

ارزیابی تاثیر تغییر مقیاس در شبیه‌سازی فرآیند توسعه شهری با استفاده از اتوماتای سلولی پیوسته

مسعود فرسایي*^۱، فرشاد حکیم پور^۲

^۱ کارشناس ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی - گروه مهندسی نقشه‌برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
m.farsaie@ut.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
farshad@hakimpour.com

(تاریخ دریافت اردیبهشت ۱۳۹۱، تاریخ تصویب خرداد ۱۳۹۳)

چکیده

اتوماتای سلولی از روش‌های پرکاربرد و رایج در شبیه‌سازی فرآیند توسعه شهری می‌باشد که در سال‌های اخیر، پیاده‌سازی‌های مختلفی بر مبنای این روش‌ها جهت مدل‌سازی نحوه گسترش شهرها صورت گرفته است. مقیاس مدل یکی از مشخصه‌های مهم در مدل‌های توسعه شهری است که در نتایج خروجی این مدل‌ها در فضاهای رستری موثر می‌باشد. در این تحقیق تاثیر تغییر مقیاس مدل بر نتایج خروجی یک نوع اتوماتای سلولی پیوسته در فضای رستری مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا به بررسی مبانی پایه و اجزای سازنده مدل پیشنهادی اتوماتای سلولی پرداخته می‌شود و خطاهای مربوط به عدم قطعیت در سلول‌های این مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد، سپس به بررسی رفتار مدل پیشنهادی بروی یک شهر واقعی پرداخته می‌شود. منطقه مورد مطالعه شهر اصفهان است که داده‌های مربوط به پوشش زمین در این منطقه با کمک روش‌های طبقه‌بندی بانظارت از تصاویر ماهواره‌ای استخراج شده است. آزمایش تغییر مقیاس مدل اتوماتای سلولی پیوسته براساس دو استراتژی مختلف پیاده‌سازی شده است در استراتژی اول ضریب افزایش سطح سلول در مقیاس‌های مختلف یکسان در نظر گرفته شده و در استراتژی دوم مقدار آن بر حسب مقیاس مدل تغییر می‌کند. برآورد دقت مدل در هر مقیاس تولید شده از داده‌های مربوط به پوشش زمین براساس شاخص مجذور میانگین مربعات خطاها صورت گرفته است. در استراتژی اول در گام اجرایی با ابعاد سلولی ۶۸٫۵ متر بهترین شبیه‌سازی بر اساس این شاخص رخ داده است و بیشترین میزان انحراف کران بالا از پایین بر اساس مجذور میانگین مربعات خطاها برابر با ۰٫۰۰۳۵ متر بوده است، اما در استراتژی دوم بهترین نتیجه در گام اجرایی با ابعاد سلولی ۶۳٫۵ متر و بیشترین میزان انحراف کران بالا از پایین برابر با ۰٫۱۰۵۵ متر بوده است.

واژگان کلیدی: اتوماتای سلولی، مدل سلولی، تاثیر مقیاس، شبیه‌سازی، مدل‌سازی، تغییر پوشش، توسعه شهری

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

ها است. تحقیقات زیادی جهت بررسی تاثیر این عامل بر روند مدل سازی صورت گرفته است [۷، ۶، ۵]، اما با این وجود این عامل همچنان به عنوان یک چالش در مدل های توسعه شهری مطرح است [۵]. در نگاه اول شاید چنین به نظر برسد که با افزایش عدد مقیاس و وارد شدن جزئیات بیشتر به مدل میزان دقت نتایج خروجی آن افزایش می یابد اما پیاده سازی های عملی در این زمینه نشان داده است که برای هر منطقه جغرافیایی و هر دسته عوامل موثر در توسعه مقدار مقیاس بهینه متفاوت می باشد.

در این تحقیق به بررسی تاثیر مقیاس داده های ورودی بر مدل های اتوماتای سلولی پیوسته در یک فضای رستری می پردازیم. در ابتدا یک مدل اتوماتای سلولی تمام پیوسته بر مبنای تعاریف پیشین مدل های اتوماتای سلولی پیوسته وضعیت طراحی گردیده است. در ادامه شاخص ارزیابی مناسب برای مدل پیشنهادی با توجه به نوع مسئله ارائه می گردد و در نهایت ارزیابی تغییر مقیاس برای مدل پیشنهادی بروی یک منطقه و توسط شاخص های معرفی شده صورت می گیرد. منطقه مورد مطالعه تحقیق شهر اصفهان بوده و داده های مورد نیاز با استفاده روش های طبقه بندی با نظارت از تصاویر ماهواره ای Landsat در سال های ۱۹۹۰ و ۲۰۰۰ میلادی استخراج شده است.

۲- مفاهیم اولیه

به طور کلی فرآیند اتوماتای سلولی یک روش پایین به بالا می باشد که بروی یک شبکه از سلول ها اجرا می شود [۱]، که این شبکه می تواند به صورت چندضلعی های منظم یا غیرمنظم تعریف شده باشد و وضعیت هر سلول آن در هر بار تکرار می تواند بر اساس یک تابع انتقال تغییر کند [۹، ۸] این تابع انتقال در مسائل مربوط به تغییر کاربری و پوشش زمین به فرم رابطه (۱) نمایش داده می شود [۱۰]:

$$C_{ij}^{t+1} = f(C_{ij}^t, \bar{N}_{ij}^t, S_{ij}^t, R_{ij}^t) \quad (1)$$

که در این رابطه C_{ij}^t و C_{ij}^{t+1} به ترتیب بیانگر وضعیت سلول ij در زمان های t و $t+1$ بوده، \bar{N}_{ij}^t بیانگر تاثیر فضای همسایگی بر تغییر وضعیت یک سلول بوده که در بردارنده

روند توسعه شهرنشینی از مسائل مورد توجه در کشورهای در حال توسعه می باشد به گونه ای که نرخ رشد این پدیده در این کشورها و به خصوص در شهرهای بزرگ در حال افزایش است. توسعه سریع و مدیریت نشده شهرنشینی در نواحی مجاور شهرها نه تنها موجب افزایش مشکلات اجتماعی و اقتصادی در این نواحی می گردد، بلکه منجر به اثرات سو زیست محیطی خواهد شد. تحقق دستیابی به یک توسعه پایدار از اهداف برنامه ریزان و مدیران شهری در این کشورها می باشد. مدل سازی روند توسعه شهری به عنوان یک ابزار کارآمد می تواند به تصمیم گیری های کلان مدیریتی کمک نموده و با توجه به عوامل مختلف، یک برآورد از وضعیت آینده شهرهای مورد بررسی ارائه می دهد. مدل های گوناگونی جهت مدل سازی فرآیند توسعه شهری مورد استفاده قرار می گیرند و به دو دسته کلی تقسیم می شوند، دسته ای از این مدل ها به ارزیابی مناطق مستعد توسعه در نواحی اطراف شهرها پرداخته و احتمال توسعه را مورد بررسی قرار می دهند و دسته دوم به شبیه سازی فرآیند توسعه بر اساس پارامترهای مختلف محیطی و انسانی می پردازند [۱] اتوماتای سلولی از روش های مرسوم جهت شبیه سازی روند توسعه شهری می باشد که در سال های گذشته مورد استفاده قرار گرفته است [۲]. اتوماتای سلولی یک بستر ساده و قابل انعطاف را برای شبیه سازی پدیده های زمین مرجع فراهم می کند و این قابلیت را دارا می باشد که به سادگی با سایر روش های موجود جهت ارزیابی و برآورد مناطق مستعد توسعه تلفیق گردد [۳]. مدل های اتوماتای سلولی در دو فضای رستری و برداری جهت مدل سازی تغییرات پوشش و کاربری زمین مورد استفاده قرار می گیرند [۴]، اما با این وجود طراحی این مدل ها بیشتر در فضاهای رستری صورت گرفته است. این امر به علت ساختار ساده تر این مدل ها در فضای رستری و ماهیت رستری اکثر منابع داده در مسائل مدل سازی زمین می باشد.

علاوه بر انتخاب عوامل دخیل در مدل سازی و ساختار مدل طراحی شده، فرمت داده های ورودی به مدل از اهمیت ویژه ای برخوردار است و می تواند در نتایج نهایی تاثیر بسزایی داشته باشد [۵]. مقیاس مشخصه اصلی در میان مشخصات قابل ذکر برای داده های ورودی به مدل های توسعه شهری می باشد که در فضاهای رستری معادل با اندازه ابعاد پیکسل -

۱ Bottom-up

که در این رابطه N تعداد کل سلول‌های موجود در همسایگی سلول ij و w_l پارامتر وزن برای سلول l است که تابعی از فاصله بین سلول همسایه l با سلول مرکزی می‌باشد. قرار گرفتن پارامتر وزن در این رابطه بر مبنای اصل اول جغرافیا است که اشیا در دنیای واقعی با یکدیگر مرتبط هستند اما ارتباط اشیا در دنیای واقعی با یکدیگر [۱۳]. ساده‌ترین راه برای وزن‌دهی به هر سلول استفاده از معکوس فاصله می‌باشد هر چند که سایر توابع را نیز می‌توان مورد استفاده قرار داد [۱۰]. محاسبه تاثیر همسایگی بر اساس شمارش وضعیت‌ها در اطراف یک سلول روش مرسوم در مدل‌های اتوماتای سلولی می‌باشد اما با این روش در مدل‌سازی هیچ‌گونه بازخورد مناسبی از مقیاس جغرافیایی منطقه در مدل وجود نخواهد داشت و این کمبود در مسائل مربوط به تحلیل چند مقیاسی^۴ بیشتر نمایان می‌شود.

۳- مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی بر مبنای اتوماتای سلولی جغرافیایی با ساختار پیوسته وضعیت ساخته می‌شود به گونه‌ای که هر سلول وضعیت جاری خود را بر اساس ارزیابی وضعیت‌های موجود در منطقه حائل^۵ اطراف خود انجام می‌دهد. نکته مهمی که در این مدل وجود دارد بیان پیوسته برای عرض این منطقه حائل می‌باشد، علاوه بر این اطلاعات مربوط به مقادیر و جایگاه عوارض جغرافیایی در هر سلول پیوسته از اهمیت ویژه‌ای در مدل‌سازی برخوردار است که باید در تعاریف اولیه به آن پرداخته شود. این بخش از تحقیق به بیان جزئیات مدل پیشنهادی می‌پردازد.

۳-۱- تعریف سلول

هر مدل اتوماتای سلولی که در مدل‌سازی پدیده‌های جغرافیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد از مجموعه‌ای از سلول‌های مجزا تشکیل شده است که معمولاً در یک فضای دوبعدی در کنار هم قرار گرفته و این فضا توسط سلول‌ها افزاز می‌شود، در حقیقت هر سلول بیانگر یک واحد از سطح زمین است. این سلول‌ها در ساختار رسمی به فرم مربع بوده و در یک گرید منظم در کنار هم قرار می‌گیرند. دلیل تعریف

ویژگی‌های محلی آن نیز می‌باشد. S_{ij}^t بیانگر میزان استعداد^۲ سلول ij جهت تغییر وضعیت بر مبنای پارامترهای جهانی [۱۱] و در نهایت R_{ij}^t برآیند عوامل مقاومی است که نقش محدودکننده را در فرآیند شبیه‌سازی بازی می‌کنند، این پارامتر براساس معادله‌ای به فرم رابطه (۲) نمایش داده می‌شود [۱۰] که در این رابطه I_{ij}^t بیانگر میزان تمایل سلول جهت نگهداری وضعیت جاری آن، EC_{ij}^t بیانگر برآیند قیده‌های محیطی و PC_{ij}^t بیانگر برآیند قیده‌های انسانی می‌باشد. منظور از قیده‌های انسانی، عواملی نظیر سیاست‌های کلان توسعه در مدل‌های تغییر کاربری زمین است.

$$R_{ij}^t = g(I_{ij}^t, PC_{ij}^t, EC_{ij}^t) \quad (2)$$

پارامتر تاثیر همسایگی نقش کلیدی در رابطه انتقال اتوماتای سلولی بر عهده دارد و در حقیقت این پارامتر ویژگی‌های محلی را در فرآیند مدل‌سازی وارد می‌کند. بدون این پارامتر، مدل تغییر کاربری و پوشش زمین تبدیل به یک فرآیند بالا به پایین^۳ بر مبنای پارامترهای جهانی می‌گردد. این پارامتر بر اساس تابع ارزیابی همسایگی و وضعیت‌های سلول‌های مجاور یک سلول محاسبه می‌گردد فرم کلی تابع ارزیابی همسایگی به فرم رابطه (۳) است [۱۲].

$$\bar{N}_{ij}^{t+1} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \dots \\ n_k \end{bmatrix} = h(C_{(i-m)(j-n)}^t, \dots, C_{(i+m)(j+n)}^t) \quad (3)$$

در این رابطه n_k معادل میزان تاثیر سلول‌هایی با وضعیت k در همسایگی سلول ij می‌باشد. روش‌های مختلفی می‌تواند جهت برآورد مقادیر بردار تاثیر همسایگی استفاده شود اما برآورد مقادیر این بردار برای هر سلول در مدل سلولی زمین بر مبنای چگالی وضعیت‌ها در همسایگی آن سلول می‌باشد. رابطه (۴) نحوه برآورد مقادیر تاثیر همسایگی بر اساس این روش را ارائه می‌دهد.

$$n_k = \sum_{l=1}^N (w_l b_l^k) \quad (4)$$

$$b_l^k = \begin{cases} 1 & C_{ij} = C_l \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (5)$$

۴ Multi resolution analysis
۵ Buffer area

۲ Suitability
۳ Top-down

هر مقدار بردار وضعیت بیانگر میزان مساحت تحت پوشش سلول توسط یک نوع عارضه جغرافیایی می باشد. تمام مقادیر بردار وضعیت باید بین ۰ و ۱ تعریف شده و شرط (۷) باید در هر زمان برای هر سلول مدل برقرار باشد. در این مدل سلولها هیچگونه اطلاعاتی در مورد مکان و نحوه قرارگیری عوارض در ناحیه خود ندارند، به عبارت دیگر در محاسبات مربوط به انتقال اتوماتای مدل، برای عوارض داخلی هر سلول پراکندگی یکنواختی در نظر گرفته شده است و روابط مکانی موجود بین آنها در مدل سازی حذف می شوند.

۳-۲- تابع ارزیابی همسایگی

همان طور که ذکر شد هر سلول یک منطقه حائل در اطراف خود را برای بررسی تاثیر پارامتر همسایگی مورد جستجو قرار می دهد. این منطقه حائل دارای یک عرض پیوسته بوده که از لبه های بیرونی سلول آغاز می شود. این عرض پیوسته با ماهیت گسسته سلولها در فضای سلولی در تضاد خواهد بود و موجب می شود تا بعضی از سلولها به طور کامل در این منطقه حائل قرار نگیرند. پارامتر ضریب تقاطع برای این منظور باید در برآورد میزان تاثیر همسایگی وارد شود. منظور از ضریب تقاطع نسبت اشتراک منطقه حائل و سلول همسایه به مساحت سلول می باشد، اگر دو ناحیه فاقد هیچ گونه ناحیه اشتراکی باشند مقدار این پارامتر برابر با ۰ و اگر منطقه حائل به طور کامل سلول را بپوشاند مقدار این پارامتر برابر با ۱ خواهد شد. رابطه (۸) نحوه محاسبه ضریب تقاطع را براساس مساحت سلول (R) و منطقه حائل (B) نمایش می دهد. در نهایت با توجه به این تعریف و فرض یکنواختی پراکندگی عوارض در سلول های موجود در همسایگی، تابع ارزیابی همسایگی به فرم رابطه (۹) بیان می شود.

$$a'_l = \frac{R_l \cap B_{ij}}{R_l} \quad (8)$$

$$\bar{A}_{ij} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_k \end{bmatrix} = \sum_l^N [R_l w_l (a'_l \bar{C}_{ij} + \bar{e}_l)] \quad (9)$$

سلولها در این ساختار این است که تصاویر ماهواره ای منبع اصلی داده در مدل سازی پدیده های زمین مرجع می باشد و محاسبات مربوط به تبدیل اطلاعات پیکسل های هر تصویر به سلولهایی با ساختار فوق به مراتب ساده تر هستند. با این وجود، تلاشهایی نیز جهت طراحی مدلهایی با سلولهای نامنظم در فضای برداری نیز صورت گرفته است که با عنوان مدل های اتوماتای سلولی برداری یا شئی گرا شناخته می شوند [۱۴، ۱۵، ۱۶]. در این تحقیق هر سلول جغرافیایی به یک منطقه از سطح زمین با مختصات زمین مرجع اشاره دارد و مرزهای سلول به صورت ثابت تعریف می گردد. به صورت پیش فرض سلولها به فرم مربع در نظر گرفته شده اند اما تمامی تعاریف بر اساس تبدیلات توپولوژیک قابل تعمیم به مدل های برداری نامنظم می باشند، هر چند که مدل های برداری نامنظم در مدل سازی پدیده هایی نظیر توسعه شهر یا گسترش آتش به دلیل وجود مرزهای ثابت برای هر سلول قابل پیاده سازی نیست.



شکل ۱- ذخیره سطح پوشش عوارض در سلول

هر سلول جغرافیایی باید میزان سطح پوشش مناظر با هر عارضه را در محدوده خود نگهداری کند (شکل ۱) و این امر با تعریف یک ساختار پیوسته برای تشریح وضعیت سلول امکان پذیر می شود. وضعیت یک سلول با ساختار پیوسته به جای انتخاب یک وضعیت معین از میان مجموعه وضعیتها بر مبنای یک بردار وضعیت تعیین می شود [۱۷، ۱۸]. اندازه این بردار برابر با تعداد وضعیت های محتمل در مدل و هر وضعیت بیانگر یک عارضه جغرافیایی در فرآیند مدل سازی است.

$$\bar{C}_{ij} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \dots \\ s_k \end{bmatrix}, \quad s_k \in [0,1] \quad (6)$$

$$\sum s_m = 1 \quad (7)$$

منطقه حائل در مقابل اندازه سلول‌ها کم باشد، میزان تاثیر این خطا در مدل افزایش می‌یابد.

۳-۳- تابع انتقال

تابع انتقال در این مدل ساختاری مشابه با رابطه (۱) خواهد داشت با این تفاوت که میزان تاثیر همسایگی بر اساس رابطه (۹) و وضعیت هر سلول بر اساس رابطه (۶) ارائه می‌گردد، با توجه به این موارد رابطه انتقال در این مدل به فرم رابطه (۱۱) بیان خواهد شد:

$$\bar{C}_{ij}^{t+1} = f(\bar{C}_{ij}^t, \bar{A}_{ij}^t, S_{ij}^t, R_{ij}^t) \quad (11)$$

در این رابطه \bar{C}_{ij}^t و \bar{C}_{ij}^{t+1} بردارهایی هستند که میزان پوشش سلول توسط عوارض مختلف را در زمان‌های t و $t+1$ مشخص می‌سازند و نتیجه مهم از این رابطه این است که تغییر عناصر بردار وضعیت یک سلول نتیجه افزایش یا کاهش مساحت تحت پوشش عوارض در آن سلول می‌باشد. بر این اساس رابطه فوق را می‌توان به صورت دیگری نمایش داد:

$$\bar{C}_{ij}^{t+1} = \bar{C}_{ij}^{t1} + f'(\bar{C}_{ij}^t, \bar{A}_{ij}^t, S_{ij}^t, R_{ij}^t) \quad (12)$$

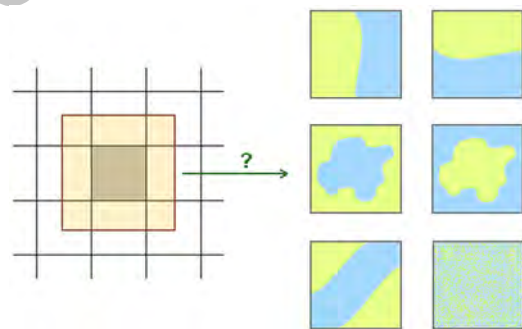
که در این رابطه f' یک تابع ارزیابی است که خروجی آن میزان تغییرات وضعیت‌های هر سلول بر مبنای شرایط جاری، پارامتر تاثیر همسایگی، استعداد و قیود توسعه خواهد بود. با توجه به این ساختار میزان تغییرات وضعیت‌ها در انتقال از زمان t به $t+1$ را می‌توان به صورت یک بردار (\bar{t}_{ij}^t) نمایش داد که با عنوان بردار انتقال در این مدل شناخته می‌شود. در نتیجه می‌توان تابع انتقال را به فرم رابطه (۱۳) نمایش داد که با عنوان فرمول پایه مدل پیوسته مبنا در این تحقیق شناخته خواهد شد.

$$\bar{C}_{ij}^{t+1} = \bar{C}_{ij}^{t1} + \bar{t}_{ij}^t \quad (13)$$

$$\bar{t}_{ij}^t = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \dots \\ t_k \end{bmatrix}, \quad t_k \in [-s_k, 1-s_k] \quad (14)$$

$$\sum_m^k t_k = 0 \quad (15)$$

که در این روابط \bar{A}_{ij} همان پارامتر تاثیر همسایگی در این مدل می‌باشد به گونه‌ای که هر مقدار بردار آن میزان مساحت موثر برای هر وضعیت را در اطراف سلول مورد بررسی نشان می‌دهد و W_l پارامتر وزن در این رابطه بوده که تابعی از فاصله بین مراکز سطح سلول مورد بررسی و منطقه اشتراکی سلول همسایه است. \bar{e}_l یک بردار خطا است که محصول عدم دسترسی سلول‌ها به اطلاعات هندسی عوارض درون خود می‌باشد. در نتیجه مقادیر این بردار به طور دقیق در فرآیند مدل‌سازی قابل برآورد نیست اما می‌توان گفت که میزان این خطا برای هر نوع عارضه در سلول وابستگی مستقیم به میزان اشتراک آن سلول با منطقه حائل و موقعیت‌های حقیقی عوارض در آن سلول دارد، به طوریکه عوارض می‌توانند به طور کامل در داخل منطقه حائل واقع شده باشند و یا اینکه وابستگی مکانی نواحی متعلق به یک نوع عارضه نزدیک به صفر باشد (شکل ۲). مطابق با تحقیقات قبلی که در زمینه سلول‌های غیرقطعی انجام گرفته است [۱۹] کران بالا و پایین خطای محتمل برای عارضه m در سلول l بر اساس رابطه (۱۰) قابل تعیین است.



شکل ۲- ابهام مکانی عوارض در سلول همسایه

$$\begin{cases} \min(e_{lm}) = \max(0, a'_l + s_m - 1) - a'_l s_m \\ \max(e_{lm}) = \min(a'_l, s_m) - a'_l s_m \end{cases} \quad (10)$$

تفاوت کران بالا و پایین رابطه (۱۰) میزان عدم قطعیت برای یک نوع عارضه در یک سلول را مشخص می‌کند و این مقدار زمانی به بیشترین مقدار خود می‌رسد که میزان ضریب پوشش عارضه در سلول به سمت ۰.۵ میل کند. این عدم قطعیت می‌تواند در تکرار متوالی اتوماتای سلولی در سلول‌های مدل به وجود آید و تنها زمانی در داده‌های اولیه مدل ظاهر می‌شود که منابع اولیه مدل به صورت برداری بوده و یا ابعاد سلول‌ها با اندازه پیکسل‌ها در منبع رستری متفاوت باشد. در فرآیند شبیه‌سازی در صورتیکه طول

مقادیر مثبت در بردار انتقال به معنی افزایش و مقادیر منفی بیانگر کاهش سطح عارضه متناظر در درون سلول می- باشند و در صورتیکه یک نوع عارضه در سلول فاقد تغییر پوشش باشد، مقدار عنصر نظیر آن برابر با صفر خواهد بود. نکته مهم در رابطه انتقال این مدل حفظ ثبات سلول‌های موجود در مدل در فرآیند انتقال بر اساس شرط (۷) می‌باشد. پس به ازای هر مقدار افزایش سطح مربوط به یک یا چند عارضه باید سطح پوشش مرتبط با عوارض دیگر در سلول کاهش پیدا کند و به بیان دیگر مجموع عناصر بردار انتقال برای هر سلول باید برابر با صفر باشد.

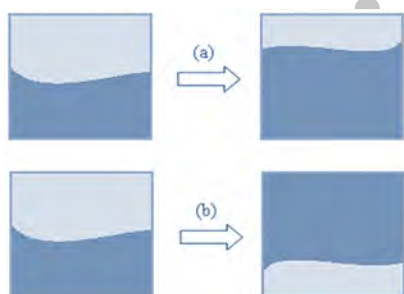
۴- ارزیابی دقت مدل

هر مدل نگاشت زمین^۶ باید این قابلیت را داشته باشد که بتوان پس از اجرای آن یک ارزیابی کلی از نتایج تولید شده در برابر داده‌های حقیقی زمین بدست آورد، که این ارزیابی امکان تفسیر نتایج مدل اجرایی و اعتبار سنجی آن را به محقق می‌دهد. استفاده از شاخص‌های مقایسه زمین ابزار مناسبی جهت برآورد و ارزیابی دقت هر مدل نگاشت زمین است که میزان تطابق نقشه خروجی مدل با واقعیت را بدست می‌آورد [۲۱]. شاخص‌های متفاوتی برای برآورد میزان تطابق خروجی مدل‌ها به کار گرفته شده است که به طور کلی به دو دسته روش‌های مقایسه هندسی و سلول مبنا تقسیم- بندی می‌شوند [۲۲، ۲۳] که روش‌های سلول مبنا در میان این روش‌ها بیشتر در ارزیابی مدل‌های سلولی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۴]. هدف این روش‌ها یافتن میزان اختلاف مقدار و مکان سلول‌های مرتبط با یک نوع عارضه در مقایسه نقشه‌های سلولی می‌باشد.

پیش از برآورد دقت کلی مدل در یک فضای سلولی باید نحوه ارزیابی هر سلول غیرقطعی در برابر سلول نظیر در نقشه مبنا مورد بررسی قرار گیرد [۱۹] که این عدم قطعیت از ساختار پیوسته سلول‌ها در این مدل به وجود می‌آید. همان- طور که ذکر شد هر سلول در این مدل شامل یک بردار وضعیت می‌باشد و هر عنصر این بردار نشان‌دهنده میزان مساحت تحت پوشش یک نوع عارضه در سلول است که می‌تواند در فرآیند انتقال مطابق با رابطه (۱۳) تغییر کند. در نتیجه پس از اجرای اتوماتا در هر سلول، باید مقادیر بردار وضعیت آن سلول با مقادیر بردار وضعیت سلول مرجع

متناظر با آن سلول مقایسه شود. اما مقایسه این مقادیر برای ارزیابی سلول کافی است؟ براساس چه شاخصی می‌توان میزان شباهت عارضه‌های موجود در این دو سلول را نسبت به هم بدست آورد؟ سلول‌ها در این مدل تنها شامل اطلاعات مقداری^۷ در مورد عوارض داخل خود هستند و این محدودیت اندازه‌گیری میزان واقعی اختلاف عوارض نظیر در سلول‌ها را دچار تردید می‌کند. به عنوان مثال دو سلول را با میزان یکسانی از مساحت تحت پوشش برای یک عارضه در نظر بگیرید (شکل ۳). عارضه‌ها در دو سلول با وجود برابر بودن مقدار مساحت تحت پوشش می‌توانند دارای هیچ گونه مساحت مشترکی نباشند، به عبارت دیگر دو سلول در عارضه مورد بررسی فاقد اختلاف مقداری بوده اما در واقعیت اختلاف مکانی آن‌ها بیشینه مقدار ممکن باشد [۲۰]. به طور کلی دستیابی به اختلاف مکانی عوارض نظیر در سلول‌های غیرقطعی با این ساختار دست یافتنی نیست، اما با این وجود کران بالا و پایین اختلاف مکانی محتمل در این سلول‌ها با کمک اطلاعات مقداری آن‌ها و بر اساس رابطه (۱۶) قابل برآورد می‌باشد.

$$|s_i^m - s_i^r| < e_i < 1 - |s_i^m + s_i^r - 1| \quad (16)$$



شکل ۳- سلول‌های نظیر با کمترین و بیشترین اختلاف مکانی ممکن

اختلاف بین کران بالا و پایین در این رابطه زمانی به بیشترین حد خود می‌رسد که مقادیر وضعیت‌ها در سلول مدل و مبنا برابر با ۰,۵ باشد و این اختلاف زمانی کاهش می‌یابد که اختلاف بین مقادیر وضعیت‌ها به سمت ۱ میل کند. همان‌طور که گفته شد هیچ روش مستقیمی جهت برآورد اختلاف مکانی واقعی در این سلول‌ها وجود ندارد که علت آن عدم دسترسی سلول‌ها به اطلاعات مکانی عوارض خود می‌باشد. اما با این وجود بعضی از اطلاعات

^۷ Quantity Information

^۶ Land Transformation Model

۵- نتایج عملی و ارزیابی

در این قسمت به بررسی رفتار مدل اتوماتای سلولی پیشنهادی در مقیاس‌های مختلف در یک منطقه جغرافیایی می‌پردازیم. پس از معرفی منطقه مطالعاتی و نحوه تهیه و آماده‌سازی داده‌های مورد استفاده در مدل-سازی، به تشریح مراحل پیاده‌سازی آزمایش در فضای رستری پرداخته می‌شود و در نهایت نتایج ارزیابی مدل را بر داده‌های پوشش زمین در مقیاس‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته خواهد شد.

۵-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی در این تحقیق شهر اصفهان بوده که نرخ رشد جمعیت بالایی را در دهه‌های اخیر تجربه کرده است. اطلاعات مورد نیاز برای انجام فرآیند شبیه-سازی از تصاویر ماهواره‌ای بدست می‌آید. برای این منظور دو تصویر سنجنده Landsat TM با تفکیک مکانی ۲۸٫۵ متر در سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۰۰ میلادی تهیه گردید. تصحیحات هندسی و اتمسفری باید بروی این تصاویر انجام و در نهایت زمین مرجع شده باشند. شکل ۴ و ۵ تصاویر تصحیح و زمین مرجع شده برای شهر اصفهان در سال‌های مذکور را نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه هدف این تحقیق پیش‌بینی یا تفسیر روند توسعه بر مبنای پارامترهای موثر در روند توسعه نمی‌باشد و صرفاً به بررسی تاثیر مقیاس در فرآیند مدل‌سازی می‌پردازد، در نتیجه کمترین داده‌های مورد نیاز جهت اجرای مدل پیشنهادی استفاده شد و تنها دو نوع پوشش زمین «شهر» و «غیرشهر» از تصاویر ماهواره-ای استخراج گردید. که این طبقه‌بندی براساس روش بیشترین شباهت^۸ در نرم‌افزار ENVI صورت گرفت. در نهایت از ماژول‌های موجود در این نرم‌افزار جهت کاهش نویز در مدل و انسجام داده‌های شهری خروجی مرحله طبقه‌بندی استفاده گردید. این اطلاعات به عنوان داده‌های ورودی مدل اتوماتای سلولی مورد استفاده قرار گرفت.

پیش فرض در مورد طبیعت پدیده‌ها در دنیای واقعی می-تواند به ما در برآورد مقدار اختلاف مکانی کمک نماید. به عنوان مثال در صورتیکه یک مدل اتوماتای سلولی جهت مدل‌سازی حرکت یک مایع در یک کانال مورد استفاده قرار گیرد، دانستن جهت مشخص حرکت مایع به ما این آگاهی را می‌دهد که در هر سلول مقدار اختلاف مکانی به سمت کران پایین محتمل بر اساس رابطه (۱۶) می‌باشد. روش دیگر تبدیل سلول‌های غیرقطعی به قطعی با تعریف یک حد آستانه می‌باشد که این روش با وجود ساختار ساده در آنالیزهای مربوط به تغییر مقیاس مدل کاربرد نداشته و در نحوه نتیجه‌گیری در این پردازش‌ها اثر منفی خواهد گذاشت.

پس از برآورد میزان اختلاف بین هر سلول مدل و مینا نوبت به برآورد کلی دقت خروجی مدل در تمام سلول‌ها می‌رسد. شاخص‌های سلول‌مبنای زیادی جهت محاسبه دقت خروجی مدل‌ها استفاده شده‌اند [۲۴، ۲۵، ۲۶]. اما تعداد کمتری از آن‌ها جهت مقایسه دقت مدل‌های اتوماتای سلولی در مقیاس‌های مختلف در یک منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵، ۱۹]. در این تحقیق مجذور میانگین مربعات خطاها به عنوان شاخص مورد استفاده در برآورد دقت خروجی مدل به کار گرفته شده است. این شاخص یک روش پراستفاده در ارزیابی خروجی مدل‌ها با مقادیر حقیقی بوده و در بررسی تاثیر تغییر مقیاس در مدل‌های توسعه شهری نیز به کار گرفته شده است [۲۷]. این شاخص بر اساس میزان انحراف مقادیر مربوط به پوشش عوارض در سلول‌های نظیر و بدون در نظر گرفتن اطلاعات مکانی آن‌ها محاسبه می‌گردد، هر چند که این اطلاعات در مسائل مربوط به بررسی تاثیر مقیاس در ناحیه درونی یک سلول موجود باشد. از آنجائیکه میزان اختلاف برای هر عارضه در سلول‌های متناظر دارای یک محدوده غیرقطعی بر مبنای رابطه (۱۶) است، پس براین اساس در سلول‌های غیرقطعی با فرض روی‌دادن کمینه و بیشینه انحراف در تمام سلول‌ها، کمترین و بیشترین مقدار خطای محتمل در کل مدل سلولی نسبت به مدل مینا قابل برآورد می‌باشد.

^۸ Maximum Likelihood

صرف نظر از عدم قطعیت موجود در مقادیر این پیکسل‌ها بازتولید می‌شوند.

پس از بازتولید مدل سلولی از منابع اولیه نوبت به اجرا و ارزیابی فرآیند اتوماتای سلولی در مقیاس انتخابی می‌رسد. برای این منظور قبل از اجرای مدل باید مشخصات اولیه آن از قبیل فاصله همسایگی و حد آستانه تاثیر همسایگی را تعیین نمود. سپس نوبت به برآورد تعداد دفعات لازم برای اجرای اتوماتای سلولی در فضای سلولی جاری می‌رسد. هر مرتبه اجرای اتوماتای سلولی معادل گذشت یک بازه زمانی در واقعیت است که با کمک شاخص‌های ارزیابی دقت می‌توان تعداد بهینه اجراها را در هر مقیاس بدست آورد. برای این منظور پس از هر بار اجرای اتوماتا در تمام سلول‌های مدل مقدار دقت نهایی مدل را در برابر یک مدل سلولی مبنای در یک زمان مشخص ارزیابی و در یک جدول درج می‌نماییم. مرتبه‌ای را که پس از چند مرتبه اجرای مدل میزان دقت آن در مقایسه با نتایج دیگر موجود بهینه می‌باشد را در نظر گرفته و بر اساس شماره اجرای آن، ارزش زمانی هر اجرای اتوماتای سلولی برآورد می‌شود (شکل ۶).



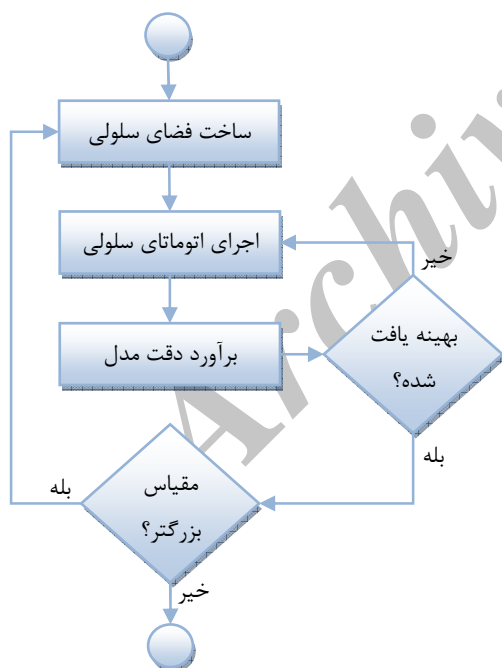
شکل ۴- تصویر ماهواره‌ای شهر اصفهان در سال ۱۹۹۰ میلادی



شکل ۵- تصویر ماهواره‌ای شهر اصفهان در سال ۲۰۰۰ میلادی

۵-۲- پیاده‌سازی

جهت بررسی تاثیر تغییر مقیاس بر شبیه‌سازی با اتوماتای سلولی نیاز به بازتولید داده‌های اولیه در مقیاس‌های مختلف می‌باشد. در پیاده‌سازی‌های موجود معمولاً روش‌های بازتولید مبتنی بر الگوریتم‌های انترپلاسیون^۹ تصویری جهت ساخت مدل سلولی اولیه استفاده می‌شود. در این روش‌ها به هر پیکسل در مقیاس جدید یک مقدار براساس مقادیر پیکسل‌های تصویر با مقیاس قبلی نسبت داده می‌شود و در نهایت هر پیکسل به عنوان یک سلول در مدل‌سازی وارد می‌شود. در هر بازتولید در این ساختار، یک کلاس معین به هر سلول نسبت داده می‌شود. در مدل پیشنهادی با توجه به اینکه هر سلول به عنوان یک ناحیه مشخص بر روی زمین شناخته می‌شود و میزان مساحت تحت پوشش عوارض را در خود نگه می‌دارد در نتیجه این قابلیت را دارا است تا در فرآیند بازتولید بتواند اطلاعاتی فراتر از یک کلاس را در خود ذخیره کند. به این ترتیب سلول‌ها در هر مقیاس بر اساس اشتراکات مکانی با پیکسل‌های تصویر طبقه‌بندی شده و



شکل ۶- نمودار فرآیند اجرای تحلیل تاثیر مقیاس

در این تحقیق رفتار پیشنهادی بر مبنای تابع انتقال گزاره‌ای در مقیاس‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. یک فضای سلولی با مقیاس معین انتخاب و تنظیمات دو مدل در این فضا به گونه‌ای انجام می‌گیرد تا نتایج خروجی آن‌ها در این فضا یکسان باشد. در مراحل

^۹ Interpolation

شهری در پیرامون سلول از حد معین بیشتر شود کل مساحت سلول تغییر وضعیت دهد. در استراتژی دوم با افزایش ابعاد سلول‌ها ضریب افزایش مساحت شهری بر اساس معکوس مساحت سلول‌ها کاهش پیدا کرده و مقدار آن براساس رابطه (۱۷) تعیین می‌شود.

$$t_i'' = \begin{cases} \frac{b}{R_l} & b < R_l \\ 1 & otherwise \end{cases} \quad (17)$$

در این رابطه R_l میزان مساحت سلول l و b یک مقدار ثابت می‌باشد که در این تحقیق مقدار آن در مقیاس ابتدایی به گونه‌ای انتخاب می‌شود که ضریب افزایش سطح در آن مقیاس برابر با ۱ باشد. در صورتیکه در یک مدل مقدار این ثابت بزرگتر از مساحت سلول شود، ضریب مربوطه ۱ انتخاب می‌گردد که اضافه شدن این قید این رابطه موجب جابجایی تعداد بهینه اجراها در یک بازه زمانی می‌شود.

۵-۳- نتایج ارزیابی

ابعاد اولیه سلول‌ها در مدل جهت آغاز فرآیند مقایسه برابر با ۲۸٫۵ متر در نظر گرفته شد. پس از هر مرحله اجرای مدل ۱۰ متر به عرض سلول‌ها در مدل اضافه شده و بر اساس مقیاس جدید مدل سلولی بازتولید شده است و این روند تا ابعاد سلولی ۱۷۸٫۵ متر ادامه پیدا می‌کند. ابعاد منطقه در مقیاس اولیه برابر با $۷۵۰ * ۵۹۰$ سلول و در آخرین مقیاس مورد بررسی برابر با $۱۲۵ * ۹۸$ سلول بوده است. در هر مقیاس اتوماتای سلولی در چند مرتبه متوالی بر مدل سلولی اعمال گشته و در هر مرتبه ارزیابی دقت بر مبنای مجذور میانگین مربعات خطاها صورت گرفت.

شکل ۷ نتایج اجرای مدل با ابعاد سلولی ۲۸٫۵ متر در ۶ مرتبه متوالی را نشان می‌دهد که در سومین اجرا خطای آن بهینه شده است.

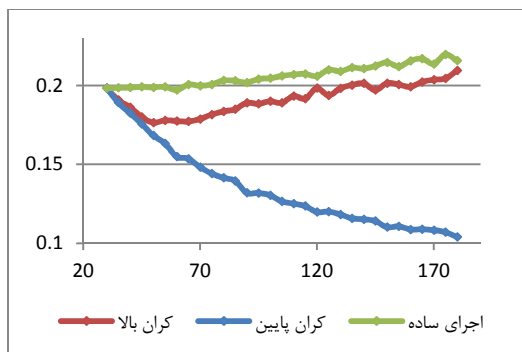
بعد با همان تنظیمات اولیه دو مدل در فضاهای سلولی با ابعاد سلولی بزرگتر اجرا می‌شوند. شیوه اجرا در مورد اتوماتای سلولی ساده به مانند روش‌های رایج اتوماتای سلولی است. در این نوع اتوماتا با توجه به ساختار پیکسل‌مبنای سلول‌ها در مقیاس‌های مختلف، اندازه همسایگی بر اساس تعداد پیکسل‌ها در فضای همسایگی تعیین می‌شود و ماهیت زمین مرجع بودن آن‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. در مدل اتوماتای سلولی پیوسته با ساختار پیشنهادی اندازه همسایگی بر اساس یک طول با مقیاس مکانی مشخص در مدل تعیین می‌شود. (رابطه ۱۱) در نتیجه در صورتیکه ابعاد سلول‌ها در محیط دچار تغییر شود، طول همسایگی تغییر نکرده و ابعاد منطقه حائل اطراف هر سلول حفظ می‌گردد. از آنجائیکه تنها دو کلاس شهر و غیرشهر به عنوان لایه‌های ورودی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند در نتیجه بردار انتقال در این مدل پیوسته تنها دارای دو عنصر بوده که جهت برقراری شرط (۱۵)، مقادیر آن‌ها قرینه یکدیگر می‌باشد. به عبارت دیگر به ازای افزایش مساحت شهری به همان میزان از مساحت‌های غیرشهری در هر سلول باید کاهش پیدا کند و در صورتیکه تعداد کلاس‌ها در مدل افزایش پیدا کند باید یک استراتژی جهت کاهش مساحت‌ها در برابر هر افزایش مساحت در نظر گرفته شود.

در مدل ساده با قوانین انتقال گزاره‌ای در صورتیکه یک سری شروط در مورد وضعیت‌های یک سلول برقرار باشد، وضعیت سلول مذکور به طور کامل تغییر می‌کند اما در بیان پیوسته قوانین انتقال باید میزان افزایش مساحت برای کلاس مذکور و با در نظر گرفتن شرط (۷) تعیین شود که با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه و ساختار مدل باید مقدار آن بهینه گردد. با توجه به اینکه هدف در این تحقیق بررسی رفتار مدل در مقیاس‌های مختلف است در نتیجه ضریب افزایش مساحت مناطق شهری در این مدل برای مقیاس اولیه برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود، که این مقدار به سبب ایجاد شرایط مشابه با مدل ساده در مقیاس اول بوده است. اما برای تکرار فرآیند اتوماتای سلولی در مقیاس‌های بعد دو استراتژی در نظر گرفته شده است. در استراتژی اول ضریب افزایش سطح در تمام مقیاس‌ها برابر با مقدار آن در مقیاس اول در نظر گرفته شده است. این امر موجب می‌شود تا در هر اجرا با ابعاد سلولی متفاوت در صورتیکه میزان تاثیر مساحت‌های

در نمودار ۸ نتایج پیاده سازی مدل پیوسته را بر اساس استراتژی اول و نمودار ۹ نتایج پیاده سازی را برای استراتژی دوم نمایش می دهد. در هر نمودار محور افقی بیانگر ابعاد سلولی و محور عمودی بیانگر برآورد کمترین خطای اجرای اتوماتای سلولی در فضای باز تولید شده و بر اساس شاخص مجذور میانگین مربعات خطاها می باشد. نتایج خروجی مدل ساده با اجزای گسسته و برآورد کلی کران بالا و پایین خطا در مدل پیوسته برای هر پیاده سازی آورده شده است. در برآورد کران پایین خطا فرض بر این بوده است که خطا در تمام سلولها برابر با کران پایین رابطه (۱۶) بوده است و بالعکس.

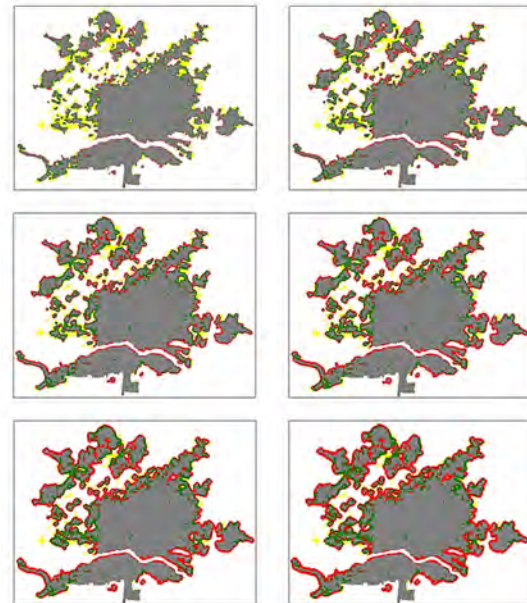


شکل ۸- نتایج پیاده سازی بر اساس استراتژی اول



شکل ۹- نتایج پیاده سازی بر اساس استراتژی دوم

در پیاده سازی استراتژی اول در گام اجرایی با ابعاد سلولی ۶۸٫۵ متر بهترین نتیجه بر مبنای خطای کمترین مربعات بدست آمده است. با توجه به ضریب افزایش ۱ در این استراتژی، میزان انحراف کران بالا از پایین خطا در چندان زیاد نبوده و در بیشترین حالت به میزان ۰٫۰۰۳۵ متر می باشد و این میزان انحراف به علت نحوه بازتولید مدل در مقیاس های کوچکتر و غیرقطعی شدن سلولها در این مقیاس ها می باشد. در پیاده سازی استراتژی دوم نتیجه کار اندکی متفاوت است. کران پایین خطا در این استراتژی با افزایش ابعاد سلولها و کاهش مقدار ضریب افزایش سطح،



شکل ۷- نمایش نقشه مبنای اجرای متوالی مدل

فرآیند ارزیابی پس از برآورد مقدار خطا برای مرتبه بهینه در مدل اولیه با مقیاس مذکور، بر مبنای استراتژی های تعریف شده برای مقیاس های بعدی ادامه پیدا می کند. نتایج بهترین برآورد خطا برای هر مقیاس بازتولید شده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- نتایج خروجی در مقیاس های مختلف

عرض سلول	استراتژی اول		استراتژی دوم	
	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا
۲۸/۵	۰/۱۹۸۴	۰/۱۹۸۴	۰/۱۹۸۴	۰/۱۹۸۴
۳۸/۵	۰/۱۹۰۷	۰/۱۹۱۲	۰/۱۸۲۵	۰/۱۸۶۳
۴۸/۵	۰/۱۸۲۹	۰/۱۸۴۳	۰/۱۶۸۳	۰/۱۷۶۵
۵۸/۵	۰/۱۷۵۴	۰/۱۷۸۹	۰/۱۵۴۹	۰/۱۷۷۵
۶۸/۵	۰/۱۷۵۲	۰/۱۷۸۱	۰/۱۴۸۳	۰/۱۷۸۸
۷۸/۵	۰/۱۷۷۸	۰/۱۸۰۸	۰/۱۴۱۵	۰/۱۸۳۶
۸۸/۵	۰/۱۷۶۷	۰/۱۷۹۵	۰/۱۳۲	۰/۱۸۹
۹۸/۵	۰/۱۸۳۷	۰/۱۸۶۸	۰/۱۳۰۴	۰/۱۹
۱۰۸/۵	۰/۱۸۶۳	۰/۱۸۹۲	۰/۱۲۵۱	۰/۱۹۳۴
۱۱۸/۵	۰/۱۸۸۸	۰/۱۹۱۱	۰/۱۱۹۸	۰/۱۹۸۳
۱۲۸/۵	۰/۱۹۵۳	۰/۱۹۸	۰/۱۱۸۳	۰/۱۹۸۲
۱۳۸/۵	۰/۱۹۸۵	۰/۲۰۱۷	۰/۱۱۵۲	۰/۲۰۱۴
۱۴۸/۵	۰/۲۰۳۹	۰/۲۰۶۹	۰/۱۱۰۲	۰/۲۰۱۵
۱۵۸/۵	۰/۲۱۰۵	۰/۲۱۳۳	۰/۱۰۸۷	۰/۱۹۹۲
۱۶۸/۵	۰/۲۱۷۳	۰/۲۲	۰/۱۰۸۳	۰/۲۰۳۷
۱۷۸/۵	۰/۲۱۹۹	۰/۲۲۲۱	۰/۱۰۴	۰/۲۰۹۵

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ارزیابی تاثیر تغییر مقیاس بر اساس دو استراتژی متفاوت بروی مدل پیوسته اتوماتای سلولی ارائه گشت. هدف از ارائه این دو استراتژی بررسی تاثیر دو عامل ضریب افزایش سطح و تعداد بهینه تکرارهای اتوماتای سلولی علاوه بر چینش قوانین انتقال در سرعت تغییر وضعیت سلول‌ها در روند مدل‌سازی در مقیاس‌های مختلف بوده است. تعداد تکرارهای اتوماتای سلولی در هر مرحله اجرایی با مقیاس مشخص نکته مهمی است که در نتایج خروجی هر دو استراتژی باید مدنظر قرار بگیرد. تعداد تکرارها جهت رسیدن به کمترین خطا پس از اجرا در فضای سلولی با ابعاد سلولی ۶۸،۵ متر در استراتژی اول و ۶۳،۵ متر در استراتژی دوم، برابر با یک تکرار بوده است و در پیاده‌سازی استراتژی اول پس از این مرحله دقت نهایی مدل شروع به کاهش کرده است. از این امر می‌توان این نتیجه را گرفت که در شبیه‌سازی فرآیند توسعه شهری با استفاده از اتوماتای سلولی، تنظیمات اولیه و در نتیجه سرعت تغییر وضعیت‌ها در مدل باید به گونه ای انجام گیرد که مدل بتواند با چند تکرار به یک مرحله بهینه در مقایسه با یک مدل سلولی مرجع دست پیدا کند.

کاهش پیدا می‌کند. که این امر به دلیل کاهش تغییرات محتمل در مقادیر مساحت عوارض سلول‌ها در فرآیند اتوماتا اتفاق افتاده است که در نهایت این کاهش تغییرات منجر به کاهش نرخ تغییر دقت مدل به سمت صفر می‌شود، از طرف دیگر کاهش جزئیات مکانی در محیط با افزایش ابعاد سلولی عامل دیگری در جهت کاهش کران پایین خطا در مدل می‌باشد. در طرف مقابل کران بالای خطا در این استراتژی رفتاری مشابه با کران بالای خطا در استراتژی اول را ایفا می‌کند که در گام اجرایی با ابعاد سلولی ۶۳،۵ متر مقدار آن به کمترین میزان خود رسیده است. از طرف دیگر بیشترین میزان انحراف بین کران بالا و پایین در این استراتژی ۰،۱۰۵۵ متر می‌باشد که در آخرین مرحله اجرایی رخ داده است. افزایش انحراف بین کران بالا و پایین در این استراتژی به علت کاهش ضریب تغییر مساحت در مدل می‌باشد. علت این رویداد این است که با کاهش مقدار این ضریب در مدل، مقادیر مساحت‌ها در هر سلول در فرآیند شبیه‌سازی از حالت باینری خارج شده و پراکندگی مقادیر آن‌ها در بازه صفر تا یک بیشتر می‌شود و با کاهش فاصله بین مقادیر وضعیت‌های نظیر در هر سلول میزان انحراف کران بالا از پایین خطاها بر اساس رابطه (۱۶) افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] Cheng, J., Masser, I., (2004) Understanding spatial and temporal processes of urban growth: cellular automata modeling. Environment and Planning B: Planning and Design volume 31, pages 167 194
- [2] Alves, R. M., Albrecht, C. H., (2010) The Use of Simulation in Urban Modelling. Methods and Techniques in Urban Engineering, ISBN: 978-953-307-096-4
- [3] Moreno, N. M. (2006). A vector-based cellular automata model to allow changes of polygon shape. International Conference on Modeling and Simulation.
- [4] Ozah, A. P. (2010) A deterministic cellular automata model for simulating rural land use dynamics: A case study of lake chad basin. ISPRS Volume XXXVIII-4-8-2/W9.
- [5] Chen, H., Pontius Jr, R. G., (2011) Sensitivity of a Land Change Model to Pixel Resolution and Precision of the Independent Variable. Environ Model Assess 16:37-52
- [6] Chen, H., Pontius Jr, R. G., (2011) Sensitivity of a Land Change Model to Pixel Resolution and Precision of the Independent Variable. Environ Model Assess 16:37-52
- [7] Yeh, A., Li, X., (2006) Errors and uncertainties in urban cellular automata. Computers, Environment and Urban Systems 30 10-28
- [8] Itami, R. M., (1994). Simulating spatial dynamics: cellular automata theory. Landscape and Urban Planning

- [9] Wu, F., (1998). SimLand: A prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules. *International Journal of Geographical Information Science*
- [10] Chunyang, H., Norio, O., Qiaofeng, Zh., Peijun, Sh., Jingshui, Zh. (2006) Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China. *Applied Geography* 26 323–345
- [11] Chen, Y., Wu, J. P., (2009) Cellular automata and GIS based landuse suitability simulation for irrigated agriculture. 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia
- [12] Wu, F. (2002) Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions. *International journal of geographical information science*
- [13] Tobler, W., (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 46, 234–240.
- [14] Moreno, N., Marceau, D. (2006) A vector-based cellular automata model to allow changes of polygon shape. *International Conference on Modeling and Simulation*
- [15] Marceau, D.J., Moreno, N. (2008) An object-based cellular automata to mitigate scale dependency. *Object-Based Image Analysis, Springer-Verlag*, pp. 43-73
- [16] Elissalde, B., Langlois, P., Goyat, D., (2009). GeoCells model: European Structural Funds and regional interactions, which convergences for the European regions. *European Journal of Geography*.
- [17] Vancheri, A., Andrey, D., Giordano, P., Albeverio, S. (2005) Continuous valued cellular automata and decision processes of agents for urban dynamics. *computers in urban planning and urban management*
- [18] Muzy, A., Innocenti E., Hill D. R. C., Aiello A., Santucci J. F., Santoni P. A. (2004) Dynamic structure cellular automata in a fire spreading application. *First International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*
- [19] Pontius Jr, R. G. and Neeti N. (2010) Uncertainty in the difference between maps of future land change scenarios. *Sustainability Science* 5: 39-50.
- [20] Pontius Jr, R. G. and Millones, M. (2011) Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing* 32(15): 4407-4429.
- [21] Wu X, Hu Y, He HS, Bu R, Onsted J, Xi F. (2009) Performance evaluation of the SLEUTH model in the Shenyang metropolitan area of northeastern china. *Environmental Modeling and Assessment* 14(2):221-30.
- [22] Zamyatin, A., P. Cabral, P. (2011). Advanced spatial metrics analysis in cellular automata land use and land cover change modeling. *Network of Scientific Journals from Latin America, the Caribbean, Spain and Portugal*
- [23] Herold, M., Goldstein, N. C., Clarke, K. C. (2003). The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. *Remote Sensing of Environment* 86 286–302
- [24] Kuhnert, M., Voinov, A., Seppelt, R., (2005). Comparing raster map comparison algorithms for spatial modeling and analysis. *Journal of American society for photogrammetry and remote sensing*
- [25] Pontius Jr, R. G., (2002). Statistical methods to partition effects of quantity and location during comparison of categorical maps at multiple resolutions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 68(10)
- [26] Pontius Jr, R. G., Schneider, L. C., (2001) Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 85(1-3): 239-248.
- [27] Pontius Jr, R. G., Olufunmilayo T., Hao, Ch. (2008) Components of information for multiple resolution comparison between maps that share a real variable. *Environmental and Ecological Statistics* 15(2):