

شبیه‌سازی تغییرات کاربری زمین شهر همدان در سال ۲۰۴۰ میلادی با استفاده از روش اتوماسیون سلولی و داده‌کاوی ترکیبی «رگرسیون بردار پشتیبان و سلول‌های خودکار فازی»

سعید حاجی‌بابایی (دانشجوی دکتری شهرسازی، گروه معماری و شهرسازی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران)
saeedhajibabaei@yahoo.com

کیانوش ذاکر حقیقی (دانشیار گروه شهرسازی، دانشکده هنر و معماری واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. نویسنده مسئول)

k.zakerhaghighi@gmail.com

تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۴/۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۲

صص ۱۷۵-۱۹۲

چکیده

توسعه کالبدی و رشد جمعیت شهرهای ایران در چند دهه اخیر دگرگونی‌هایی را پذیرفتند که سبب بروز عدم تعادل و ناهماهنگی در گسترش کالبدی شهرها و تغییرات پیش‌بینی نشده در توسعه فضایی شهرها شده است. در این پژوهش از تلفیق دو مدل اتوماسیون سلولی برای شبیه‌سازی تغییر کاربری در شهر همدان در سال ۲۰۴۰ میلادی و مدل رگرسیون بردار پشتیبان برای پایه‌ریزی قوانین انتقال غیرخطی برای شبیه‌سازی اتوماسیون سلولی و از منطق فازی برای تعریف قوانین انتقال خطی و غیرخطی استفاده شده است. به منظور آزمون مدل شبیه‌سازی، تغییرات کاربری شهر همدان بررسی و پس از استخراج اطلاعات از پایگاه اطلاعات جغرافیایی و تصاویر ماهواره‌ای، وضعیت سلول‌ها در دوره‌های زمانی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون مدل نشان می‌دهد مدل تلفیقی مورد نظر قادر است با رفع پیچیدگی‌های اطلاعاتی و ابهامات ناشی از تحولات کالبدی شهر، مدلی مناسب برای تحلیل تحولات توسعه‌ای در گذشته و پیش‌بینی جهات و میزان تغییرات کاربری فراهم آورد. در شهر همدان مساحت اراضی ساخته‌شده در شهر تا سال ۲۰۴۰ افزایش یافته و احتمالاً مساحت این پهنه به حدود ۶۳۵۰ هکتار برسد و رفته‌رفته مساحت اراضی باغستان نیز کمتر شود.

کلیدواژه‌ها: اتوماسیون سلولی، تغییر کاربری، رگرسیون بردار پشتیبان، منطق فازی، شهر همدان

۱. مقدمه

۱.۱. طرح مسئله

توسعه کالبدی و رشد جمعیت شهرها تا سه دهه پیش به صورت شتابزده افزایش یافته است (طیبی و جنرت^۱، ۲۰۱۶، ص. ۶۱). با بروز تحولات جدید، شهرها به سرعت تغییرات و دگرگونی‌هایی را پذیرفتند و گسترش بخش خدمات و همچنین، تمرکز صنایع و کارخانجات در شهرها موجب جذب افراد بسیاری از روستاها و شهرهای کوچک، به طرف شهرهای بزرگ شده است. اضافه شدن محلات و مناطق جدید به شهرها، متراکم شدن شهرها از جمعیت، قیمت زمین و بسیاری عوامل دیگر، به طور مستقیم و غیرمستقیم در این مسئله نقشی اساسی داشته‌اند (نوابخش، نادری و احمدی، ۱۳۹۴، ص. ۲). در بررسی رشد و توسعه فضایی شهرها باید مسائلی از قبیل نظارت بر چگونگی توسعه شهرها و افزایش جمعیت آن‌ها، شناسایی مراحل گسترش فضایی شهرها به همراه تغییر و تحولاتی که در هر دوره صورت خواهند گرفت، باید مد نظر قرار گیرند که این امر بدون وجود نگرش به مسائل شهر در قالب یک دید سیستمی امکان‌پذیر نخواهد بود. وجود چنین مسائلی، ضرورت ایجاد تحلیل فضایی از شهرها و همچنین، یک مدل‌سازی^۲ منطقی برای رشد و ساختار فضایی^۳ شهرها در آینده را بیش از پیش مشخص می‌کند. از طرف دیگر، شهرها در بین پیچیده‌ترین ساختارهایی هستند که از طریق جوامع

بشری ساخته شده‌اند (وو و وبستر^۴، ۱۹۹۸، ص. ۲۴). این پیچیدگی در مسائل شهری نیز به شدت دیده می‌شود (حیب و شکوهی، ۱۳۹۱، ص. ۱۹). شهرها چند ویژگی دارند که آن‌ها را به هم شبیه می‌سازد. پویایی و رشد دو رکنی هستند که در اغلب شهرها وجود دارد، با این حال، مدل‌سازی پویایی و رشد و مدل‌هایی که دربرگیرنده پیچیدگی شهرها باشد، بسیار دشوار است (ماجدی و پورجوهری، ۱۳۹۲، ص. ۲۷؛ بردو، کاناسکو، مک کورمیک، لاوله^۵، ۲۰۰۳، ص. ۱۴۵). بنابراین، این پیچیدگی‌ها استفاده از مدل‌های قدیمی برای مدل‌سازی را سخت می‌کند؛ زیرا آن‌ها ایستا، خطی، تجمعی، به هم پیوسته و براساس تئوری سیستم‌های ساده بالا به پایین هستند (چنگ^۶، ۲۰۰۳، ص. ۱۷۷). پس به منظور مدل‌سازی سیستم‌های شهری باید روش‌های جدید به خدمت گرفته شود که دینامیک^۷، غیرخطی، غیرتجمعی، گسسته و پایین به بالا باشند (جونفنگ^۸، ۲۰۰۳، ص. ۳۲). از این رو، از گذشته تا کنون، مدل‌های مختلفی توسط محققان توسعه یافته است تا از طریق به کارگیری این مدل‌ها بتوان پیچیدگی پویایی رشد شهر و روند رشد را شبیه‌سازی^۹ کرد (کاندو^{۱۰}، ۲۰۰۲، ص. ۱۳۸). تغییر کاربری اراضی تحت تأثیر عوامل مختلفی است که مدل‌های کیفی و توصیفی به تنهایی نمی‌توانند یارای بیان کامل این عوامل باشد. فعالیت‌های انسان‌ها و عوامل طبیعی بر تغییر کاربری اراضی در گذر زمان

4. Wu, Webster

5. Barredo, Kasanko, McCormick, Lavallo

6. Cheng

7. dynamic

8. Junfeng

9. simulating support vector machines

10. Candau

1. Tayyebi, Jenerette

2. modeling

3. Spatial structure

تأثیر می‌گذارند. جزئیات فضایی نقش مهمی در این فرآیند دارند (وایت و انگلن^۱، ۱۹۹۷، ص. ۲۳۶). بنابراین، مدل‌سازی فضایی مناسب‌ترین روش به منظور مدل‌سازی فرآیند تغییرات کاربری اراضی است (تورنس و سالیوان، ۲۰۰۲، ص. ۱۶۷).

در شهر همدان نیز بافت قدیمی شهر به دور هسته اولیه شهر یا بافت تاریخی تنیده شده است. وجود ساخت متحداالمركز، باعث گسترش هسته‌های شهر به دور منطقه مرکزی شد. خیابان‌ها و کوچه‌های شهر و راه‌های بیرون آن نیز از طریق راه‌های اصلی، متهمی به همین منطقه مرکزی می‌شده‌اند. طرح شعاعی ارائه شده باعث دگرگونی اساسی در ساختار فضایی شهر به موازات شش خیابان اصلی پیرامون نقطه مرکزی شهر؛ یعنی میدان امام خمینی شد. با گسترش‌های بعدی شهر گرد بافت قدیم و رشد سریع شهرنشینی، این بافت‌ها اشباع از جمعیت شده و مراکز خدماتی و تجاری و غیره بیشتر در آن تجمع یافتند. سپس بافت جدیدی به دور بافت قبلی شهر شکل گرفت. افزایش مهاجرت به شهر نیز خود عامل دیگری در بالا رفتن رشد جمعیت شهری و افزایش ساخت‌وسازهای داخل شهرها و به تبع آن، توسعه شهر همدان در جهات مختلف حول نقطه مرکزی شهر بود. این تحولات نه تنها باعث نامتعادل شدن گسترش کالبدی این شهر شده است؛ بلکه توسعه فضایی آن را نیز به شدت تحت تأثیر خود قرار داده است. از این رو، این پژوهش با هدف شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین آتی شهر همدان با

به‌کارگیری روشی که متغیرهای شهری را به صورت غیرخطی مورد ارزیابی قرار داده‌اند، مد نظر قرار دارد.

۲.۱. پیشینه پژوهش و مبانی نظری

دانیل ژی^۲ (۱۹۹۶) در پژوهش خود با عنوان «تحلیل ساختار فضایی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی^۳»، تغییرات ساختار فضایی در شهرها را مورد بررسی قرار می‌دهد و از این تحلیل برای مدل‌سازی و در نهایت، شبیه‌سازی در هنگام استفاده می‌کند. او توزیع جمعیت را یکی از مهم‌ترین عوامل تغییر ساختار فضایی شهرها می‌داند.

وو^۴ (۱۹۹۶) از روش شبیه‌سازی نوین به منظور محاسبه قوانین انتقال^۵ استفاده کرد. در این پژوهش، شبیه‌سازی از طریق تعداد زیاد سناریوی ممکن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که در هر سناریو پارامترهای مختلف به طور تصادفی تعیین می‌شود.

آنا^۶ (۲۰۰۴) ماشین‌های بردار پشتیبان را به عنوان روشی برای ساخت قوانین انتقال غیرخطی معرفی می‌کند و احتمال تغییرات کاربری زمین و تبدیل یک سلول غیرشهری به یک سلول شهری را در چند تکرار از شبیه‌سازی در بازه‌های زمانی مختلف برآورد می‌کند.

جان لو^۷ (۲۰۰۶) با مطالعه در مورد تحلیل و مدل‌سازی شهری و ساختار فضایی شهرها از تکنیک‌های مدل‌سازی منطقی برای رسیدن به اهداف

2. zhi

3. geographical information system

4. wu

5. Transition rules

6. ana

7. lou

1. White, Engelen

پژوهش خود استفاده می‌کند. جان‌لو ضمن تأکید بر مدل‌سازی تغییرات محلی با استفاده از تأثیرات متغیرهای فضایی در گسترش توسعه زمین شهری چهارچوبی را برای تحلیل، مدل‌سازی و شبیه‌سازی تعریف می‌کند.

رضازاده (۱۳۸۸) در پژوهشی با عنوان «روشی نوین در شبیه‌سازی رشد شهری» این مسئله را مطرح می‌کند که با وجود روبه‌روبودن شهرهای امروز با متغیرهای بسیار زیاد و قراردادن شهرها در بین سیستم‌های پیچیده موجود، شبیه‌سازی رشد شهری می‌تواند تا حدودی جواب‌گوی پیچیدگی موجود در شهرها باشد.

کامیاب (۱۳۹۰) با مطالعه در مورد کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در مدل‌سازی شهری به این نتیجه می‌رسد وجود یک تکنیک اصولی با رویکرد سیستمی جهت پیش‌بینی موقعیت‌های شهری جدید ضروری است. او با استفاده از متغیرهای کاربری زمین، تعداد سلول‌های شهری، کاربری‌هایی که بیشترین اثر در دوره زمانی مورد مطالعه را دارند و همچنین، متغیرهای فاصله تا کاربری‌های دیگر، رشد شهری شهر گرگان را مدل‌سازی کرد و به این نتیجه رسید که نوع کاربری تأثیر زیادی در توسعه شهرها دارد.

طیبی (۲۰۱۳) ضمن بررسی خطاهای موضعی در داده‌های مکانی و ارتباط آن با ویژگی‌های زمین، به تحلیل ابعاد عدم قطعیت در تغییرات استفاده از زمین می‌پردازد.

پيجانوسکی^۱ (۲۰۱۴) چگونگی اجرای مدل ترکیبی سیستم اطلاعات جغرافیایی و شبکه‌های عصبی با کارایی بالا را براساس تغییرات کاربری زمین در بازه‌های زمانی مختلف مورد تحلیل قرار می‌دهد.

احمدلو، دلاور، طیبی، شفیعی‌زاده و مقدم (۲۰۱۵) با استفاده از رگرسیون چندمتغیره و شبکه‌های عصبی مصنوعی و همچنین، تصاویر لندست^۲ ۱۹۹۱ و ۲۰۱۰، شهرنشینی در بمبئی هند را مورد شبیه‌سازی قرار دادند و در نهایت، به این نتیجه رسیدند که شبکه‌های عصبی مصنوعی نتیجه بهتری را در شبیه‌سازی در مقایسه با رگرسیون چندمتغیره می‌دهند.

یکی از دست‌آوردهای «نظریه عمومی سیستم‌ها» استفاده از «روش شبیه‌سازی و مدل‌سازی برای مطالعه سیستم‌ها و مداخله در آنهاست. بر این اساس، در دهه ۱۹۶۰ در غرب نوعی «برنامه‌ریزی سیستمی» به وجود آمد که اساس آن بر شبیه‌سازی واقعیت به صورت یک «مدل» است که از طریق آن رفتار یک سیستم خاص در جهت اهداف مورد نظر هدایت می‌شود. اهداف مدل‌سازی به طور کلی عبارت است از شناخت دقیق ساختار و عملکرد یک سیستم به منظور کمک به حل مشکلات آن و در نهایت، اصلاح یا بازسازی سیستم. مدل‌ها براساس اهداف مختلف مورد نظر به چند نوع اصلی تقسیم می‌شوند: مدل‌های شناختی (توصیفی)، مدل‌های

1. Pijanowski

2. Landsat

پیش‌بینی‌کننده، مدل‌های تصمیم‌گیری و مدل‌های
هنجاری.

از دیدگاه نظریه سیستم‌ها، شهر یک سیستم اجتماعی پویا و باز است که در آن سه سطح حرکت مکانیکی، زیستی و اجتماعی در هم آمیخته و با انواع فرا سیستم‌ها و زیرسیستم‌های متعدد در ارتباط است. از این نظر، شناخت کامل سیستم شهر و پیش‌بینی کل تحولات و تغییرات آن و برنامه‌ریزی دقیق و کامل برای تمام عناصر و اجزای آن تقریباً غیرممکن است. بنابراین، شناخت شهر و تحولات آن محدود به عرصه‌های زیر می‌شود:

شناخت و تحلیل عناصر اصلی

(ساختاری) شهر

شناخت و تحلیل ارتباطات اصلی شهر

با سیستم‌های مرتبط دیگر

تبدیل برنامه‌ریزی خطی به یک فرآیند

چرخه

رویکرد سیستمی ایجاب می‌کند که برنامه‌ریزی

شهری با تکیه بر عناصر و روابط ساختاری شهر

(درونی و بیرونی) مطالعات خود را سازمان دهد؛ اول

باید ارتباطات شهر با نواحی پیرامون آن مورد مطالعه

قرار گیرد. دوم، آثار متقابل میان عوامل فضایی،

اجتماعی و اقتصادی بررسی شود و سوم، فرآیند

برنامه‌ریزی به صورت چرخه‌ای (و نه خطی) و با

توجه به روابط میان گذشته، حال و آینده در نظر

گرفته شود.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲.۱. روش پژوهش

مدل‌ها ابزاری برای ترجمان پیچیدگی‌های فرآیندهای خارجی در بیان ساده می‌باشند. از این رو، از گذشته تا کنون، مدل‌های مختلفی توسط محققان گسترش یافته است تا از طریق به‌کارگیری این مدل‌ها بتوان پیچیدگی پویایی توسعه کالبدی شهر و روند توسعه کالبدی را شبیه‌سازی کرد. در این پژوهش از روشی استفاده شده است که بتواند با توجه به پیچیدگی‌های اطلاعاتی و ابهامات ناشی از تحولات کالبدی شهر، مدلی مناسب را برای تحلیل تحولات توسعه‌ای در گذشته و پیش‌بینی جهات و میزان تغییرات کاربری زمین فراهم آورد. در این پژوهش، یک روش دانش‌مبنا به کار برده شد که ضمن افزایش دقت در طبقه‌بندی تصاویر و استخراج مناسب عوارض ساخته شده، زمان عملیات طبقه‌بندی را نیز کاهش می‌دهد.

اتوماسیون سلولی: یک اتوماسیون سلولی شهری برای مدل‌سازی سیستم‌های شهری و منطقه‌ای طراحی شده است که دربرگیرنده شبیه‌سازی پروژه‌های شهری از قبیل شبیه‌سازی توسعه کالبدی شهری، شبیه‌سازی تغییرات کاربری زمین و غیره باشند. اصل عمومی اتوماسیون سلولی^۱ را به صورت جمله زیر می‌توان نوشت: «اگر چیزی در همسایگی یک سلول اتفاق افتد پس چیز دیگری، در دوره زمانی بعد، در سلول اتفاق خواهد افتاد» (زارعی و آل‌شیخ، ۱۳۹۱، ص. ۱۰). تغییر وضعیت سلول‌ها

اطراف سلول مرکزی تعریف می شود که این فاصله ناحیه ای را تعیین می کند که می تواند به عنوان ناحیه تأثیر بر سلول مرکزی تعریف شود (بردو، ۲۰۰۳، ص. ۱۴۷). بر اثر روابط متقابل سلول مورد آزمایش و همسایه آن و تحت تأثیر قوانین انتقال، سلول به وضعیت های مختلف تغییر پیدا می کند (رضازاده و میراحمدی، ۱۳۸۸، ص. ۴۹).

د) تأثیر همسایگی: این تأثیر در اتوماسیون سلولی حالتی را تعریف می کند که در آن سلول می تواند تغییر کند یا در حالت اصلی ثابت باشد. به طور کلی، سلول هایی که از این همسایگی دورتر هستند، تأثیر کمتری در سلول مرکزی ارزیابی شده دارند و همین طور هرچه این همسایگی نزدیک تر باشد، تأثیر بیشتری را خواهد گذاشت (بردو، ۲۰۰۳، ص. ۱۴۸).

ه) قوانین انتقال: قوانین انتقال به عنوان موتور اصلی تغییرات در مدل اتوماسیون سلولی رفتار سلول ها را طی فرآیند تکامل، در مراحل زمانی مختلف، مشخص و وضعیت آینده سلول را مشخص می کنند این قوانین، طرز عمل سیستم واقعی را منعکس می کنند. همچنین، سیستم ها را به عناصر ساده ای تجزیه می کنند که پویایی سیستم در اثر همین عناصر است. (چوپارد و لوزی و کولوز، ۱۹۹۶، ص. ۲۳۳۲؛ نگال و اسپرکنبورگ، ۱۹۹۲، ص. ۲۲۲۶؛ واحل و آنن و اسپچستر و نوبرت و اسپرکنبورگ، ۲۰۰۱، ص. ۳۰۶). در این پژوهش از دو روش رگرسیون بردار پشتیبان و منطق فازی برای قوانین

توسط قوانین زیر کنترل می شود: ۱- اگر سه سلول یا بیشتر در همسایگی توسعه یافته باشند، پس سلول مورد آزمایش توسعه خواهد یافت. ۲- اگر یک یا دو سلول توسعه یافته در همسایگی سلول مورد آزمایش، وجود داشته باشد و یک راه از این سلول گذشته باشد، پس سلول توسعه خواهد یافت. ۳- اگر از یک سلول، رودخانه ای بگذرد، پس هیچ توسعه ای بر آن سلول اتفاق نمی افتد (وایت و انگلن، ۲۰۰۰، ص. ۳۸۳). اتوماسیون سلولی متشکل از عناصر زیر است (بردو، ۲۰۰۳، ص. ۱۴۵):

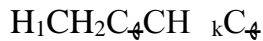
الف) شبکه سلولی^۱: شبکه در اتوماسیون سلولی شامل شبکه مستطیل شکلی از سلول های مربع شکل هستند که هر ناحیه اندازه مختص به خود را دارد (بردو، ۲۰۰۳، ص. ۱۴۷). در مدل سازی شهری معمولاً به علت طبیعت داده های ورودی و سهولت محاسبه و برنامه نویسی، سلول های همگن مورد استفاده قرار می گیرند؛ اما تحت شرایطی خاص استفاده از سلول های غیرهمگن به علت واقعی تر بودن شکل آن ها مانند قطعات زمین ممکن است مناسب تر باشند (رضازاده و میراحمدی، ۱۳۸۸، ص. ۴۸).

ب) وضعیت سلول^۲: حالتی است که هر سلول در فرآیند تکامل اتوماسیون سلولی می تواند داشته باشد. در مدل اتوماسیون سلولی هرچه تعداد وضعیت کمتر باشد، طبیعتاً آن مدل ساده تر خواهد بود (وایت و انگلن، ۲۰۰۰، ص. ۳۸۶).

ج) همسایگی سلول^۳: در اتوماسیون سلولی، فضای مجاور به عنوان ناحیه ای دایره ای شکل در

4. Chopard, Luthi, Quelo
5. Nagel, Schreckenburg
6. Wahle, Annen, Schuster, Neubert, Schreckenburg

1. Cell status
2. Cell network
3. Cell Neighborhood



به طوری که عنصر H_k از ساختاری با نامساوی

زیر تعریف می‌شود:

$$\|w\|^2 (w, w) C_k$$

و برای یافتن مدلی با پیچیدگی بهینه، $\|w\|^2$ را

مینیمم می‌کند.

حالت خطی: فرض بر این است که داده‌ای

آموزشی $S = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$

داده شده است که n تعداد نمونه‌ای آموزشی

و R^d نشان‌دهنده فضای ورودی است. در رگرسیون

بردار پشتیبان هدف ما یافتن یک تابع $f(x)$ است که

برای همه نمونه‌های آموزشی حداکثر به میزان از

مقادیر هدف واقعی y_i ، انحراف دارد و تا حد ممکن

هموار باشد. تابع رگرسیون خطی در فضای ورودی

به صورت زیر برآورد می‌شود:

$$f(x) = (w, x) + b \quad x, w \in R, b \in R \quad (1)$$

همواربودن (۱) به معنای این است که مدلی با

کمترین پیچیدگی مطلوب است. با توجه به آنچه در

بخش قبل اشاره شد، این کار با مینیمم کردن $\|w\|^2$

انجام می‌شود. بنابراین مسأله اصلی را می‌توان به

صورت زیر نوشت (اسمولا و اسچولکوف، ۲۰۰۴،

ص. ۲۰۰)

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad (2)$$

$$s.t. y_i - (w, x_i) - b \leq \epsilon, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$(w, x_i) - b - y_i \leq \epsilon, i = 1, 2, \dots, n$$

بعضی مواقع این حالت ممکن است اتفاق نیفتد؛

یعنی رابطه (۳) برای تمام نمونه‌های آموزشی برقرار

نباشد. برای برخورد با قیود غیرممکن مسأله

انتقال مورد استفاده قرار گرفته است که خطای

داده‌های غیرخطی را به حداقل ممکن می‌رساند.

رگرسیون‌های بردار پشتیبان: در برخورد با

روابط غیرخطی پیچیده، مطلوب است. در

رگرسیون‌های بردار پشتیبان برای به‌حداقل رساندن

خطر ساختاری و حداکثر حاشیه که در آن یک

ابرفهجه طبقه‌بندی شده بهینه ساخته شده است

(یانگ و لی و شی، ۲۰۰۸، ص. ۵۹۲).

رگرسیون‌های بردار پشتیبان به عنوان روشی برای

ساخت قوانین انتقال غیرخطی اتوماسیون سلولی،

می‌تواند پروژه‌های شبیه‌سازی را انجام دهد و در هر

تکرار از شبیه‌سازی در بازه‌های زمانی مختلف

احتمال توسعه سلول‌های غیرشهری و تغییرات

کاربری زمین برآورد می‌شود (مادسکاوا-باگدانووا و

نیکولیک و کورفس، ۲۰۰۴، ص. ۳۰۱).

به طور کلی، رگرسیون بردار پشتیبان برای برآورد

تاریخ رگرسیونی به صورت زیر عمل می‌کند:

تابع رگرسیونی را در مجموعه‌ای از توابع خطی

به صورت $f(X) = (w, X) + b$ برآورد

می‌کند.

مخاطره تجربی را نسبت به تابع زبان

Einsensitive مینیمم می‌کند.

اصل کمینه‌سازی مخاطره ساختاری را برای

کمینه‌کردن مخاطره واقعی اجرا می‌کند؛ به این

صورت که ساختاری روی مجموعه توابع خطی

(تعریف شده به وسیله نرم ضرایب توابع خطی) به

صورت زیر در نظر می‌گیرد:

1. Yang, li, shi

2. Madevska-Bogdanova, Nikolik, Curfs

3. smola, Scholkopf

با محاسبه ضرایب لاگرانژ از رابطه (۹) و با استفاده از رابطه (۷) می توان $f(x)$ را به صورت زیر نوشت:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n w_i x_i - \sum_{i=1}^n b_i (x_i - x_i^*) \quad (11)$$

حالت غیرخطی: در روش رگرسیون بردار پشتیبان در حالتی که نتوان یک تابع رگرسیون خطی در فضای ورودی به داده ها برازش داد (صادقی فر و زهره وند، ۱۳۸۹، ص. ۴). از یک نگاهت غیرخطی برای تبدیل داده ها به یک فضای با بعد بالاتر استفاده می کنیم. با جایگزینی تابع هسته به جای ضرب نقطه ای (x_i, x_j) در فضای جدی با بعد بالا، تابع رگرسیون خطی در این فضای جدید به صورت زیر نوشته می شود:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n s_i (x) - \sum_{i=1}^n b_i (x_i - x_i^*) \quad (x_i, x_j) = b$$

همچنین، رگرسیون بردار پشتیبان با به کار بردن نگاهت داده ها به یک فضای بالاتر، قادر به برآورد توابع غیرخطی پیچیده نیز می باشد (واپنیک، ۱۹۹۸، ص. ۳۵۱). متغیرهای مکانی فضایی مورد استفاده از در شبیه سازی از پایگاه اطلاعات جغرافیایی استخراج می شود و متغیرهای تغییر کاربری از تصاویر ماهواره ای به دست خواهد آمد. پس از مشخص شدن وضعیت یک سلول در دوره زمانی بعد، سلول ها یک به یک با هم مقایسه می شوند. فرآیند انجام این روش از دو مرحله اصلی رده بندی و شبیه سازی تشکیل شده است. در مرحله اول رده بندی کننده های خطی با استفاده از رگرسیون بردار پشتیبان منجر به تصمیم گیری می شود و در مرحله شبیه سازی با توجه

بهینه سازی فوق، متغیرهای کمکی i^* ، i تعریف می شود؛ به طوری که در قیود زیر صدق کنند:

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 - C \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) \quad (4)$$

$$s.t. \quad y_i - (w \cdot x_i) - b_i = 0 \quad (5)$$

$$(w, x_i) - b_i - y_i = 0 \quad (6)$$

$$x_i^* = 0, i = 1, 2, \dots, n$$

می توان نشان داد که این تابع یک نقطه زینی نسبت به متغیرهای اصلی و دوگان دارد. از شرط نقطه زینی نتیجه می شود که برای بهینه سازی، مشتقات جزئی L نسبت به متغیرهای اصلی (w, b, x_i, x_i^*) باید صفر شوند.

$$\frac{\partial L}{\partial b_i} = \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial w} = \sum_{i=1}^n w - \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) x_i = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_i^*} = C - \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) = 0 \quad (8)$$

با قرارداد (۶)، (۷) و (۸) در تابع لاگرانژ (w, b, x_i, x_i^*) حاصل می شود:

$$L(w, b, x_i, x_i^*) = \frac{1}{2} (w, w) - \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) (w, x_i) - \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) b_i - \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) C + \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) y_i - \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) (w, w) - \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) y_i (x_i - x_i^*)$$

بنابراین مسأله بهینه سازی دوگان زیر به دست می آید:

$$\max \quad \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_i - x_i^*) (x_j - x_j^*) \alpha_{ij} \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) - \sum_{i=1}^n y_i (x_i - x_i^*) = 0 \quad (10)$$

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) = 0$$

$$x_i, x_i^* \in [0, C]$$

از مدل اتوماسیون سلولی برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری در شهر همدان استفاده شده و اطلاعات پیرامون کاربری زمین که از طریق تصاویر ماهواره‌ای گرفته شده‌اند، به دست آمده‌اند. محدوده طبقه‌بندی که تعیین می‌کند آیا یک سلول غیرشهری به یک سلول شهری تبدیل می‌شود یا خیر، می‌تواند بسیار پیچیده باشد و معادلات خطی در این زمینه ناکافی و ناقص هستند. همچنین، برخی متغیرها را می‌توان برای نشان‌دادن محدودیت‌ها نسبت به توسعه سلول‌های غیرشهری به کار گرفت. برای شبیه‌سازی شهر همدان با استفاده از مدل اتوماسیون سلولی، ۴ مرحله کلی تعریف شده است که به طور خلاصه در شکل (۱) تدوین شده است:

به متغیرهای مختلف احتمال تغییرات کاربری زمین نهایی شهر پیش‌بینی خواهد شد (یانگ و لی و شی، ۲۰۰۸، ص. ۵۹۲).

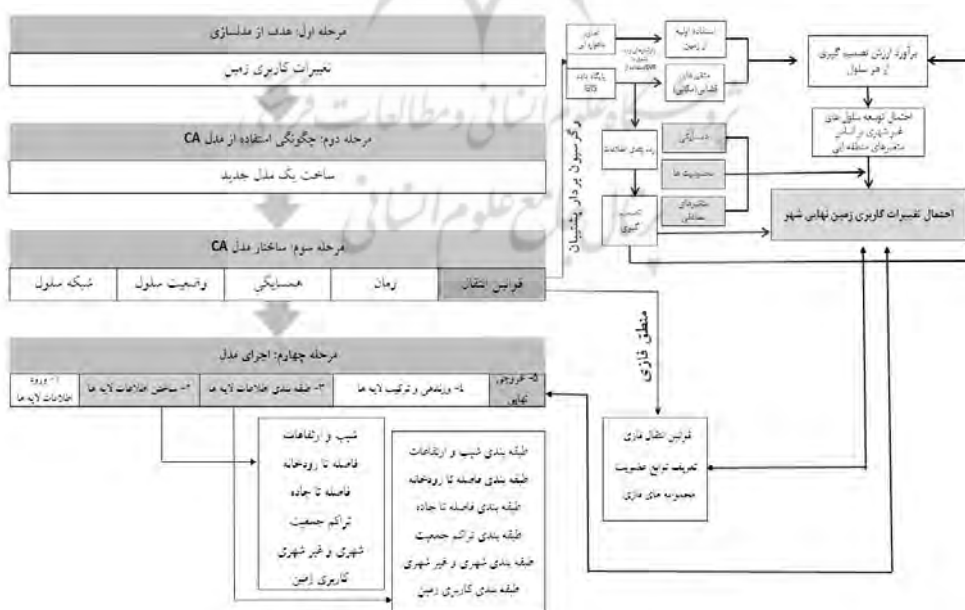
سلول‌های خودکار فازی: منطق فازی از جمله منطق‌های چندارزشی بوده و بر نظریه مجموعه‌های فازی تکیه می‌کند (ذبیحی، ۱۳۹۰، ص. ۲۲). در این دسته از مدل‌ها، برخلاف مدل‌هایی که از معادلات ریاضی برای تعریف قوانین انتقال استفاده می‌شود، قوانین انتقال براساس مجموعه‌های فازی تعریف می‌شود و می‌توان از تئوری فازی به منظور تعریف قوانین انتقال در شبکه‌های خودکار استفاده کرد (هی و ژانگ، ۲۰۱۶، ص. ۳۲۲).

هر کدام از متغیرها را به صورت مجموعه‌های فازی با ۵ مقدار خیلی بد، بد، رضایت‌بخش، خوب و خیلی خوب و با توابع عضویتی دوزنقه‌ای در نظر گرفته می‌شوند. دلیل استفاده از توابع مثلثی و دوزنقه‌ای علاوه بر سادگی محاسبات، به تصویرکشیدن و انتقال مفاهیم و روش‌شناسی منطق فازی نسبت به انواع دیگر است (بارت، ۱۳۸۰، ص. ۴۲). مقادیر نرمال‌شده در محور افقی (ورودی‌های مرحله سوم)، خروجی‌های نافازی‌شده و نرمال‌شده مرحله دوم است که با ترکیب هر کدام از دو گروه مؤلفه‌های ثانویه، مؤلفه‌های اولیه استخراج می‌شوند. سپس برای هر کدام از مؤلفه‌های ثانویه توابع عضویتی مثلثی شکل و به صورت مجموعه‌های فازی دیگری با ۵ ارزش خیلی پایین، پایین و متوسط و بالا و خیلی بالا تعریف می‌شود.

جدول ۱. قوانین انتقال فازی

| قانون | رابطه | قانون | رابطه |
|-----------------------|--|--|--|
| قوانین استلزام | $X \text{ is } A$ $A \text{ } B$ ----- $X \text{ is } B$ | قانون ترکیب | $X, Y \text{ is } R$ $Y \text{ is } B$ ----- $X \text{ is } B \circ R$ |
| قانون عطف | $X \text{ is } A$ and $X \text{ is } B$ ----- $X \text{ is } A \cap B$ | قانون نفی | $\text{not } X \text{ is } A$ ----- $X \text{ is } A$ |
| قانون فصل | $X \text{ is } A$ or $X \text{ is } B$ ----- $X \text{ is } A \cup B$ | قانون گسترش | $f A \quad \frac{1}{f u_1}, \frac{2}{f u_2}, \dots, \frac{n}{f u_n} \quad \frac{X \text{ is } A}{f X \text{ is } f A}$ |
| قانون حاصل ضرب دکارتی | $X \text{ is } A$ $Y \text{ is } B$ ----- $X, Y \text{ is } A \times B$ | قانون قیاس استثنایی تعمیم یافته | $Y \text{ is } B \text{ Then } X \text{ is } A$ $X \text{ is } A$ ----- $Y \text{ is } B$ |
| قانون تصویر | $X, Y \text{ is } R$ ----- $X \text{ is } R_x$ | استنتاج فازی به وسیله قانون ترکیبی استنتاج | $Y \text{ is } B \text{ Then } X \text{ is } A$ $X \text{ is } A$ ----- $Y \text{ is } B, B \text{ AOR } A \text{ O}(A \text{ } B)$ |

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴



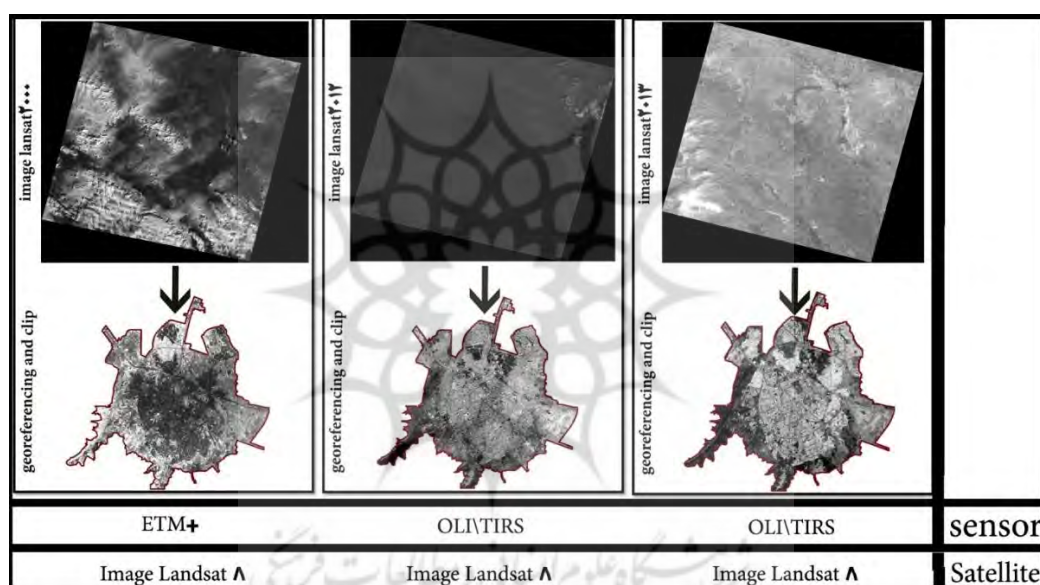
شکل ۱. مراحل انجام پژوهش

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

۲.۲. متغیرها و شاخص‌های پژوهش

براساس عوامل دخیل در توسعه کالبدی شهر در منطقه مورد مطالعه ورودی‌های مدل براساس ارتفاع، شیب، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، تراکم جمعیت، کاربری اراضی زمین انتخاب شد. همچنین، نوع تفکیک کاربری‌های شهری و غیرشهری به نحوی صورت پذیرفته است که کاربری‌هایی که به نوعی با شهر سازگار هستند، به عنوان کاربری‌های

شهری مد نظر قرار گرفته‌اند؛ به عنوان مثال، کاربری‌های مسکونی، تجاری، آموزشی، فرهنگی، مذهبی، ورزشی، خدماتی و غیره به عنوان کاربری‌های شهری هستند و زمین‌های بایر، کشاورزی، صنایع سنگین و زمین‌های موات و از این قبیل جزء کاربری‌های غیرشهری قرار گرفته‌اند.



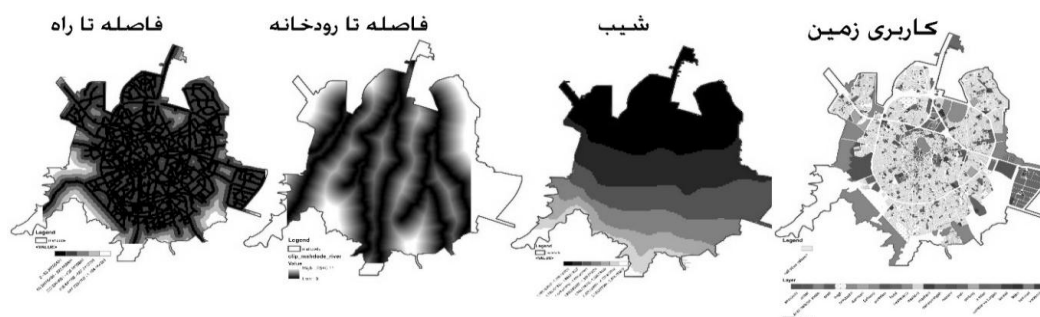
شکل ۲. داده‌های عکس ماهواره‌ای

مأخذ: ماهواره لندست، ۲۰۱۳

طبقه‌بندی، لایه‌های اطلاعاتی که در تغییرات کاربری زمین تأثیر مثبت می‌گذارند، در ارزش‌گذاری هر چه فاصله کوتاه‌تر باشد از ارزش بالاتری برخوردار خواهد بود؛ به عبارت دیگر، در هر یک از لایه‌های اطلاعاتی موضوعی مختلف، ارزش‌های بالاتر به مشخصه‌های مکان‌هایی داده می‌شوند که برای هدف شیبه‌سازی، مناسب‌تر ارزش‌یابی شده‌اند. پس از مشخص شدن

تولید لایه‌های اطلاعاتی: در این مرحله پس از تبدیل کردن نقشه‌ها به رستر تمامی نقشه‌ها به یک مقیاس یکسان و مشترک تبدیل شدند. این مقیاس نشان می‌دهد که هر سلول چه قدر برای ساخت شهر مناسب است. در این مرحله شبکه سلول‌ها، وضعیت سلول‌ها، اندازه سلول‌ها مشخص می‌شود. سپس لایه‌های اطلاعاتی رودخانه، جاده، شیب و ارتفاعات، کاربری زمین در شکل (۳) طبقه‌بندی شدند. در این

وضعیت یک سلول در دوره زمانی بعد، سلول‌ها یک به یک با هم مقایسه می‌شوند.



شکل ۳. تولید لایه‌های اطلاعاتی

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

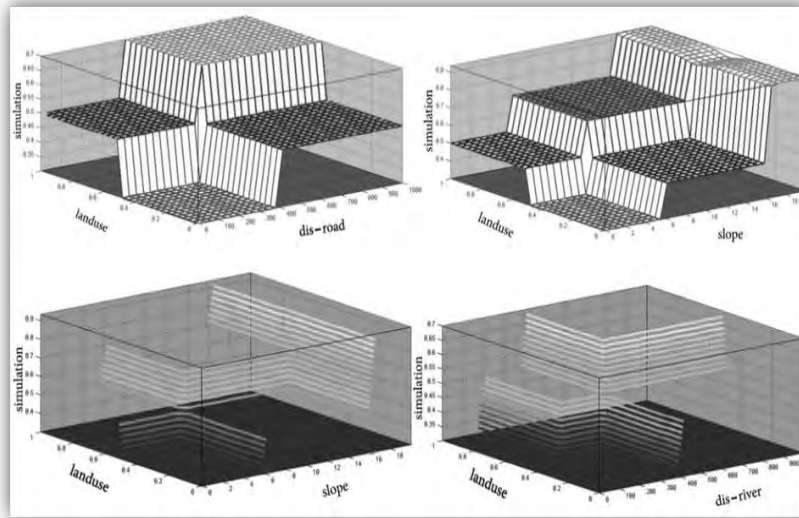
هستند که شیب مناسبی را برای تغییر کاربری دارا می‌باشند، هرچه فاصله از رودخانه و جاده بیشتر باشد، ارزش بیشتر برای تغییر کاربری وجود دارد. برای این منظور از روش فازی در نرم‌افزار متلب استفاده شد. برای این منظور ۲۵۰ نقش برای معیارهای ارتفاعات، شیب، کاربری، روزخانه، راه، تراکم جمعیت و شبیه‌سازی در شهر همدان در شکل (۴) تعریف شد. نحوه عملکرد یک تابع انتقال چندجمله‌ای به گونه‌ای است که مکان‌های مشخص شده ورودی را به موقعیت محل‌های مشخص شده و مورد نظر به عنوان خروجی منتقل می‌کند. نرم‌افزار تابع انتقال را به گونه‌ای محاسبه کرد که میزان اختلاف مکانی مابین مختصات مکانی که به عنوان خروجی مشخص شده است با مختصاتی که طبق رابطه چندجمله‌ای درجه N که برای مختصات خروجی نقاط کنترل محاسبه شده است، دارای یک پردازش حداقل مربعات باشد.

۳.۲. قلمرو جغرافیایی پژوهش

همدان یکی از کلان شهرهای ایران در منطقه غربی و کوهستانی ایران و مرکز شهرستان و استان همدان است. این شهر در دامنه کوه الوند و در بلندای ۱,۷۴۱ متری از سطح دریا واقع شده است و از شهرهای سردسیر ایران به شمار می‌آید. شهر همدان، از شمال به شهرستان‌های رزن و کبودراهنگ، از جنوب به تویسرکان و ملایر، از شرق به استان مرکزی و از غرب به شهرستان بهار محدود می‌شود.

۳. یافته‌های پژوهش

شهر همدان به عنوان شهری که توسعه شهری بالایی در نیم قرن اخیر تجربه کرده است، اطلاعاتی پیرامون کاربرد زمین که از طریق تصاویر ماهواره‌ای دریافت شده‌اند، به دست آمده‌اند؛ اطلاعاتی رستری خروجی در این مرحله نشان می‌دهد که برای شبیه‌سازی، هر محل تا چه اندازه برای تغییرات کاربری زمین شهر همدان مناسب است. در واقع، در مدل شبیه‌سازی شده مکان‌های مناسب، محل‌هایی

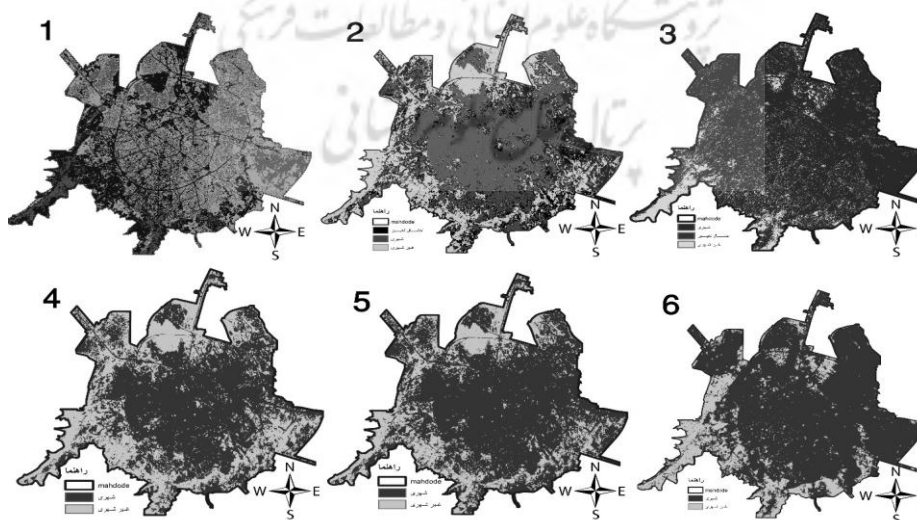


شکل ۴. تعریف ۲۵۰ نقش و فازی کردن لایه‌های اطلاعاتی

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

سلول‌ها برآورد شد؛ به عبارت دیگر، با استفاده از این روش مشخص شد آیا یک سلول غیرشهری می‌تواند به یک سلول شهری تبدیل شود یا خیر و پس از مشخص کردن طبقه‌بندی لایه شهری و غیرشهری در شکل (۵) شبیه‌سازی شهر همدان در سال ۲۰۴۰ استخراج شد.

پس از وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی در محیط سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، شبیه‌سازی تغییر کاربری زمین شهر همدان طی سه مرحله زیر انجام پذیرفت. ابتدا شبیه‌سازی تغییرات کاربری شهر همدان مورد آزمایش قرار گرفت. در هر تکرار از شبیه‌سازی در بازه‌های زمانی مختلف احتمال توسعه



شکل ۵. شبیه‌سازی تغییرات کاربری

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

جمعیت شهر و در نتیجه، مساحت شهری همدان رو به افزایش است. در شکل (۶) این افزایش در دوره‌های قبل محاسبه شده و با مساحت پیش‌بینی شده هم مقایسه شده است. شایان ذکر است بعد زمانی توسعه، شباهت بسیار زیادی به بعد مکانی آن دارد. نتایج در این پژوهش در شهر همدان نشان می‌دهد اگر در یک بازه زمانی خاص، محدوده ای از وضعیت غیرشهری به وضعیت ساخته شده تبدیل شود، این گسترش در طول این زمان به یک فرآیند دائمی تبدیل می‌شود و در این فاصله زمانی، محدوده موردنظر می‌تواند تا حدودی به شکل نسبی توسعه یابد.

پس از تعریف ۲۵۰ نقش و فازسازی لایه‌های اطلاعاتی در نرم‌افزار متلب، این قوانین انتقال به جهت راستی آزمایی نتایج در دوره‌های زمانی قبل مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن نیز حکایت از آن داشت که مجموعه‌های فازسازی در بررسی شاخص‌ها به طور هم‌زمان در دوره‌های زمانی مختلف و همچنین، در به‌روزکردن لایه‌های اطلاعاتی، در شبیه‌سازی‌های شهری نقشی بسیار کارآ و مثبتی را ایفا می‌کنند. این شبیه‌سازی در این جا برای شهر همدان مورد استفاده قرار گرفته است. شهر همدان به دلیل موقعیت قرارگیری عوامل و محدودیت‌های توسعه بسیاری را داراست، با این وجود همچنان



شکل ۶. شبیه‌سازی تغییرات کاربری در سال ۲۰۴۰

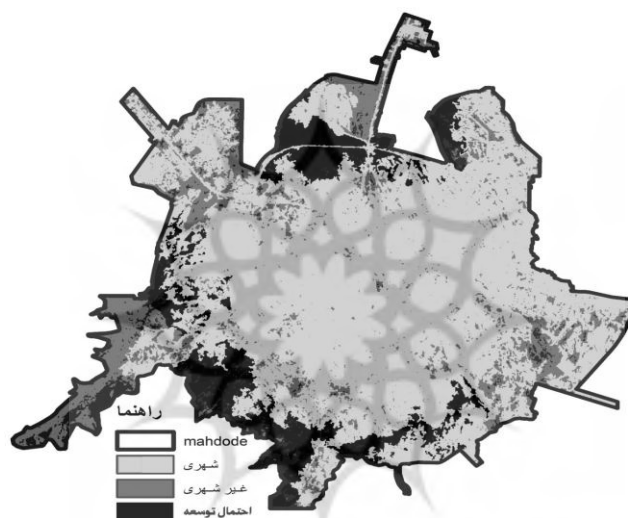
مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

خروجی‌های شبیه‌سازی به صورت نقشه‌های رستری و همچنین، محاسبه میزان توسعه کالبدی شهر در سال ۲۰۴۰ با استفاده از روش‌های آماری، مشخص شد اگر تغییرات کاربری زمین با این روند ادامه پیدا

پژوهش حاضر مساحت، میزان و چگونگی کاربری اراضی شهر را تا سال ۲۰۴۰ نشان می‌دهد و ایجاد و سپس جهات توسعه کالبدی شهر همدان برای سال‌های آتی شبیه‌سازی و پیش‌بینی شده است.

استخراج شد و با توجه به مطالعات جمعیتی انجام‌شده و همچنین، معیارها و لایه‌های تعریف‌شده، عملیات شبیه‌سازی در بازه‌های زمانی مختلف برای شبیه‌سازی تغییر کاربری زمین شهر همدان انجام گرفت و طبق نقشه زیر تغییر کاربری شهر همدان را در سال ۲۰۴۰ شبیه‌سازی شد؛ به عبارت دیگر، سلول‌های غیرشهری احتمالاً در سال ۲۰۴۰ در مناطق مشخص شده، به سلول شهری تبدیل خواهند شد

کند، هم‌چنان مساحت اراضی ساخته‌شده تا سال ۲۰۴۰ افزایش یافته و احتمالاً مساحت این پهنه به حدود ۶۳۵۰ هکتار برسد و رفته‌رفته مساحت اراضی باغستان و درختزار نیز کمتر شود. طبق محاسبات صورت‌گرفته توسعه کالبدی شهر همدان طی سی سال گذشته، بیش از ۲/۵ برابر شده است. پس از مشخص کردن طبقه بندی لایه شهری و غیرشهری شبیه‌سازی کاربری زمین شهر همدان در سال ۲۰۴۰



شکل ۷. شبیه‌سازی تغییر کاربری شهر همدان در سال ۲۰۴۰

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در شبیه‌سازی احتمال تغییر کاربری شهر، بسیاری عوامل دخیل هستند؛ مانند متغیرهای منطقه‌ای تأثیرگذار در توسعه سلول‌های شهر، همسایگی و مدت زمانی که یک سلول صرف می‌کند تا تغییر کند و به وضعیت دیگری منتقل شود و غیره. این مدل برای شبیه‌سازی تغییر کاربری زمین در شهر همدان به کار گرفته شد و مدل تغییر کاربری زمین در سال ۲۰۴۰ را شبیه‌سازی می‌کند و نتایج معتبر نشان‌دهنده

مطابقت خوب بین الگوهای واقعی و شبیه‌سازی شده می‌باشند. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل اتوماسیون سلولی براساس قوانین انتقال رگرسیون بردار پشتیبان یک ابزار مفید برای شبیه‌سازی سیستم‌های شهری است. با توجه به محاسبات صورت‌گرفته شهر همدان روند توسعه نسبتاً زیادی را طی ۵۰ سال گذشته تجربه کرده است؛ به طوری که در سال ۱۹۵۷ شهر همدان مساحتی حدود ۴۹۷ هکتار داشته است و طی ۳۰ سال؛ یعنی در سال

اندازه بر تولید استانداردهای برنامه‌ریزی و غیره اشاره کرد. این نتایج به طراحان، برنامه‌ریزان و مدیران شهری و سایر پژوهش‌گران کمک می‌کند تا بتوانند پیش‌بینی از وضعیت محدوده شهرها و دیگر تغییرات کاربری اراضی در آینده داشته باشند.

در پایان نیز به منظور بهبود نحوه ارزیابی تغییرات کاربری‌ها و ارائه نتایج واقعی‌تر و مطلوب‌تر در شبیه‌سازی تغییرات کاربری راهکارهای ذیل پیشنهاد می‌شود:

تغییرات کالبدی نتیجه اثرات کالبدی و تأثیرات انسانی می‌باشد. برای بالارفتن هر درصد موفقیت این رویکرد و واقعی‌تر شدن این پیش‌بینی، تأثیرات انسانی باید دائماً کنترل و به‌روزرسانی شود.

برای افزایش دقت مدل و واقعی‌تر شدن نتایج، می‌توان شعاع‌های همسایگی متفاوتی را متناسب با منطقه مورد مطالعه، تعیین کرد و برای هر کاربری، شعاع همسایگی را به گونه‌ای انتخاب کرد که منطبق بر مقیاس مکانی باشد. شعاع همسایگی در این پژوهش، ۶۰۰ متر لحاظ شده است.

در این تحقیق به مدل‌سازی تغییرات انواع کاربری داخل شهر پرداخته شده است، به منظور ارائه نتایج واقعی‌تر پیشنهاد می‌شود فاکتورهای قیمت زمین، عوامل دسترسی، تناسب کالبدی و مدل‌سازی ارتفاعی داخل شهر نیز پرداخته شود.

۱۹۸۷ این رقم بیش از ۴ برابر شده است. مساحت موجود شهر همدان ۵۵۹۶ هکتار می‌باشد و با پیش‌بینی انجام‌شده در سال ۲۰۴۰ احتمالاً به بیش از ۶۳۵۰ هکتار نیز خواهد رسید.

نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل ۸۸ درصد دقت مدل را نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل (۷) نشان می‌دهد، تغییرات کاربری شهر همدان در قسمت شمالی و جنوبی محدوده شهر همدان قابل توجه خواهد بود. تغییرات کاربری زمین در همدان در این پژوهش نشان‌گر این است که با ادامه روند تحولات گذشته در دهه‌های آتی، محدوده شهر همدان به محیطی عمدتاً مصنوع و ساخته‌شده تبدیل خواهد شد؛ به طوری که تغییرات با شدت بیشتری اتفاق خواهد افتاد. بنابراین، شهر همدان که در افق پیش‌بینی، با کمبودهای شدید فضاهای سبز و اراضی کشاورزی مواجه خواهد شد که این تحولات، علاوه بر تخریب منابع زیست‌محیطی، تغییرات شدید اکولوژیکی را نیز به بار خواهد آورد. این رویکرد براساس استفاده از مدل‌سازی در قالب نگاه سیستماتیک است و از نقاط قوت رویکرد سیستمی برنامه‌ریزی می‌توان به دارابودن دورنمای کالبدی، انعطاف‌پذیربودن برنامه، انجام آینده‌نگری‌های واقعی، عدم دخالت غیربرنامه‌ریزان در فرآیند تهیه برنامه، توجه لازم به مشکلات شهری و عدم تأکید بیش از

کتاب‌نامه

۱. حبیب، ف. و شکوهی، ع. (۱۳۹۱). شناخت و تحلیل مسائل شهری با استفاده از سیستم‌های فازی. هویت شهر، ۶ (۱۰)، ۲۶-۱۷.
۲. ذبیحی، ح. (۱۳۹۰). کنکاشی در نظریه‌ها، تئوری‌ها و اقدامات شهرسازی و معرفی برنامه‌ریزی فازی شهری. تهران: جهاد دانشگاهی (دانشگاه تربیت معلم).

۳. رضازاده، ر. و میراحمدی، م. (۱۳۸۸). مدل اتوماسیون سلولی، روشی نوین در شبیه‌سازی توسعه کالبدی شهری، فن‌آوری آموزش، ۴ (۱)، ۴۷-۵۵.
۴. زارعی، ر. و آل‌شیخ، ع. (۱۳۹۱). مدل‌سازی توسعه شهری با استفاده از اتوماسیون سلولی و الگوریتم ژنتیک (منطقه مورد مطالعه: شهر شیراز). پژوهش و برنامه‌ریزی شهری، ۳ (۱۱)، ۱-۱۶.
۵. قهرمانی، م. (۱۳۹۱). توسعه گردش‌گری پایدار روستایی و جایگاه بافت‌های باارزش روستا (مطالعه موردی روستای سیمین شهر همدان). فضای گردش‌گری، ۱ (۲)، ۸۰-۶۵.
۶. کاسکو، ب. (۱۳۸۰). تفکر فازی. (علی غفاری، عادل مقصودپور ممتاز و جمشید قمیسی، مترجمان). تهران: انتشارات دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.
۷. کامیاب، ح. (۱۳۹۰). کاربرد شبکه عصبی در مدل‌سازی توسعه شهری. پژوهش‌های جغرافیای انسانی، (۷۶)، ۹۹-۱۱۳.
۸. ماجدی، ح. و پورجوهری، ا. (۱۳۹۲). ارزیابی تعریف حدود رشد شهر در طرح‌های توسعه شهری ایران (از طریق پایش ۱۱ گونه شهری). هویت شهر، ۷ (۱۵)، ۳۶-۲۵.
۹. نوابخش، م.، نادری، ن. و مهدوی، م. ص. (۱۳۹۴). ارزیابی سهم عوامل توسعه کالبدی-فضایی و جمعیتی در بودجه مناطق شهری اصفهان. مطالعات جامعه‌شناختی شهری (مطالعات شهری)، ۵ (۱۵)، ۲۶-۱.
10. Ahmadlou, A., Delavar, M. R., Tayyebi, A., & Shafizadeh Moghadam, H. (2015). Using multivariate adaptive regression spline and artificial neural network to simulate urbanization in Mumbai, India. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 31-36.
11. Ana, M., Nikolik, D., & Curfs, L. (2004). Probabilistic SVM outputs for pattern recognition using analytical geometry. *Neurocomputing*, 62, 293° 303.
12. Barredo, J. I., Kasanko, M., McCormick, N., & Lavallo, C. (2003). Modelling dynamic spatial processes: Simulation of urban future scenarios through cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 64, 145° 160.
13. Candau, J. T. (2002). *Temporal calibration sensitivity of the SLEUTH urban growth model* (Unpublished master s thesis). University of California, Santa Barbara.
14. Cheng, J. (2003). *Modelling spatial and temporal urban growth* (Unpublished doctoral dissertation). International institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC), The Netherlands.
15. Chopard, B., Luthi, P. O., & Quelo, P. A. (1996). Cellular automata model of car traffic in a two-dimensional street network. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 29(10), 2325° 2336.
16. He, L., & Zhang, X. (2016). Fuzzy reliability analysis using cellular automata for network systems. *Information Sciences*, 348, 322° 336.
17. Junfeng, J. (2003). *Transition rule elicitation for urban cellular automata models (Case study: Wuhan-China)* (Unpublished master s thesis). International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC), The Netherlands.
18. Lou, J. (2006). *Modeling urban growth and spatial structure in Nanjing, China with GIS and remote sensing*. Milwaukee: The University of Wisconsin.
19. Madevska-Bogdanova, A., Nikolik, D., & Curfs, L. (2004). Probabilistic SVM outputs for pattern recognition using analytical geometry. *Neurocomputing*, 62, 293° 303.

20. Nagel, K., & Schreckenburg, M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique*, 2, 2221-2229.
21. Pijanowski, B., Tayyebi, A., Doucette, J., Pekin, B., Braun, D., & Plourde, J. (2014). A big data urban growth simulation at a national scale: Configuring the GIS and neural network based land transformation model to run in a high performance computing (HPC) environment. *Environmental Modelling and Software*, 51, 250-268.
22. Smola, A., & Scholkopf, B., (2004). A tutorial on support vector regression. *Statistics and Computing*, 14, 199-222.
23. Tayyebi, A., & DarrelJenerette, G. (2016). Increases in the climate change adaption effectiveness and availability of vegetation across a coastal to desert climate gradient in metropolitan Los Angeles, CA, USA. *Science of the Total Environment*, 548-549, 60° 71.
24. Tayyebi, A., Tayyebi, A. M., & Khanna, N. (2013). Assessing uncertainty dimensions in land-use change models: Using swap and multiplicative error models for injecting attribute and positional errors in spatial data. *International Journal of Remote Sensing*, 35(1), 149-170
25. Torrens, P. M., & O'Sullivan, D. (2002). Cellular automata and urban simulation: Where do we go from here? *Environment and Planning B-Planning and Design*, 28(2), 163-168.
26. Vapnik, V. (1998). *Statistical learning theory*. New York, USA: Wiley.
27. Wahle, J., Annen, O., Schuster, C., Neubert, L., & Schreckenburg, M. (2001). A dynamic route guidance system based on real traffic data. *European Journal of Operational Research*, 131(2), 302-308.
28. White, R., & Engelen, G. (1997). Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. *Environment and Planning B-Planning and Design*, 24(2), 235-246.
29. White, R., & Engelen, G. (2000). High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24(5), 383° 400.
30. Wu, F. (1996). Changes in the structure of public housing provision in urban China. *Urban Studies*, 33(9), 1601-1627.
31. Wu, F., & Webster, C. (1998). Simulation of natural land use zoning under free-market and incremental development control regimes. *Computers, Environment and Urban Systems*, 22(3), 241° 256.
32. Yang, Q., li, X., & Shi, X. (2008). Cellular automata for simulating land use changes based on support vector machines. *Computers and Geosciences*, 34(6), 592° 602.
33. Zhi, D. (1996). *GIS-based spatial analysis, modeling and simulation a case study on the changing spatial structure of Hong Kong*. Columbia: University of South Carolina.