

واسنجی مدل اتوماسیون سلولی فازی رشد شهری با استفاده از الگوریتم ژنتیک

وحید زالی^۱، علی اصغر آل شیخ^۲، فرهاد حسینعلی^{۳*}

^۱ کارشناس ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین

طوسی

vahidzali92@yahoo.com

^۲ استاد دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

alesheikh@kntu.ac.ir

^۳ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

f.hosseinali@sru.ac.ir

(تاریخ دریافت بهمن ۱۳۹۶، تاریخ تصویب بهمن ۱۳۹۶)

چکیده

توسعه سناریوهای برنامه‌ریزی رشد شهری با توجه به پیامدهای آتی که برای کاربری اراضی و پیشرفت برنامه‌های مکانی و سیاست‌ها دارد، برای برنامه ریزان شهری و منطقه‌ای بسیار مهم می‌باشد؛ اما پدیده توسعه شهری به‌عنوان یک فرآیند پیوسته در حیطه مکان و زمان، تحت تأثیر رفتارهای تصمیم‌گیری انسانی است و در معرض ابهام و عدم قطعیت مکانی قرار دارد. بدین سبب در این پژوهش با پیاده‌سازی منطق فازی، چهارچوبی برای مدل‌سازی ماهیت مبهم پدیده توسعه شهری ارائه شده است. سپس جهت تعیین پارامترهای توابع عضویت فازی و وزن قوانین فازی مستقل از نظر کارشناس باشد، از الگوریتم ژنتیک جهت تنظیم این مقادیر و بهبود عملکرد منطق فازی استفاده گردیده است.

در این تحقیق با به‌کارگیری سه معیار ارزش زمین، دسترسی و جذابیت که نماد سه رکن توسعه پایدار هستند، یک مدل اتوماسیون سلولی فازی برای شبیه‌سازی گسترش کاربری اراضی شهری منطقه قزوین توسعه داده شد. سپس با تنظیم پارامترهای مدل در دوره زمانی ۱۳۸۴-۱۳۸۹، حداکثر میزان انطباق با توسعه‌های حادث شده در سال ۱۳۸۹ به دست آمد. در حقیقت این مدل با دقتی برابر با ۹۴/۳۱٪ بر مبنای شاخص کاپا و ۵۵/۲۸٪ بر مبنای شاخص سازگاری تنظیم شد که در مقایسه با مدل عامل مبنای ارائه شده با معیارهایی مشابه در این منطقه، دارای نتایج به مراتب مطلوب‌تری می‌باشد. از این رو با به‌کارگیری این مدل بهینه، توسعه شهری سال ۱۳۹۴ شبیه‌سازی شد که به مقدار شاخص کاپا ۸۸/۷۳٪ و مقدار شاخص سازگاری ۳۹/۰۵٪ در پیش‌بینی مناطق توسعه‌یافته دست‌یافت. این نتایج نشانگر کارایی بالای مدل مذکور در حوزه مدل‌سازی توسعه شهری و تغییرات کاربری اراضی می‌باشد و بر توانایی مدل اتوماسیون سلولی، منطق فازی و همچنین الگوریتم ژنتیک در شبیه‌سازی فرآیندهای جغرافیایی پیچیده صحنه می‌گذارد.

واژگان کلیدی: توسعه شهری، منطق فازی، واسنجی، الگوریتم ژنتیک، شاخص سازگاری، قزوین

۱- مقدمه

افزایش جمعیت و مهاجرت از نواحی روستایی به شهرها در کنار رشد اقتصادی از علل عمده گسترش شهرنشینی است که این روند در کشورهای در حال توسعه از جمله ایران که در حال گذر از سامانه‌های سنتی به جوامع مدرن هستند، شتاب بیشتری دارد [۱، ۲]. افزون بر آن فرآیند توسعه شهری، فرآیند گریزناپذیری است که اگر طبق یک برنامه‌ریزی صحیح هدایت نشود، علاوه بر گسترش بی‌رویه شهر به سمت نواحی پیرامونی، سبب به وجود آمدن معضلات عمده‌ای از جمله آلودگی، ترافیک، جنگل‌زدایی و ... خواهد شد [۳]. لذا مدیریت، بخش مهم و ضروری در ارتقاء توسعه شهری و پدیده شهرنشینی است و غفلت از آن سبب تحمیل هزینه‌های سنگینی می‌گردد [۴]. از این رو، جهت مواجهه و کم اثر نمودن تبعات منفی رشد شهری، مدیران و برنامه ریزان شهری از ارائه راهکارهایی که به درک آن‌ها از الگوهای آتی رشد شهری و تغییرات کاربری اراضی کمک کند، استقبال می‌نمایند [۵].

فرآیند رشد شهری، فرآیندی است پویا که نتیجه معیارهای پیچیده اقتصادی، مدیریتی، اجتماعی، صنعتی، جغرافیایی و فرهنگی در سطوح محلی، ملی و بین‌المللی است. لذا مدل‌سازی آن توسط سامانه‌های سنتی امکان‌پذیر نخواهد بود [۶، ۷]. بدین سبب در دهه‌های اخیر مدل‌های متنوعی برای شبیه‌سازی رشد شهری ارائه شده است که در این بین مدل اتوماسیون سلولی^۱ به دلیل سادگی، توانایی بالای آن در بازتولید پویایی سامانه‌های پیچیده، انعطاف‌پذیری، ارائه روشی غیر مرکزی^۲ و انطباق آن با ساختار داده سلولی، توانایی شبیه‌سازی فرآیند رشد شهری را دارا بوده و در دو دهه اخیر مدل‌های متکی بر آن توانسته‌اند به محققان در درک پویایی الگوهای رشد شهری کمک فراوانی نمایند [۸-۱۰].

اتوماسیون سلولی در دهه ۱۹۴۰ میلادی توسط *Ulam* و *Neumann* جهت ارائه چهارچوبی برای بررسی رفتار سامانه‌های پیچیده و خود سازمانده توسعه داده شد [۱۱]. ویژگی کلیدی اتوماسیون سلولی این است که می‌تواند فرآیندهای پیچیده مکانی را با استفاده از مجموعه‌ای ساده از قوانین محلی مدل‌سازی کند. این رویکرد پایین به بالای

اتوماسیون سلولی، مطابق با تئوری پیچیدگی است. بر اساس این تئوری، یک سیستم پیچیده از تعاملات زیرسامانه‌های کوچک به دست می‌آید [۱۲].

اما از آنجاکه دینامیک‌های شهری محصول قیود فیزیکی و رفتارهای تصمیم‌گیری انسانی هستند، در معرض ابهام و عدم قطعیت مکانی قرار دارند. روش‌های معمول که مبتنی بر منطق بولین هستند، توانایی مدل‌سازی این عدم قطعیت ذاتی را ندارند، از این رو استفاده از قوانین فازی جهت تعریف قوانین کنترل توسعه شهری بسیار مناسب می‌باشد. در حقیقت منطق فازی با به‌کارگیری توابع عضویت فازی، قوانین فازی و پروسه فازی سازی-غیرفازی سازی، پیوستگی فرآیند پویای مکانی-زمانی توسعه شهری را حفظ می‌کند [۱۳].

با وجود اینکه منطق فازی برای مدل‌سازی تناسب کاربری اراضی دارای مزیت‌هایی نسبت به روش‌های معمول است ولی این روش نیز بدون محدودیت نیست. برای طراحی یک منطق فازی نیاز به فردی خبره و کارشناس می‌باشد، کارشناس بر اساس دانش و تجربیاتش پارامترهای توابع عضویت را تنظیم نموده و همچنین قوانین فازی موردنیاز سیستم را تعریف می‌کند؛ اما از آنجایی که دانش کارشناس در این حوزه محدود بوده و وابستگی به مکان و زمان دارد، نمی‌توان اتکالی صد در صد به آن داشت. بدین سبب در این پژوهش جهت رفع این مشکل، بحث واسنجی مطرح شده است تا با پیاده‌سازی این نگرش از وابستگی این پارامترها به دانش کارشناسی کاسته شود.

واسنجی یا کالیبراسیون به معنی تخمین پارامترهای مدل و ثوابت برای بهبود سازگاری بین خروجی مدل و مجموعه داده است. واسنجی زمانی به‌عنوان یک مسئله چالش‌برانگیز مطرح می‌شود که همانند این پژوهش، هدف تعیین وزن‌ها و پارامترهای بهینه برای تعداد زیادی از معیارهای مدل رشد شهری باشد. با این وجود واسنجی یک بخش جدایی‌ناپذیر از طراحی مدل و فرآیند توسعه‌ی آن است زیرا مکانیسمی فراهم می‌کند که می‌توان مطمئن شد که مدل‌ها می‌توانند پیش‌بینی‌های منطقی در مورد سناریوهای جاری و آینده داشته باشند [۱۴].

انگیزه اصلی این پژوهش، پیاده‌سازی یک روش واسنجی درون مدل رشد شهری سلولی فازی (FCUGM)^۳

^۳ Fuzzy Cellular Urban Growth Model (FCUGM)

^۱ Cellular Automata

^۲ Decentralized

می‌باشد و روند واسنجی FCUGM یکی از جنبه‌های منحصربه‌فرد این مقاله است. در حقیقت در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی FCUGM منطقه قزوین، شهرها و شهرک‌های اقماری اطراف آن استفاده شده است تا پارامترهای توابع عضویت فازی و وزن قوانین فازی که با متغیرهای غیرخطی و ناهمگن متعددی سروکار دارند، به‌صورت بهینه تعیین شوند. در بخش ارزیابی نیز نتایج این مدل با نتایج مدل عامل مبنای ارائه شده توسط حسینی و همکاران مقایسه گردیده است [۱۵].

۲-۱- واسنجی مدل‌های اتوماسیون سلولی شهری

ابتدایی‌ترین روش برای واسنجیدن^۱ مدل‌های اتوماسیون سلولی شهری روش‌های آزمون و خطا می‌باشد. در این روش مدل به‌صورت اصولی با ترکیبی از پارامترها اجرا می‌شود و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شوند. White and Engelen از این روش برای کالیبره کردن مدل اتوماسیون سلولی جزیره سنت لویس^۲ و شهر سینسیناتی^۳ استفاده کردند و اعتقاد داشتند که اجرای این روش ساده می‌باشد [۱۶]. Clarke, et al. از ترکیبی از مقایسه بصری و آنالیزهای ریاضی برای واسنجی مدلشان استفاده کردند و ۱۰۱ پارامتر که بر روی نتایج تأثیرگذار بودند را تعیین کردند [۱۷]. Straatman, et al. معتقد بودند، از آنجایی که مدل Clarke، یک مدل اتوماسیون سلولی بولین احتمالاتی با تنها ۵ پارامتر است، زمانی که تعداد پارامترها افزایش پیدا کند، این روش، روش مناسبی نخواهد بود زیرا مدل به زمان بسیار زیادی برای اجرای واسنجی نیاز خواهد داشت [۱۸]؛ بنابراین روش آزمون و خطا دارای محدودیت در مدت زمان مورد نیاز برای اجرا و همچنین تعداد پارامترهای واسنجی است [۱۹].

تابع ریاضی که به‌خوبی تعریف شده یا تابعی که دارای تعداد پارامتر کمی است، به‌راحتی از طریق روابط آماری امکان واسنجی آن وجود دارد اما واسنجی توابعی که شامل تعداد پارامتر زیادی هستند، یا توابعی که خوب تعریف نشده‌اند و یا توابع پیچیده (مانند توابع غیر پیوسته و غیرخطی)، بسیار دشوارتر می‌باشد. از این رو استفاده از برخی

متدهای آماری از قبیل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی^۴ [۲۰] و که ذاتاً خطی هستند، در مدل‌سازی روابط پیچیده بین متغیرهای مکانی و دینامیک‌های شهری مناسب نیست [۲۱]. Openshaw and Openshaw اعتقاد داشتند که روش‌های هوش مصنوعی و هوش محاسباتی می‌توانند برای مواقعی که تعداد پارامترهای ما زیاد باشد و یا با توابع پیچیده‌ای سروکار داشته باشیم، به‌طور مؤثر مورد استفاده قرار بگیرند [۲۲]. شبکه عصبی مصنوعی^۵ مثالی از این ابزار در زمینه‌ی هوش مصنوعی می‌باشد که برای به دست آوردن مقادیر بهینه استفاده شده است [۲۱، ۲۳]. یکی از ایراداتی که به شبکه عصبی مصنوعی می‌گیرند، همین دیدگاه جعبه سیاه بودن آن است که درک رفتار مدل را سخت می‌کند و کاربر را از روابطی که در مدل استفاده شده است بی‌اطلاع می‌گذارد. Li and Gar-On Yeh از مدل‌های درخت تصمیم جهت کشف قوانین انتقال مدل اتوماسیون سلولی استفاده کردند ولی این روش نیز در معرض بهینه‌سازی محلی قرار دارد [۲۴]. بعدها Yang et al. یک مدل اتوماسیون سلولی برای شهر شنزن چین توسعه دادند، آن‌ها در این مدل برای توسعه قوانین از روش ماشین‌های بردار پشتیبان^۶ استفاده کردند که در مقایسه با رگرسیون لجستیک به نتایج بهتری دست یافتند [۲۵]. ترکیب مدل مارکوف، رگرسیون لجستیک و اتوماسیون سلولی توسط Han and Jia جهت مدل‌سازی الگوهای پویای شهری فوشان^۷ چین در سال ۲۰۱۶ ارائه شد [۲۶]. Bleicic, et al. نیز از ترکیب شبکه‌های عصبی مصنوعی و اتوماسیون سلولی برای مدل‌سازی رشد شهری استفاده نمودند [۲۷].

Liu, et al. اعتقاد داشتند که معایب استفاده از شبکه عصبی مصنوعی طبیعت جعبه سیاه بودن آن‌ها و تمایل آن‌ها به سمت فرا منطبق شدن^۸ می‌باشد و از این جهت استفاده از یک روش kernel-based را ترجیح دادند. آن‌ها این روش را برای توسعه شهری شهر گوانژو^۹ در چین استفاده کردند و نسبت به شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون لجستیک به نتایج بهتری رسیدند [۱۲]. ولی از معایب روش‌های kernel-based این است که آن‌ها مقید

^۴ Analytical Hierarchy process (AHP)

^۵ Artificial Neural Network (ANN)

^۶ Support vector machines (SVM)

^۷ Foshan

^۸ Over-fitting

^۹ Guangzhou

^۱ Calibrating

^۲ St Lucia

^۳ Cincinnati

به استفاده از یک سری قوانین انتقال هستند و نیاز به محاسبات پیچیده دارند. از طرفی دیگر هر دو روش kernel-based و SVM همانند شبکه عصبی مصنوعی روش‌های بهینه‌سازی‌ای هستند که دارای طبیعت جعبه سیاه‌اند و واضح نیست که چطور دانش افزوده در مورد توسعه شهری را ارائه می‌کنند.

در سال‌های اخیر برای رفع از این محدودیت‌ها، الگوریتم‌های فرا ابتکاری جهت بهینه‌سازی قوانین انتقال و پارامترهای مدل اتوماسیون سلولی به کار گرفته شده‌اند. Feng, et al. از تلفیق اتوماسیون سلولی با الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات^۱ به منظور بهینه‌سازی قوانین انتقال، جهت کاهش عدم قطعیت مدل‌سازی رشد شهری، شهر شانگهای^۲ چین استفاده کردند. آن‌ها اعتقاد داشتند که این شباهت بین ماهیت خودسازمان‌ده الگوریتم PSO و رویکرد پایین به بالای اتوماسیون سلولی باعث می‌شود تا الگوریتم PSO، الگوریتم مناسبی جهت کشف روابط پیچیده بین متغیرهای مکانی و دینامیک‌های شهری باشد. از این‌رو نتایج این مقاله نشان می‌دهد که مدل اتوماسیون سلولی مبتنی بر الگوریتم PSO (PSO-CA) از سایر مدل‌های اتوماسیون سلولی مبتنی بر آنالیزهای آماری از قبیل رگرسیون لجستیک، عملکرد بهتری در شبیه‌سازی رشد شهری دارد [۲۸]. بعد از Yang, et al. مدلی بر پایه الگوریتم کلونی زنبور عسل^۳ جهت کشف قوانین انتقال مدل اتوماسیون سلولی‌شان ارائه کردند. آن‌ها معتقد بودند که الگوریتم کلونی زنبور عسل از طریق جستجوی محلی و کلی طی فرآیندهای تکراری، بهتر می‌تواند از گیر افتادن در بهینه محلی جلوگیری کند و برخلاف الگوریتم کلونی مورچه^۴ نیاز به گسسته سازی مقادیر اطلاعات توصیفی ندارد. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که مدل اتوماسیون سلولی مبتنی بر الگوریتم کلونی زنبور عسل (BCO-CA) دارای نتایج بهتری نسبت به مدل اتوماسیون سلولی مبتنی بر الگوریتم کلونی مورچه (ACO-CA) می‌باشد [۲۹]. سپس در مدلی که توسط Yao, et al. ارائه شد، از الگوریتم PSO جهت کشف قوانین انتقال مدل اتوماسیون سلولی شهر تیانجین^۵ چین استفاده کردند و در مقایسه با

مدل اتوماسیون سلولی مبتنی بر رگرسیون لجستیک به نتایج بهتری دست‌یافت‌اند [۳۰]. در نهایت Cao, et al. در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ به ترتیب از الگوریتم‌های جستجوی کوکو^۶ و حرکت خفاش‌ها^۷، برای استخراج قواعد تبدیل مدل اتوماسیون سلولی، در فرآیند شبیه‌سازی رشد شهری نانجینگ^۸ چین بهره گرفتند. نتایج این دو پژوهش حاکی از کارایی و عملکرد بالای مدل‌های ارائه‌شده در مقایسه با مدل‌های BCO-CA، PSO-CA و ACO-CA می‌باشد [۳۱، ۳۲].

می‌توان ادعا کرد که الگوریتم‌های فرا ابتکاری نیز دارای محدودیت‌هایی مشابه روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، SVMs و روش‌های kernel-based هستند. به عنوان مثال درست است که الگوریتم ژنتیک در مقایسه با سایر روش‌های ساده، مدل را بهتر تطبیق می‌دهد، اما هیچ دانش اضافی در مورد سیستم شهری ارائه نمی‌کند. از این‌رو تلفیق این روش‌ها با مدل منطقی فازي توسعه شهری بسیار لازم و ضروری است [۱۴]. مدل فازي یک مدل قانون مبناست که امکان تفسیر آن وجود دارد. الگوریتم ژنتیک نیز به صورت موفق برای کالیبره کردن مدل‌های فازي استفاده شده است [۳۳]. پیش از اینکه به ساختار مدل ارائه‌شده بپردازیم، در بخش‌های بعدی محدوده پژوهش و داده‌های مورد استفاده تشریح می‌گردند.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه در این پژوهش قسمتی از استان قزوین شامل بخش مرکزی شهرستان قزوین به علاوه شهرستان البرز است که در شکل ۱ نمایش داده شده است. این منطقه به شکل مستطیل با طول ۴۵ و عرض ۳۶ کیلومتر، در قاچ ۳۹ شمالی از سیستم تصویر UTM قرار گرفته است، به طوری که از مختصات $\{X = 394000, Y = 3994000\}$ در جنوب غربی تا مختصات $\{X = 439000, Y = 4030000\}$ در شمال شرقی را پوشش می‌دهد.

جدا از تقسیمات کشوری، منطقه در نظر گرفته شده مجموعه‌ای است شامل شهر قزوین و شهرها و شهرک‌های اقماری اطراف آن که در معرض توسعه‌ی شهرنشینی قرار

^۱ Particle swarm optimization (PSO)

^۲ Shanghai

^۳ Artificial bee colony (ABC)

^۴ Ant Colony Optimization (ACO)

^۵ Tianjin

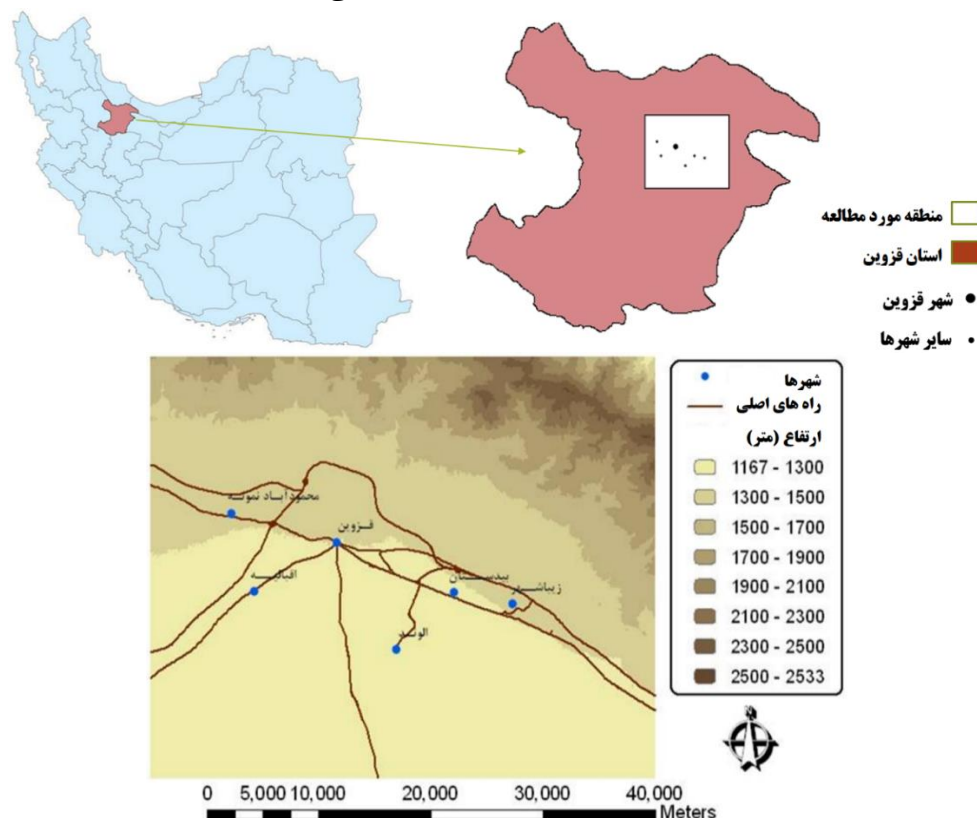
^۶ Cuckoo search algorithm (CS)

^۷ Bat Algorithm

^۸ Nanjing

نفری جمعیت روستایی مواجه بوده‌ایم (مرکز آمار ایران). ازجمله شهرها و شهرک‌هایی که در ۵۰ سال گذشته ایجاد شده‌اند و یا روستاهایی که توسعه یافته و به شهر تبدیل گردیده‌اند، می‌توان به زیباشهر، اقبالیه، الوند، بیدستان و محمودآباد نمونه اشاره کرد. این موضوع نشان از رشد فوق‌العاده شهرنشینی طی چندین سال اخیر در این منطقه دارد. در حال حاضر در برخی از روستاهای اطراف شهر نیز ساکنان غیربومی جهت یافتن سکونت‌گاه ارزان‌قیمت اقامت گزیده و برای کار و تحصیل به شهر رفت‌وآمد می‌کنند.

دارند. وجود مناطق وسیع مناسب کشت و نیز وجود واحدهای صنعتی متعدد در نزدیکی پایتخت و همچنین قرار گرفتن در مسیر شاهراه‌های غرب و شمال غرب کشور، سبب جاذبه هرچه بیشتر این منطقه برای سکونت و شهرنشینی شده است. به همین دلیل شهرهای منطقه علاوه بر مهاجرت روستاییان به شهر، شاهد ورود مهاجران از شهرهای دیگر و حتی استان‌های دور و نزدیک هستند (مرکز آمار ایران). طبق آمار، جمعیت شهری قزوین از ۵۵۲۹۲۸ نفر در سال ۱۳۷۵ به ۷۷۷۹۷۵ نفر در سال ۱۳۸۵ رسیده است و در همین مدت با کاهش ۵۰۱۰۴



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه و موقعیت آن در استان قزوین

محققان مختلف داده‌ها و نقشه‌های مختلفی را به‌عنوان معیارهای محرک در توسعه شهری مورد استفاده قرار داده‌اند که در این بین بعضی از داده‌ها حضور ثابتی در بیشتر این تحقیقات داشته‌اند که این داده‌ها عبارت‌اند از: ۱- زمان سفر یا فاصله مکانی تا شبکه راه‌ها ۲- زمان سفر یا فاصله مکانی تا مرکز شهر ۳- تراکم توسعه ۴- خصوصیات فیزیکی مانند شیب، ارتفاع، نوع خاک ۵- نزدیکی به مراکز خدمات اقتصادی-اجتماعی، مناطق تجاری و صنعتی ۶- ارزش زمین و ۷- آیین‌نامه‌های برنامه‌ریزی.

۳- داده‌های مورد استفاده

در واقعیت، توسعه شهری تحت تأثیر پارامترهای مختلفی از قبیل رشد جمعیت، رشد اقتصادی، افزایش درآمد، توسعه زیرساخت‌ها و... می‌باشد [۳۴]. از این رو برآزندگی (مطلوبیت) توسعه شهری با استفاده از معیارهای محرک مختلفی تعیین می‌شود. البته معیارهای محرک رشد شهری ممکن است از یک مکان تا مکان دیگر متغیر باشند زیرا این معیارها وابسته به عوامل اقتصادی، سیاسی، اجتماعی، جمعیتی و نظایر آن هستند [۱۴].

در برخی تحقیقات سعی بر آن بوده است تا از تعداد نقشه‌ها و پارامترهای بیشتری استفاده گردد. باین وجود، Torrens and O'Sullivan اظهار می‌دارند که استفاده از معیارها و پارامترهای بیشتر تنها مسئله را پیچیده‌تر می‌کند و در راستای بهبود نتایج کمکی نمی‌کند [۳۵]. Waddell در مطالعه‌ی خود بیان می‌کند که استفاده از نقشه‌های بیشتر به‌عنوان معیارهای گسترش کاربری اراضی، سبب استفاده از داده‌های وابسته و در نتیجه منجر به منحرف شدن نتایج می‌گردد [۳۶].

با این توضیحات انتخاب معیارهای محرک برای منطقه مورد مطالعه بر اساس ۳ اصل بوده است: ۱- خصوصیات و ویژگی‌های رشد شهری منطقه مورد مطالعه بر مبنای درک مستندات تاریخی، برنامه‌های جامع، مطالعات مرتبط و نظرات کارشناسان برنامه‌ریز ۲- مقالات علمی ۳- آنالیزهای تجربی. در نهایت با توجه به توضیحات بالا، در این تحقیق سه معیار به‌عنوان معیارهای محرک اصلی رشد شهری برای منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد که عبارت‌اند از: ارزش زمین، دسترسی و جذابیت. این معیارها نماد سه رکن توسعه پایدار هستند [۳۷]. بدین صورت که ارزش زمین نماینده‌ی اقتصاد، جذابیت نمایشگر بخش اکولوژیک و دسترسی نیز متناظر با تساوی حقوقی است. معیارهای مذکور در قالب سه نقشه‌ی رستری با اندازه‌ی پیکسل ۱۰۰ متر مورداستفاده قرار می‌گیرند و هر یک حاصل اثر و ترکیب چندین نقشه‌ی دیگر است که در ادامه به آن می‌پردازیم.

برای تهیه‌ی نقشه‌ی ارزش زمین از سه معیار اقتصادی، فیزیکی و قانونی استفاده شده است. معیار اقتصادی بیانگر قیمت زمین است که به‌صورت منطقه‌ای و با بازدید میدانی اخذ گردید. این قیمت‌ها به مناطق ساخته شده و یا در حال ساخت نسبت داده شد. برای سایر مناطق، قیمت‌ها به‌صورت میانگین وزن‌دار متناسب با عکس مجذور از مناطق ساخته شده و همراه با ضریب افت قیمت محاسبه و در نهایت نقشه نرمال گردید. از دیدگاه قانونی، مستعد بودن زمین‌ها برای توسعه در نظر گرفته شده است. با این توصیف که مستعدترین زمین‌ها برای توسعه زمین‌هایی بوده‌اند که از سوی مراجع قانونی نظیر سازمان مسکن و شهرسازی و شهرداری‌ها برای توسعه و ساخت‌وساز در نظر گرفته و در قالب نقشه‌های تفصیلی و جامع توسعه‌ی شهری ارائه شده‌اند. زمین‌های

دیگر در رده‌های بعدی قرار گرفته‌اند تا جایی که با رویکردی زیست‌محیطی، باغ‌ها به‌عنوان غیر مستعدترین زمین‌ها لحاظ شده‌اند. از دیدگاه فیزیکی نیز شیب زمین و جنس خاک مدنظر قرار گرفته‌اند. به‌طوری‌که با افزایش شیب از قابلیت زمین برای توسعه کاسته می‌شود. لذا منطقه از نظر شیب طبقه‌بندی و ارزش هر طبقه یا کلاس توسط کارشناس تعیین شد. همچنین جنس خاک‌های مختلف از نظر کارشناسی جهت ساخت‌وساز ارزش‌گذاری گردید و سپس با کلاس‌های در نظر گرفته شده برای نقشه‌ی شیب، ترکیب شد.

نقشه‌ی دسترسی بیانگر نسبت سلول‌ها برای دسترسی به شهر قزوین از نظر زمانی است. برای تهیه چنین نقشه‌ای ابتدا تمامی راه‌های منطقه مورد مطالعه از آزادراه گرفته تا راه جیپ‌رو استخراج و سرعت حرکت در آن‌ها از ۱۲۰ تا ۱۵ کیلومتر در ساعت تعیین شد. همچنین سرعت حرکت پیاده در یک منطقه مسطح شش کیلومتر در ساعت در نظر گرفته شد که این مقدار با افزایش شیب کاهش می‌یابد [۳۸]. بدین ترتیب کوتاه‌ترین فاصله زمانی هر سلول تا نزدیک‌ترین کران شهر قزوین به دست آمد.

جهت تهیه‌ی نقشه‌ی جذابیت نیز از سه معیار چشم‌انداز، ارتفاع و نزدیکی استفاده شده است. در حقیقت داشتن چشم‌انداز مطلوب یک از عوامل نشان‌دهنده جذابیت است. لذا سلول‌هایی که بر اساس مدل رقومی زمین، بر شهر قزوین مشرف بودند از مزیت بالاتری نسبت به سایر مناطق برخوردار شدند. ارتفاع نیز از این نظر در جذابیت مؤثر است که به‌نوعی بیانگر آب‌وهوا و درجه حرارت ناحیه است. از آنجاکه دشت قزوین منطقه‌ای نیمه گرم و نیمه بیابانی است، آب‌وهوای خنک از شاخص‌های جذابیت خواهد بود. باین وجود ارتفاعات زیاد اثر عکس داشته و دارای آب‌وهوای خشن کوهستانی است. بر این اساس، ارتفاعات منطقه که از ۱۰۰۰ تا ۲۶۰۰ متر بالای سطح دریا را شامل می‌شود در کلاس‌های ۲۰۰ متری طبقه‌بندی و به هر کلاس امتیاز متناسب تخصیص یافت. در نهایت در تعیین جذابیت یک منطقه معمولاً نزدیکی به عرصه‌های آبی، پارک‌ها، جنگل‌ها، رودخانه‌ها، برکه‌ها و فضاهای سبز مورداستفاده قرار می‌گیرند که در منطقه‌ی مورد مطالعه از میان عوارض فوق تنها پارک‌ها و باغ‌ها

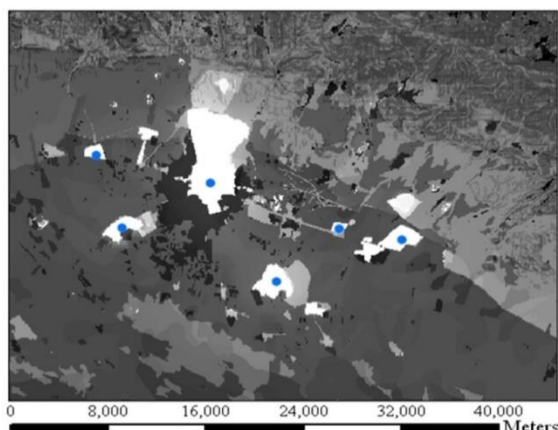
نقشه‌های مورد استفاده در شکل ۲ و شکل ۳ نشان داده شده‌اند. در نقشه‌های معیار (شکل ۲)، رنگ روشن‌تر به معنای مطلوبیت بیشتر است. همچنین در نقشه‌های توسعه‌ی شهری سال ۱۳۸۴، ۱۳۸۹ و ۱۳۹۴ (شکل ۳)، منظور از مناطق غیرقابل توسعه مناطقی است که کاربری نظامی یا منابع طبیعی دارند.

شایان ذکر است که در این پژوهش جهت آماده‌سازی نقشه‌ها، انجام تحلیل‌ها و تولید نقشه‌های خروجی، به‌طور گسترده نرم‌افزار Arc GIS 10.4.1 به کار گرفته شده است. البته بخشی از آماده‌سازی داده‌ها نیز که مربوط به تصاویر ماهواره‌ای بود، توسط نرم‌افزار ENVI 5.1 انجام گرفت. در نهایت جهت پیاده‌سازی مدل نیز از نرم‌افزار MATLAB 2015a بهره گرفته شد.

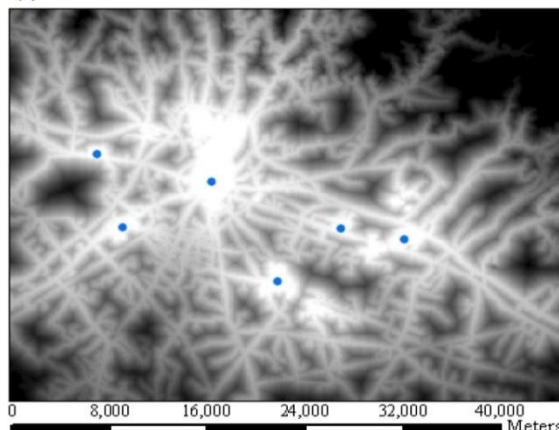
وجود دارند. لذا میزان نزدیکی به باغ‌ها و پارک‌ها برای تهیه‌ی نقشه جذابیت مدنظر قرار گرفت.

گفتنی است برای آماده‌سازی نقشه‌های ارزش زمین، دسترسی و جذابیت ابتدا هر یک از نقشه‌های تشکیل‌دهنده آن‌ها نرمال شده و مقادیری بین صفر و یک گرفتند. سپس با ترکیب نقشه‌های نرمال شده بر اساس از روش جمع وزنی، نقشه‌های این سه معیار استخراج شدند. در نهایت لازم است که مناطق توسعه‌یافته در سال ۱۳۸۹ و ۱۳۹۴ مشخص شوند. بدین منظور دو تصویر سنجنده P5 ماهواره IRS با قدرت تفکیک مکانی ۵ متر از سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح اخذ شد. این تصاویر همراه با تصاویر Google Earth برای شناسایی توسعه‌های به وقوع پیوسته، مورد استفاده قرار گرفتند و با ویرایش و بررسی بصری، مرزهای مناطق توسعه‌یافته استخراج شد.

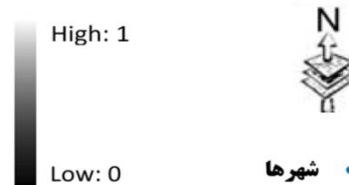
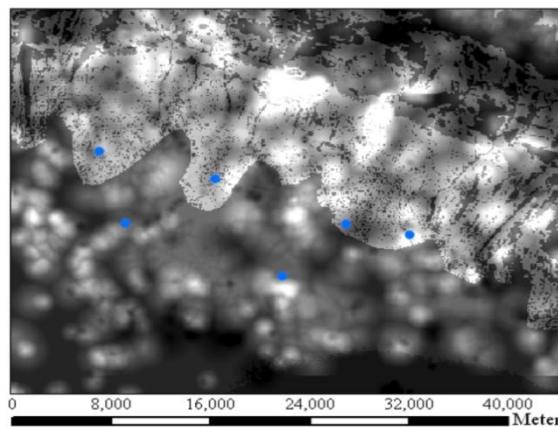
الف)



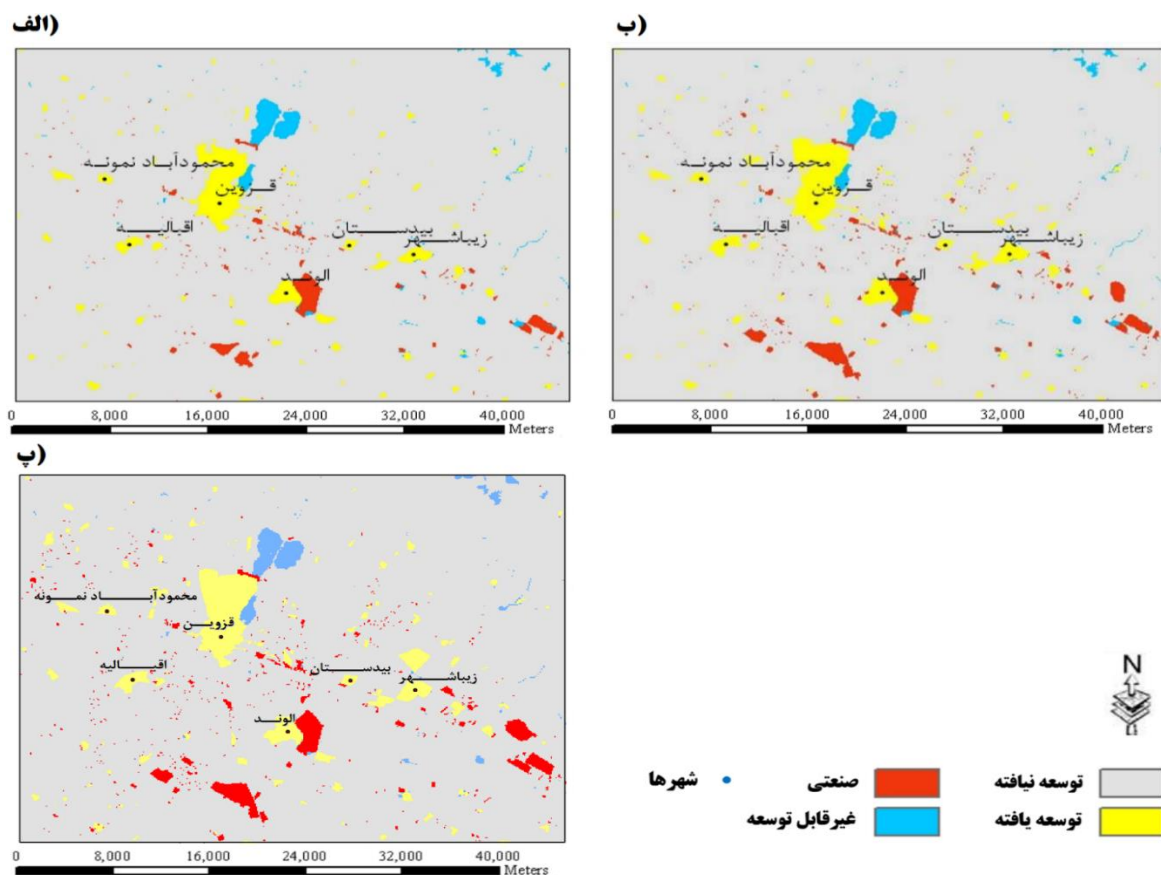
ب)



پ)



شکل ۲- نقشه‌های معیار؛ الف: نقشه ارزش زمین، ب: نقشه دسترسی، پ: نقشه جذابیت



شکل ۳- الف: نقشه توسعه شهری سال ۱۳۸۴، ب: نقشه توسعه شهری سال ۱۳۸۹، پ: نقشه توسعه شهری سال ۱۳۹۴

می‌شوند. رابطه (۱)، رابطه بین ورودی‌ها و خروجی مدل را نشان می‌دهد:

$$DS_{ij} = f(Ac_{ij}, Lv_{ij}, At_{ij}) \quad (1)$$

در این رابطه DS ، بیانگر خروجی مدل و میزان برازندگی توسعه شهری برای سلول غیرشهری ij و Ac ، Lv ، At ورودی‌های مدل و به ترتیب بیانگر میزان دسترسی، ارزش زمین و جذابیت برای آن سلول می‌باشد. تابع f نیز تابع استنتاج ممدانی فازی می‌باشد. تابع استنتاج ممدانی فازی یکی از رایج‌ترین روش‌های فازی به کار گرفته‌شده برای پروسه فازی سازی-غیر فازی سازی، جهت محاسبه متغیر خروجی (در اینجا برازندگی توسعه شهری) می‌باشد که در ادامه به تشریح روند این پروسه می‌پردازیم.

اولین مرحله در استنتاج فازی، تبدیل مقادیر قطعی به مجموعه‌های فازی با استفاده از توابع عضویت فازی است. در این مدل همان‌طور که بیان شد، ورودی مدل نقشه‌های دسترسی، جذابیت و ارزش زمین می‌باشد. این نقشه‌ها دارای مقادیر نرمال شده (بین صفر و یک) برای هر سلول

۴- مدل اتوماسیون سلولی فازی رشد شهری

مدل‌های اتوماسیون سلولی شهری پیشین، قوانین انتقال را برای توسعه شهری بر اساس تئوری احتمالات فرموله می‌کردند [۳۹-۴۳]. در عوض FCUGM از مجموعه‌هایی از تئوری‌های فازی و قوانین فازی استفاده می‌کند. از آنجایی که دینامیک‌های شهری محصول قیود فیزیکی و رفتارهای تصمیم‌گیری انسانی هستند، استفاده از قوانین فازی برای تعریف قوانین کنترل توسعه شهری بسیار مناسب می‌باشد. در حقیقت طرفداران این رویکرد معتقدند که برای بررسی ابهامات و پیچیدگی‌ها در تصمیم‌گیری استفاده از مجموعه‌های فازی و قوانین فازی بسیار کارا می‌باشد [۴۴].

۴-۱- ساختار مدل

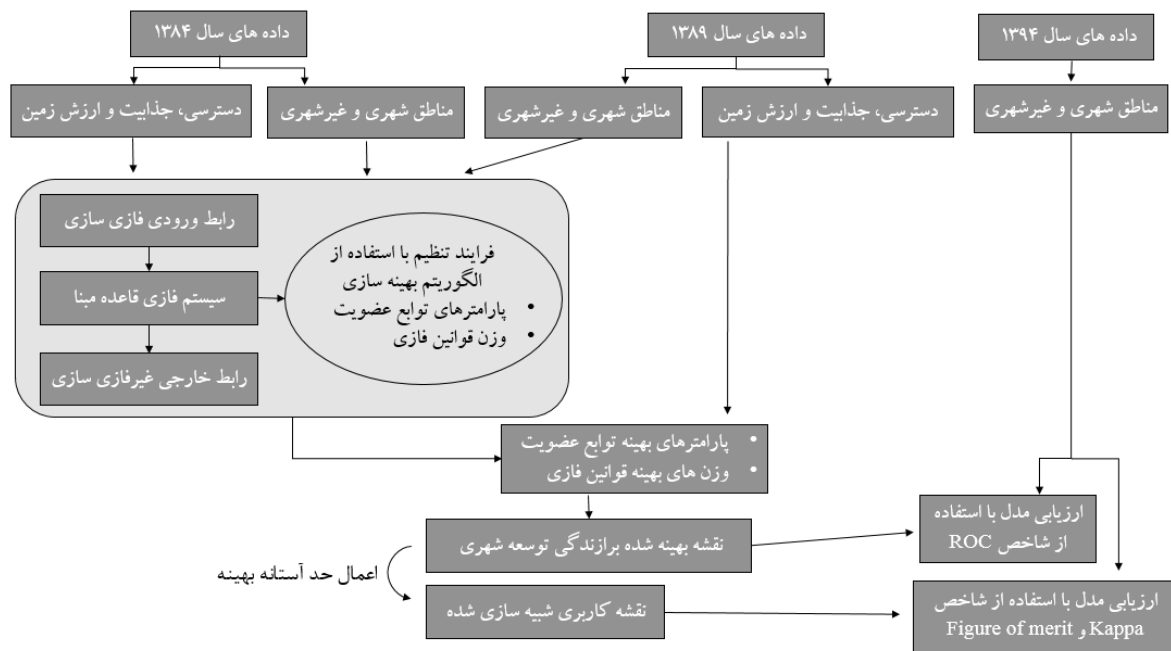
با توجه به توضیحاتی که در بخش سوم داده شد، میزان برازندگی توسعه شهری برای سلول‌های غیرشهری، تابعی از سه معیار ارزش زمین، جذابیت و دسترسی می‌باشد که به‌عنوان ورودی‌های مدل در نظر گرفته

جهت نمایش یک دید کلی نسبت به فرآیند تحقیق شکل ۴ ارائه شده است. به طور خلاصه، با به کارگیری فرآیند تنظیم ژنتیکی، مدل FCUGM منطقه قزوین طی دوره ۱۳۹۴-۱۳۸۹ کالیبره می گردد. در این مدل، علاوه بر اینکه پارامترهای توابع عضویت فازی و وزن قوانین فازی بهینه سازی می شوند، طبق این وزن های بهینه، قوانین فازی بهینه نیز استخراج می شوند. سپس جهت ارزیابی مدل، با به کارگیری مقادیر بهینه به دست آمده و داده های دسترسی، جذابیت و ارزش زمین سال ۱۳۸۹، نقشه برازندگی توسعه شهری سال ۱۳۹۴ تولید می شود. در مرحله بعد جهت ارزیابی نقشه برازندگی تولید شده از شاخص های سازگاری، کاپا و شاخص عامل نسبی استفاده می شود. به استثنای شاخص ROC که مستقل از حد آستانه است، دو شاخص دیگر نیاز به تعریف حد آستانه بهینه ای دارند تا با اعمال این حد آستانه به نقشه برازندگی، نقشه کاربری شبیه سازی شده سال ۱۳۹۴ استخراج شود. در نهایت با مقایسه نقشه کاربری شبیه سازی شده با نقشه کاربری واقعی منطقه مورد مطالعه در همان سال، دقت مدل سنجیده می شود که در ادامه به تشریح روند فوق خواهیم پرداخت.

غیرشهری هستند. این مقادیر با توجه به قوانین فازی و پارامترهای توابع عضویت که در طول فرآیند واسنجی بهینه می شوند، با یک درجه عضویت متعلق به یک سری مجموعه های فازی می باشند که با به کارگیری روش ممدانی (کمینه-بیشینه) خروجی تابع فازی برای هر سلول غیرشهری به دست می آید. سپس نوبت به مرحله غیر فازی سازی می رسد که در آن خروجی فازی به یک عدد قطعی تبدیل می شود. روش های متعددی جهت غیرفازی سازی ارائه شده اند که رایج ترین آن ها، روش مرکز گرانش می باشد [۴۵]. طبق رابطه (۲) خروجی هر قانون فازی اگر آنگاه، یک عدد غیر فازی است که نشان دهنده برازندگی توسعه شهری برای سلول ij است [۴۶].

$$DS^t = \frac{\sum_{i=1}^n \mu c_n(z_{ij}) z_{ij}}{\sum_{i=1}^n \mu c_n(z_{ij})} \quad (2)$$

در این رابطه mc_n تابع عضویت خروجی فازی (برازندگی توسعه) مربوط به قانون n ام و z_{ij} مقدار خروجی فازی (برازندگی توسعه) قانون n ام سلول ij است.



شکل ۴- مدل مفهومی FCUGM جهت مدل سازی توسعه شهری

بتواند الگوهای واقعی و مورد انتظار را شبیه سازی کند [۱۴]. بدین منظور در این مدل از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه سازی پارامترهای توابع عضویت فازی و وزن قوانین فازی استفاده شده است.

۵- واسنجی مدل FCUGM

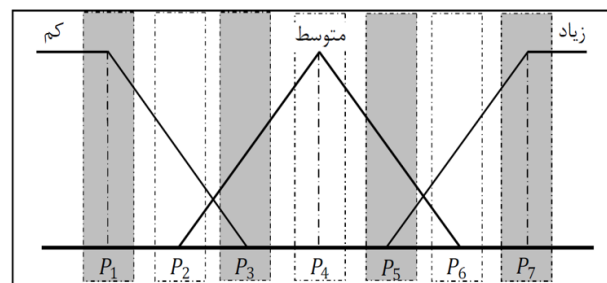
همان طور که قبلاً بیان شد، واسنجی به منظور یافتن مجموعه ای بهینه از وزن ها و پارامترها انجام می گیرد تا

۵-۱- بهینه‌سازی پارامترهای توابع عضویت فازي و وزن قوانین فازي

جهت بهینه‌سازی پارامترهای توابع عضویت فازي، در مرحله اول باید توابع عضویت موردنیاز مدل را تعریف نمود. برای تعیین توابع عضویت، در ابتدا لازم است تا نوع توابع و همچنین برچسب‌های زبانی را برای متغیرهای زبانی ورودی و خروجی تعیین شود. مدل ارائه‌شده طبق رابطه (۱) شامل سه ورودی (دسترسی، ارزش زمین و جذابیت) و یک خروجی (برازندگی توسعه شهری) است. در این مدل برای هر سه متغیر ورودی و یک متغیر خروجی، از توابع عضویت دوزنقه‌ای و از برچسب‌های زبانی "کم"، "متوسط" و "زیاد" استفاده شده است.

همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد، برای تعریف سه تابع عضویت مذکور از ۷ پارامتر p_1 تا p_7 استفاده شده است که مقادیر بهینه این ۷ پارامتر برای هر سه متغیر ورودی و یک متغیر خروجی طی فرآیند واسنجی تعیین می‌شود. رابطه (۶) نحوه تعریف این ۷ پارامتر را نشان می‌دهد.

$$0 < p_1 < p_2 < p_3 < p_4 < p_5 < p_6 < p_7 < 1 \quad (6)$$



شکل ۵- پارامترهای در نظر گرفته‌شده برای توابع عضویت

درنهایت جهت بهینه‌سازی وزن قوانین فازي، هم قوانین مرتبط و هم قوانین نامرتبب برای تعریف قوانین فازي در نظر گرفته‌شده‌اند. در حقیقت، تمامی حالت‌های ممکن برای قوانین فازي با سه متغیر ورودی و یک متغیر خروجی در نظر گرفته‌شده‌اند که مجموعاً ۸۱ قانون فازي می‌شود. به‌عنوان مثال حتی قانونی تحت عنوان "اگر برای سلولی هر سه معیار دسترسی، جذابیت و ارزش زمین کم باشد، آنگاه پتانسیل رشد برای آن سلول زیاد است" نیز جزو قوانین در نظر گرفته‌شده است. بدین ترتیب برای هر قانون فازي چه مرتبط و چه غیر مرتبط یک وزن بهینه‌ای به دست می‌آید. سپس بر اساس این وزن‌ها و بدون

اعمال نظر کارشناسی، قوانین بهینه و پرکاربرد، متناسب با معیارهای رشد شهری منطقه استخراج می‌شوند.

۵-۲- تابع هدف مورد استفاده در واسنجی

تابع هدف یا تابع هزینه برای ارزیابی نقشه توسعه شهری شبیه‌سازی‌شده در مقایسه با واقعیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از واسنجی مدل FCUGM این است که یک نقشه توسعه شهری شبیه‌سازی‌شده ارائه کند که تا حد امکان به واقعیت منطقه، نزدیک و شبیه باشد، به‌عبارت‌دیگر تابع هزینه آن کمترین مقدار ممکن باشد؛ که در این صورت به آن مدل، یک مدل کالیبره گفته می‌شود و جهت شبیه‌سازی سناریوهای آینده قابل استفاده خواهد بود. در این پژوهش تابع هدف 1-ROC می‌باشد که در ادامه به آن خواهیم پرداخت.

جهت ارزیابی نقشه برازندگی توسعه شهری می‌باید این نقشه با استفاده از حد آستانه‌ای به نقشه کاربری شبیه‌سازی‌شده تبدیل شود و سپس با نقشه کاربری واقعی آن سال مورد مقایسه قرار بگیرد. چنانچه تعیین این حد آستانه به‌صورت کارشناسی و بر اساس دانش اولیه از منطقه و تجربه‌صورت گیرد، چندان موفق نخواهیم بود زیرا اگر حد آستانه‌ای نامناسب تعریف شود، منجر به ضعیف نشان دادن مدل می‌شود. بدین ترتیب جهت ارزیابی نقشه برازندگی توسعه شهری باید از شاخص استفاده گردد که مستقل از حد آستانه باشد. شاخص عامل نسبی (ROC) یک شاخص کمی است که با تعریف حدود آستانه‌های مختلف نیاز به تعریف یک حد آستانه مشخص را از بین می‌برد [۴۷].

مقدار عددی شاخص عامل نسبی از مساحت زیر سطح نموداری به دست می‌آید که مؤلفه افقی آن درصد واقعیت کاذب و مؤلفه قائم آن درصد واقعیت صحیح می‌باشد؛ که از طریق روابط زیر به دست می‌آیند [۴۸]:

$$\text{False posivite(FP)\%} = \frac{B}{B + D} \quad (3)$$

$$\text{True posivite(TP)\%} = \frac{A}{A + C} \quad (4)$$

مقادیر A, B, C و D از طریق ماتریس خطا و جدول ۱ به دست می‌آیند.

جدول ۱- ماتریس خطا جهت مقایسه نقشه شبیه سازی و نقشه واقعی

مدل	واقعیت		
	شهری	غیرشهری	کل
شهری	A	B	A+B
غیرشهری	C	D	C+D
کل	A+C	B+D	A+B+C+D

در حقیقت برای ارزیابی نقشه برازندگی توسعه شهری با استفاده از شاخص ROC، یک سری حدود آستانه بین صفر و یک با بازه ۰/۰۱ در نظر گرفته می شود که با اعمال هر کدام از این حد آستانه ها، یک نقشه کاربری شبیه سازی شده تولید می شود که در مقایسه با نقشه کاربری واقعی یک ماتریس خطا به دست می آید. به عبارت دیگر به ازای هر حد آستانه یک ماتریس خطا خواهیم داشت و از هر ماتریس خطا می توان مقادیر مؤلفه های افقی و قائم منحنی ROC را به دست آورد. در نهایت مقدار عددی این شاخص آماری از مساحت زیر سطح نمودار این منحنی طبق رابطه (۵) تعیین می شود [۴۹].

$$AUC = \sum_{i=1}^n [FP_{i+1} - FP_i] [TP_i + TP_{i+1} - \left(\frac{TP_i}{2}\right)] \quad (5)$$

در رابطه فوق TP و FP به ترتیب درصد واقعیت صحیح و درصد واقعیت کاذب و n نیز تعداد حدود آستانه در نظر گرفته شده می باشد.

۵-۳- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک فن مؤثر و قوی بهینه سازی است که از مکانیسم تکامل و ژنتیک موجودات زنده الهام می گیرد. الگوریتم ژنتیک در مقایسه با سایر روش های متعارف بهینه سازی مزیت های قابل توجهی دارد. از جمله اینکه الگوریتم ژنتیک به جای تکیه بر روی یک جواب و بهینه سازی آن در تکرارهای بعدی، بر روی دسته ای از جواب ها به طور هم زمان کار می کند و به تدریج به سمت نقطه بهینه همگرا می شود؛ بنابراین احتمال این که در بهینه محلی قرار بگیرد، بسیار کم است. همچنین الگوریتم ژنتیک هیچ گونه قیدی از جمله خطی بودن، پیوستگی و یا مشتق پذیری بر تابع هدف تحمیل نمی کند زیرا نحوه داده پردازی این الگوریتم به نحوی است که تنها به اطلاعات ورودی خروجی فرآیند نیاز دارد [۵۰].

در الگوریتم ژنتیک هر راه حل در فضای جمعیت به عنوان یک کروموزوم شناخته می شود. در یک کروموزوم (راه حل) که از مجموعه ای از ژن ها ساخته شده است، هر ژن نشان دهنده یک پارامتر یا وزن است که نیاز به

واستجی دارد. پس در این مدل هر راه حل شامل ۱۰۹ ژن است که از ۲۸ پارامتر توابع عضویت فازی و ۸۱ وزن قوانین فازی تشکیل شده است و از آنجایی که اندازه جمعیت برابر با ۲۰ در نظر گرفته شده است، برای هر نسل ماتریسی با ابعاد ۲۰ × ۱۰۹ خواهیم داشت.

الگوریتم ژنتیک در ابتدا با تولید یک جمعیت تصادفی اولیه شروع می شود، سپس هر کروموزوم (راه حل) به یک سری وزن ها و پارامترهای منحصر به فرد رمزگشایی می شود و FCUGM اجرا می شود. سپس با مقایسه نقشه توسعه شهری شبیه سازی شده با نقشه واقعی آن، تناسب هر یک از راه حل ها بر اساس تابع هزینه (طبق روندی که در بخش قبلی توضیح داده شد) محاسبه می شود.

پس از ارزیابی جمعیت، جمعیت بر اساس مقدار تابع هزینه مرتب می شود و برای ایجاد جمعیت برای نسل بعد، اپراتورهای انتخاب، ترکیب و جهش به این جمعیت اعمال می گردد. در راستای عملگر انتخاب ۱۵٪ اول جمعیت به عنوان نخبه انتخاب و به صورت مستقیم به نسل بعدی منتقل می شوند. پس از این مرحله نوبت به عملگر ترکیب می رسد. طبق این عملگر از ترکیب دو عضو از جمعیت به عنوان والد، دو عضو دیگری ایجاد می شود که وارث ویژگی های والدینشان می باشند. برای انتخاب والدین در این الگوریتم از روش انتخاب رقابتی و برای ترکیب از روش ترکیب حسابی با نرخ ۶۰٪ استفاده شده است. در نهایت برای حفظ تنوع در جمعیت و جلوگیری از به دام افتادن در بهینه های محلی عملگر جهش اعمال می گردد. عملگر جهش با تغییر تصادفی یک یا چند مقدار از پارامترها یا وزن ها بر پایه نرخ جهش، راه حل ها را اصلاح می کند که در این الگوریتم نرخ جهش، ۲۵٪ در نظر گرفته شده است.

پس از آنکه عملگر انتخاب، ترکیب و جهش بر روی جمعیت قبلی اعمال شدند، جمعیت جدید تشکیل شده و درست مشابه قبل مورد ارزیابی قرار می گیرد. این روند تا جایی ادامه پیدا می کند که الگوریتم همگرا شود و یا تا تعداد تکرار مشخص اجرا گردد که در این الگوریتم تعداد تکرار ۲۰۰ به عنوان شرط توقف در نظر گرفته شده است.

۴- نتایج واسنجی

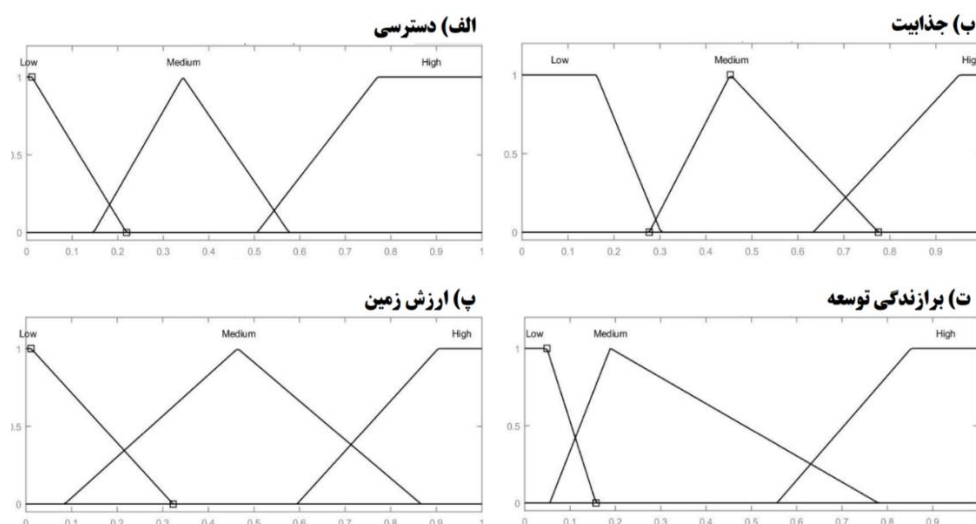
پس از اینکه الگوریتم ژنتیک به شرط توقف رسید، پارامترهای بهینه توابع عضویت فازی و وزن های بهینه قوانین فازی قابل استخراج می باشند. شکل ۶ توابع عضویت فازی کالبره شده مدل را نشان می دهد.

تشخیص درست ارزش زمین، پاسخهای مدل به سمت وسوی درستی هدایت شده‌اند.

با به‌کارگیری چنین پارامترهای بهینه‌ای، نقشه بهینه‌شده برازندگی توسعه شهری سال ۱۳۸۹، با مقدار شاخص ROC ۹۸/۱ درصد به دست آمد که در شکل ۷ این نقشه به همراه نمودار شاخص عامل نسبی آن نمایش داده شده است.

بعد از اینکه وزن بهینه هر ۸۱ قانون به دست آمد، این قوانین بر اساس مقدار وزنشان مرتب شدند؛ که در جدول ۲، بیست قانونی که دارای بیشترین وزن بودند به عنوان قوانین بهینه و پر کاربرد ارائه شده‌اند.

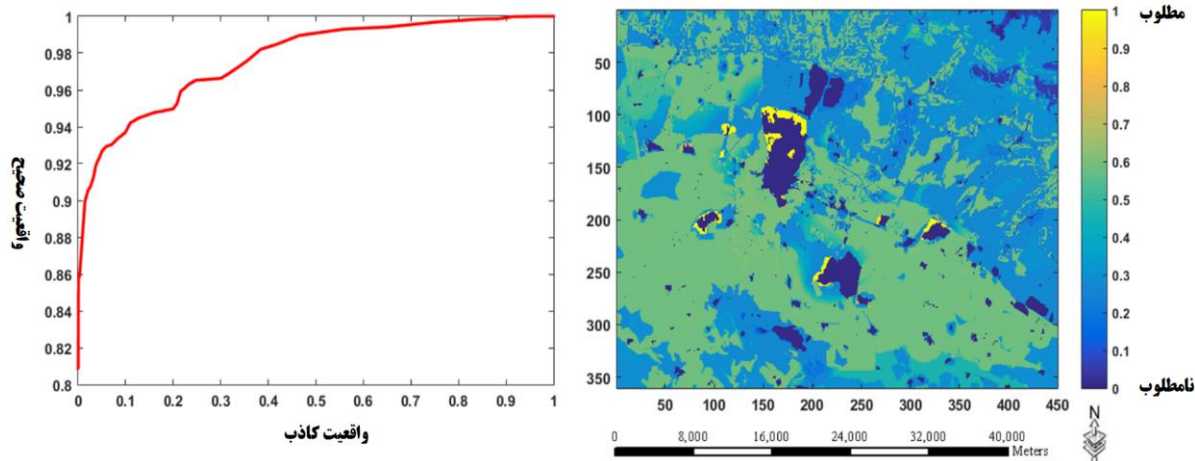
بر اساس نتایج جدول ۲، از میان این سه معیار، معیار ارزش زمین، در اکثر موارد تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر روی خروجی‌ها دارد و مناطقی که دچار توسعه شده‌اند، ارزش زمین بسیار بالاتری نسبت به سایر مناطق دارند. لذا با



شکل ۶- توابع عضویت فازی کالبره شده متغیرهای ورودی و خروجی مدل

جدول ۲- قوانین بهینه به همراه وزنشان

قانون فازی	دسترسی	جذابیت	ارزش زمین	پتانسیل توسعه	وزن
۱	اگر	متوسط	کم	متوسط	0.999
۲	اگر	زیاد	متوسط	متوسط	0.998
۳	اگر	متوسط	زیاد	زیاد	0.995
۴	اگر	کم	متوسط	متوسط	0.985
۵	اگر	کم	متوسط	متوسط	0.981
۶	اگر	زیاد	کم	کم	0.977
۷	اگر	زیاد	کم	متوسط	0.957
۸	اگر	متوسط	کم	کم	0.949
۹	اگر	متوسط	متوسط	متوسط	0.946
۱۰	اگر	کم	متوسط	کم	0.945
۱۱	اگر	متوسط	کم	متوسط	0.935
۱۲	اگر	متوسط	زیاد	زیاد	0.927
۱۳	اگر	کم	زیاد	زیاد	0.900
۱۴	اگر	زیاد	متوسط	زیاد	0.899
۱۵	اگر	کم	متوسط	متوسط	0.774
۱۶	اگر	متوسط	کم	متوسط	0.726
۱۷	اگر	کم	متوسط	کم	0.693
۱۸	اگر	زیاد	متوسط	زیاد	0.641
۱۹	اگر	کم	کم	کم	0.632
۲۰	اگر	کم	زیاد	متوسط	0.619



شکل ۷- نقشه کالیبره شده نرمال برازندگی توسعه شهری سال ۱۳۸۹ به همراه نمودار شاخص عامل نسبی آن

۵- ارزیابی مدل

در شاخص سازگاری برخلاف شاخص کاپا تمام پیکسل‌های منطقه وارد محاسبات نمی‌شود و فقط پیکسل‌هایی که قرار است تخصیص پیدا کند (تعداد تقاضا) مدنظر قرار می‌گیرد. بدین ترتیب با حذف مساحت عدم‌تغییر از محاسبات، مقدار واقع‌بینانه‌ای از دقت مدل محاسبه می‌گردد. این شاخص آماری از طریق رابطه زیر به دست می‌آید [۵۲-۵۴]:

$$Figure\ of\ merit = \frac{B}{A + B + C + D} \quad (V)$$

B : بیانگر مجموع سلول‌هایی است که در واقعیت و مدل، از کلاسی دیگر به کلاس i تغییر پیدا کرده‌اند به عبارتی دیگر مجموع سلول‌هایی است که تغییرات آن‌ها درست پیش‌بینی شده است.

A : بیانگر مجموع پیکسل‌هایی است که در واقعیت از کلاسی دیگر به کلاس i تغییر پیدا کرده‌اند اما در مدل تغییری نداشته‌اند.

C : بیانگر مجموع پیکسل‌هایی است که در واقعیت از کلاسی دیگر به کلاس i تغییر پیدا کرده‌اند اما در مدل به کلاس j تغییر پیدا کرده‌اند.

D : بیانگر مجموع پیکسل‌هایی است که در واقعیت تغییری نداشته‌اند، اما در مدل از کلاسی دیگر به کلاس i تغییر پیدا کرده‌اند.

بدین ترتیب مقدار این شاخص بین صفر تا صد درصد متغیر است. عدد صفر نشان‌دهنده‌ی این است که هیچ تطابقی بین تغییرات پیش‌بینی‌شده با تغییرات مشاهده‌شده نیست و عدد ۱۰۰ نشان‌دهنده تطابق کامل بین تغییرات پیش‌بینی‌شده و تغییرات مشاهده‌شده است [۵۵].

در حال حاضر که مدل توسعه شهری منطقه قزوین بین سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۹ بهینه‌شده است، نوبت به مرحله ارزیابی مدل می‌رسد. جهت ارزیابی مدل از شاخص‌های سازگاری و کاپا استفاده شده است. شاخص کاپا از شاخص‌های رایج برای مقایسه الگوهاست و به‌طور گسترده جهت ارزیابی مدل‌های توسعه شهری به کار گرفته شده است. این شاخص مطابق روابط زیر محاسبه می‌گردد [۵۱]:

$$K = \frac{P(A) - P(E)}{1 - P(E)} = \frac{\sum_{i=1}^c P_{ii} - \sum_{i=1}^c P_{iT} P_{TI}}{1 - \sum_{i=1}^c P_{iT} P_{TI}} \quad (6)$$

که در این رابطه:

$i = 1, \dots, c$ نشان‌دهنده‌ی کلاس‌های مشترک بین پاسخ‌های مدل و واقعیت است.

P_{ii} : نشان‌دهنده‌ی سلول‌هایی از کلاس i در واقعیت است که در مدل نیز در همین کلاس قرار گرفته‌اند.

P_{iT} : نشان‌دهنده‌ی مجموع سلول‌هایی از کلاس i در واقعیت است که در کلاس‌های مختلف حاصل از مدل قرار گرفته‌اند.

P_{TI} : نشان‌دهنده‌ی مجموع سلول‌هایی است که توسط مدل در کلاس i قرار گرفته‌اند و در کلاس‌های مختلف حالت واقعیت قرار دارند.

$P(A)$: نشان‌دهنده‌ی تطابق بین پاسخ‌های مدل و واقعیت است.

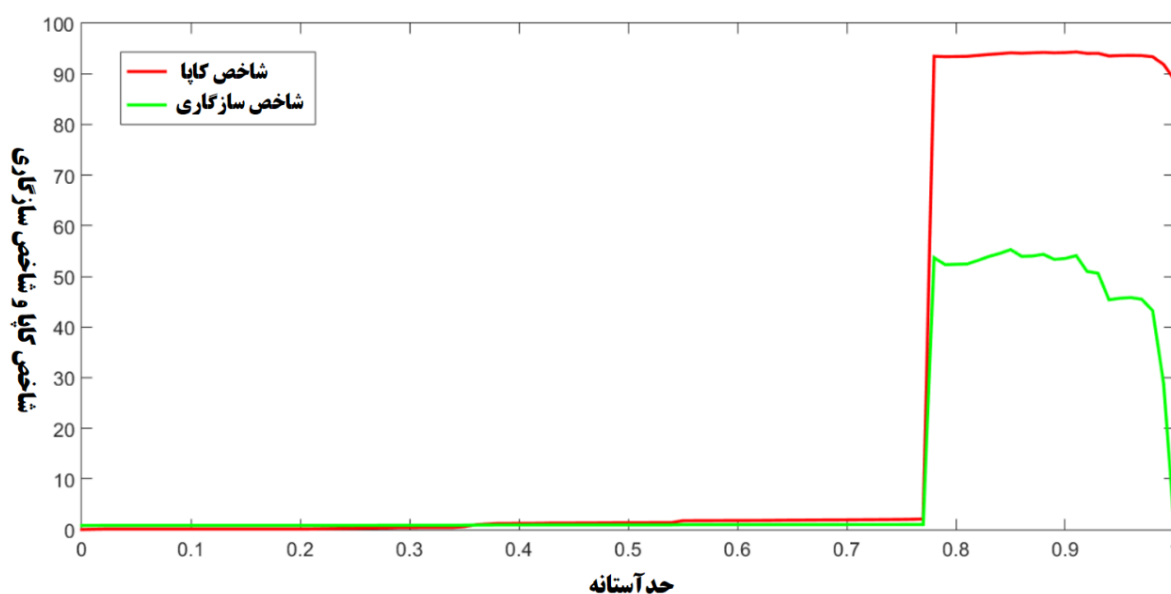
$P(E)$: نشان‌دهنده‌ی عدم تطابق بین پاسخ‌های مدل و واقعیت است.

جهت ارزیابی نقشه برازندگی توسعه شهری سال ۱۳۸۹ با استفاده از شاخص‌های سازگاری و کاپا نیاز به تعریف حد آستانه می‌باشد تا با اعمال آن به نقشه برازندگی، نقشه کاربری شبیه‌سازی شده استخراج شود. همان‌طور که در بخش ۲-۳ بیان شد، چنانچه تعیین حد آستانه به صورت کارشناسی و بر اساس دانش اولیه از منطقه یا برحسب تجربه صورت گیرد، چندان موفق نخواهیم بود زیرا اگر حد آستانه‌ای نامناسب تعریف شود، منجر به ضعیف نشان دادن مدل می‌شود. بدین منظور تمامی حد آستانه‌ها از ۰/۰۱ تا ۱ به فاصله ۰/۰۱ از یکدیگر به نقشه برازندگی توسعه شهری اعمال شده است. با اعمال هر حد آستانه به نقشه برازندگی توسعه شهری، یک نقشه کاربری شبیه‌سازی شده به دست آمد که با مقایسه آن با نقشه کاربری واقعی میزان شاخص‌های سازگاری و کاپا برای هر حد آستانه تعیین شد. سپس حد آستانه‌ای به عنوان حد آستانه بهینه انتخاب شد که دارای بالاترین میزان شاخص‌های سازگاری و کاپا بود. همان‌طور که در شکل ۸ قابل مشاهده است، حد آستانه ۰/۸۵ با به دست دادن شاخص کاپا ۹۴/۳۱ و شاخص سازگاری ۵۵/۲۸، به عنوان حد آستانه بهینه برای نقشه برازندگی توسعه شهری سال ۱۳۸۹ می‌باشد.

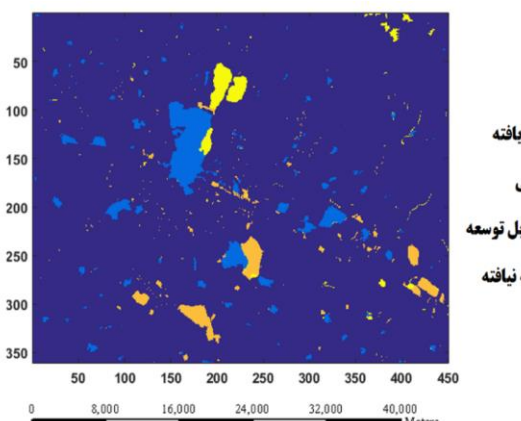
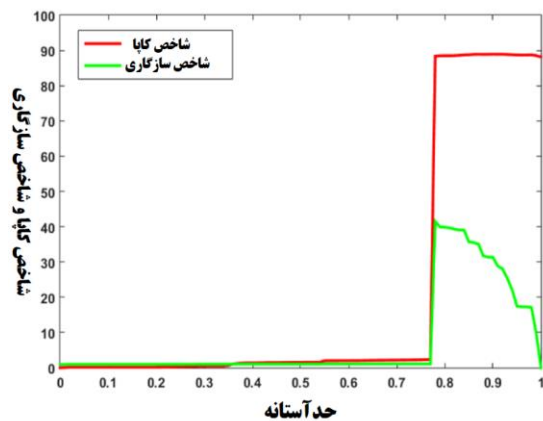
همان‌طور که در بخش اول بیان شد، جهت ارزیابی عملکرد مدل، می‌توان نتایج این مدل را با نتایج پژوهش حسینعلی و همکاران مقایسه نمود. آن‌ها یک مدل عامل مبنای نوین، برای شبیه‌سازی گسترش کاربری اراضی

شهری در منطقه‌ای منطبق با منطقه تحقیق حاضر ارائه کردند. در این مدل، توسعه‌دهندگان زمین به صورت عامل‌هایی در نظر گرفته شده‌اند که در منطقه به صورت مشخص به حرکت و کاوش می‌پردازند و پس از سنجش شرایط نقاط مختلف برای توسعه، مطلوب‌ترین آن‌ها را توسعه می‌دهند. آن‌ها کاملاً مشابه با تحقیق حاضر از داده‌های مربوط به سال ۱۳۸۴ و نقشه‌های معیار دسترسی، جذابیت و ارزش زمین به عنوان ورودی مدل و از داده‌های سال ۱۳۸۹ به منظور ارزیابی نتایج استفاده کردند. در نهایت با تنظیم پارامترهای مدل، بر مبنای شاخص کاپا به دقت ۷۸/۱۷٪ در پیش‌بینی توسعه‌های حادث شده در سال ۱۳۸۹ رسیدند که در مقایسه با نتایج مدل ارائه شده، نتایج بسیار ضعیف‌تری می‌باشد.

مقایسه بالا می‌تواند مهر تأییدی بر دقت و توانایی مدل حاضر در پیش‌بینی توسعه‌های آتی باشد. از این رو با به کارگیری پارامترها و وزن‌های بهینه شده و نقشه‌های ارزش زمین، دسترسی و جذابیت سال ۱۳۸۹ به عنوان ورودی‌های مدل، نقشه برازندگی توسعه شهری سال ۱۳۹۴ با مقدار شاخص عامل نسبی ۹۳٪ تولید شد. سپس با اعمال حد آستانه بهینه ۰/۸۵ به این نقشه برازندگی، نقشه کاربری شبیه‌سازی شده سال ۱۳۹۴ با مقدار شاخص کاپا ۸۸/۷۳٪ و شاخص سازگاری ۳۹/۰۵٪ استخراج شد. شکل ۹ نقشه کاربری شبیه‌سازی شده سال ۱۳۹۴، به همراه نمودار رابطه شاخص‌های سازگاری و کاپا با مقدار حد آستانه این نقشه را نمایش داده است.



شکل ۸- نمودار رابطه شاخص‌های سازگاری و کاپا با مقدار حد آستانه



شکل ۹- نقشه کاربری شبیه‌سازی شده سال ۱۳۹۵ به همراه نمودار رابطه شاخص‌های سازگاری و کاپا این نقشه با مقدار حد آستانه

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پروسه واسنجی مدل اتوماسیون سلولی فازی رشد شهری منطقه قزوین پیاده‌سازی شد که نتایج این تحقیق، تأییدی بر توانایی مدل اتوماسیون سلولی، منطق فازی و همچنین الگوریتم ژنتیک در حوزه مدل‌سازی توسعه شهری و تغییرات کاربری اراضی می‌باشد.

در این تحقیق از سه معیار ارزش زمین، دسترسی و جذابیت برای مدل‌سازی توسعه استفاده گردید. این معیارها نماد سه رکن توسعه پایدار می‌باشند، بدین‌صورت که ارزش زمین، دسترسی و جذابیت به ترتیب نمایانگر بخش اقتصاد، بوم‌شناسی و تساوی حقوقی هستند. این معیارها حاصل اثر و ترکیب چندین لایه اطلاعاتی از قبیل قیمت زمین، طرح توسعه، شیب، جنس خاک، همسایگی، چشم‌انداز و ارتفاع هستند. بدین‌جهت مدل ارائه‌شده با توجه به دارا بودن پارامترهای متعدد و مؤثر برای تطبیق با محیط، بسیار انعطاف‌پذیر بوده و نظر به کسب نتایج مطلوب توسط آن، قابلیت استفاده در سایر مناطق را دارد.

در حقیقت مدل با به‌کارگیری داده‌های دوره ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۹ با مقدار شاخص کاپا ۹۴/۳۱٪ و مقدار شاخص سازگاری ۵۵/۲۸٪ واسنجیده و تنظیم شد، سپس با استفاده از داده‌های سال ۱۳۸۹ و ۱۳۹۴ مورد ارزیابی قرار گرفت. طی فرآیند ارزیابی، مدل به شاخص کاپا ۸۸/۹۳٪ و شاخص سازگاری ۴۱/۴۹٪ در پیش‌بینی مناطق توسعه‌یافته سال ۱۳۹۴ دست‌یافت که مقدار قابل وجه و مناسبی به شمار می‌رود. البته زمانی به‌دقت بالای این مدل پی می‌بریم که نتایج این پژوهش را با نتایج مدل عامل مبنای ارائه‌شده توسط حسینعلی و همکاران مقایسه

می‌کنیم. آن‌ها با به‌کارگیری معیارها و داده‌هایی مشابه، پس از تنظیم پارامترها، تنها به شاخص کاپای ۷۸/۱۷٪ در پیش‌بینی مناطق توسعه‌یافته سال ۱۳۸۹ دست‌یافت‌اند. در نگاهی دقیق‌تر به نقشه کاربری شبیه‌سازی شده سال ۱۳۹۴ و نقشه کاربری واقعی همان سال به این موضوع پی می‌بریم که مدل در پیش‌بینی توسعه‌های صورت گرفته در اطراف شهرها و مناطق در حال شهری شدن، بسیار موفق‌تر از توسعه‌های به وقوع پیوسته در روستاها و شهرک‌های جدید عمل نموده است. البته این امر طبیعی به نظر می‌رسد، چراکه توسعه‌های صورت گرفته در روستاهای این منطقه تا حدود زیادی تعصبی است. همچنین توسعه شهرک‌های جدید نیز بیشتر تحت تأثیر تصمیمات دست‌اندرکاران امر بوده تا مطلوبیت آن مناطق.

درمجموع نتایج این تحقیق نشان داد که گرچه توسعه شهری امری به‌غایت پیچیده و پیش‌بینی آن دشوار است، ولی با انتخاب صحیح مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر آن و استفاده از مدلی که دارای قابلیت انطباق بالایی با شرایط باشد، می‌توان تا حدود زیادی توسعه‌های آتی را پیش‌بینی کرد و در جهت مدیریت و هدایت بهتر آن‌ها گام برداشت.

۷- پیشنهادها

پس از انجام این پژوهش، پیشنهادهایی جهت انجام تحقیقات آتی به شرح زیر ارائه می‌گردند:

- در استفاده از اتوماسیون سلولی در شبیه‌سازی رشد شهری برخی محدودیت‌ها دیده شد. این مدل فاقد توانایی لازم برای اعمال بازخوردهای رفتارهای اجتماعی مشارکت‌کنندگان (مانند رفتار ساکنان، سازندگان و برنامه‌ریزان و مدیران شهری) در امور

شهری است که این رفتارها و تعاملات میان آن‌ها با محیط‌های شهری، در فرآیند پیش‌بینی رشد شهری بسیار مؤثر هستند. برای حل این مشکل روش ترکیبی میان مدل اتوماسیون سلولی واسنجیده توسط روش‌های هوشمند و مدل عامل مبنا پیشنهاد می‌گردد. این مدل ترکیبی توانایی زیادی در شبیه‌سازی فرآیند رشد شهری با لحاظ پارامترهای ایستا و پویا که دربرگیرنده‌ی غالب پارامترهای دخیل در فرآیند رشد شهری است، فراهم خواهد نمود.

- مدل حاضر در این پژوهش تنها با فرض تبدیل مناطق غیرشهری به مناطق شهری توسعه داده شده است. از این رو غنی‌سازی مدل به نحوی که بتواند انواع تغییر

کاربری‌ها را در کنار تغییر کاربری‌های شهری در نظر بگیرد، می‌تواند از راهبردهای دیگر پیش رو برای تحقیقات آتی باشد.

- برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد تا برای اخذ نتایج بهتر از الگوریتم‌های ترکیبی و مبتنی بر خرد جمعی مانند *Cuckoo-ABC*، *ABC-PSO* و *Cuckoo-PSO* برای واسنجی مدل‌های سلولی فاز رشد شهری استفاده شود. به نظر می‌رسد الگوریتم‌های ترکیبی می‌توانند نتایج بهتری را تولید نمایند، چراکه مدل‌های ترکیبی می‌توانند از نقاط قوت الگوریتم‌ها استفاده نموده و از ضعف‌های آن‌ها صرف‌نظر نمایند.

مراجع

- [1] G. Zhou, C. Li, M. Li, J. Zhang, and Y. Liu, "Agglomeration and diffusion of urban functions: An approach based on urban land use conversion," *Habitat International*, vol. 56, pp. 20-30, 2016.
- [2] Y. Pan, M. Zhai, L. Lin, Y. Lin, J. Cai, J.-s. Deng, et al., "Characterizing the spatiotemporal evolutions and impact of rapid urbanization on island sustainable development," *Habitat International*, vol. 53, pp. 215-227, 2016.
- [3] S. Deep and A. Saklani, "Urban sprawl modeling using cellular automata," *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, vol. 17, pp. 179-187, 12// 2014.
- [4] F. Hosseinali, "Developing an Agent-Based Model with Spatial Optimization for Land Use Development in GIS," P.H.D Thesis in Department of Geospatial Information Systems, Faculty of Geodesy and Geomatics, K.N.T University of Technology, Tehran, 2012.
- [5] F. Naghibi, "Intelligent designation of suitable spaces for optimal city growth using spatial temporal analysis," P.H.D Thesis in Department of Geomatics and Surveying Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, 2016.
- [6] P. Veneri and V. Ruiz, "Urban-To-Rural Population Growth Linkages: Evidence from OECD T13 Regions," *Journal of regional science*, vol. 56, pp. 3-24, 2016.
- [7] R. I. McDonald, P. J. Marcotullio, and B. Güneralp, "Urbanization and global trends in biodiversity and ecosystem services," in *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem services: Challenges and opportunities*, ed: Springer, 2013, pp. 31-52.
- [8] Y. Feng, Y. Liu, and M. Batty, "Modeling urban growth with GIS based cellular automata and least squares SVM rules: a case study in Qingpu–Songjiang area of Shanghai, China," *Stochastic environmental research and risk assessment*, vol. 30, pp. 1387-1400, 2016.
- [9] X. Liu, L. Ma, X. Li, B. Ai, S. Li, and Z. He, "Simulating urban growth by integrating landscape expansion index (LEI) and cellular automata," *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 28, pp. 148-163, 2014.
- [10] Y. Liu, D. Liu, Y. Liu, J. He, L. Jiao, Y. Chen, et al., "Rural land use spatial allocation in the semiarid loess hilly area in China: Using a Particle Swarm Optimization model equipped with multi-objective optimization techniques," *Science China Earth Sciences*, vol. 55, pp. 1166-1177, 2012.
- [11] R. White and G. Engelen, *Environment and Planning A*, vol. 25, p. 1175, 1993.
- [12] X. Liu, X. Li, X. Shi, S. Wu, and T. Liu, "Simulating complex urban development using kernel-based non-linear cellular automata," *Ecological Modelling*, vol. 211, pp. 169-181, 2008/02/24/ 2008.
- [13] E. Foroutan, "Fuzzy Integration Genetic Urban Growth Modeling Using Cellular Automata Algorithms," M.Sc. Thesis in Department of Geomatics and Surveying Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, 2012.
- [14] K. Al-Ahmadi, L. See, A. Heppenstall, and J. Hogg, "Calibration of a fuzzy cellular automata model of urban dynamics in Saudi Arabia," *Ecological Complexity*, vol. 6, pp. 80-101, 2009.

- [15] F. Hosseinali, A. A. Alesheikh, F. Nourian, "Developing an Agent-Based Model to Simulate Urban Land-Use Expansion (Case Study: Qazvin)," *Urban - Regional Studies and Research Journal*, vol. 4, no. 14, pp. 1-6, Autumn 2012.
- [16] R. White and G. Engelen, "Cellular Automata as the Basis of Integrated Dynamic Regional Modelling," *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 24, pp. 235-246, 1997/04/01 1997.
- [17] K. C. Clarke, S. Hoppen, and L. Gaydos, "A Self-Modifying Cellular Automaton Model of Historical Urbanization in the San Francisco Bay Area," *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 24, pp. 247-261, 1997/04/01 1997.
- [18] B. Straatman, R. White, and G. Engelen, "Towards an automatic calibration procedure for constrained cellular automata," *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 28, pp. 149-170, 2004/01/01/ 2004.
- [19] X. Li and A. G.-O. Yeh, "Calibration of cellular automata by using neural networks for the simulation of complex urban systems," *Environment and Planning A*, vol. 33, pp. 1445-1462, 2001.
- [20] F. Wu, "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, 1998/01/01 1998.
- [21] X. Li and A. G.-O. Yeh, "Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS," *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 16, pp. 323-343, 2002/01/06 2002.
- [22] S. Openshaw and C. Openshaw, *Artificial Intelligence in Geography* vol. null, 1997.
- [23] C. M. Almeida, J. M. Gleriani, E. F. Castejon, and B. S. Soares-Filho, "Using neural networks and cellular automata for modelling intra-urban land-use dynamics," *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 22, pp. 943-963, 2008/09/01 2008.
- [24] A. G.-O. Yeh and X. Li, "A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS," *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 28, pp. 733-753, 2001.
- [25] Q. Yang, X. Li, and X. Shi, "Cellular automata for simulating land use changes based on support vector machines," *Computers & Geosciences*, vol. 34, pp. 592-602, 2008/06/01/ 2008.
- [26] Y. Han and H. Jia, "Simulating the spatial dynamics of urban growth with an integrated modeling approach: A case study of Foshan, China," *Ecological Modelling*, vol. 353, pp. 107-116, 2017.
- [27] I. Blečić, A. Cecchini, and G. A. Trunfio, "Cellular automata simulation of urban dynamics through GPGPU," *The Journal of Supercomputing*, vol. 65, pp. 614-629, 2013.
- [28] Y. Feng, Y. Liu, X. Tong, M. Liu, and S. Deng, "Modeling dynamic urban growth using cellular automata and particle swarm optimization rules," *Landscape and Urban Planning*, vol. 102, pp. 188-196, 2011/09/15/ 2011.
- [29] J. Yang, G. a. Tang, M. Cao, and R. Zhu, "An intelligent method to discover transition rules for cellular automata using bee colony optimisation," *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 27, pp. 1849-1864, 2013.
- [30] F. Yao, C. Hao, and J. Zhang, "Simulating urban growth processes by integrating cellular automata model and artificial optimization in Binhai New Area of Tianjin, China," *Geocarto International*, vol. 31, pp. 612-627, 2016/07/02 2016.
- [31] M. Cao, S. J. Bennett, Q. Shen, and R. Xu, "A bat-inspired approach to define transition rules for a cellular automaton model used to simulate urban expansion," *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 30, pp. 1961-1979, 2016/10/02 2016.
- [32] M. Cao, G. a. Tang, Q. Shen, and Y. Wang, "A new discovery of transition rules for cellular automata by using cuckoo search algorithm," *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 29, pp. 806-824, 2015.
- [33] F. Herrera, "Genetic fuzzy systems: taxonomy, current research trends and prospects," *Evolutionary Intelligence*, vol. 1, pp. 27-46, 2008/03/01 2008.
- [34] S. Liu and S. Prieler, "Spatial patterns and dynamic mechanisms of urban land use growth in China: Case studies in Beijing and Shanghai," 2002.
- [35] P. M. Torrens and D. O'Sullivan, "Cellular automata and urban simulation: where do we go from here?," ed: SAGE Publications Sage UK: London, England, 2001.
- [36] P. Waddell, "Towards a Behavioral Integration of Land Use and Transportation Modeling," 2001.
- [37] K. Williams, E. Burton, and M. Jenks, "Achieving sustainable urban form: an introduction," *Achieving sustainable urban form*, pp. 1-5, 2000.

- [38] R. P. Juliao, "Accessibility and GIS, "1999.
- [39] M. Batty and Y. Xie, *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 21, p. 531, 1994.
- [40] F. Wu and C. J. Webster, "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, 1998/02/01 1998.
- [41] D. P. Ward, A. T. Murray, and S. R. Phinn, "A stochastically constrained cellular model of urban growth," *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 24, pp. 539-558, 200 11/01/2000.
- [42] R. White and G. Engelen, "High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems," *Computers, environment and urban systems*, vol. 24, pp. 383-400, 2000.
- [43] X. Li and A. G. O. Yeh, *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 14, p. 131, 2000.
- [44] L. A. Zadeh, "Information and control," *Fuzzy sets*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [45] D. Kim, Y.-S. Choi, and S.-Y. Lee, "An accurate COG defuzzifier design using Lamarckian co-adaptation of learning and evolution," *Fuzzy sets and systems*, vol. 130, pp. 207-225, 2002.
- [46] E. H. Mamdani and S. Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller," *International journal of man-machine studies*, vol. 7, pp. 1-13, 1979.
- [47] S. Beguería, "Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management," *Natural Hazards*, vol. 37, pp. 315-329, 2006.
- [48] T. Fawcett, "An introduction to ROC analysis," *Pattern recognition letters*, vol. 27, pp. 861-878, 2006.
- [49] R. G. Pontius and L. C. Schneider, "Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA," *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 85, pp. 239-248, 2001.
- [50] S. Sivanandam and S. Deepa, "Genetic algorithms," in *Introduction to genetic algorithms*, ed: Springer, 2008, pp. 15-37.
- [51] B. C. Pijanowski, S. Pithadia, B. A. Shellito, and K. Alexandridis, "Calibrating a neural network-based urban change model for two metropolitan areas of the Upper Midwest of the United States," *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 19, pp. 197-215, 2005.
- [52] A. M. García, I. Santé, M. Boullón, and R. Crecente, "A comparative analysis of cellular automata models for simulation of small urban areas in Galicia, NW Spain," *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 36, pp. 291-301, 2012.
- [53] H. Wang, S. He, X. Liu, L. Dai, P. Pan, S. Hong, et al., "Simulating urban expansion using a cloud-based cellular automata model: A case study of Jiangxia, Wuhan, China," *Landscape and urban planning*, vol. 110, pp. 99-112, 2013.
- [54] Y. Wang and S. Li, "Simulating multiple class urban land-use/cover changes by RBFN-based CA model," *Computers & Geosciences*, vol. 37, pp. 111-121, 2011.
- [55] R. G. Pontius, W. Boersma, J.-C. Castella, K. Clarke, T. de Nijs, C. Dietzel, et al., "Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change," *The Annals of Regional Science*, vol. 42, pp. 11-37, 2008.