مدل اتوماسیون سلولی، روشی نوین در شبیه‌سازی رشد شهری

راضیه رضازاده[1] و مهرداد میراحمدی[2]

چکیده: مدل‌سازی و شبیه‌سازی رشد شهری، می‌تواند ابزار بسیار مفیدی برای تشریح روابط متقابل بین محیط انسان‌ساخت و محیط طبیعی- به منظور کمک به تصمیم‌گیری برنامه‌ریزان 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 برنامه‌ریزی است. این مقاله به شناخت مدل اتوماسیون سلولی و کاربرد آن در شبیه‌سازی رشد شهری می‌پردازد. در بخش نخست مقاله اصول و عناصر تشکیل‌دهنده آن، معرفی و در بخش دوم چگونگی کار مدل اتوماسیون سلولی در شبیه‌سازی 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 می‌نماید؛ به نحوی که پژوهشگران بتوانند براساس آن، پدیده‌های شهری را با استفاده از این رویکرد جدید، مدل‌سازی کنند.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی رشد شهری[1]، مدل اتوماسیون سلولی[2]، مدل اتوماسیون سلولی شهری[3]

۱- مقدمه

شهرها سیستم‌هایی پیچیده، باز، پویا و خودسازمانده هستند که در فرایند توسعه آنها، بسیاری از نشانه‌های پیچیدگی مانند: ابعاد فرکتال، خودمانندی، خودسازماندهی، ظهور و... وجود دارد [۱]. درک مکانیسم فرایند رشد شهری در برنامه‌ریزی و مدیریت شهری به منظور رسیدن به شکل شهری پایدار بسیار مهم است. مدل‌های فضایی، ابزارهایی مفید برای درک فرایند توسعه شهری، ابزار کمکی سیاستگذاری مدیریت و برنامه‌ریزی شهری و فراهم کننده اطلاعات برای ارزیابی تأثیرات شهری بر محیط‌زیست و اکوسیستم هستند [۲]. با مدل‌سازی سیستم پیچیده شهری، الگوهای فضایی و روندهای رشد شهری را می‌توان شبیه‌سازی کرد و درک بهتری از سیستم شهر به عنوان یک کل، به دست آورد. بیشتر روش‌هایی که تاکنون به مدل‌سازی ویژگی‌های پیچیده شهر پرداخته‌اند مدل‌هایی ایستا، خطی، متمرکز و براساس تئوری سیستم ساده بالا به پایین بودند. طی دو دهه گذشته پژوهشگران برای غلبه بر این نارسایی‌ها، از روش جدیدی به نام مدل اتوماسیون سلولی (CA) که دارای ویژگی‌های پویا، غیرخطی، غیرمتمرکز، و پایین به بالا است، استفاده کرده‌اند. در دو دهه گذشته مدل CA به وسیله پژوهش‌گران بسیاری در مطالعات شهری به کارگرفته شده است[4]. در حوزه شهری، مدل CA می‌تواند در پاسخ به بسیاری از سؤالات شرطی[5] به کار رود، با استفاده از این روش، می‌توان برای رشد شهری- قبل از این که اتفاق بیفتد- سناریوهای مختلف پیش‌بینی کرد تا بتوان از نقاط ضعف و قوت تصمیم‌گیری‌ها آگاهی یافت. با استفاده از مدل اتوماسیون سلولی در شبیه‌سازی رشد شهری، می‌توان به پاسخ موارد زیر دست یافت:

الف) درک چگونگی سیستم پیچیده شهری

ب) شناخت سیستماتیک تغییرات ساختاری شهر

پ) شناخت و پیش‌بینی فرایندهای فضایی زمانی سیستم رشد شهری

ت) شناخت عوامل مؤثر بر رشد شهر، طراحی سناریوهای مختلف رشد شهری و گزینش بهینه‌ترین 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 برنامه‌ریزی شهری به ویژه در شبیه‌سازی رشد شهری، اصول کار با مدل CA شهری، انواع و مزیت‌های این مدل در شبیه‌سازی تغییرات شهری، نشان داده می‌شود. هدف، شناخت مدل CA و چگونگی به کارگیری آن در مطالعات شهری و نهایتاً

تاریخ دریافت مقاله ۸۷/۹/۲۹ تاریخ تصویب نهایی۸۸/۴/۸

[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

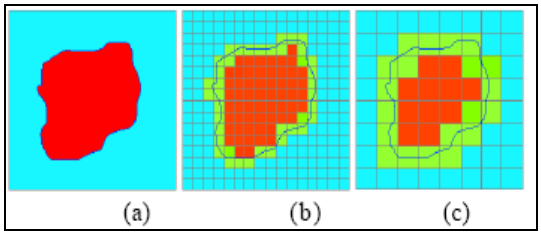
ارائه چهارچوبی برای طراحی و ساخت مدل CA شهری است، به نحوی که پژوهش‌گران بتوانند براساس آن، مسائل مختلف برنامه‌ریزی و مدیریت شهری را با استفاده از رویکرد اتوماسیون سلولی شبیه‌سازی کنند.

۲- ساختار مدل CA

مدل CA اولین بار در دهه ۱۹۴۰ و ۱۹۵۰ توسط دو ریاضی‌دان به نام اولام[۶] و نیومن[۷]، به منظور شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده در فیزیک و زیست‌شناسی به کار گرفته شد. به علت نبود ظرفیت بالای محاسبه‌ای تا دهه ۱۹۷۰، CA پژوهشگران کمی از آن استفاده می‌کردند تا این که در سال ۱۹۷۰، جان هارتون[۸]، مدل معروفش به نام بازی زندگی[۹] را ساخت. از آن پس مدل CA در سایر حوزه‌های مطالعاتی دیگر نیز مورد استفاده قرار گرفت. مدل‌سازی شهری در فضای سلولی، ابتدا توسط توبلر[۱۰]، با تعریفی که از جغرافیای سلولی ارائه داده است، وارد مطالعات شهری شده است. در سال‌های اخیر پژوهشگران مختلف نشان داده‌اند که CA ابزار مناسبی برای مدل‌سازی تغییرات شهری است و از آن در موضوعات گوناگونی از پدیده‌های شهری از شبیه سازی ترافیک، تغییرات کاربری زمین، تغییرات پوشش زمین، رشد شهری و... استفاده کرده‌اند. عناصر مدل CA به شرح زیر است.

۲-۱ شبکه سلولی[۱۱]

فضایی که CA در آن وجود دارد شبکه CA نام دارد و در طول زمان، تکامل (تغییر) می‌یابد. این شبکه می‌تواند ۱ تا N بعد داشته باشد؛ اما بیشتر مدل‌های CA، به ویژه مدل‌هایی که با اهداف فضایی و شهری ساخته شده‌اند (مانند مدل‌های شهری)، در یک شبکه دوبُعدی تشکیل می‌شوند. این امر ناشی از طبیعت پیکسلی داده‌های سنجش از دور و دیگر منابع و همچنین برنامه‌نویسی آسان‌تر است. در مدل‌سازی سیستم شهری با استفاده از مدل CA، در تعریف شبکه سلولی، انتخاب شکل و مقیاس سلول بر خروجی‌های مدل، بسیار تأثیرگذار است. در CA اولیه (کلاسیک)، سلول‌ها به صورت اشکال منظم، اغلب به شکل مربع یا دیگر اشکال منظم (از شش ضلعی و مثلث نیز برخی موارد استفاده شده است) تعریف می‌شوند. در مدل‌سازی شهری معمولاً به علت طبیعت داده‌های ورودی و سهولت محاسبه و برنامه‌نویسی، سلول‌های همگن مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ اما تحت شرایطی خاص استفاده از سلول‌های غیرهمگن به علت واقعی‌تر بودن شکل آنها (مانند قطعات زمین) ممکن است مناسب‌تر باشد [۳]. مقیاس سلول، سطح جزییات و روابط متقابل بین سلول‌ها را نشان می‌دهد. سلول‌های بزرگ‌تر، حجم داده‌ها را کاهش می‌دهند؛ اما منجر به کاهش دقت فضایی نیز می‌شوند[۴]. در مدل‌های CA که تاکنون در مطالعات شهری به کار رفته‌اند، سلول‌ها با مقیاس‌های متفاوتی تعریف شده‌اند. برای مثال وو[۱۲] در مدل‌های خود از سلول‌های با ابعاد ۲۸/۵ متر و ۲۰۰ متر برای یک ناحیه با وسعت ۲۲۴ کیلومتر مربع استفاده کرده است. وایت[۱۳] و انگلن[۱۴] در شبیه‌سازی الگوی کاربری زمین در شهرهای آمریکا از سلول‌های۵۰۰ مترمربع و ۲۵۰ مترمربع استفاده کرده‌اند [۵]. کلارک[۱۵] در شبیه‌سازی رشد شهری در ناحیه سانفرانسیسکو از سلول‌های پایه ۳۰۰×۳۰۰ متر؛ ولی در مدل‌سازی منطقه واشنگتن/ بالتیمور طی چند مرحله از سلول‌های ۲۱۰ و ۴۲۰ و ۸۱۰ و ۱۶۸۰ متر استفاده کرده‌اند.



شکل ۱ تأثیر مقیاس سلول
a: ناحیه مورد نظر b: سلول اندازه کوچک c: سلول با اندازه بزرگ [۶]

روش تعیین مقیاس سلول‌ها، در برخی مطالعات انجام شده، بستگی به نظرات و تجربیات شخصی پژوهش‌گر داشته است. کلارک روش استفاده از سلول‌های با اندازه‌های متفاوت بزرگ تا کوچک را طی چند مرحله پیشنهاد داده است. ناریم اسمات[۱۶] طی مطالعه‌ای که حساسیت پذیری سلول در مدل CA را بررسی کرده است ، پیشنهاد می‌کند که مقیاس سلول باید متناسب با مقیاس توسعه مورفولوژی شهر در دامنه‌ای انتخاب شود، به طوری که نتایج مدل

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

۲-۲ وضعیت سلول[18]

وضعیت سلول، حالتی است که هر سلول در فرایند تکامل CA می‌تواند داشته باشد. سلول در مدل اولیه CA اغلب دارای وضعیت بولین (۰یا ۱) بود، مانند مدل ماشین تورینگ؛ اما می‌توان وضعیت‌های 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 ساده‌تر خواهد بود. به عنوان مثال در مدل ارائه شده توسط نیومن ۲۹ حالت مختلف برای وضعیت سلول‌تعریف شده است. در مدل‌های‌شهری با توجه به هدف مدل‌سازی و وضعیت سلول‌های معمولاً طبقه‌بندی‌های کاربری زمین، ارزش زمین، پوشش زمین و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. در برخی موارد نیز وضعیت سلولها به صورت باینری، توسعه یافته یا توسعه نیافته (شهری یا غیرشهری) تعریف می‌شوند. همچنین در برخی مطالعات اجتماعی از تراکم جمعیت، وضعیت اجتماعی اقتصادی، ویژگی‌های جمعیتی و در برخی مطالعات طبیعی سطح آب‌های زیرزمینی، جنس خاک و ... نیز به عنوان وضعیت سلول مورد استفاده قرار گرفته است [۷].

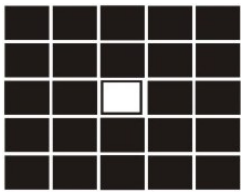
۲-۳ همسایگی[19]

براساس تئوری CA، رفتار کلان سیستم خودسازمانده، توسط قوانین انتقال که در سطح خرد تعریف می‌شوند، کنترل می‌شود. این عملکرد CA در مدل‌های شهری با تعریف همسایگی نشان داده می‌شود. 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 وضعیت‌های مختلف تغییر پیدا می‌کند. اندازه همسایگی برای مدل‌های مختلف CA، فرق دارد. در CA یک بعدی، هر سلول دارای سه سلول همسایه است (شکل۲). مشهورترین همسایگی در CA دو بعدی، همسایگی مور[20] شامل ۹ سلول به صورت ۳×۳ سلول، و همسایگی ون[21] شامل ۵ سلول است (شکل۳ و۴). در برخی مدل‌های CA، همسایگی به صورت ۵×۵ یا ۷×۷ تعریف شده‌اند.

شکل ۲ همسایگی در مدل CA یک بعدی

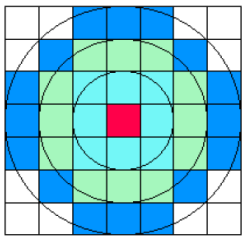
شکل ۳ همسایگی ون در مدل CA دو بعدی

شکل ۴ همسایگی مور

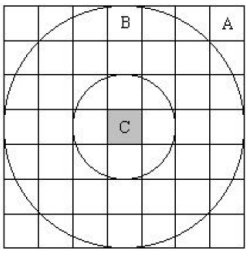


شکل ۵ همسایگی گسترش یافته مور

در برخی موارد، همسایگی مستطیلی، مانند همسایگی مور به ویژه همسایگی با اندازه بزرگ باعث از بین رفتن داده‌ها در جهات مختلف می‌شود. در شکل ۷، در یک همسایگی ۷×۷ تأثیر سلول A با B برسلول C متفاوت است، گرچه هر دو در یک ردیف قرا دارند؛ زیرا فاصله سلول B و سلول A با سلول C متفاوت است. برخی مانند لیو (۲۰۰۳) برای رفع این مشکل از همسایگی دایره‌ای با شعاع‌های مختلف استفاده کرده‌اند.



شکل ۶ همسایگی دایره‌ای در سه مقیاس کوچک، متوسط و بزرگ



شکل ۷ تأثیر شکل همسایگی بر رفتار مدل

در عمل، همسایگی‌های بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس، هر دو، در مدل‌های توسعه شهری به‌کار رفته‌اند. برخی مانند کلارک و گایدوس[۲۲] (۱۹۹۸) از همسایگی ۹ سلولی، برخی از همسایگی‌های ۵×۵ یا ۷×۷ سلولی، و حتی برخی نیز مانند وایت و انگلن (۱۹۹۴ و ۱۹۹۳) از همسایگی ۱۱۳ سلولی استفاده کرده‌اند.

۲-۴ 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 هم زمان 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.

۲-۵ قوانین انتقال[۲۳]

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 [۸]. 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 پراکندگی[۲۴]، ضریب زایش[۲۵]، ضریب گسترش[۲۶]، ضریب شیب[۲۷]، ضریب جاذبه شبکه راه[۲۸])[۹].

ب) پیش‌بینی احتمال توسعه براساس فرایند تحلیل سلسله مراتبی[۲۹] و ارزیابی چند معیاری[۳۰] [۱۹].

پ) تعریف قوانین انتقال براساس مجموعه‌های فازی[۳۱] [۶].

ت) محاسبه پتانسیل تغییر براساس ماتریس از قبل تعریف شده [۱۰].

ث) شبیه سازی توسعه شهری براساس شبکه‌های عصبی [۱۱و۱۲].

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 [۱۳].

۳- چگونگی کار مدل CA

اگر $S^t_{x_{ij}}$ وضعیت سلول x_{ij} در موقعیت i, j در زمان t باشد، $S^t_{x_{ij}}$ متعلق به تعداد محدودی (قابل شمارش) از وضعیت‌های ممکن سلول در فضای سلولی است و اگر $S^{t+1}_{x_{ij}}$ وضعیت سلول در زمان $t+1$ باشد بنابرین:

$$S_{x_{ij}}^{t+1} = f\left(S_{x_{ij}}^{t}, S_{\Omega_{x_{ij}}}^{t}\right) \quad (۱)$$

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:

$$S_{x_{ij}}^{t+1} = f\left(S_{\Omega_{x_{ij}}}^{t}\right) \quad (۲)$$

معادله شماره۲ 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 بیان کننده قوانین انتقال می‌باشند. برای مثال، مدل مشهور Game of life با 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 ۱۰۰ سلول در ۱۰۰ سلول در نظر بگیرید که هر کدام از این سلول‌ها ۲۵۰۰ مترمربع را نشان دهد. فرض کنید تنها ۵ سلول در مرکز ناحیه، دارای وضعیت شهری باشند (شکل شماره ۸، t=0). همچنین فرض کنید شرایط 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 ۹ سلولی (۸ سلول همسایه به علاوه سلول مورد آزمایش یا همسایگی Moore)، تغییر وضعیت سلول‌ها توسط قانون زیر کنترل می‌شود:

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

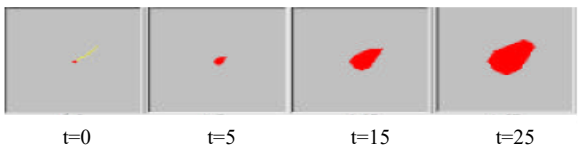
با این مدل، سناریوی توسعه شهری به صورت شکل زیر نشان داده می‌شود:

شکل ۸ مدل توسعه شهری با CA در یک ناحیه هموار با همسایگی مور [۶]

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. بنابرین 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.

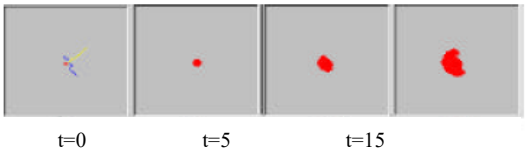
با این دو قانون، سناریوی توسعه شهری در این ناحیه تغییر خواهد کرد و به شکل شماره ۹ تغییر خواهد یافت.



شکل ۹ مدل توسعه شهری تولید شده با CA و تأثیر راه [۶]

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

اگر از یک سلول، رودخانه‌ای بگذرد، پس هیچ توسعه‌ای بر آن سلول اتفاق نمی‌افتد.



شکل ۱۰ مدل توسعه شهری تولید شده با CA و تأثیر راه و رودخانه [۶]

۴- مزیت‌های مدل CA شهری

به طور کلی، سه نوع مدل CA شهری وجود دارد. اولین نوع مدل‌های CA شهری با هدف آزمون ایده‌ها و فرضیات مرتبط با تئوری‌های شهری استفاده می‌شوند. نوع دوم مدل‌هایی هستند که به شبیه‌سازی شهرهای واقعی می‌پردازند و در نوع سوم، استفاده از CA به منظور ایجاد مدل‌های برنامه‌ریزی هنجاری برای شبیه‌سازی ساختارهای مختلف شهری براساس اهداف برنامه‌ریزی است. مزیت‌های مدل CA را می‌توان به شرح زیر برشمرد:

الف) داشتن ویژگی فضایی: برخلاف بسیاری از مدل‌های سنتی- که در برخورد با پدیده‌های فضایی ضعف بسیاری دارند، CA می‌تواند این ویژگی‌های فضایی را در اثر قوانین انتقال تولید کند.

ب) همسازی با سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور: مدل CA به طور ذاتی با داده‌های رستری همسازی دارد. در واقع CA&GIS&RS دارای ویژگی‌های مشابهی هستند و بسیار خوب با هم هماهنگ می‌شوند. اول این که هم CA و هم GIS فضا را به واحدهای فضایی مجزا تقسیم می‌کنند (سلول در CA و پلیگون یا سلول در GIS) دوم؛ CA و GIS اطلاعات توصیفی را به روش لایه‌ای نشان می‌دهند (Them در GIS و وضعیت سلول در CA) و توسط توابعی آنها را تغییر می‌دهند. (تکنیک همپوشانی در GIS و قوانین انتقال CA). سوم وضعیت سلول می‌تواند مستقیماً از اطلاعات GIS یا RS گرفته شود.

پ) دینامیک (پویایی): بیشتر مدل‌های سنتی در برخورد با پدیده‌های پویا ضعف دارند، این مدل‌ها در واقع از یک زمان به زمان دیگر جهش می‌کنند. اغلب این جهش چندین سال است، که در این دوره خیلی از تغییرات می‌تواند در شهر اتفاق بیفتد. مدل CA قابلیت شبیه‌سازی 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 دوره‌های زمانی کوتاه اتفاق بیفتند این مسئله در مدل‌سازی شهری بسیار مهم است.

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

ث) مطلوب برای شبیه‌سازی پدیده‌های پیچیده: سیستم شهری، یک سیستم پیچیده غیرخطی است که بسیاری از ویژگی‌های پیچیده مانند خودسازماندهی، خودمانندی و فرکتال را در خود داراست. مدل‌سازی این ویژگی‌ها با مدل‌های شهری سنتی بسیار مشکل است. درحالی که CA به عنوان یک نوع سیستم، می‌تواند ذاتاً این ویژگی‌ها 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 شبیه‌اند. علاوه بر این هسته اصلی CA- یعنی قوانین انتقال در مقایسه با توابع ریاضی در مدل‌های سنتی- ساده‌تر هستند. این قوانین ساده ممکن است منجر به تولید الگوی فضایی پیچیده شوند. به علاوه برخلاف مدل‌های شهری سنتی، که در فرایند مدل‌سازی پیچیده است، CA اجازه می‌دهد که پیچیدگی در درون مدل ظهور پیدا کند و طراحی مدل را محدود ننماید.

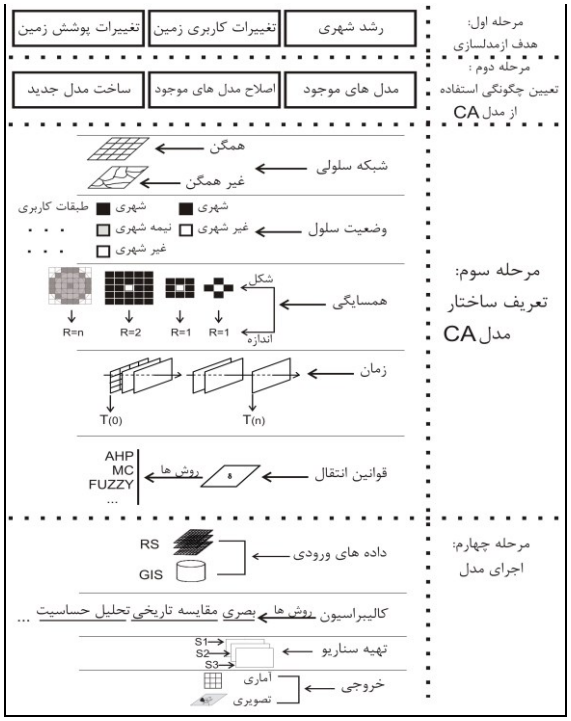
خ) دیدگاه پایین به بالا: سیستم شهری دارای خرده سیستم‌های بسیاری است که در رابطه با هم عمل می‌کنند و پدیده‌های مختلف شهری را تشکیل می‌دهند. مدل‌های سنتی این تأثیرات را به طور جداگانه بررسی می‌کنند. بنابرین نتایج مدلسازی شهری مجزا و بدون ارتباط با دیگر پدیده‌های شهری خواهد بود. مدل CA، این خرده‌سیستم‌ها 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.

۵- یافته ها

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؛ فضایی 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 لابراتوری مطلوب برای مطالعه، مدل‌سازی و بازنمایی فرایندهای پیچیده شهری عمل نماید.

در این مدل، برای درک فرایندهای شهر، بر روابط متقابل و غیرخطی بین خرده‌سیستم‌ها، 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 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 هریک از عناصر می‌تواند در تغییر نتایج مدل تأثیرگذار باشد؛ لذا در این مرحله دقت بسیار لازم است تا نتایج مدل تا حدامکان 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 ۱۱ ساختار پایه، جهت طراحی مدل CA شهری

۶- 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، بهینه‌ترین 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 بلافصل 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.

پی نوشت

[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 andWebster,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] Slop 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.