اولین کنفرانس مهندسی فناوری اطلاعات مکانی
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی نقشه‌برداری
۲۹ و ۳۰ دی ماه ۱۳۹۴

The 1st National Conference on
Geospatial Information Technology
K.N.Toosi University of Technology
Faculty of Geomatics Engineering
19 - 20 January 2016

بررسی خودکاره سلولی گرافی در مدلسازی مناطق شهری

مصطفی عزیزخانی*[۱]، عبدالله وکیلی[۲]، محمدرضا ملک[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و عمران - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش ازدور - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و عمران - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته
۳- دانشیار گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

چکیده :

خودکاره سلولی گرافی یک مدل مکانی پویا است که به اختصار Graph-CA نامیده می‌شود. خودکاره سلولی گرافی در واقع نمایشی دیگر از مدل سنتی نمایش فضا و جبر جغرافیایی است. خودکاره سلولی گرافی به همراه ویژگی‌های ساختاری ویژه‌اش اغلب به صورت ارتباطات بین زیرمجموعه‌ای از سلول‌ها تعریف می‌شود. این مدل یک تعمیم از خودکاره سلولی سنتی است. خودکاره سلولی گرافی با رعایت تمامی ضوابط و قوانین حاکم بر خودکاره سلولی و گراف ساخته می‌شود. این مدل، امکان استفاده از روش‌های موجود در حوزه‌ی گراف به منظور تشریح ساختار را فراهم می کند. همچنین امکان استفاده از روش‌های متعدد موجود در حوزه خودکاره سلولی جهت تشریح و مشاهده‌ی پویایی‌های موجود در فرآیندها را به صورت همزمان در اختیار قرار می‌دهد. بسیاری از تحقیقات صورت گرفته در حوزه‌ی خودکاره سلولی گرافی براساس مزیت استفاده همزمان از امکانات گراف و خودکاره سلولی به وجود آمده است.

واژه‌های کلیدی : خودکاره سلولی، خودکاره سلولی گرافی، مدلسازی

نویسنده مکاتبه کننده : مصطفی عزیزخانی
آدرس پستی : خیابان نواب – کوچه نسترن – پلاک ۱۷- ۳۴۱۹۷۱۷۳۶۶
تلفن : ۰۹۱۲۷۸۷۰۸۵۸
آدرس پست الکترونیک : az431mos@gmail.com

۱- مقدمه

مدل‌های خودکاره سلولی شهری و منطقه‌ای در سال‌های اخیر تغییرات چشمگیری یافته است. امروزه این مدل‌ها به مدل‌های سنتی تبدیل‌شده‌اند[۱]. به‌طور خلاصه یک خودکاره سلولی یک شبکه یا فضایی از سلول‌ها است. این مجموعه در واحدهای زمانی گسسته تغییر می کنند. حالت هر سلول در هر واحد از زمان بر اساس حالت فعلی‌اش و حالت سلول‌های همسایه‌اش در فضای سلولی تعیین می‌گردد[۲]. محدوده‌های همسایگی سلول، از فضای سلولی تعریف می‌شود. این محدوده می‌تواند شامل سلول‌های مجاور بی‌فاصله یک سلول در یک شبکه‌ی سلولی باشد. نمونه‌ای غیر جغرافیایی از خودکاره سلولی، بازی زندگی کانوی است، که رفتارهای سراسری و پیچیده را فقط بر مبنای دو حالت مجاز سلولی و قوانین انتقال حالت ساده بیان می‌نماید[۳]. چنین رفتارهای سراسری، اغلب در ساخت مدل‌های شهری و منطقه‌ای دیده شده و کاربرد دارد[۴]. از آنجایی که به نظر می‌رسد ساختار سراسری در سیستم‌های خودکاره سلولی، اغلب از تعاملات محلی ضعیف بین سلول‌ها نشأت می‌گیرد [۵, ۶]. بنابراین، نمونه‌هایی چون بازی زندگی کانوی می‌توانند در این زمینه کاربرد گسترده‌ای داشته باشند خودکاره های سلولی دارای ماهیت مکانی هستند. پس برای شبیه سازی انواع داده های مکانی مناسب اند. از طرفی پویا و مبتنی بر قانون هستند. پس می توان از آنها در شبیه سازی گستره وسیعی از رفتار های مکانی استفاده کرد[۵][۷]. خودکاره های سلولی انواع گوناگونی را شامل می شوند. بسیاری از آن ها ساده هستند. از یک حالت اولیه به سوی یک وضعیت همگون می روند. یعنی همه صفر یا همه یک می شوند. می توان گفت، قوانین حاکم بر آن هرگونه اطلاعاتی در حالت اولیه را از بین می برند[۶]. ولی قصد ما شبیه سازی دنیای واقعی است. پدیده های طبیعی معمولا رفتار بسیار پیچیده تری از خود نشان می دهند. برای حل این مشکل استفاده از انواع خودکاره های سلولی ویژه توصیه می شود. این امر، انگیزه‌ی اصلی برای معرفی خودکاره سلولی مبتنی بر گراف است. در خودکاره سلولی مبتنی بر گراف قوانین همسایگی‌های هر سلول در سراسر فضای سلولی یکنواخت نیست. پتانسیل‌های نهفته چنین دیدگاهی در مدلسازی شهری قبلاً در بحث مدل‌های سه بعدی پیرامونی توسط Couclelis مطرح گردیده است[۷]. پذیرش این چهارچوب مفهومی، سبب می‌شود که بتوان یک مدل سه بعدی از فضا را به عنوان یک نوع خاص از خودکاره سلولی با عنوان خودکاره سلولی گرافی یا خودکاره [۸]سلولی بی قاعده معرفی نمود. بنابراین می‌توان خودکاره سلولی گرافی را به عنوان جایگزینی برای روش رسمی جبر جغرافیایی در نظر گرفت. احتمالاً هر بیان رسمی بسته به حوزه‌ی کاری برتر از دیگری خواهد بود. در هر حال، خودکاره سلولی گرافی مانند جبر جغرافیایی یک تعمیم مفید از مدل‌های خودکاره سلولی است. همانطور که در ادامه گفته خواهد شد، خودکاره سلولی گرافی برخی از ابزارهای مفهومی مفید را جهت حل مسئله‌ی ارتباط بین ساختار و فرآیند ، شکل و کارکرد فراهم می‌نماید.

۲- مدل پیرامونی از فضا و جبر جغرافیایی

مدل پیرامونی از فضا و جبر جغرافیایی در تعدادی از مقالات توسط Couclelis و Takeyama مورد بررسی قرار گرفته است [۹-۱۱]. این ایده‌ها از مشاهده‌ی ارتباط بین مدل‌های مطلق و نسبی از فضا [۹] و همچنین به عنوان یک تعمیم از جبر نقشه‌ای Tomlin [۱۲] نشأت گرفته است. در اینجا، برای معرفی خودکاره سلولی گرافی به عنوان شکل دیگری از این ایده آنچه که لازم است را بیان می‌نماییم.

اگر از دیدگاه مفهوم پیرامونی به حوزه‌ی فضا بنگریم، ویژگی‌های مهم یک مکان فقط به خود همان مکان خلاصه نمی‌شود، بلکه این مکان به عنوان یک بخش از یک ساختار فضای سراسری در نظر گرفته می‌شود. موقعیت در فضا که یک مکان آن را اشغال نموده است، مجزّا از وضعیت قرارگیری آن است[۱۳]. موقعیت قرارگیری به صورت مکان نسبی

آن با توجه به دیگر مکان‌ها تعریف می‌شود. مفهوم مکانی پیرامونی تلاش می‌کند که هر دو مفهوم موقعیت[1] و وضعیت[2] قرارگیری را با استفاده از مفهوم همسایگی با هم تطبیق دهد. تعریف فضای پیرامونی مطابق [۱۴] عبارتست از:

در فضای پیرامونی، اطلاعات مکانی به عنوان یک مکان مطلق، دارای سیستم مختصات می‌باشند، اما علاوه به این به هر مکان یک شناسنامه الصّاق شده است که دربرگیرنده‌ی مکان نسبی آن با توجه به بخشی است که این مکان در آن واقع شده است. مفهوم کلیدی در مکان مطلق، قطعه‌ای است که ارجاع جغرافیایی دارد و مفهوم کلیدی در مکان نسبی مفهوم رابطه‌ی مکانی است، در اینصورت می‌توان بیان داشت که مفهوم کلیدی در فضای پیرامونی بحث همسایگی است. یک همسایگی برای یک مکان شامل تمام مکان‌هایی است که ممکن است به گونه‌ای بر این مکان تاثیر داشته باشند، حال این تاثیر چه از طریق ارتباط پیرامونی و چه از طریق ارتباط کارکردی باشد.

نزدیکی و وابستگی بالای موجود بین این دیدگاه و آنچه که در بحث ارتباطات همسایگی در مدل‌های مبتنی بر خودکاره سلولی وجود دارد به وضوح قابل مشاهده است؛ بنابراین از این وابستگی می‌توان جهت برقراری ارتباط بین مدل مکانی پیرامونی و مدل خودکاره سلولی استفاده نمود[۱۵]. مدل پیرامونی قادر است هر دو مفهوم فضای مطلق و فضای نسبی را در خود جای دهد. این دو مفهوم، پیشینه‌ی طویلی در رقابت با یکدیگر در تئوری جغرافیایی دارند[۱۶].

۳- مدل‌های خودکاره سلولی گرافی

پس از معرفی یک مدل پیرامونی از فضا در بخش قبل، در این بخش به معرفی یک جایگزین رسمی ریاضی برای این مدل می‌پردازیم. این روش تلاش می‌کند که سادگی شهودی موجود در خودکاره سلولی را حفظ نموده و از طرفی همه‌ی کلیات مهم موجود در چهارچوب جبر جغرافیایی را نیز حفظ نماید. نکته کلیدی به منظور درک ارتباط بین این دو روش در آن است که بپذیریم که ساختار مکانی قرار گرفته در زیر مدل مکانی پیرامونی را به راحتی می‌توان توسط یک گراف درک و تشریح نمود.

در ابتدا چند نماد در رابطه با گراف‌ها را معرفی می‌نماییم:

گراف G: از دو مجموعه به نام مجموعه گره‌ها و مجموعه یال‌ها تشکیل شده که به ترتیب با V(G) و E(G) نمایش می‌دهند.

V (G): مجموعه‌ی گره‌ها

N: سایز گراف

E (G): مجموعه‌ی یال ها

V_iV_j: یک مسیر از V_i به V_j

Neighborhood: مجموعه گره‌هایی که از طریق یال‌های موجود در E به V_i وصل هستند.

$$N(v_i) = \{v_j | v_j v_i \in E(G)\}$$

قابل ذکر است که در بحث‌های فعلی فرض بر این است که گراف مورد بررسی جهت دار بوده و در نتیجه V_{ij} با V_{ji} تفاوت دارد.

[1] Location
[2] Situation

$$N_{\text{in}}(v_i) = \{v_j | v_j v_i \in E(G)\}$$

$$N_{\text{out}}(v_i) = \{v_j | v_i v_j \in E(G)\}$$

بنابراین، یک مدل خودکاره سلولی گرافی تشکیل شده است از یک گراف جهت دار G و یک مجموعه از وضعیت‌های سلول (گره) مجاز با نام{Sj}=S می‌باشد گراف G تشکیل شده است از عناصر مکانی که توسط مجموعه گره‌های V(G) نمایش داده می‌شود و ارتباطات مستقیم بین این عناصر که به وسیله یال‌های موجود در E(G) نشان داده می‌شوند. در هر گراف، همسایه یک گره V_i شامل همه گره‌های موجود در V(G) است که با آن مجاور هستند. در بحث ساخت یک مدل پیرامونی پویا، همسایگان داخلی گره V_i که با $N_{in}(V_i)$ نشان داده می‌شود شامل مجموعه مکان‌هایی است که بر گره (مکان) V_i تاثیر می‌گذارند. از بالا نویس (t) برای مشخص نمودن حالت ویژه یک گره در زمان t و یا مشخص نمودن یک حالت سراسری در یک همسایگی در زمان t استفاده می‌شود. بنابراین، $s_i^{(t)}$ حالت مکان v_i در زمان t است و خودکاره سلولی مطابق زیر است:

$$s_i^{(t+1)} = f[S_i^{(t)}]$$

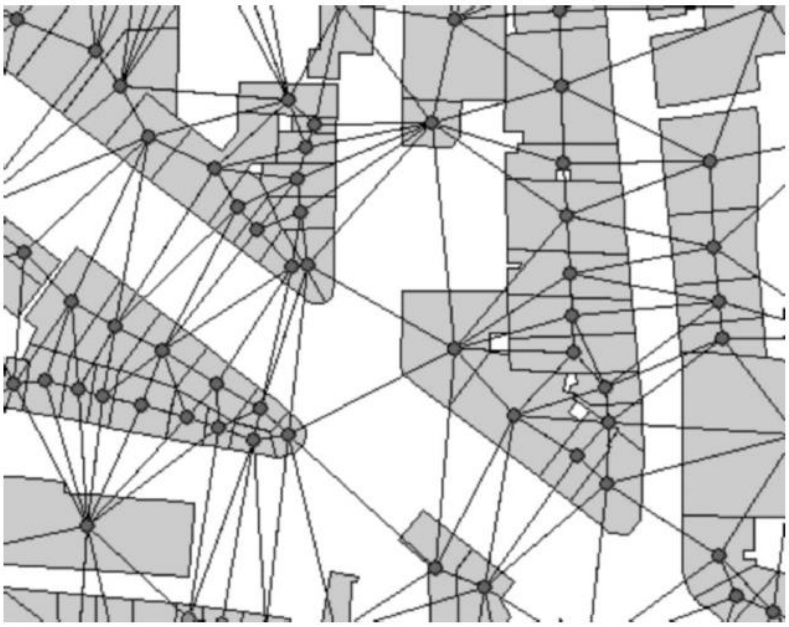
که در آن $S_i^{(t)}$ مجموعه حالات همسایگان داخلی v_i در زمان t است که:

$$S_i^{(t)} = \{s_j^{(t)} | v_j \in N_{\text{in}}(v_i)\}$$

توجه شود که حالت مکان v_i در زمان (t+1) تا حدی وابسته به حالت این مکان در زمان t است[۱۷].

۴- خودکاره سلولی گرافی به عنوان یک گراف

مزیت خودکاره سلولی گرافی نسبت به جبر جغرافیایی توانایی آن در پیشنهاد فرم‌های ساختاری برای مدل‌های سلولی است که می‌توانند ساخته شوند. همچنین، به ساختارهای مدلی اجازه می‌دهد که توصیف، مقایسه، مرور و به اشکال مختلف نمایش داده شوند. چهارچوب تئوری موجود در حوزه‌ی گراف ما را قادر می‌سازد تا اندازه‌ای ساختار مدل خود را تعیین نماییم. به شکل (۱) نگاه کنید. این شکل بیانگر یک مدل خودکاره سلولی گرافی از پیشرفت تدریجی مناطق شهری در یک قطعه‌ی شهری کوچک است. برخی از انعطاف پذیری‌هایی که ناشی از اعمال آزاد سازی مکانی در خودکاره سلولی است، به خوبی قابل مشاهده است.



شکل ۱- یک تکه از مدل خودکاره سلولی گرافی. سلول‌ها در این مدل ساختمان‌ها منفرد بوده و ساختار گرافی نشان داده شده، همسایگی‌های سلولی که به منظور تعیین تکامل حالات سلولی استفاده می‌شوند را نمایش می‌دهد[۱۷].

این واقعیت که هر مدل خودکاره سلولی گرافی بر روی یک گراف پایه ریزی می‌گردد، خود امری مهم است. می‌توان از روش‌های موجود در تئوری گراف‌ها به منظور توصیف، اندازه گیری و مرور ساختار مدل استفاده نمود.

۵- خودکاره سلولی گرافی به عنوان نوعی از خودکاره سلولی: درک پویایی‌های مدل

خودکاره سلولی یک نمونه ای با فهم ساده از مدل پویای گسسته است. جنبه ی گرافی از مدل‌های مبتنی بر خودکاره سلولی در مناطق شهری کمتر توسط محققین مورد توجه قرار گرفته است. اگرچه ابزارهای آنالیز خودکاره سلولی کمتر از ابزارهای تحلیل گراف هستند، اما با این وجود باز هم مهم و قابل ملاحظه هستند. از آنجایی که بارزترین حقیقت در زمینه‌ی خودکاره سلولی رفتار غیر قابل پیش بینی و متغیر آن است، بنابراین بسیاری از کارهای تئوری بر روی خودکاره سلولی در زمینه‌ی توسعه‌ی روش‌هایی برای فهم این رفتار است. Wolfram مروری بر رفتار کلاس ساده‌ای از خودکاره سلولی داشته است[۱۸] و آن یک خودکاره سلولی خطی فقط با دو حالت مجاز است. که هر سلول فقط همسایگان مجاور بی‌فاصله‌ی خود را به عنوان همسایه در کنار خود دارد. او از بالا بودن میزان رفتار متغیر در این خودکاره سلولی که فقط دو حالت در خود دارد بسیار متعجب گردید. بر مبنای این تحقیق و نیز تحقیقات مشابه دیگری که در زمان‌های بعد انجام گرفت، خودکاره سلولی با پنج همسایگی و سه یا چهار حالت مجاز سلولی ارائه گردید. Wolfram پشنهاد می‌کند که برای خودکاره سلولی چهار کلاس کیفیتی از رفتارها را می‌توان در نظرگرفت:

اولین کلاس، خودکاره سلولی است که در یک دوره‌ی کوتاه زمانی به یک حالت همگن یکتا می‌رسد. کلاس دوم، خودکاره سلولی است که به چند حالت نهایی می‌رسد و در هر دوره از زمان یکی از حالت‌هایش را به نمایش می‌گذارد. کلاس سوم، خودکاره سلولی است که به یک رفتار آشفته‌ی غیر متناوب می‌رسد و اگرچه در کل این رفتار قطعی است، اما در عین حال غیر قابل پیش بینی می‌باشد، مگر در حالتی که دانش کاملی در مورد حالت اولیه این خودکاره سلولی موجود باشد. کلاس چهارم، خودکاره سلولی است که رفتار پیچیده‌ای را از خود به نمایش می‌گذارد. چنین رفتاری یک ساختار سلسله مراتبی دارد. رفتار موجود در کلاس چهارم، ویژگی اصلی سیستم‌هایی است که قابلیت محاسبه‌ای دارند و ممکن است برنامه نویسی شوند و بنابراین قابلیت رفتارهای پیچیده را دارا می‌باشند. در حقیقت، اکثر کارهای تئوری یا عملی که در زمینه خودکاره سلولی انجام می‌شود بیشتر از نوع کلاس‌های سوم و چهارم هستند که در بالا بحث

گردید. رفتار آنها ممکن است شبیه سیستم‌های غیر قابل پیش بینی در حوزه‌های فیزیک، شیمی، زیست شناسی و شبکه های اجتماعی باشد. قابل ذکر است که Wolfram همچنین یک روش برای مشخص نمودن این خودکاره سلولی بر اساس معیارهای کمّی نیز ارائه نموده که بر این مبنا است که زمان مورد نیاز برای برخی از اندازه‌گیری‌های بی نظمی‌های موجود در این سیستم‌ها برای این چهار کلاس، متفاوت از یکدیگر است. Wolfram [۱۹] پیشنهاد نمود که از یک از اندازه‌گیری مبتنی بر بی نظمی به منظور روشی بنیادین برای دسته‌بندی خودکاره سلولی بر اساس رفتارهایشان استفاده شود و یک بی نظمی مجموعه‌ای مکانی تعریف نمود:

$$S(X) = -\frac{1}{X}\sum_{j=1}^{s^X} p_j \log_s p_j$$

که در این فرمول P_j بیانگر فرکانس رخداد حالت‌های پیرامونی ممکن S^X در توالی‌هایی از سلول‌ها با طول X و با تعداد حالت‌های مجاز سلولی s است. این‌اندازه‌گیری در بازه 0 و 1 است که 0 بیانگر یک آرایش خیلی مرتب از حالت‌های سلولی و 1 بیانگر یک آرایش کاملا نامرتب از حالت‌های سلولی است. یک پیکربندی خاص از حالت‌های سلولی ممکن است در X=1 تصادفی به نظر آید، اما به ازای مقادیر دیگری از X برخی از ترتیب‌ها را به نمایش می‌گذارد.

۶- خودکاره سلولی گرافی هم به عنوان گراف و هم به عنوان خودکاره سلولی: تحقیق تئوری فرآیند-ساختار با استفاده از خودکاره سلولی گرافی

در این بخش به تحقیقاتی که می‌توان در آینده در مورد خودکاره سلولی گرافی ناشی از یک مدل گسسته انجام داد اشاره می‌نماییم. مزیت روش خودکاره سلولی گرافی فقط در رسمی سازی موجود در آن نیست، بلکه در روش‌های تفکر درباره‌ی جنبه‌های مختلف مدل‌های حاصل شده است که این روشهای تفکر ناشی از ترکیب خودکاره سلولی و گراف‌ها است. یک خودکاره سلولی گرافی ممکن است هم از نقطه نظر ساختار گرافی و هم از نقطه نظر رفتار پویای آن مورد بررسی قرار گیرد. کار کردن بر روی رفتار خودکاره سلولی روشی برای تفکر در مورد پویایی‌های فرآیندهای مکانی در اختیار ما قرار می‌دهد. اگر در خودکاره سلولی گرافی از اندازه‌گیری‌های موجود در حوزه گراف استفاده نماییم، در این صورت قادر خواهیم بود تاثیر ساختار مکانی بر پویایی‌های موجود در زمینه پیشرفت تدریجی فرآیندهای مکانی را مورد تحقیق و بررسی قرار دهیم؛ بنابراین، خودکاره سلولی گرافی، مرور ارتباطات موجود بین ساختار مکانی که به تدریج آشکار می‌شوند و ترتیب رفتارهای پویا که رخ می‌دهد را صریحا امکان پذیر می‌سازد. در این راستا، در اولین گام بهتر است جایگاه مدل‌های خودکاره سلولی گرافی را به نسبت مدل‌های مشابه و مرتبط مشاهده نماییم. در شکل (۲)، سه نوع از مدل‌های گسسته ارائه گردیده که عبارتند از: خودکاره سلولی، خودکاره سلولی گرافی و شبکه‌های بولین[۳] که از نظر طرح کلی به یکدیگر مربوط هستند. این امر کمک می‌کند که در تحقیقات، این مدل‌ها را مد نظر داشته و یک ارتباط منحصر به فرد بین مدل‌های خودکاره سلولی گرافی و تحقیقات موجود در زمینه جغرافیایی و محاسبات جغرافیایی ارائه نماییم. مدل‌های خودکاره سلولی به خودی خود بسیار مرتبط با مدل‌های خودکاره سلولی گرافی هستند.

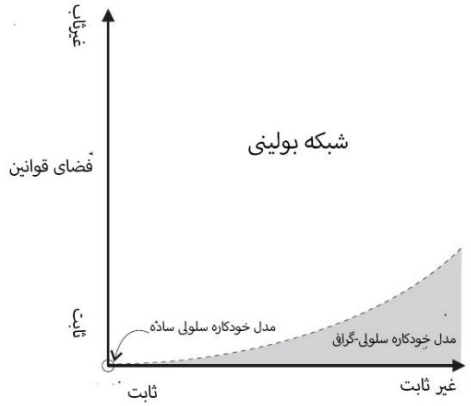
علاوه براین، نوع دیگری از مدل‌های گسسته با نام شبکه‌های بولین نیز مرتبط با مدل خودکاره سلولی گرافی هستند. یک شبکه بولین شامل یک گراف جهت دار از گره‌ها است که هر کدام از آن گره‌ها ممکن است دارای حالت شروع یا توقف باشند. قابل ذکر است که در یک شبکه بولین کلاسیک، فقط دو حالت برای گره‌ها مجاز است. اگرچه که واضح است که می‌توان این حالت را تعمیم داد. حالت هر گره در زمان (t+1) با استفاده از حالات همسایگان آن گره در گراف

[3] Boolean Networks

در زمان t مشخص می‌شود. این موضوع خیلی شبیه به یک خودکاره سلولی گرافی است. اگرچه در یک شبکه بولین، قانون‌هایی که حالت یک گره را به حالت همسایگان داخلی ربط می‌دهند نباید در سراسر شبکه یکسان باشند.

شکل (۲)، دو معیار تنوع و گوناگونی در بین این مدل‌ها را نمایش می‌دهد. اولین مشخصه اینکه، ساختار مکانی اجزای مدل گسسته مانند فضای سلولی، شبکه یا ساختار گراف ممکن است همگن و یا از محلی به محل دیگر ایستا باشد و یا اینکه در سراسر سیستم متغیر باشد. خودکاره سلولی مرسوم از این منظر ایستا[4] است، اما مدل‌های خودکاره سلولی گرافی چنین ویژگی را ندارند. شبکه‌های بولین از این منظر غیر ایستا هستند. دومین مشخصه اینکه، قوانینی که نمایش دهنده فرآیندها در یک مدل هستند ممکن است ایستا و یا غیر ایستا باشند. هم خودکاره سلولی و هم خودکاره سلولی گرافی هر دو ایستا و ایستا بوده و این در حالی است که شبکه‌های بولین غیر ایستا می‌باشند. قابل ذکر است که اگرچه ساختار فضای سلولی مدل‌های خودکاره سلولی گرافی ایستا نیستند، اما اینکه قوانین موجود در این فضا نیز مطلقا ایستا نباشند نیز زیاد خوشایند نیست. دلیل این یک تعامل اجتناب ناپذیر بین اندازه‌ی همسایگی‌های سلولی با میزان اثرات قوانین وجود دارد و این که بتوان به بیان قوانینی این چنین متغیر در سراسر محدوده‌های همسایگی پرداخت، دشوار است و دلیل ای موضوع است که این محدوده تعداد کم سلول های موجود است.

چهارچوب موجود در شکل (۲) به طور خاصی بیانگر استفاده مدل‌های خودکاره سلولی گرافی است و این شکل مبین این واقعیت است که بردار اصلی تفاوت بین خودکاره سلولی و خودکاره سلولی گرافی، مکانی است. این دلالت بر این امر را دارد که پی‌گیری تغییرات حاصل از انتقال از یک خودکاره سلولی به یک خودکاره سلولی گرافی ممکن است فقط به طور ویژه، در تغییرات فضایی رخ داده شده در چنین مدل‌های گسسته‌ای باشد.



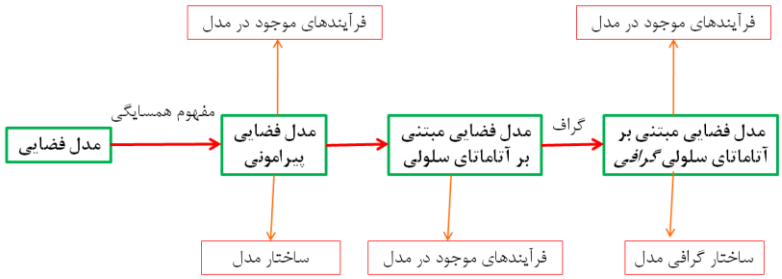
شکل (۲)- خودکاره سلولی گرافی در مقایسه با دیگر مدل‌های سلولی گسسته. خودکاره سلولی گرافی یک ساختار مکانی ناایستا دارد، اما قوانین انتقال آن ایستا است؛ اما در هر حال، ساختار مکانی و قوانین به طور کامل مستقل از هم نیستند، به طوریکه می‌توان بیان نمود که ساختارهای خیلی نامنظم مانع از تعریف قوانین انتقال کاملا ایستا می‌شوند و این موضوع دلالت بر این دارد که این دو تا حدی وابسته به هم هستند.[۱۷].

۷- نتیجه‌گیری

روش خودکاره سلولی گرافی، برخی از جنبه‌های جبر جغرافیایی را روشن‌تر و قابل درک‌تر می‌نماید. از آن جمله می‌توان به این امر اشاره نمود که خودکاره سلولی تعمیم یافته‌ای که در زیر مدل فضایی است یک ساختار رابطه‌ای سراسری است که می‌تواند توصیف، اندازه‌گیری و بصری سازی گردد و این کاملاً مستقل از رفتار خودکاره سلولی است. چنین توصیف و بصری سازی به راحتی ما را قادر می‌سازد که ساختارهای مدلی آینده را ساخته و نمایش دهیم.

[4] Stationary

همچنین پتانسیلی را فراهم می‌کند که از طریق آن می‌توان حداقل، برخی از انواع مهم از خودکاره سلولی شهری را به صورت خودکاره سلولی گرافی تفسیر نمود[۲۰]. در بسیاری از خودکاره سلولی که مورد بررسی قرار می‌گیرند، دیده می‌شود که به عنوان مثال مورد جدیدی نبوده و در واقع از همان کلاس مدل هستند و در نتیجه ممکن است بتوان تفاوت‌های آن‌ها را در تفاوت موجود در ساختار رابطه‌ایشان جستجو نمود. با توجه به این مطالب، در این نوشتار کلاس‌های متفاوتی از خودکاره سلولی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۴)، ارتباط بین مفاهیم موجود در این نوشتار، به صوری فشرده نمایش داده شده است.



شکل ۴- ارتباط موجود بین مدل‌های فضایی، مدل فضایی پیرامونی، مدل فضایی مبتنی بر خودکاره سلولی و مدل فضایی مبتنی بر خودکاره سولی گرافی

بنابراین می‌توان بیان داشت که مزیت خودکاره سلولی گرافی در این است که مدل‌های حاصل از آن را می‌توان هم ازنظر ساختاری با استفاده از الگوریتم‌های موجود در حوزه گراف و هم ازنظر رفتاری با توجه به این مطلب که خودکاره سلولی گرافی یک خودکاره سلولی است موردبررسی قرار داد. درمجموع، تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از خودکاره سلولی نامنظم به دلیل انعطاف‌پذیری بالای آن می‌تواند در بسیاری از حوزه‌های کاری ازجمله در مدل‌سازی جغرافیایی کاربردهای گسترده‌ای داشته باشد.

مراجع

[1] M. Delorme and J. Mazoyer, *Cellular Automata: a parallel model* vol. 460: Springer Science & Business Media, 2013.

[2] E. F. Codd, *Cellular automata*: Academic Press, 2014.

[3] T. Ben-Nun, E. Levy, A. Barak, and E. Rubin, "Memory access patterns: the missing piece of the multi-GPU puzzle," in *Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, 2015, p. 19.

[4] M. Farsaie and F. Hakimpour, "Evaluation of Scale Change Effect on Simulating Urban Expansion Using Continuous Cellular Automata," *Journal of Geomatics Science and Technology*, vol. 4, pp. 67-78, 2014.

[5] H. Couclelis, "Cellular worlds: a framework for modeling micro-macro dynamics," *Environment and planning A*, vol. 17, pp. 585-596, 1985.

[6] H. Couclelis, "Of mice and men: what rodent populations can teach us about complex spatial dynamics," *Environment and Planning A*, vol. 20, pp. 99-109, 1988.

[7] M. J. F. Martínez, E. G. Merino, E. G. Sánchez, J. E. G. Sánchez, A. M. del Rey, and G. R. Sánchez, "A graph cellular automata model to study the spreading of an infectious disease," in *Advances in Artificial Intelligence*, ed: Springer, 2013, pp. 458-468.

[8] M. Garzon, *Models of massive parallelism: analysis of cellular automata and neural networks*: Springer Science & Business Media, 2012.

[9] H. Couclelis, "From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation," *environment and Planning B,* vol. 24, pp. 165-174, 1997.

[10] M. Takeyama, "Building spatial models within GIS through Geo-Algebra," *Transactions in GIS,* vol. 2, pp. 245-256, 1997.

[11] M. Takeyama and H. Couclelis, "Map dynamics: integrating cellular automata and GIS through Geo-Algebra," *International Journal of Geographical Information Science,* vol. 11, pp. 73-91, 1997.

[12] D. C. Tomlin, "Geographic information systems and cartographic modeling," 1990.

[13] D. G. Anderson, "Linguistic diversity zones and cartographic modeling: GIS as a method for understanding the prehistory of lowland South America," 2011.

[14] M. Takeyama, *Geo-Algebra: A mathematical approach to integrating spatial modeling and GIS*, 1996.

[15] N.-N. Wang and G.-L. Chen, "A virus spread model based on cellular automata in weighted scale-free networks," in *Proceedings of the 2012 International Conference on Communication, Electronics and Automation Engineering*, 2013, pp. 1169-1175.

[16] R. D. Sack, *Homo geographicus: A framework for action, awareness, and moral concern*: Johns Hopkins University Press Baltimore, 1997.

[17] D. O Sullivan, "Graph-cellular automata: a generalised discrete urban and regional model," *Environment and Planning B,* vol. 28, pp. 687-706, 2001.

[18] S. Wolfram, "Statistical mechanics of cellular automata," *Reviews of modern physics,* vol. 55, p. 601, 1983.

[19] S. Wolfram, "Universality and complexity in cellular automata," *Physica D: Nonlinear Phenomena,* vol. 10, pp. 1-35, 1984.

[20] P. Barreira-González, M. Gómez-Delgado, and F. Aguilera-Benavente, "From raster to vector cellular automata models: A new approach to simulate urban growth with the help of graph theory," *Computers, Environment and Urban Systems,* vol. 54, pp. 119-131, 2015.