پنجمین کنفرانس سیستمهای فازی ایران
هفدهم الی نوزدهم شهریورماه ۱۳۸۳

کاربرد سیستم‌های فازی در تهیه ابرنقشه الکترونیک شهر

اکبر کیانی[۱]، اکبر پرهیزکار[۲]، محمدحسن قاسمیان‌یزدی[۳]
دانشگاه تربیت مدرس (TMU)
Kiani_ak@modares.ac.ir or Kiani_ak@yahoo.com

چکیده

اهمیت نقشه‌های کاربری زمین، در شهرها به اندازه‌ای زیاد است که برخی از برنامه‌ریزان شهری، تهیه نقشه‌های کاربری زمین شهری را مساوی «رشته برنامه‌ریزی شهری» قلمداد نموده‌اند. با توجه به تجربیات جهانی، رویکردهای جدید و استانداردهای برنامه‌ریزی شهری، شهرها از این به بعد، به نقشه‌های قابل انعطاف نیاز دارند که بتوانند بطور خودکار بهنگام شوند. در این راستا، جهت تبیین موضوع، روش تهیه نقشه کاربری زمین شهری بصورت اتوماتیک مطرح می‌گردد. مواد و منابع مورد استفاده جهت تهیه نقشه مذکور بصورت خودکار و Online از منابع مختلف شامل داده‌ها و اطلاعات نقشه‌ای، تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های سنسوری و ... می‌باشد خوشبختانه از لحاظ سخت‌افزاری و نرم‌افزاری نیز پیشرفتهای حاصل شده که در سطح مقدماتی جوابگو بوده و زیرساختهای مخابراتی و اینترنتی نیز تا حدی فراهم بوده است. روشهای بکار گرفته شده از تئوریها و فعالیتهای انجام شده در زمینه برنامه‌ریزی شهری (آتوماتای سلولی و ...) نیز در بسط بنیادی موضوع مؤثر بوده‌اند همچنین فازی در زمینه تخصیص کاربریها و رفع ابهامات، کمکهای زیادی در حل مسائل تهیه ابرنقشه الکترونیکی شهر داشته است. هر چه قوانین تعریف‌شده برای سلولهای شهری تحت عملیات شبیه‌سازی بیشتر و واقعی‌تر باشند نتیجه شبیه‌سازی نیز واقعی‌تر خواهد بود بر اساس قوانین تعریف شده کلی برای کلانشهر تهران، نتیجه‌ای با مطابقت ۸۲/۲ درصدی بدست آمده است. از مهمترین ویژگیها و نتایج بدست آمده تحقیق مذکور می‌توان به انعطاف‌پذیری نقشه تولید شده، بر اساس نیازها و استانداردهای برنامه‌ریزی شهری اشاره نمود که قسمت عمده‌ای از آن حاصل محاسبات و تحلیلهای توأم آتوماتای سلولی و فازی در ارائه خروجیهای نهایی بوده است.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های فازی ـ ابرنقشه الکترونیکی ـ شهر ـ آتوماتای سلولی ـ انعطاف‌پذیری

مقدمه

در طول دهه گذشته آتوماتای سلولی[۴] و کاربردهای آن در مدلسازی شهری به سرعت مورد توجه محققان شهری بوده است [۱تا ۲۴]. فعالیتهای تحقیقاتی که در زمینه مدلسازی شهری با استفاده از آتوماتای سلولی انجام شده است قابلیت و

۱- دانشجوی دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری
۲- استادیار گروه سنجش از دور
۳- استاد گروه مخابرات
۴- آتوماتای سلولی (Cellular Automata=CA)؛ در برنامه‌ریزی کاربری زمین شهری جهت شبیه‌سازی فرآیند توسعه شهری، از شبکه سلولی بنام مدل CA استفاده می‌شود. لازم به ذکر است نقشه کاربری زمین شهری به صورت سلولهای منظم در طول دوره‌های زمانی مختلف در می‌آید و در طی آن تغییر و تحولات سلولی شهر (تولد، حیات، مرگ یا انتقال نقش سلولها) شبیه‌سازی می‌گردد. تغییر و تحولات کاربری زمین یا انتقال نقش در سلولهای کاربری زمین تابع عوامل و پارامترهای مختلفی هستند این عوامل و پارامترها در بسیاری از مواقع جهت تخصیص و تعیین ویژگی سلولها فازی می‌باشند. (ابرنقشه الکترونیکی شهر، نقشه‌ای با ورودیها، خروجیها و تحلیلهای هوشمندانه می‌باشد که توسط نگارندگان طرح گردیده است.)

توانایی آتوماتای سلولی را جهت مدلسازی و کشف فرآیندهای شهری که به سرعت تحت تأثیر عوامل مختلف انسانی و طبیعی محلی مثل رشد سریع و مسائل بحرانی قرار دارند مناسب می‌باشد [۱۱]. به عبارت دیگر رفتارهای مختلف پدیده‌ها را با توجه به قوانین پشتیبان و وضعیت پدیده‌ها در مراحل مختلف را نیز مشخص می‌نماید [۱۱]. در مطالعات پیشین مدلسازی شهری از CA جهت تنظیم جنبه‌های مختلف توسعه شهر استفاده می‌شد و اغلب این مطالعات نیز به گونه‌ای توسعه شهر را با فرآیندهای مرزی بصورت نواحی تبدیل به شهرشده و نواحی غیرشهری مشخص می‌کردند برای این منظور پارادایم نظریه مجموعه‌های قطعی هدایت‌گر فعالیتها بود [۴،۶،۷،۸،۹،۱۱،۱۹،۲۰و۲۱]. فرآیند توسعه شهر شبیه به فرآیند فازی هم فضایی و هم زمانی است. در فرآیند فضایی مرز دقیق بین یک ناحیه شهری، حاشیه شهر ـ روستایی و زمینهای روستایی غیرشهری وجود ندارد. در فرآیند زمانی نیز توسعه شهر فرآیند مستمر و مداومی دارد که از روند کلی منحنی لجستیک (Logistic) پیروی می‌کند [۲۶و۲۷]. مدلهای آتوماتای سلولی در بسیاری از نرم‌افزارها قابل اجراء می‌باشند با توجه به ایده‌هایی که در تحقیق مذکور مطرح گردیده و مواردی که جهت ساختن مدل ترکیبی منطق فازی، کنترل فازی، قوانین آتوماتای سلولی برنامه‌ریزی کاربری زمین شهری و سنسورهای هوشمند مطرح می‌گردد، به منظور اجرای فرآیند شبیه‌سازی از نرم‌افزارMATLAB 6.5 استفاده شده است.

اصول کلی توسعه یک آتوماتان سلولی شهری در ادامه آمده است که با توجه به مباحثی که بر روی تأثیرات مقیاس سلول و نوع/اندازه همسایگی در رفتار آتوماتان سلولی ایجاد می‌شود ارائه می‌گردد. برای مثال: **قوانین مختلف انتقال با توجه به پارامترها و عوامل مورد نیاز توسعه شهری (قابلیتها و محدودیتهای توسعه شهر) در جهت بهینه‌سازی، بهینه‌یابی و پیش‌بینی توسعه کاربریهای زمین شهری مطرح شده است** به سبب پویایی و قابلیت به‌هنگام‌سازی سیستم ارائه شده در تحقیق حاضر، بویژه با استفاده از داده‌های Online، بلادرنگ و سنسورهای هوشمند، اصطلاح « **ابرنقشه الکترونیکی**» عنوان گردیده است. جهت تصدیق، تأیید و اعتبار مدل و همچنین سیستم ارائه شده عملیات شبیه‌سازی آتوماتای سلولی، بر اساس قوانین برنامه‌ریزی کاربری زمین شهری در سطح **کلانشهر تهران** انجام شده است که با توجه با قابلیتها و محدودیتهای تعریف شده برای سلولها نتایج مختلفی بدست آمد. هر چه قوانین مذکور با داده‌های دنیای واقعی انطباق بیشتری داشته باشند نتیجه شبیه‌سازی نیز به واقعیت نزدیکتر خواهد بود این موضوع را می‌توان از مطالب ارائه شده به خوبی استنباط نمود.

اصول کلی توسعه آتوماتان سلولی نواحی شهری

حالتِ یک سلول را با $S^t_{x_{ij}}$ و موقعیت آنرا در زمان t با x_{ij} نشان می‌دهیم. $S^t_{x_{ij}}$ متعلق به یک فاصله عددی از حالتهای سلولها در فضای سلولی است. و $S^{t+1}_{x_{ij}}$ حالت سلول در زمان $t+1$ را نشان می‌دهد در آنصورت تابع f که نشان دهنده مجموعه‌ای از قوانین انتقال می‌باشد بصورت زیر تعریف خواهد شد.

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

که در آن $\Omega_{x_{ij}}$ یک مجموعه سلولها در همسایگی سلول x_{ij} بوده و $S^t_{\Omega_{x_{ij}}}$ یک مجموعه حالتهای سلولهای $\Omega_{x_{ij}}$ در زمان t می‌باشد همانطوریکه در تابع (۱) ملاحظه می‌کنید که سلول خودش مثل عضوی از همسایگانش است، سپس تابع (۱) را می‌توان بصورت زیر نوشت:

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

تابع (۲) می‌تواند شکل زبانی را به گونه‌ای بیان کند که اصول کلی توسعه آتوماتان سلولی را تشریح نماید. یعنی:

- اگر چیزی در همسایگی (مجاورت) یک سلول اتفاق بیفتد.
- آنگاه چیز دیگری برای سلول در مرحله زمانی بعد اتفاق خواهد افتاد.

مدل آتوماتان سلولی معمولاً شامل یک مجموعه عبارات (جمله) «اگر-آنگاه» (If-Then) است که بوسیله قوانین انتقال خاص بکار گرفته می‌شوند. برای نمونه مدل مشهور «بازی زندگی» (Game of Life) [۲۸] می‌تواند سه عبارت (جمله) را بصورت زیر بیان کند:

- اگر دو یا سه سلول زنده در همسایگی (مجاورت) مور یک سلول زنده وجود دارد.
- آنگاه سلول در تولید بعدی زنده بماند.
- اگر کمتر از دو یا بیشتر از سه سلول زنده در همسایگی مور یک سلول زنده وجود دارد.
- آنگاه سلول زنده در تولید بعدی بمیرد (از بین برود).
- اگر سه سلول زنده درست در همسایگی مور یک سلول مرده وجود دارد.
- آنگاه سلول مرده در تولید بعدی زنده شود.

در تعریف عبارت « اگر ـ آنگاه »، چهار عنصر پایه‌ای آتوماتان سلولی (**سلول‌ها، حالت‌ها، همسایگی و قوانین انتقال**) جهت معین شدن آنها نیاز است. در **یک *سیستم شهری*، سلول‌ها** می‌توانند بصورت توسعه محلی از سلولهای غیرشهری به سلولهای توسعه‌یافته شهری تبدیل شوند. **حالتها**، انواع زمینها مثل شهری یا غیرشهری، یا هر نوع کاربری مشخص، **همسایگی**، نواحی که ممکن است توسعه در آنها رخ دهد، و **قوانین انتقال**، قوانینی که اثر انتقال سلولها از یک حالت به حالت دیگر را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که، بکار بردن فرآیند توسعه در سطح محلی انجام می‌پذیرد.

توسعه شهر و مجموعه‌های فازی

توسعه شهر یک فرآیند طبیعی از مردم و ساختمانها است[۲۶]. این فرآیند مستمر در فضا و طول زمان وجود دارد که شبیه فرآیندها فازی می‌باشد و هم در تعاریف نواحی شهر و هم در عوامل کنترل توسعه شهر وجود دارند. فازی ویژگیهای توسعه شهر را با ارائه قابلیتهای از رویکرد مجموعه فازی در مدلسازی فرآیند توسعه شهر بکار می‌گیرد. بطور کلی برای نمایش پدیده‌های جغرافیایی از نقشه‌های موضوعی استفاده می‌شود[۲۹،۳۰]. در نقشه‌های موضوعی استفاده از ویژگیهای جغرافیایی، تابع نظریه مجموعه کلاسیکی بوده است بدین معنی که هر مکان تعلق به یک ویژگی دارد. مرزهای بین ویژگیهای مختلف با خطهای معلوم و دقیق نشان داده می‌شوند[۲۹و۳۱]. نمایش مذکور ممکن است برای نمایش نقشه‌های کاداستر، جمعیت، مرزهای اشکال زمینی که بطور معلوم و دقیق تعریف می‌شوند صحیح باشد[۳۰]. امّا برای نمایش مرزهای اشکال زمینی که بطور پیوسته‌ای، ویژگیهای آنها تغییر می‌کند مثل کیفیت خاک، پوشش زمین یا تراکم جمعیت، آبهای زیرزمینی، ژئومرفولوژی، دما و بارش، دقیق نیستند به عبارت دیگر مثل پدیده‌های مشخص یا قطعی جغرافیایی، این پدیده‌ها (که پیوسته می‌باشند) دارای مرز دقیق و قطعی نمی‌باشند. بر این اساس، نمایش مرزهای جغرافیایی مبتنی بر نظریه مجموعه قطعی ممکن است درک اشتباهی از اطلاعات ارائه شده را پیش‌روی کاربران بگذارد[۳۰]. توسعه تئوری مجموعه فازی و کاربردهای آن برای نمایش پدیده‌های جغرافیایی راه‌حلی در جهت مواجه با چنین مسائلی مهیا نموده است. در این قسمت با ارائه مطالب و مثالهای ساده، تلاش شده است در قلمرو مسائل وابسته به برنامه‌ریزی کاربری زمین شهری موضوع ارائه گردد: X مجموعه‌ای از اشیاء است که عنصر نوعی آن بر x دلالت دارد. بنابراین $X=\{x\}$. یک مجموعه فازی A در X مجموعه‌ای از زوجهای مرتب است.

$$A=\{(x,\mu_A(x))\,|\,x\in X\} \qquad (۳)$$

در رابطه مذکور $\mu_A(x)$ درجه عضویت x در A را نشان می‌دهد که با هر x یک عدد واقعی از $[0,1]$ را ارتباط می‌دهد.

اگر یک ناحیه از ناحیه غیرشهری به ساختمان‌های شهری توسعه یافته است در اینصورت یک دورهٔ معین توسعه جهت استمرار فرآیندها داشته است بنابراین در این زمان، ناحیه می‌تواند بطور جزئی توسعه‌یافته باشد و مقداری گسترش یابد. به عبارت دیگر توسعه و گسترش ناحیه دارای هماهنگی زمانی و فیزیکی باشد. جهت نشان دادن گسترش توسعه این شهر در فضا و سراسر زمان، فازی مفهوم «شهر» یا «غیرشهر» را می‌تواند تعریف نماید. چنانچه x مجموعه سلولهای نشان‌دهندهٔ یک

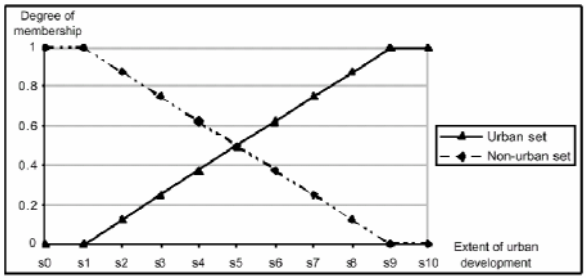
ناحیه در محدوده منطقه‌ای باشد. x_{ij} نوعی شکل از یک سلول در x است. یک شهر می‌تواند بصورت مجموعه فازی S_{Urban} مثل یک مجموعه زوج مرتب تعریف شود.

$$S_{Urban} = \left\{ \left(x_{ij}, \mu_{S_{Urban}}(x_{ij}) \right) \middle| x_{ij} \in X \right\} \quad (۴)$$

در رابطه مذکور $\mu_{S_{Urban}}(x_{ij})$ یک تابع عضویت سلول x_{ij} در مجموعه فازی S_{Urban} است، ارزشی که حالت یک سلول در یک فرآیند توسعه شهر بدست می‌آورد را نشان می‌دهد. بطور مشابه یک مجموعه فازی غیرشهری نیز می‌تواند چنین تعریف شود.

$$S_{non-Urban} = \left\{ \left(x_{ij}, \mu_{S_{non-Urban}}(x_{ij}) \right) \middle| x_{ij} \in X \right\} \quad (۵)$$

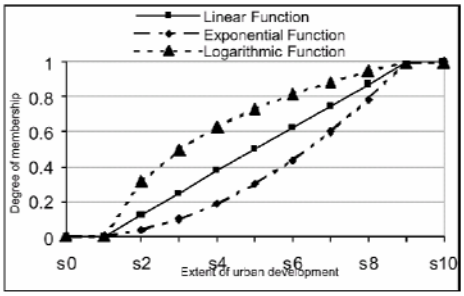
در رابطه مذکور $\mu_{S_{non-Urban}}(x_{ij})$ یک تابع عضویت سلول x_{ij} در مجموعه فازی $S_{non-Urban}$ است. تابع عضویت تعیین می‌کند که چگونه و با چه درجه‌ای یک سلول متعلق به مجموعه باشد. تابع عضویت متکی به توسعه یک سلول است که در فرآیند رشد شهر توسعه یافته است. در نزدیکترین درجه عضویت ارزش سلول به یک میل می‌کند و بالاترین درجه عضویت نیز در مجموعه فازی یک است. نمودار تابع عضویت فازی $\mu_{S_{Urban}}(x_{ij})$ و $\mu_{S_{non-Urban}}(x_{ij})$ در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱ـ مثال تابع عضویت مجموعه‌های فازی شهری و غیرشهری

مرحله S0 تا S10 اختلاف گسترش توسعه شهر از توسعه‌نیافته تا کاملاً توسعه‌یافته را نشان می‌دهد.

در این مثال، اگر یک سلول، یک درجهٔ عضویتِ 0.8 را در مجموعه فازی شهری داشته باشد در آنصورت یک گسترش بالاتر از یک سلول با درجه عضویت 0.3 دارد و توسعه‌یافته شده است. بر عکس یک سلول با درجه عضویت 0.8 در مجموعه فازی غیرشهری کمتر از یک سلول با درجه عضویت 0.4 در مجموعه توسعه‌یافته شده است. با این اصطلاح، مرز بین نواحی غیرشهری و شهری می‌تواند مثل خطوط معلوم و معین درک شود، امّا یک منطقه با تغییرات پیوسته در مقیاس عضویت می‌باشد. بطور آشکار، تابع عضویت یک مؤلفه یا جزء قطعی از یک مجموعه فازی است. توابع مختلف عضویت، مجموعه‌های فازی متفاوت را نشان می‌دهند. شکل (۲) سه نوع تابع عضویت را شرح می‌دهد، هر تابع یک مجموعه فازی متفاوت را نشان می‌دهد اگر چه همه آنها زمینه مشابهی دارند و در یک کلاس از سلولها توسعه یافته‌اند.



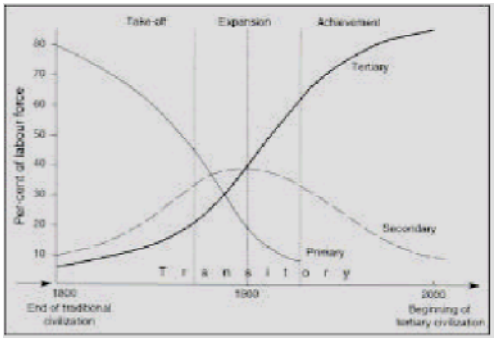
شکل ۲ـ اختلاف توابع عضویت فازی

در شکل سه نوع تابع عضویت مختلف نشان داده شده است. S0 تا S10 در محور X گسترش توسعه شهر را نشان می‌دهد که بصورت سه مجموعه فازی متفاوت تعریف شده است و محتوی مشابهی دارند. قبل از S1 ناحیه توسعه نیافته است و بعد از S9 ناحیه کاملاً توسعه

یافته است. توسعه در نواحی با گسترش یک شهر بین S1 و S9 اتفاق افتاده است. به هر حال درجات مختلف عضویتشان که بوسیله توابع عضویتشان تعیین می‌شود.

منحنی لجستیک توسعه شهر

تحقیقات قبلی نشان داد که فرآیندهای توسعه شهر از منحنی لجستیک در طول زمان پیروی می‌نماید[۲۶،۲۷و۳۲]. فوراستیه [۳۲] اشاره می‌کند که دوره صنعتی‌شدن و شهرنشینی مرحله‌ای زودگذر در طول تاریخ بشر است که تغییر شکل جوامع از مرحله ابتدایی یا کشاورزی-پایه به مرحله سوم یا خدمات-حرفه‌ای تغییر می‌یابد (شکل (۳).



شکل ۳ـ توسعه شهر و پیشرفت از انتقالی به مدرن [۲۶].

فرض کنید که تمام فرآیندهای توسعه شهر در یک ناحیه (یا یک سلول) n سال داده و اطلاعات بگیرند، برای مثال *اگر یک سلول غیرشهری حالتهای یک فرآیند توسعه شهری را بگیرند، این سلول بعد از* n *سال توسعه، بطور کامل شهری خواهد* شد. اگر $t_{x_{ij}}$ دلالت بر t^{th} سال توسعه یک سلول x_{ij} باشد. گسترش توسعه سلول شهر در سال t می‌تواند بوسیله درجه عضویت نشان داده شود که می‌تواند توسط $\mu_{S_{Urban}}(x^t_{ij})$ مدلل شود. با فهم منحنی لجستیک فرآیندهای توسعه شهر، ارتباطبین $t_{x_{ij}}$ و $\mu_{S_{Urban}}(x^t_{ij})$ می‌تواند با رابطه (۶) نشان داده شود:

$$\mu_{S_{Urban}}(x^t_{ij}) = \begin{cases} 0 & t_{x_{ij}} \langle 0 \\ \dfrac{1}{a_0 + b_0 \exp(-c_0 . t_{x_{ij}})} & 0 \le t_{x_{ij}} \langle n \\ 1 & t_{x_{ij}} \ge n \end{cases} \qquad (۶)$$

در رابطه (۶) a_0، b_0 و c_0 پارامترهای منحنی لجستیک هستند n استمرار (مدت) کل فرآیندهای توسعه شهر است. شکل منحنی رشد معمولاً سرعت توسعه شهر را در طول زمان نشان می‌دهد که بوسیله سه پارامتر a_0، b_0 و c_0 کنترل می‌شوند. سرعت توسعه شهر از یک شهر به شهر دیگر متفاوت است سرعت توسعه شهر حتّی از یک سلول به سلول دیگر در همان شهر نیز متفاوت است. با این حال، شکل منحنی رشد تغییرات خیلی حساسی بر روی پارامترهای a_0و b_0 ندارند امّا تغییرات حساسی بر روی پارامتر c_0 دارند. بنابراین a_0، b_0 ، c_0 و n می‌توانند مطابق سرعت توسعه شهر در شهرهای جداگانه تعریف و طبقه‌بندی شوند.

نمای کلی از توسعه شهر

مطابق اصول آتوماتای سلولی، حالت خود سلول و حالت سلولهای همسایه در مرحله زمانی قبل، حالت سلول را در مجموعه‌های فازی شهر تعیین می‌کند. اگر یک سلول تمایل قوی برای توسعه داشته باشد آن سلول می‌تواند برای چنین

توسعه‌ای از همسایگانش پشتیبانی بگیرد، آنگاه توسعه برای آن سلول اتفاق خواهد افتاد. برای نمونه اگر یک سلول درجه عضویتی بزرگتر از یک ارزش معین در زمان t در مجموعه فازی شهر داشت آن به این معنی است که سلول مذکور تمایل قوی برای توسعه دارد و متوسط درجه عضویت سلولهای همسایه‌اش بزرگتر از درجه عضویت خود سلول است، بدین معنی که یک رانش قوی برای توسعه از همسایه‌هایش وجود دارد، سلول توسعه بیشتر را با توجه به منحنی لجستیک که در رابطه (۶) شرح داده شد طی خواهد نمود. تعیین آنچه که حالت یک سلول را بعد از تعیین دورهٔ زمانی مشخص نماید با توجه به رابطه (۶) می‌توان به صورت رابطه (۷) بازنویسی شود:

$$t_{x_{ij}} = \begin{cases} 0 & t_{x_{ij}} \langle 0 \\ (\ln(b_0) - \ln(\mu_{S_{Urban}^{-1}(x_{ij}^1)} - a_0)/c_0 & 0 \le \mu_{S_{Urban}(x_{ij}^1)} \langle n \\ n & t_{x_{ij}} \ge n \end{cases} \quad (۷)$$

برای هر سلول x_{ij} در مجموعه فازی شهر، درجه عضویت آنها از ارزش تراکم جمعیت آنها در رابطه (۸) تعریف شده است. بنابراین مرحله (یا سال بر $t_{x_{ij}}$ دلالت نموده) توسعه سلول در فرآیند توسعه شهر می‌تواند در رابطه (۷) محاسبه شود. ضمن آگاهی از مراحل جریان توسعه سلولها در فرآیند توسعه شهر، درجهٔ عضویت این سلولها در مجموعه فازی شهر زمان دیگری t می‌تواند از رابطه (۶) محاسبه گردد.

الگوی محدود کنندهٔ توسعه شهر

بر اساس کنترل منطق فازی، پایه الگوی توسعه می‌تواند با استفاده از تعدادی از متغیرهای زبانی مثل «سریع»، «کُند (آهسته)»، «خیلی سریع» یا «خیلی آرام» اصلاح شود و مطابق آن سناریوهای توسعه مختلفی را انجام داد. بر اساس تعریف کلی نمای توسعه شهر، **چهار نوع تابع عضویت** در قسمت زیر جهت ارائه الگوهای مختلف محدود کنندهٔ توسعه شهر ارائه شده است:

(۸) الگوی پایه توسعه

$$\mu_{S_{Urban}}(x'_{ij}) = \begin{cases} 0 & t'_{x_{ij}} \langle 0 \\ \dfrac{1}{a_0 + b_0 \exp(-c_0 . t'_{x_{ij}})} & 0 \le t'_{x_{ij}} \langle n \\ 1 & t'_{x_{ij}} \ge n \end{cases}$$

$$(c_0 = 0.5)$$

(۹) الگوی توسعه سریع

$$\mu_{S_{Urban}}(x'_{ij}) = \begin{cases} 0 & t'_{x_{ij}} \langle 0 \\ \dfrac{1}{a_0 + b_0 \exp(-c' . t'_{x_{ij}})} & 0 \le t'_{x_{ij}} \langle n \\ 1 & t'_{x_{ij}} \ge n \end{cases}$$

$$(c' \rangle 0.5)$$

(۱۰) الگوی توسعه کُند (آرام)

$$\mu_{S_{Urban}}(x'_{ij}) = \begin{cases} 0 & t'_{x_{ij}} \langle 0 \\ \dfrac{1}{a_0 + b_0 \exp(-c' . t'_{x_{ij}})} & 0 \le t'_{x_{ij}} \langle n \\ 1 & t'_{x_{ij}} \ge n \end{cases}$$

$$(0 \langle c' \langle 0.5)$$

(۱۱) الگوی توسعه جدید

$$\mu_{S_{Urban}}(x_{ij}^t) = \sqrt{\mu_{S_{Urban}(x_{ij}^t)}}$$

(۱۲) الگوی بدون توسعه

$$\mu_{S_{Urban}}(x_{ij}^t) = \mu_{S_{Urban}(x_{ij}^t)}$$

بواسطه پارامترهای مختلف c' در روابط (۹)-(۱۰)، بیشتر سناریوهای توسعه شهر مثل «توسعه خیلی سریع»، «نهایت توسعه سریع»، «توسعه خیلی آرام» و «نهایت توسعه آرام» می‌توانند در مدل اجراء شوند.

متغیرهای زبانی در تحقیق مذکور بصورت زیر تعریف شده‌اند:

سریع: $c' = (1 + 1/4) \times c_0$ خیلی سریع: $c' = (1 + 1/2) \times c_0$ نهایت سریع: $c' = (1 + 3/4) \times c_0$

کُند: $c' = 3/4 \times c_0$ خیلی کُند: $c' = 1/2 \times c_0$ نهایت کُند: $c' = 1/4 \times c_0$

موتور استنباط فازی

در مدلسازی توسعه شهر مبتنی بر اصول آتوماتان سلولی، هر الگوی توسعه‌ای در رابطه (۶) تا (۱۱) توصیف شده است و با قوانین انتقال نسبت داده می‌شوند. برای توسعه یک سلول در این سیستم، معادله‌ای که کاربردهای انتقال قوانین را در زمان مشخص تعیین می‌کند متکی به شرایط خودسلول و شرایط همسایگان آن سلول می‌باشد. این شرایط می‌توانند یا طبیعی (فیزیکال)، اجتماعی – اقتصادی، یا نهادی، یا ترکیبی از هر کدام یا همه آنها باشد. T_1، T_2، T_3، T_4، T_5، T_6، T_7 و T_8 هشت نوع انتقالات مختلف در آتوماتان سلولی مبتنی بر سیستم شهری را نشان می‌دهند. این انتقالات اصطلاحاً به ترتیب مثل: «توسعه نرمال» (الگو پایه) T_1، «توسعه کُند (آرام)» T_2، «توسعه خیلی کُند» T_3، «توسعه نهایت کُند» T_4، «توسعه سریع» T_5، «توسعه خیلی سریع» T_6، «توسعه جدید» T_7 و «بدون توسعه» T_8 هستند. پایهٔ الگوی توسعه (T_1) برای اجراء خواهد بود، اگر یک سلول تمایل شدیدی به توسعه داشته باشد آن سلول می‌تواند پشتیبانی کافی و مناسب را برای چنین توسعه‌ای از همسایگانش بگیرد. تعداد دیگری از محدودیتها مثل اختلافات توپوگرافی یا شبکه‌ای حمل و نقل یا طرحهای برنامه‌ریزی نیز برای سلول کاربرد دارند. اگر حالت سلولها در مجاورت سلولی x_{ij} بوسیله متوسط درجه عضویت همه همسایگان سلولها در مجموعه فازی شهر نشان داده شود، بوسیله $\overline{\mu}_{S_{Urban}}(\Omega_{x_{ij}})$ مدلل می‌شود آنگاه قانون زیر کاربردهای T_1 را می‌تواند بیان نماید:

(۱۳) شرط A
$$\mu_{S_{Urban}}(x_{ij}) \rangle = \mu_0 \ \ and \ \ \overline{\mu}_{S_{Urban}}(\Omega_{x_{ij}}) \rangle \mu_{S_{Urban}}(x_{ij})$$

در رابطه بالا، μ_0 حداقل آستانه یک سلول با تمایل شدید را، برای تعیین حدود توسعه مشخص می‌نماید. برای مثال، چنانکه μ_0 مجموعه‌ای نسبت به 0.5 برای اوّلین مورد یا نمونه باشد آن می‌تواند در مدل مبتنی بر فرآیندهای شبیه‌سازی طبقه‌بندی یا اصلاح شود.

اگر یک سلول تمایل شدیدی برای توسعه دارد امّا آن سلول نمی‌تواند به اندازه کافی برای چنین توسعه‌ای از همسایگانش پشتیبانی بگیرد، الگوی توسعه کُندی (آرامی) (T_2) برای آن سلول بکار برده می‌شود. اگر در این الگوی توسعه کُند (آرام)، یک سلول نتواند تمایل شدیدی برای توسعه از خود نشان دهد سلول مذکور می‌تواند برای توسعه از همسایگانش پشتیبانی لازم را بگیرد. بنابراین، T_2 اگر شرایط زیر را داشته باشد بکار گرفته می‌شود. اگر:

(۱۴) شرط B
$$\mu_{S_{Urban}}(x_{ij}) \rangle = \mu_0 \ \ and \ \ \overline{\mu}_{S_{Urban}}(\Omega_{x_{ij}}) \langle \mu_{S_{Urban}}(x_{ij})$$

(۱۵) شرط C
$$0 \langle \mu_{S_{Urban}}(x_{ij}) \langle \mu_0 \ \ and \ \ \overline{\mu}_{S_{Urban}}(\Omega_{x_{ij}}) \rangle \mu_{S_{Urban}}(x_{ij})$$

همین طور، اگر یک سلول تمایل ضعیفی برای توسعه داشته باشد آن سلول نمی‌تواند به اندازه کافی برای چنین توسعه‌ای از همسایگانش پشتیبانی بگیرد، بنابراین یک فرآیند توسعه خیلی کُندی برای آن سلول بکار گرفته می‌شود. بر این اساس، اگر T_3 شرط زیر را داشته باشد بکار گرفته می‌شود:

(۱۶) شرط D
$$0 \langle \mu_{S_{Urban}}(x_{ij}) \langle = \mu_0 \ \ and$$

$\overline{\mu}_{S_{Urban}}(\Omega_{x_{ij}})\langle\mu_{S_{Urban}}(x_{ij})$

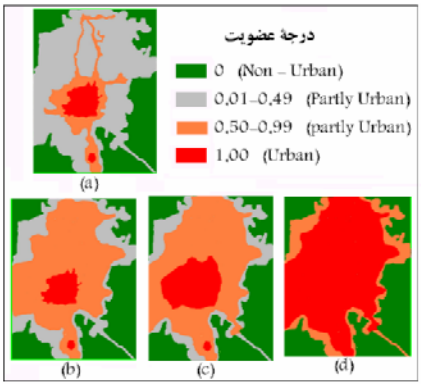
جدا از وضعیت بالا، اگر یک سلول جهت توسعه تمایلی نداشته باشد و آن سلول نتواند پشتیبانی لازم را برای چنین توسعه‌ای از همسایگانش بدست آورد آنگاه توسعه در آن سلول نمی‌تواند رخ دهد، بنابراین، T_8 (بدون توسعه) به کار گرفته می‌شود. علاوه بر این، یک سلول ممکن است در ناحیه‌ای قرار گیرد که در آن ناحیه توسعه شهر اکیداً محدودیت دارد یا بوسیله شرایط طبیعی یا دخالت نهادی محدود شده است. در این مورد، توسعه بدون توجه به حالت خود سلول و حالت سلولهای همسایگان آن رخ نخواهد داد. توسعه شهر می‌تواند تعدادی از عوامل مثل: شرایط توپوگرافی، شبکه حمل و نقل، برنامه‌ریزی و رفتار تصمیم‌گیریهای انسان، سریع و کُند شود.

اجرای مدل

مدلهای آتوماتای سلولی می‌توانند با انواع بسیاری از نرم‌افزارها اجراء شوند[۳]. برای مدلهای آتوماتای سلولی توسعه شهر، برنامه‌ها هم می‌توانند در داخل و هم در خارج از محیط GIS اجراء شوند در روشهای سابق، آی‌تامی و کلارک [۳۳] و آی‌تامی [۳۴] این مدلها را بصورت سلولی در محیط GIS نرم‌افزار IDRISI توسعه دادند و وَو [۶،۷و۸] مدلش را با استفاده از زبان ماکرو ARC/INFO Arc Macro Language (AML) اجراء نمود. این برنامه قابلیت پیشرفته گرافیکی و کاربرپسندی در GIS دارد. برنامه‌های دیگر در خارج از GIS توسعه یافته‌اند. در تحقیق مذکور از نرم‌افزار MATLAB 6.5 استفاده شده است علّت انتخاب این نرم‌افزار به دلایل قابلیت‌های آن در راستای اهداف و فرضیات تحقیق بوده است. علاوه بر آن نرم‌افزار مذکور مشکلاتی مثل: توپولوژی (خم ژوردان)، ورودی و خروجی را ندارد.

سناریوهای تجربی توسعه آتوماتای سلولی شهر تهران

توسعه شهر فقط بوسیله حالت خود سلول و حالت همسایگان سلول کنترل شد، در این وضعیت فقط سلولهایی جهت توسعه شهر فرصت پیدا می‌کردند که درجه عضویت بزرگتر از صفر [0] بودند. به عبارت دیگر، توسعه برای سلولهایی رخ می‌داد که قابلیت فرآیند توسعه را داشته‌اند. سلولهایی که دارای بالاترین درجه همسایگی، بودند توسعه سلولی سریع‌تری داشتند و سلولهایی که درجه عضویتشان صفر [0] بود توسعه‌ای نداشتند، همچنین این سلولها می‌توانستند جهت توسعه شهر یا از تمایل خودشان برای توسعه و یا از پشتیبانی سلولهای همسایگانشان برای توسعه استفاده نمایند. از اینرو، نواحی شهری نمی‌توانست به نواحی غیرشهری در طول زمان گسترش یابد. فقط چهار قانون انتقال، برای کنترل فرآیند توسعه بکار گرفته شد. این قانونها «توسعه نرمال» (الگو پایه) T_1، «توسعه کُند (آرام)» T_2، «توسعه خیلی کُند» T_3، و «بدون توسعه» T_8 بودند. در شکل (۴، a، b، c و d) نتایج شبیه‌سازی توسعه شهر در ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سال به ترتیب نشان داده شده است. مقایسه و همپوشی آن با نقشه واقعی تهران و همچنین با توجه به قوانین تعریف‌شده در طول شبیه‌سازی متفاوت بوده است، پس از بررسی و مقایسه نتایج مختلف بدست آمده در طول روند شبیه‌سازی، نتیجه ۸۲/۲ درصدی بطور کلی حاصل شد در صورت تعریف بیشتر قوانین تأثیرگذار با توجه به محدودیتها و قابلیتهای توسعه شهر، می‌توان نتایج دقیق‌تری حاصل نمود.



شکل ۴ـ شبیه‌سازی توسعه کلانشهر تهران

a) حالتهای اوّلیه شهر b)سناریو شهر بعد از ۲۵ سال c) سناریو شهر بعد از ۵۰ سال d) سناریو شهر بعد از ۷۵ سال. دایره همسایگی بکار گرفته شده (شعاع = ۱)

اگر شرایط توپوگرافیک شهر از مکانی به مکانی دیگر متفاوت بود لازم بود که این عوامل برای مدل بصورت محدودیتهای مدل معرفی شوند. بر این اساس توسعه آتوماتای سلولی در نواحی که زمینهای مسطح و شیب آرام یا صاف دارند می‌تواند تسریع گردد و بر عکس توسعه آتوماتای سلولی در نواحی که دارای زمینهای بلند و شیب پله‌ای است می‌تواند کُند شود. ملاحظه می‌شود که قوانین می‌توانند بر روی فرآیند توسعه شهر اجراء شوند. این قوانین شامل انتقالات T_4 وT_7 بعلاوه چهار نوع انتقال بکار گرفته شده بالا می‌باشند. علاوه بر محدودیت توپوگرافی، عوامل دیگر همچون شبکه‌های حمل و نقل نیز می‌توانند اثرات مهّمی بر فرآیند توسعه شهر بگذارند. در این وضعیت توسعه نواحی بطور عمده‌ای در طول راههای اصلی شبکه حمل و نقل جذب شده‌اند. مدل ارائه شده بر اساس اصول آتوماتای سلولی توسعه شهر و مجموعه فازی ساخته شده است و توانایی تولید سناریوهای واقع بین توسعه شهر را دارد ضمن آنکه با استفاده از سنسورهای هوشمند و اتصال شبکه‌های کابلی و بدون سیم می‌توانند وضعیت‌های اضطراری را نیز بصورت بلادرنگ نشان دهد، قابلیت مذکور به آسانی قابل دستیابی است. همچنین با تعریف قوانین آتوماتای سلولی برنامه‌ریزی کاربری زمین شهری بطور جامع با توجه به ابعاد مختلف (فیزیکی– طبیعی، اقتصادی و اجتماعی) می‌توان تأثیر عواملی که در گسترش توسعه کلانشهر تهران سهیم هستند را کشف، شناسایی، بارزسازی و کنترل نمود و ضمن آن عملیات شبیه‌سازی را جهت بهینه‌سازی، بهینه‌یابی و پیش‌بینی آتوماتای سلولی کلانشهر تهران انجام داد.

نتیجه‌گیری

بر اساس تجربیات جهانی و بویژه نتایج تحقیق مذکور، سیستم ارائه شده قادر است که بصورت خودکار برخی از داده‌ها، اطلاعات و نقشه‌های را از طریق سنسورهای هوشمند اخذ نماید و به دنبال آن با توجه به قوانین تعریف‌شده مطابق عوامل، استانداردها، معیارها و شاخص‌های برنامه‌ریزی کاربری زمین شهری در ابعاد افقی و عمودی شهر بهینه‌سازی، بهینه‌یابی و پیش‌بینی نماید.

یکی از اشکال ترکیب تئوری مجموعه‌های فازی و منطق فازی در تعریف **حالت سلولها و قوانین انتقال** است با تئوری مجموعه فازی **حالت یک سلول با درجه عضویت آن در ارائه مراحل فرآیند توسعه سلولهای شهری** ارتباط داده می‌شود. درجه عضویت توسعه شهر همچون فرآیندی پیوسته در فضا و طول زمان (مثل تبدیل مرزهای غیرشهری به شهری) نشان داده می‌شود. علاوه بر این، استفاده از قوانین انتقال فازی مانند: «توسعه سریع»، «توسعه خیلی سریع»، «توسعه کُند (آرام)»، «توسعه خیلی کُند»، «نهایت توسعه کُند» و انواع متغیرهای زبانی مثل «خوب»، «مناسب»، «غیرمناسب» تعاریف قوانین انتقال که نزدیکتر به رفتار تصمیم‌گیری انسان است را می‌سازند.

سیستم مطرح شده در تحقیق حاضر، با بسیاری از تئوریهای برنامه‌ریزی شهری و معادلات حاصل از آنها می‌تواند ترکیب و توسعه یابد. بویژه اینکه **فکر سلولی از قدمت بسیار زیادی در شهرسازی برخوردار بوده است.** از چین باستان، ایران باستان و تمدنهای کهن تا زمان کنونی **ایده‌ها و پشتوانه‌های غنی** آنرا حمایت می‌کند. کامپیوتر به فکر سلولی، توان و سرعت جدیدی بخشیده است. مدل آتوماتای سلولی شهر، فواید زیادی دارد برخی از مهمترین فواید آن عبارتند از: جامع بودن (پوشش ابعاد فیزیکی-طبیعی، اقتصادی، اجتماعی و نهادی)، اجرای ساده مدل (قوانین ساده جهت حل مسائل پیچیده)، انعطاف‌پذیری (خروجی و ورودی، فرمتها، طبقه‌بندی، تحلیل و ...)، قابلیت اتصال به سنسورهای هوشمند، بلادرنگی سیستم، مشارکت مردمی و همکاری بین‌سازمانی، جلوگیری از نابسامانیهای شهر و نزدیکتر شدن به اهداف برنامه‌ریزی شهری و... . خروجی عملیات شبیه‌سازی آتوماتای سلولی بر اساس قوانین برنامه‌ریزی کاربری زمین‌شهری در **کلانشهر تهران** نشان می‌دهد که مدل مذکور می‌تواند جهت انجام شرایط پیچیده‌تر نیز بکار گرفته شود زیرا با تعریف قوانین بیشتر مبتنی بر

استانداردها، معیارها و شاخص‌های برنامه‌ریزی شهری، نتیجه واقعی‌تر می‌گردد، نتایج مذکور پس از بررسی مراحل مختلف حدود ۸۲/۲ درصد با شرایط واقعی مطابقت داشتند.

عملیات شبیه‌سازی تحقیق، قابلیت و توان آتوماتای سلولی شهر و فازی را جهت حل مسائل کاربری زمین و توسعه کلانشهر تهران ارائه داد. علاوه بر این ، اعتبار مدل را جهت شرایط پیچیده‌تر با رویکردهای زیربنایی و اهداف برنامه‌ریزی شهری نشان می‌دهد.

منابع

[1] Batty, M. (2000) "GeoComputation using cellular automata", in *GeoComputation*, eds. S. Openshaw and R. J. Abrahart, Taylor & Francis, London, pp.95-126.
[2] Batty, M. (1998) "Urban evolution on the desktop: simulation with the use of extended cellular automata", *Environment and Planning A*, vol. 30, pp.1943-1967.
[3] Batty, M. (1997) "Cellular automata and urban form: a primer", *Journal of the American Planning Association*, vol. 63, pp.266-274.
[4] Wu, F. and Webster, C. J. (2000) "Simulating artificial cities in a GIS environment: urban growth under alternative regulation regimes", *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 14, no. 7, pp.625-648.
[5] Wu, F. and Webster. C. J. (1998) "Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation", *Environment and Planning B: Planning and Design,* vol. 25, pp.103-126.
[6] Wu, F. (1998a) "An experiment on the generic polycentricity of urban growth in a cellular automatic city", *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 25, pp.731-752.
[7] Wu, F. (1998b) "Simulating urban encroachment on rural land with fuzzy-logic-controlled cellular automata in a geographical information system", *Journal of Environmental Management*, vol. 53, pp.293-308.
[8] Wu, F. (1998c) "SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules", *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 12, pp.63-82.
[9] Wu, F. (1996) "A linguistic cellular automata simulation approach for sustainable land development in a fast growing region", *Computers, Environment, and Urban Systems*, vol. 20, pp.367-387.
[10] Batty, M., Xie, Y. & Sun, Z. (1999) "Modelling urban dynamics through GIS-based cellular automata", *Computers, Environment and Urban Systems,* vol. 23, pp.205-233.
[11] Clarke, K. C. and Gaydos, L. J. (1998) "Loosecoupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore", *International Journal Geographical Information Sciences,* vol. 12, pp.699-714.
[12] Batty, M. and Xie, Y. (1997) "Possible urban automata", *Environment and Planning B*, vol. 24, pp.175-192.
[13] Batty, M., Couclelis, H. & Eichen, M. (1997) "Urban systems as cellular automata", *Environment and Planning B,* vol. 24, pp.59-164.
[14] Clarke, K. C., Hoppen S. & Gaydos, L. J. (1997) "A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Franciso Bay area", *Environment and Planning B,* vol. 24, pp.247-261.
[15] Couclelis, H. (1997) "From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation", *Environment and Planning B,* vol. 24, pp.165-174.
[16] Couclelis, H. (1989) "Macrostructure and microbehavior in a metropolitan area", *Environment and Planning B,* vol. 16, pp.141-154.
[17] Couclelis, H. (1985) "Cellular worlds: a framework for modelling micro-macro dynamics", *Environment and Planning A*, vol. 17, pp.585-596.
[18] Wagner, D. F. (1997) "Cellular automata and geographic information systems", *Environment and Planning B,* vol. 24, pp.219-234.
[19] White, R. and Engelen, G. (1997) "Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling", *Environment and Planning B,* vol. 24, pp.235-246.
[20] White, R. and Engelen, G. (1994) "Cellular dynamics and GIS: modelling spatial complexity", *Geographical Systems*, vol. 1, pp.237-253.
[21] White, R. and Engelen, G. (1993) "Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use", *Environment and Planning A,* vol. 25, pp.1175-1199.
[22] White, R., Engelen, G. & Uljee, I. (1997) "The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics", *Environment and Planning B,* vol. 24, pp.323-343.
[23] Cecchini, A. (1996) "Urban modelling by means of cellular automata: generalised urban automata with the help on-line (AUGH) model", *Environment and Planning B,* vol. 23, pp.721-732.

[24] Itami, R. M. (1994) "Simulating spatial dynamics: cellular automata theory", *Landscape and Urban Planning*, vol. 30, pp.27-47.
[25] Takeyama, M. and Couclelis, H. (1997) "Map dynamics: integrating cellular automata and GIS through Geo-Algebra", *International Journal Geographical Information Sciences,* vol. 11, pp.73-91.
[26] Herbert, D. T. and Thomas, C. J. (1997) *Cities in space: City as place,* 3rd edn, David Fulton Publishers, London.
[27] Jakobson, L. and Prakash, V. (eds) (1971) *Urbanization and national development*, Beverley Hills, Sage.
[28] Gardner, M. (1972) "The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game 'Life'", *Scientific American,* vol. 233, pp.120-123.
[29] Woodcock, C. E. and Gopal, S. (2000) "Fuzzy set theory and thematic maps: accuracy assessment and area estimation", *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 14, no. 2, pp.153-172.
[30] Wang, F. and Hall, G. B. (1996) "Fuzzy representation of geographical boundaries in GIS", *International Journal of Geographical Information Systems,* vol. 10, pp.573-590.
[31] Burrough, P. A. (1986) *Principles of geographic information systems for land resources assessment*, Clarendon Press, Oxford.
[32] Fourastié, J. (1963) *Le Grand Espoir du XX Siécle*, Edition definitive, Gallimard, Paris.
[33] Itami, R. M. and Clark, J. D. (1992) "Spatial dynamic simulations using discrete time and discrete event theory in cell based GIS systems", *Proceedings: 5th International Symposium on Spatial Data Handling*, Charleston, SC., pp.702-712.
[34] Itami, R. M. (1988) "Cellular worlds: models for dynamic conceptions of landscape", *Landscape Architecture,* vol. 78, pp.52-57.