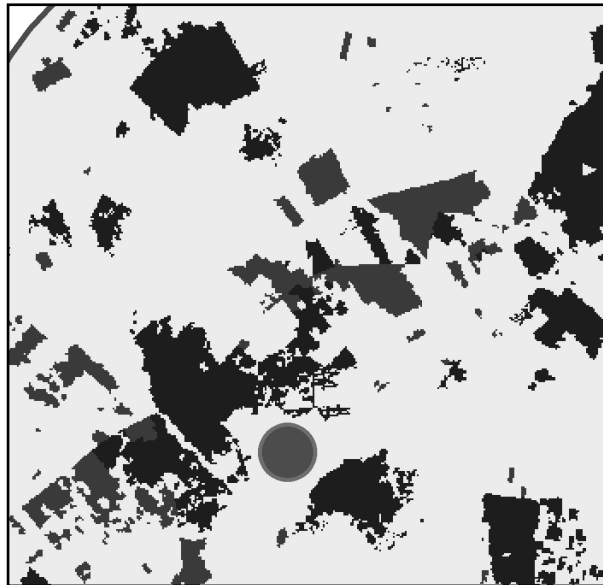


شکل ۷ نقشه پیش‌بینی اراضی مسکونی برای سال ۸۱: الف: بخش شمالی، ب: بخش جنوبی منطقه

دقت این مدل در حالت سلول به سلول برابر با  $38/71$  درصد است اما این دقت با تفرانس یک سلول (افقی و اریب) برابر  $53/09$  درصد و با تفرانس دو سلول (افقی و اریب) برابر  $64/21$  درصد می‌باشد که افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد در نهایت دقت با تفرانس ۵ سلول (خطای حداکثر ۱۰۰ متر) به  $78/04$  درصد می‌رسد (شکل ۸- الف).



الف



ب

شکل ۸ الف: نمودار دقت/تولرانس سال ۸۱، ب: وضعیت نسبی حداکثر خطا در منطقه مطالعاتی

### ۵-۳- سال ۱۴۰۰

برای شبیه‌سازی سال ۱۴۰۰ از مدل WoE استفاده شد، زیرا مقادیر احتمال Direct متعلق به دوره زمانی ۷۱ تا ۷۵ بوده و اطلاعات قدیمی‌تری هستند و استفاده از آن ممکن است منجر به کاهش دقت پیش‌بینی شود.

شبیه‌سازی برای سال ۱۴۰۰ اطلاعاتی کلی را در مورد وضعیت توسعه اراضی در آینده ارائه می‌کند. با بررسی اجمالی می‌توان دریافت بیش‌تر اراضی مسکونی پیش‌بینی شده در اطراف مناطق توسعه یافته در سال ۷۵ قرار دارند. از نکات قابل توجه می‌توان به اتصال روستای اسماعیل‌آباد به نسیم‌شهر، رشد شهرک‌های کوچک شمال اسلامشهر و رشد بالای شهرستان رباط کریم اشاره کرد. همچنین میزان رشد اراضی مسکونی در دوره زمانی ۷۵ - ۱۴۰۰ برای اسلامشهر ۱/۵، رباط کریم ۲/۳۵، گلستان و مناطق مسکونی اطراف آن ۳/۲۵، چهاردانگه ۰/۶۶، نسیم شهر ۱/۶۴، شهرک واوان ۱/۹۴ و صالح‌آباد ۱/۴۴ کیلومتر مربع پیش‌بینی شد.

### ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق شبیه‌سازی برای سال ۷۵ با سه مدل WoE، Direct و Hybrid اجرا شد و همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، دقت مدل Direct از دو مدل دیگر بالاتر بود؛ زیرا در این حالت مقادیر احتمال عمومی چنان‌چه پیش‌تر به آن اشاره شد، فقط بر اساس نسبت تعداد پیکسل‌های تغییر یافته به کل پیکسل‌های موجود در هر کلاس لایه ترکیبی، بین دو دوره ۷۱ و ۷۵ به دست می‌آید و از آنجایی که تأثیرگذارترین پارامتر در مدل، تابع احتمال عمومی است، در نتیجه بدیهی به نظر می‌رسد که دقت مدل Direct در سال ۷۵ از دو مدل دیگر بالاتر باشد. اما در مورد شبیه‌سازی سال ۸۱ همان‌طور که در شکل ۶ دیده شد، دقت مدل‌های WoE و Hybrid نسبت به مدل Direct بالاتر بود که نشان می‌دهد دقت مدل Direct به دلیل قدیمی بودن اطلاعات آن نسبت به مدل WoE (که رشد اراضی مسکونی را در سایر مناطقی که دارای پتانسیل بالای توسعه هستند نیز پیش‌بینی می‌کند) پایین‌تر است.

دقت مدل بهینه در سال ۸۱ ( $\delta = 20$ )، Hybrid (۰/۱) در حالت سلول به سلول (بدون تفرانس) تنها ۳۸ درصد بود. در این جا می‌توان به اهمیت تفرانس پی برد، دقت این مدل با



تلرانس یک سلول حدود ۵۳ درصد و با افزایش تلرانس همان گونه که در شکل (۸-الف) مشاهده می‌شود روندی صعودی را طی می‌کند. دقت این مدل با تلرانس ۵ سلول حدود ۷۸ درصد است؛ یعنی با خطای حداکثر ۱۰۰ متر، نزدیک به ۸۰ درصد مناطق توسعه یافته مسکونی قابل پیش‌بینی است. این دقت با خطای ۴۰۰ متر به ۹۸ درصد می‌رسد؛ یعنی تقریباً حداکثر خطای پیش‌بینی برابر ۴۰۰ متر است که در شکل (۸-ب) وضعیت نسبی حداکثر خطا را نسبت به منطقه مورد مطالعه به صورت حریمی با شعاع ۴۰۰ متر می‌توان مشاهده کرد که در مقایسه با کل منطقه چندان وسیع نیست.

به عنوان جمع‌بندی می‌توان گفت مدل‌های طراحی شده به طور کلی دارای دو قابلیت هستند:

۱- چنانچه توسعه از نظر مکانی تنها در یک سری مناطق خاص روی دهد و ادامه پیدا کند، آن‌گاه مدل Direct قابلیت شبیه‌سازی رشد آن مناطق را تا حدود زیادی داراست (دقت این مدل عموماً در دوره‌های زمانی کوتاه‌تر نسبت به سایر مدل‌ها بالاتر است)، ضمن این که ضریب همسایگی و تابع نمایی نیز به نوبه خود در دقت مدل تأثیرگذار هستند.

۲- چنانچه توسعه اراضی در سایر مناطقی که با احتساب وزن‌ها و احتمالات WoE به عنوان مناطق با پتانسیل بالا شناخته شده‌اند، نیز روی دهد - که معمولاً در درازمدت این وضعیت را می‌توان انتظار داشت - آن‌گاه متناسب با درجه تمایل توسعه به سمت این مناطق، مدل‌های WoE و Hybrid، قابلیت بیش‌تری برای پیش‌بینی گسترش اراضی دارند. بالا بودن دقت این مدل‌ها در دوره‌های زمانی بلندتر نشان‌دهنده قابلیت فوق است.

اما چنانچه توسعه به طور تصادفی در مناطق خاصی که هیچ کدام از شرایط فوق را ندارند پدید آید، آن‌گاه طبیعی است که مدل قادر به پیش‌بینی چنین الگویی نخواهد بود. البته یادآوری این نکته ضروری است که پتانسیل سلول‌ها برای توسعه در این تحقیق به وسیله تعداد محدودی از لایه‌های مکانی و کلاس‌های معدودی از آن‌ها تعریف شد، بنابراین ممکن است توسعه برخی سلول‌ها در شرایط فوق به صورت تصادفی و بی‌قاعده باشد ولی در صورت افزوده شدن لایه‌های اطلاعاتی جدید نظیر قیمت زمین یا محدودیت‌های قانونی و سایر پارامترهای اقتصادی - اجتماعی و یا حتی افزایش تعداد کلاس‌های لایه - های اطلاعاتی فعلی بتوان این گونه توسعه‌ها را نیز توجیه کرد. از مزایای مهم شبیه‌سازی امکان اجرای مدل برای

سال‌های آینده با توجه به اطلاعات موجود است که در این تحقیق نتایج آن برای سال ۱۴۰۰ ارائه شده است.

## ۷- منابع

- کیانی ا؛ شبیه‌سازی و ارزیابی کارایی سنسورهای هوشمند و اتوماتای سلولی در تحلیل کاربری فیزیکی ابر نقشه شهر؛ رساله دکترا، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۳.
- Almeida, C. M., C. L. Pennachin, A. M. V. Monteiro, G. Câmara, B. S. Soares-Filho, G. C. Cerqueira and M. Batty; Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: Computers, Environment and Urban Systems, 2002.
  - Beneson I., Torrens P.; Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena; John Wiley, 2004.
  - Bonham-Carter G. F.; Geographic information systems for geoscientists: Modeling with GIS; Pergamon, 1994.
  - Candau J. T.; Temporal calibration sensitivity of the SLEUTH urban growth model; University of California, Santa Barbara, 2002.
  - Clarke K. C. S. Hoppen, Gaydos L.; A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area; Environment and Planning B., 24: 247-261, 1997.
  - Jantzô C. S. Goetz, Shelley M. Using the SLEUTH urban growth model to simulate the impacts of future policy scenarios on urban land use in the Baltimore-Washington metropolitan area; Environment and Planning B: Planning and Design 2003, Vol. 30: 251-271, 2003.
  - Junfeng J.; Transition rule elicitation for urban cellular automata models, Case study: Wuhan, China: master's thesis; Institute For Geo-Information Science And Earth , 2003.



- Liu Y. Phinn S. R ; Developing a cellular automation model of urban growth incorporating fuzzy set approaches ; 6<sup>th</sup> International Conference on Geocomputation, University of Queensland, Brisbane, Australia, 2001.
- Sui D. Z. , Zeng H.; Modeling the dynamics of landscape structure in Asia's emerging desakota regions: A case study in Shenzhen; Landscape and Urban Planning, 53(1-4): 37-52, Observation, Enschede, The Netherlands, 2001.
- Wu F. ; An experiment on the generic polycentricity of urban growth in a cellular automatic city; Environment and Planning B, 25:731-752, 1998.
- Wu F.; A parameterised urban cellular model combining spontaneous and self-organising growth. Geocomputation: Innovation in GIS 7. P. A. a. D. Martin. London, Taylor & Francis, London: 73-85, 2000.
- Wu F.; Calibration of stochastic cellular automata: The application to rural-urban land conversions, int. j. Geographical Information Science, 16 (8): 795 –818, 2002.