

مدل اتوماسیون سلولی، روشی نوین در شبیه سازی رشد شهری

راضیه رضازاده¹ و مهرداد میراحمدی²

چکیده: مدل سازی و شبیه سازی رشد شهری، می تواند ابزار بسیار مفیدی برای تشریح روابط متقابل بین محیط انسان ساخت و محیط طبیعی - به منظور کمک به تصمیم گیری برنامه ریزان در شرایط پیچیده - باشد. مدل اتوماسیون سلولی، روشی کارآمد در تشریح فرایند رشد شهری، و ابزاری مفید برای ارزیابی پیامدهای اجتماعی و محیطی سناریوهای مختلف برنامه ریزی است. این مقاله به شناخت مدل اتوماسیون سلولی و کاربرد آن در شبیه سازی رشد شهری می پردازد. در بخش نخست مقاله اصول و عناصر تشکیل دهنده آن، معرفی و در بخش دوم چگونگی کار مدل اتوماسیون سلولی در شبیه سازی رشد شهری تشریح خواهد شد. هدف این مقاله، شناخت مدل اتوماسیون سلولی و چگونگی به کارگیری آن در مطالعات شهری است که نهایتاً چهارچوبی برای طراحی مدل اتوماسیون سلولی شهری ارائه می نماید؛ به نحوی که پژوهشگران بتوانند براساس آن، پدیده های شهری را با استفاده از این رویکرد جدید، مدل سازی کنند.

کلمات کلیدی: مدل سازی رشد شهری¹، مدل اتوماسیون سلولی²، مدل اتوماسیون سلولی شهری³

1 - مقدمه

غیرمتمرکز، و پایین به بالا است، استفاده کرده اند. در دو دهه گذشته مدل CA به وسیله پژوهشگران بسیاری در مطالعات شهری به کار گرفته شده است⁴. در حوزه شهری، مدل CA می تواند در پاسخ به بسیاری از سؤالات شرطی⁵ به کار رود، با استفاده از این روش، می توان برای رشد شهری - قبل از این که اتفاق بیفتد - سناریوهای مختلف پیش بینی کرد تا بتوان از نقاط ضعف و قوت تصمیم گیری ها آگاهی یافت. با استفاده از مدل اتوماسیون سلولی در شبیه سازی رشد شهری، می توان به پاسخ موارد زیر دست یافت:

الف) درک چگونگی سیستم پیچیده شهری
ب) شناخت سیستماتیک تغییرات ساختاری شهر
پ) شناخت و پیش بینی فرایندهای فضایی زمانی سیستم رشد شهری
ت) شناخت عوامل مؤثر بر رشد شهر، طراحی سناریوهای مختلف رشد شهری و گزینش بهترین آنها در جهت جلوگیری و کاهش خطرات محیطی، اجتماعی و ...
در این مقاله، ساختار مدل اتوماسیون سلولی، شناسایی و معرفی شده و کاربرد آن در حوزه مطالعات برنامه ریزی شهری به ویژه در شبیه سازی رشد شهری، اصول کار با مدل CA شهری، انواع و مزیت های این مدل در شبیه سازی تغییرات شهری، نشان داده می شود. هدف، شناخت مدل CA و چگونگی به کارگیری آن در مطالعات شهری و نهایتاً

شهرها سیستم هایی پیچیده، باز، پویا و خودسازمانده هستند که در فرایند توسعه آنها، بسیاری از نشانه های پیچیدگی مانند: ابعاد فرکتال، خودمانندی، خودسازماندهی، ظهور و ... وجود دارد [1]. درک مکانیسم فرایند رشد شهری در برنامه ریزی و مدیریت شهری به منظور رسیدن به شکل شهری پایدار بسیار مهم است. مدل های فضایی، ابزارهایی مفید برای درک فرایند توسعه شهری، ابزار کمکی سیاستگذاری مدیریت و برنامه ریزی شهری و فراهم کننده اطلاعات برای ارزیابی تأثیرات شهری بر محیط زیست و اکوسیستم هستند [2]. با مدل سازی سیستم پیچیده شهری، الگوهای فضایی و روندهای رشد شهری را می توان شبیه سازی کرد و درک بهتری از سیستم شهر به عنوان یک کل، به دست آورد. بیشتر روش هایی که تاکنون به مدل سازی ویژگی های پیچیده شهر پرداخته اند مدل هایی ایستا، خطی، متمرکز و براساس تئوری سیستم ساده بالا به پایین بودند. طی دو دهه گذشته پژوهشگران برای غلبه بر این نارسایی ها، از روش جدیدی به نام مدل اتوماسیون سلولی (CA) که دارای ویژگی های پویا، غیرخطی،

تاریخ دریافت مقاله 87/9/29 تاریخ تصویب نهایی 88/4/8

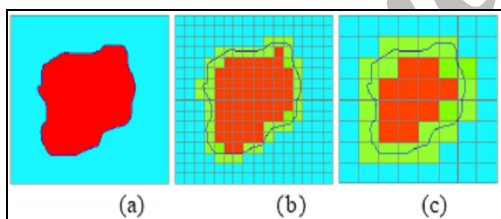
¹ استادیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران - (نویسنده مسئول)، پست الکترونیکی rezazadeh@iust.ac.ir
² کارشناس ارشد شهر سازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران

مدل سازی شهری معمولاً به علت طبیعت داده های ورودی و سهولت محاسبه و برنامه نویسی، سلول های همگن مورد استفاده قرار می گیرد؛ اما تحت شرایطی خاص استفاده از سلول های غیرهمگن به علت واقعی تر بودن شکل آنها (مانند قطعات زمین) ممکن است مناسب تر باشد [3].

مقیاس سلول، سطح جزئیات و روابط متقابل بین سلول ها را نشان می دهد. سلول های بزرگ تر، حجم داده ها را کاهش می دهند؛ اما منجر به کاهش دقت فضایی نیز می شوند [4].

در مدل های CA که تاکنون در مطالعات شهری به کار رفته اند، سلول ها با مقیاس های متفاوتی تعریف شده اند. برای مثال وو¹² در مدل های خود از سلول های با ابعاد 28/5 متر و 200 متر برای یک ناحیه با وسعت 224 کیلومتر مربع استفاده کرده است. وایت¹³ و انگلن¹⁴ در شبیه سازی الگوی کاربری زمین در شهرهای آمریکا از سلول های 500 مترمربع و 250 مترمربع استفاده کرده اند [5].

کلارک¹⁵ در شبیه سازی رشد شهری در ناحیه سانفرانسیسکو از سلول های پایه 300×300 متر؛ ولی در مدل سازی منطقه واشنگتن/ بالتیمور طی چند مرحله از سلول های 210 و 420 و 810 و 1680 متر استفاده کرده اند.



شکل 1 تأثیر مقیاس سلول

a: ناحیه مورد نظر b: سلول اندازه کوچک c: سلول با

اندازه بزرگ [6]

روش تعیین مقیاس سلول ها، در برخی مطالعات انجام شده، بستگی به نظرات و تجربیات شخصی پژوهش گر داشته است. کلارک روش استفاده از سلول های با اندازه های متفاوت بزرگ تا کوچک را طی چند مرحله پیشنهاد داده است. ناریم اسمات¹⁶ طی مطالعه ای که حساسیت پذیری سلول در مدل CA را بررسی کرده است، پیشنهاد می کند که مقیاس سلول باید متناسب با مقیاس توسعه مورفولوژی شهر در دامنه ای انتخاب شود، به طوری که نتایج مدل

ارائه چهارچوبی برای طراحی و ساخت مدل CA شهری است، به نحوی که پژوهش گران بتوانند براساس آن، مسائل مختلف برنامه ریزی و مدیریت شهری را با استفاده از رویکرد اتوماسیون سلولی شبیه سازی کنند.

2 - ساختار مدل CA

مدل CA اولین بار در دهه 1940 و 1950 توسط دو ریاضی دان به نام اولام⁶ و نیومن⁷، به منظور شبیه سازی سیستم های پیچیده در فیزیک و زیست شناسی به کار گرفته شد. به علت نبود ظرفیت بالای محاسبه ای تا دهه 1970، CA پژوهشگران کمی از آن استفاده می کردند تا این که در سال 1970، جان هارتون⁸، مدل معروفش به نام بازی زندگی⁹ را ساخت. از آن پس مدل CA در سایر حوزه های مطالعاتی دیگر نیز مورد استفاده قرار گرفت. مدل سازی شهری در فضای سلولی، ابتدا توسط توبلر¹⁰، با تعریفی که از جغرافیای سلولی ارائه داده است، وارد مطالعات شهری شده است. در سال های اخیر پژوهشگران مختلف نشان داده اند که CA ابزار مناسبی برای مدل سازی تغییرات شهری است و از آن در موضوعات گوناگونی از پدیده های شهری از شبیه سازی ترافیک، تغییرات کاربری زمین، تغییرات پوشش زمین، رشد شهری و... استفاده کرده اند. عناصر مدل CA به شرح زیر است.

2-1 شبکه سلولی¹¹

فضایی که CA در آن وجود دارد شبکه CA نام دارد و در طول زمان، تکامل (تغییر) می یابد. این شبکه می تواند 1 تا N بعد داشته باشد؛ اما بیشتر مدل های CA، به ویژه مدلهایی که با اهداف فضایی و شهری ساخته شده اند (مانند مدل های شهری)، در یک شبکه دو بعدی تشکیل می شوند. این امر ناشی از طبیعت پیکسلی داده های سنجش از دور و دیگر منابع و همچنین برنامه نویسی آسان تر است. در مدل سازی سیستم شهری با استفاده از مدل CA، در تعریف شبکه سلولی، انتخاب شکل و مقیاس سلول بر خروجی های مدل، بسیار تأثیرگذار است. در CA اولیه (کلاسیک)، سلول ها به صورت اشکال منظم، اغلب به شکل مربع یا دیگر اشکال منظم (از شش ضلعی و مثلث نیز برخی موارد استفاده شده است) تعریف می شوند. در

شامل 5 سلول است (شکل 3 و 4). در برخی مدل های CA، همسایگی به صورت 5×5 یا 7×7 تعریف شده اند.



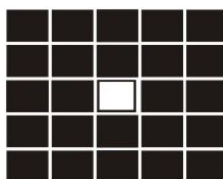
شکل 2 همسایگی در مدل CA یک بعدی



شکل 3 همسایگی ون در مدل CA دو بعدی

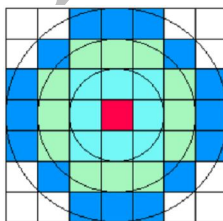


شکل 4 همسایگی مور



شکل 5 همسایگی گسترش یافته مور

در برخی موارد، همسایگی مستطیلی، مانند همسایگی مور به ویژه همسایگی با اندازه بزرگ باعث از بین رفتن داده ها در جهات مختلف می شود. در شکل 7، در یک همسایگی 7×7 تأثیر سلول A با B بر سلول C متفاوت است، گرچه هر دو در یک ردیف قرار دارند؛ زیرا فاصله سلول B و سلول A با سلول C متفاوت است. برخی مانند لیو (2003) برای رفع این مشکل از همسایگی دایره ای با شعاع های مختلف استفاده کرده اند.



شکل 6 همسایگی دایره ای در سه مقیاس کوچک، متوسط و بزرگ

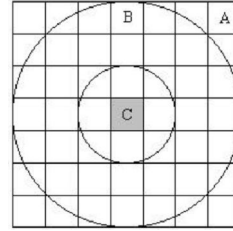
تحت تأثیر تغییر اندازه سلول نباشند و در واقع مدل "مستقل از مقیاس سلول"¹⁷ باشد.

2-2 وضعیت سلول¹⁸

وضعیت سلول، حالتی است که هر سلول در فرایند تکامل CA می تواند داشته باشد. سلول در مدل اولیه CA اغلب دارای وضعیت بولین (0 یا 1) بود، مانند مدل ماشین تورینگ؛ اما می توان وضعیت های بیشتری نیز در رابطه با نوع نیاز تعریف کرد. برای دو مدل CA مختلف، با عناصر یکسان، هر چه تعداد وضعیت تعریف شده برای سلول کمتر باشد، آن مدل ساده تر خواهد بود. به عنوان مثال در مدل ارائه شده توسط نیومن 29 حالت مختلف برای وضعیت سلول تعریف شده است. در مدل های شهری با توجه به هدف مدل سازی و وضعیت سلول های معمولاً طبقه بندی های کاربری زمین، ارزش زمین، پوشش زمین و ... مورد استفاده قرار می گیرد. در برخی موارد نیز وضعیت سلولها به صورت باینری، توسعه یافته یا توسعه نیافته (شهری یا غیرشهری) تعریف می شوند. همچنین در برخی مطالعات اجتماعی از تراکم جمعیت، وضعیت اجتماعی اقتصادی، ویژگی های جمعیتی و در برخی مطالعات طبیعی سطح آب های زیرزمینی، جنس خاک و ... نیز به عنوان وضعیت سلول مورد استفاده قرار گرفته است [7].

3-2 همسایگی¹⁹

بر اساس تئوری CA، رفتار کلان سیستم خودسازمانده، توسط قوانین انتقال که در سطح خرد تعریف می شوند، کنترل می شود. این عملکرد CA در مدل های شهری با تعریف همسایگی نشان داده می شود. همسایگی در بردارنده خود سلول و تعدادی سلول دیگر در شعاع خاصی از سلول مورد آزمایش است. بر اثر روابط متقابل بین سلول مورد آزمایش و همسایه آن و تحت تأثیر قوانین انتقال، سلول به وضعیت های مختلف تغییر پیدا می کند. اندازه همسایگی برای مدل های مختلف CA، فرق دارد. در CA یک بعدی، هر سلول دارای سه سلول همسایه است (شکل 2).²⁰ مشهورترین همسایگی در CA دو بعدی، همسایگی مور²¹ شامل 9 سلول به صورت 3×3 سلول، و همسایگی ون



شکل 7 تأثیر شکل همسایگی بر رفتار مدل

در عمل، همسایگی‌های بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس، هر دو، در مدل‌های توسعه شهری به کار رفته‌اند. برخی مانند کلارک و گایدوس²² (1998) از همسایگی 9 سلولی، برخی از همسایگی‌های 5×5 یا 7×7 سلولی، و حتی برخی نیز مانند وایت و انگلن (1994 و 1993) از همسایگی 113 سلولی استفاده کرده‌اند.

2-4- زمان

زمان در CA ناپیوسته است. مدت مراحل زمانی در CAهای مختلف متفاوت است، شکاف‌های زمانی بیشتر، ناپیوستگی بیشتر را در بر دارد و برعکس. سلول‌ها در CA، در دو مرحله زمانی T و T+1، وضعیت‌های (حالت‌ها) مختلفی خواهند داشت؛ زیرا از T تا T+1، CA تکامل پیدا خواهد کرد، مانند مدل‌های CA اولیه. زمان در مدل CA شهری نیز ناپیوسته است، از T به T+1، سلول‌ها به طور هم‌زمان تکامل می‌یابند. قوانین انتقال به صورت یکسان در همه سلول‌ها به کار می‌روند و سلول‌ها به طور هم‌زمان به روز می‌شوند. تعیین فاصله‌های زمانی یا تعداد مراحل، یکی از مسائل طراحی مدل CA است. هر چه دامنه‌های زمانی بزرگتر باشند، تعداد مراحل زمانی کمتر است؛ اما در CAهای مختلف دامنه مراحل زمانی، متفاوت است. اخیراً محققان سعی کرده‌اند که سلول‌ها، مانند یک شهر واقعی به صورت غیر هم‌زمان به روز شوند؛ ولی در این مورد تحقیقات هنوز در حال انجام است.

2-5- قوانین انتقال²³

قوانین انتقال - به عنوان موتور اصلی تغییرات در مدل CA- رفتار سلول‌ها را طی فرایند تکامل، در مراحل زمانی مختلف، مشخص و وضعیت آینده سلول را تعریف می‌کنند. این قوانین، طرز عمل سیستم واقعی را منعکس می‌کنند، همچنین سیستم‌ها را به عناصر ساده‌ای تجزیه می‌کنند که

پویایی سیستم در اثر همین عناصر است [8]. قوانین انتقال، عموماً به صورت جملات IF, THEN, & ELSE درحقیقت، جایگزین توابع سنتی ریاضی در مدل‌ها شدند. در CA اولیه، قوانین انتقال به صورت یکنواخت و هم‌زمان در سراسر سلول‌ها اجرا می‌شوند و در مدل CA شهری، قوانین انتقال در رابطه با فرایند توسعه فضایی شهر تعریف می‌شوند. فاکتورهای محلی و تئوری‌های توسعه شهری (تناسب فیزیکی، دسترسی حمل و نقل و...) در این رابطه تأثیرگذار هستند. بر خلاف مدل CA اولیه، مدل CA شهری این امکان را برای قوانین انتقال فراهم می‌کند که ارتباطات بیرونی مختلفی (مقدار زمین مورد نیاز برای توسعه، سرعت توسعه اقتصادی و...) با محیط اطراف داشته باشند. این قوانین معمولاً با مجموعه‌ای از جملات - If Then بیان می‌شوند که بسیار ساده هستند؛ ولی می‌توانند الگوهای پیچیده‌ای از توسعه ایجاد کنند. در کل روش‌های گوناگونی برای تعریف قوانین انتقال مورد استفاده پژوهش‌گران قرار گرفته‌اند:

الف) استفاده از پنج فاکتور کنترل کننده (ضریب پراکندگی²⁴، ضریب زایش²⁵، ضریب گسترش²⁶، ضریب شیب²⁷، ضریب جاذبه شبکه راه²⁸) [9].

ب) پیش‌بینی احتمال توسعه براساس فرایند تحلیل سلسله مراتبی²⁹ و ارزیابی چند معیاری³⁰ [19].

پ) تعریف قوانین انتقال براساس مجموعه‌های فازی³¹ [6].

ت) محاسبه پتانسیل تغییر براساس ماتریس از قبل تعریف شده [10].

ث) شبیه سازی توسعه شهری براساس شبکه‌های عصبی [11و12].

در این روش‌ها، برای تعریف قوانین از متغیرهای فراوانی - که هر یک در ارتباط با یک پارامتر است - استفاده می‌شود که هر پارامتر با توجه به ضریب اهمیتش بر نتایج شبیه‌سازی تأثیر گذار است [13].

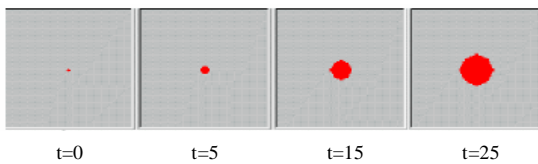
3- چگونگی کار مدل CA

اگر وضعیت سلول x_{ij} در موقعیت i, j در زمان t باشد، $S'_{x_{ij}}$ متعلق به تعداد محدودی (قابل شمارش) از وضعیت‌های ممکن سلول در فضای سلولی است و اگر وضعیت سلول در زمان $t+1$ باشد بنا برین:

جغرافیایی همه سلول‌ها در این ناحیه یکسان باشد و تنها عوامل مؤثر بر توسعه سلول‌ها تعداد سلول‌های توسعه یافته (شهری شده) در همسایگی سلول مورد آزمایش باشد. در یک همسایگی 9 سلولی (8 سلول همسایه به علاوه سلول مورد آزمایش یا همسایگی Moore)، تغییر وضعیت سلول‌ها توسط قانون زیر کنترل می‌شود:

اگر سه سلول یا بیشتر در همسایگی Moore توسعه یافته باشند پس سلول مورد آزمایش توسعه خواهد یافت.

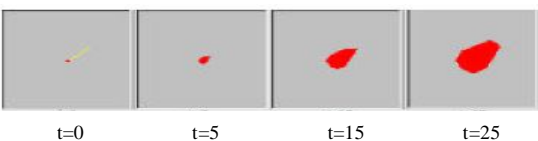
با این مدل، سناریوی توسعه شهری به صورت شکل زیر نشان داده می‌شود:



شکل 8 مدل توسعه شهری با CA در یک ناحیه هموار با همسایگی مور [6]

در واقعیت، شرایط جغرافیایی هیچ‌گاه یکنواخت نیست؛ بنابراین قوانین دیگری تغییر وضعیت سلول‌ها را کنترل می‌کند. در مثال بالا، اگر جاده‌ای از مرکز به شمالی‌ترین بخش ناحیه وجود داشته باشد، بیشتر توسعه در طول این جاده اتفاق خواهد افتاد. بنابراین یک جمله IF-THEN دیگر باید به قانون اول اضافه شود، تا تأثیر راه را در توسعه نشان دهد.

اگر یک یا دو سلول توسعه یافته در همسایگی (Moore) سلول مورد آزمایش، وجود داشته باشد و یک راه از این سلول گذشته باشد، پس سلول توسعه خواهد یافت. با این دو قانون، سناریوی توسعه شهری در این ناحیه تغییر خواهد کرد و به شکل شماره 9 تغییر خواهد یافت.



شکل 9 مدل توسعه شهری تولید شده با CA و تأثیر راه [6]

$$S_{x_{ij}}^{t+1} = f(S_{x_{ij}}^t, S_{\Omega_{x_{ij}}}^t) \quad (1)$$

که در این رابطه $\Omega_{x_{ij}}$ نشان‌دهنده مجموعه سلول‌ها در همسایگی سلول x_{ij} است و $S_{\Omega_{x_{ij}}}^t$ مجموعه وضعیت‌های ممکن $\Omega_{x_{ij}}$ در زمان t و f تابعی است که نشان‌دهنده قوانین انتقال است. از آنجا که خود سلول نیز عضوی از همسایگی‌اش است، معادله بالا را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$S_{x_{ij}}^{t+1} = f(S_{\Omega_{x_{ij}}}^t) \quad (2)$$

معادله شماره 2 می‌تواند به صورت جمله‌ای به شرح زیر باشد که اصل عمومی CA را نشان می‌دهد:

"IF something happens in the neighborhood of a cell, THEN something else will happen to the cell at the following time step."

اگر چیزی در همسایگی یک سلول اتفاق افتد پس چیز دیگری، در دوره زمانی بعد، در سلول اتفاق خواهد افتاد.

یک مدل اتومای سلولی معمولاً از مجموعه جملات IF-THEN تشکیل می‌شود که هر یک بیان‌کننده قوانین انتقال می‌باشند. برای مثال، مدل مشهور Game of life سه جمله IF-THEN بیان می‌شود:

IF there are two or three live cells in the Moore Neighborhood of a live cell,
THEN the cell stays alive in the next generation;
IF there are less than two or more than three live cells in the Moore Neighborhood of a live cell,
THEN the live cell dies in the next generation;
IF there are exactly three live cells in the Moore Neighborhood of a dead cell,
THEN the dead cell becomes alive in the next generation.

در مدل CA شهری نیز مانند CA کلاسیک، در تعریف جملات IF-THEN چهار عنصر اصلی اتوماسیون سلولی (سلول‌ها، وضعیت سلول‌ها، همسایگی و قوانین انتقال) باید مشخص شوند. مثال زیر نشان می‌دهد چگونه می‌توان قوانین انتقال را در مدل اتوماتی سلولی شهری به کار برد و چگونه این قوانین می‌توانند رفتار پیچیده سیستم را در یک فضای سلولی شبیه‌سازی کنند.

یک ناحیه با 100 سلول در 100 سلول در نظر بگیرید که هر کدام از این سلول‌ها 2500 مترمربع را نشان دهد. فرض کنید تنها 5 سلول در مرکز ناحیه، دارای وضعیت شهری باشند (شکل شماره 8، $t=0$). همچنین فرض کنید شرایط

قوانین انتقال CA). سوم وضعیت سلول می تواند مستقیماً از اطلاعات GIS یا RS گرفته شود.

پ) دینامیک (پویایی): بیشتر مدل های سنتی در برخورد با پدیده های پویا ضعف دارند، این مدل ها در واقع از یک زمان به زمان دیگر جهش می کنند. اغلب این جهش چندین سال است، که در این دوره خیلی از تغییرات می تواند در شهر اتفاق بیفتد. مدل CA قابلیت شبیه سازی دینامیک خوبی دارد. گرچه در CA زمان از T تا T+1 هنوز ناپیوسته است؛ اما این مقیاس در مقایسه با چندین سال، دوره کوتاهی است و از آنجا که تغییرات سیستم شهری ممکن است در دوره های زمانی کوتاه اتفاق بیفتند این مسئله در مدل سازی شهری بسیار مهم است.

ت) قابلیت بصری: مدل های CA یک محیط بصری بسیار مطلوب برای شبیه سازی هستند که وضعیت اولیه و نتایج را به صورت بصری نشان می دهند. این خصوصیات برای تحقیقات شهری بسیار مهم هستند؛ زیرا برای مدیران شهری یک تصویر از هزاران کلمه گویاتر است و به وسیله آن می توان حجم زیادی از اطلاعات را به یکباره انتقال داد. علاوه بر این، مدل های CA از لحاظ بصری پویا هستند و می توان کل روند توسعه شهر را به روش پویا نشان دهند.

ث) مطلوب برای شبیه سازی پدیده های پیچیده: سیستم شهری، یک سیستم پیچیده غیرخطی است که بسیاری از ویژگی های پیچیده مانند خودسازماندهی، خودمانندی و فرکتال را در خود داراست. مدل سازی این ویژگی ها با مدل های شهری سنتی بسیار مشکل است. در حالی که CA به عنوان یک نوع سیستم، می تواند ذاتاً این ویژگی ها را ایجاد کند.

ج) سادگی: ساختار CA ساده است، مفهوم وضعیت سلول و همسایگی، به راحتی قابل فهم هستند در حقیقت این عناصر با سیستم شهر واقعی شبیه اند. علاوه بر این هسته اصلی CA- یعنی قوانین انتقال در مقایسه با توابع ریاضی در مدل های سنتی- ساده تر هستند. این قوانین ساده ممکن است منجر به تولید الگوی فضایی پیچیده شوند. به علاوه برخلاف مدل های شهری سنتی، که در فرایند مدل سازی پیچیده است، CA اجازه می دهد که پیچیدگی درون مدل ظهور پیدا کند و طراحی مدل را محدود ننماید.

علاوه بر راه، ممکن است رودخانه های نیز از وسط شهر بگذرد و بنابراین سلولی که رودخانه از آن بگذرد نمی تواند توسعه پیدا کند. در این حالت قانون دیگری می تواند به اتوماسیون سلولی اضافه شود، تا محدودیت رودخانه را نشان دهد که می تواند به صورت زیر بیان شود:

اگر از یک سلول، رودخانه ای بگذرد، پس هیچ توسعه ای بر آن سلول اتفاق نمی افتد.



شکل 10 مدل توسعه شهری تولید شده با CA و تأثیر راه و رودخانه [6]

4 - مزیت های مدل CA شهری

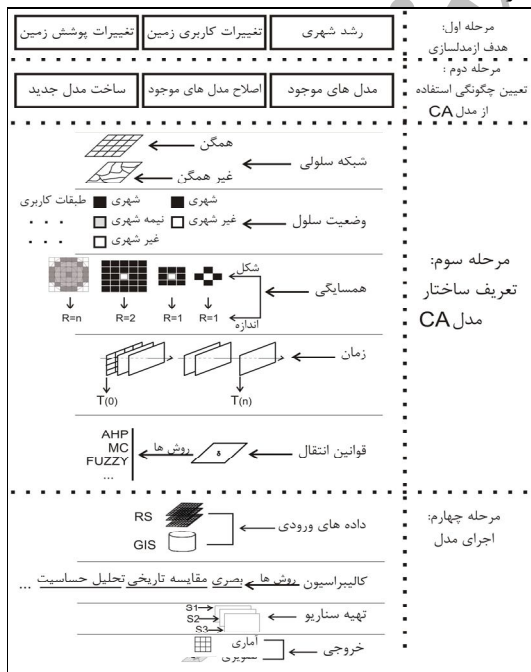
به طور کلی، سه نوع مدل CA شهری وجود دارد. اولین نوع مدل های CA شهری با هدف آزمون ایده ها و فرضیات مرتبط با تئوری های شهری استفاده می شوند. نوع دوم مدل هایی هستند که به شبیه سازی شهرهای واقعی می پردازند و در نوع سوم، استفاده از CA به منظور ایجاد مدل های برنامه ریزی هنجاری برای شبیه سازی ساختارهای مختلف شهری براساس اهداف برنامه ریزی است. مزیت های مدل CA را می توان به شرح زیر برشمرد:

الف) داشتن ویژگی فضایی: برخلاف بسیاری از مدل های سنتی - که در برخورد با پدیده های فضایی ضعف بسیاری دارند، CA می تواند این ویژگی های فضایی را در اثر قوانین انتقال تولید کند.

ب) همسازی با سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور: مدل CA به طور ذاتی با داده های رستری همسازی دارد. در واقع CA&GIS&RS دارای ویژگی های مشابهی هستند و بسیار خوب با هم هماهنگ می شوند. اول این که هم CA و هم GIS فضا را به واحدهای فضایی مجزا تقسیم می کنند (سلول در CA و پلیگون یا سلول در GIS) دوم؛ CA و GIS اطلاعات توصیفی را به روش لایه ای نشان می دهند (Them در GIS و وضعیت سلول در CA) و توسط توابعی آنها را تغییر می دهند. (تکنیک همپوشانی در GIS و

CA اولیه، مدل CA شهری این امکان را برای قوانین انتقال فراهم می‌کند که با محیط اطراف (مقدار زمین مورد نیاز برای توسعه، سرعت توسعه اقتصادی، تأثیرات برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری شهری و ...) ارتباط داشته باشند. از آنجا که مدل‌های CA ابزارهای حمایتی تصمیم‌گیری برای سیاست‌گذاران هستند، این ویژگی بسیار مطلوب خواهد بود؛ زیرا بسیاری از عوامل تأثیرگذار بر سیستم شهری غیر محلی هستند و می‌توان آنها را به عنوان عوامل خارجی وارد مدل CA شهری کرد. علاوه بر این برخلاف قوانین انتقال در CA اولیه - که به صورت جملات جبری بودند - در مدل CA شهری، قوانین انتقال می‌توانند با جملات احتمالی نیز شکل گیرند.

در طراحی ساختار مدل CA برای انجام مطالعات شهری، چگونگی تعریف هر یک از عناصر می‌تواند در تغییر نتایج مدل تأثیرگذار باشد؛ لذا در این مرحله دقت بسیار لازم است تا نتایج مدل تا حد امکان تحت تأثیر تعریف عناصر نباشد و در واقع مدل بتواند تا حد امکان، تحت تأثیر عملکرد سیستم شهری و مستقل از عناصر خود عمل نماید. در مدل‌سازی پدیده‌های شهری براساس CA، ساختار کلی زیر می‌تواند به عنوان راهنمای عمل مورد استفاده قرار گیرد:



شکل 11 ساختار پایه، جهت طراحی مدل CA شهری

(خ) دیدگاه پایین به بالا: سیستم شهری دارای خرده سیستم‌های بسیاری است که در رابطه با هم عمل می‌کنند و پدیده‌های مختلف شهری را تشکیل می‌دهند. مدل‌های سنتی این تأثیرات را به طور جداگانه بررسی می‌کنند. بنابراین نتایج مدل‌سازی شهری مجزا و بدون ارتباط با دیگر پدیده‌های شهری خواهد بود. مدل CA، این خرده سیستم‌ها را در ارتباط با هم بررسی می‌کند و نتایج کلان در اثر روابط متقابل بین خرده سیستم‌ها به دست می‌آید. روش‌شناسی پایین به بالا در اثر وجود سلول‌های محلی (سیستم CA) بروز می‌یابد.

5 - یافته‌ها

شهرها مثال بارز سیستم پیچیده هستند. تغییرات رشد شهری، متأثر از عوامل و نیروهای مختلفی ناشی از سیستم خود شهر و سیستم‌های فرا شهری است. بنابراین مدل CA با داشتن مزایایی مانند؛ فضای بودن، داشتن دیدگاه غیرمتمرکز در برخورد با مسائل، و پیوند با دیگر ابزارهای تحلیل فضایی (GIS, RS)، دارا بودن محیط بصری و سادگی نسبی در مقایسه با دیگر مدل‌های شبیه‌سازی شهری می‌تواند به عنوان لایراتوری مطلوب برای مطالعه، مدل‌سازی و بازنمایی فرایندهای پیچیده شهری عمل نماید.

در این مدل، برای درک فرایندهای شهر، بر روابط متقابل و غیرخطی بین خرده سیستم‌ها، تأکید می‌شود. در واقع ویژگی مهم مدل CA شهری، شبیه‌سازی ساختارهای کلان براساس روابط متقابل بین عناصر محلی است. این امر ویژگی سیستم‌های پیچیده و از جمله شهر نیز هست. بسیاری از پدیده‌های شهری مانند آلودگی هوا، ازدحام ترافیک، ارتقا یا زوال واحدهای همسایگی و ... در اثر عوامل پایین به بالا به وجود می‌آیند. مدل CA با تعریف توابع همسایگی تأثیر این پدیده‌ها را شبیه‌سازی می‌کند. در سیستم شهری، عکس حالت بالا نیز بسیار امکان پذیر است؛ بدین معنی که برخی ساختارهای کلان نیز مانند زیرساخت‌های حمل و نقل و سیستم‌های برنامه‌ریزی بر تغییرات شهری اثر گذارند. در مدل‌سازی CA شهری، نیاز است روابط غیرمحلی نیز دیده شود که این امر باعث اصلاحاتی در CA اولیه خواهد شد. بنابراین بر خلاف مدل

6 - نتیجه گیری

در این مقاله با مرور مطالعات انجام شده در حوزه مدل CA، ضرورت کاربرد این مدل در مطالعات شهری، شناخت ساختار مدل CA، اصول کار با مدل CA شهری، انواع و مزیت‌های این مدل در شبیه‌سازی تغییرات شهری تشریح شده و در نهایت چهارچوبی برای طراحی و ساخت مدل CA شهری ارائه شده است؛ به نحوی که پژوهش‌گران بتوانند براساس آن، مسائل مختلف برنامه‌ریزی و مدیریت شهری را با استفاده از رویکرد اتوماسیون سلولی، مدل‌سازی کنند.

مدل CA، الهام گرفته از تئوری پیچیدگی و تفکر سیستمی است. این مدل هم دارای ویژگی‌های سیستم پیچیده مانند خودسازماندهی و خودمانندی، پویایی است هم عناصر و عملکرد آن مشابه عناصر و عملکرد شهر واقعی است. با استفاده از مدل CA به عنوان ابزار کمکی تصمیم‌گیری، برای برنامه‌ریزان، سیاست‌گذاران و مدیران شهری، می‌توان عوامل مؤثر بر رشد شهری را بررسی کرد، و شناخت جامعی از الگوهای رشد شهر طی زمان و فضا، به دست آورد. همچنین سناریوهای مختلف رشد شهری برای آینده پیش‌بینی کرد و پس از ارزیابی هر یک، بهترین‌ترین را گزینش کرد، تا از مخاطرات اجتماعی و محیطی رشد ناخواسته شهر جلوگیری شود.

مدل Cellular Automata، سیستمی دینامیک است که از شبکه سلولی، وضعیت سلول، همسایگی، قوانین انتقال و زمان تشکیل شده است. در این مدل فضا به واحدهای فضایی با اشکال منظم یا غیرمنظم (سلول) و زمان به دوره‌های ناپیوسته‌ای تقسیم می‌شود. هر یک از سلول‌ها دارای یک وضعیت (از بین چند وضعیت ممکن) است که بسته به وضعیت خود سلول و وضعیت سلول‌های همسایگی بلافاصله آن، براساس قوانین انتقال به روز می‌شود.

در به کارگیری مدل CA در مطالعات شهری، چگونگی تعریف هریک از عناصر مدل بر خروجی‌ها تأثیرگذار است و روش‌های مختلفی برای تعریف هریک از این عناصر وجود دارد. بنابراین هریک از این عناصر باید با توجه به هدف مدل‌سازی و منطقه مورد آزمایش با استفاده از روشی مناسب به صورتی تعریف شود که خروجی‌های مدل تحت

تأثیر عملکرد واقعی شهر قرار گیرد و تا حد امکان کمترین تأثیر را از چگونگی تعریف عناصر داشته باشد.

پی‌نوشت

- ¹ Urban Growth Modeling
- ² Cellular Automata Model
- ³ Urban Cellular Automata Model
- ⁴ (Xie, 1996; Couclelis, 1997; Batty et al., 1997, 1999; Clarke et al., 1997; Clarke and Gaydos, 1998; White and Engelen, 1997, 2000; Wu and Webster, 1998; Li and Yeh, 2000, 2001, 2002; Barredo et al., 2003; Fanget al., 2005; Yeh and Li, 2006)
- ⁵ What If
- ⁶ Stanislaw M. Ulam
- ⁷ John Von Neumann
- ⁸ John Horton Conway
- ⁹ Game of Life
- ¹⁰ Tobler
- ¹¹ Lattice
- ¹² Wu
- ¹³ White
- ¹⁴ Engelen
- ¹⁵ Clarke
- ¹⁶ Narimah Samat
- ¹⁷ Scale-Independent
- ¹⁸ Cell State
- ¹⁹ Neighborhood
- ²⁰ Moor
- ²¹ Von
- ²² Gaydos
- ²³ Transition Rules
- ²⁴ Dispersion Coefficient
- ²⁵ Breed Coefficient
- ²⁶ Spread Coefficient
- ²⁷ Slope Coefficient
- ²⁸ Road Gravity Coefficient
- ²⁹ Analytical Hierarchy Process
- ³⁰ Multi Criteria Evaluation
- ³¹ Fuzzy Sets

مراجع

- [1] Thorrens P.M., O'Sullivan D., *Cellular automata and urban simulation: where do we go from here?*, Environment and Planning B, No.28, 2001, pp. 163-168.
- [2] He C., Okada N., Zhang Q., Shi P. and Li J., *Modeling dynamic urban expansion processes incorporating a potential model with cellular automata, landscape and urban planning*, No.86, 2008, pp. 79-91.
- [3] O'Sullivan D., *Exploring spatial process dynamics using irregular cellular automaton models*, Geographical Analysis, No. 33, 2001, pp. 1-18.

- [4] Yeh A., Li X., *Errors and uncertainties in urban cellular automata*, Computers, Environment and Urban Systems, No. 30, **2006**, pp. 10-28.
- [5] White R., G Engelen., *Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modeling*, Environment and Planning B, No. 24, **1997**, pp. 235-246.
- [6] Liu Y. and Phinn Syuart R., *Developing a cellular automata model of urban growth incorporating fuzzy set approaches*”, Computers, Environment and Urban Systems, No. 27, **2003**, pp. 537- 658.
- [7] White R. and Engelen G., *High-resolution integrated modeling of the spatial dynamics of urban and regional systems*, Computers, Environment and Urban Systems, No. 24, **2000**, pp. 383-400.
- [8] Batty M., Couclelis H. and Eichen M., *Urban systems as cellular automata*, Environment and Planning B, No. 24, **1997**, pp. 159-164.
- [9] Clarke K.C., Hoppen S. and Gaydos I., *A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area*, Environment and Planning B, No. 24, **1997**, pp. 247-261.
- [10] White R., Engelen G., *Cellular automata and fractal urban form: a cellular modeling approach to the evolution of urban land use patterns*, Environment and Planning A, No. 25, **1993**, pp. 1175-1199.
- [11] Li X., Yeh A., *Calibration of cellular automata by using neural networks for the simulation of complex urban systems*, Environment and Planning A, No. 33, **2001**, pp. 1445-1465.
- [12] Li X., Yeh A., *Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS*, International Journal of Geographical Information Science, No. 16, **2002**, pp. 323-343.
- [13] Li X., Yang Q., Liu X., *Calibration Discovering and evaluating urban signatures development using cellular automata*, Landscape and Urban Planning, No. 86, **2008**, pp. 177-186.