

دانشگاه آزاد اسلامی فومن و شفت - ۲۲ مرداد ۱۴۰۱

National Conference on Civil Engineering and Architecture with Focus on Sustainable Development

## همایش ملی عمران و معماری با رویکردی بر توسعه پایدار

بسمه تعالی

گواهی ارایه مقاله

بدینوسیله گواهی می گردد :

جناب آقای / سرکار خانم : روزبه شاد به عنوان نویسنده همکار



کد پذیرش

76E44374BAA1

مقاله "پیش بینی توسعه افقی شهرها با استفاده از اتوماتای سلولی فازی (FCA) در سیستم اطلاعات مکانی (GIS)) جهت نیل به توسعه پایدار شهری (مطالعه موردی شهر مشهد)"

را در همایش ملی «عمران و معماری با رویکردی بر توسعه پایدار» که در تاریخ ۲۲ مردادماه سال ۱۳۹۴ به میزبانی دانشگاه آزاد اسلامی واحد فومن و شفت برگزار گردید؛ بصورت شفاهی ارائه نمودند.

رئیس همایش

مجتبی ملکی چوئری



دبیر علمی همایش

میرعلی محمد میر گزار

دبیر اجرایی همایش

حامد پوراحمدی صفت



## پیش بینی توسعه افقی شهرها با استفاده از اتوماتای سلولی فازی (FCA) در سیستم اطلاعات مکانی (GIS) جهت نیل به توسعه پایدار شهری (مطالعه موردی شهر مشهد)

فرهاد رستمی گله<sup>۱\*</sup>، روزبه شاد<sup>۲</sup>، مرجان قائمی<sup>۳</sup>

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد عمران - سیستم اطلاعات مکانی دانشگاه فردوسی مشهد

Farhad\_roostami@yahoo.com

۲ استادیار گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

Rouzbeh\_shad@yahoo.com

۳ استادیار گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

Mghaemi270@gmail.com

### چکیده

رشد شهری نتیجه اثرات فیزیکی و انسانی در گذر زمان است. در بسیاری از پویایی‌های شهری این اثرات در تقابل با توسعه پایدار قرار می‌گیرند. گسترش سریع و بی رویه شهرها منجر به ساخت و سازهای بدون برنامه‌ریزی و رشد مهارنشده می‌شود. لذا این رفتارهای ناپایدار، مشکلات فراوانی در حوزه‌های زیست محیطی، اقتصادی و فرهنگی به وجود آورده است، که می‌تواند بسیار مخاطره‌آمیز و نگران‌کننده باشد. به این ترتیب مدل سازی و پیش‌بینی رفتار شهر، کمک فراوانی به برنامه ریزان و تصمیم‌گیرندگان جهت درک چشم انداز پیش‌رو شهر جهت نیل به توسعه پایدار شهری می‌نماید. در این پژوهش، وجهی از توسعه پایدار شهری که شامل گسترش فیزیکی شهر و جنبه‌های آن در راستای افقی می‌شود، در شهر مشهد مورد مطالعه قرار گرفته است و در نهایت پیش‌بینی رفتار شهری از اهداف اصلی مطالعه می‌باشد. در این تحقیق با به کارگیری مدل اتوماتای سلولی (CA) توسعه‌یافته بر مبنای سیستم اطلاعات مکانی (GIS) و ارائه مدلی قدرتمند و ساده، شبیه‌سازی فرایندهای پیچیده شهری انجام شده است. از طرفی در پدیده‌های شهری نوعی عدم قطعیت وجود دارد که منجر به فقدان صحت و دقت مورد نیاز در تصمیم‌گیری‌ها خواهد شد. از این رو بیان فازی قوانین انتقال به منظور پشتیبانی از عدم قطعیت موجود منجر به افزایش قابلیت مدل‌سازی فرایندهای مکانی شده و نتایج واقع بینانه‌تری را برای تصمیم‌گیرندگان فراهم می‌سازد.

**واژه‌های کلیدی:** مدل‌سازی شهری، توسعه پایدار، اتوماتای سلولی فازی، سیستم اطلاعات مکانی، شهر مشهد

### ۱- مقدمه

#### ۱-۱- توسعه پایدار شهری

اصطلاح پایداری در ارتباط با الگوهای توسعه انسانی ابتدا در سال ۱۹۷۲ در مطالعه‌ای با موضوع استفاده از منابع جهانی و با عنوان محدودیت‌هایی برای رشد<sup>۱</sup> به کار برده شد. نویسندگان این اثر معتقد بودند که اگر نرخ رشد جمعیت و مصرف منابع با روند کنونی ادامه یابد، در اواسط قرن ۲۱ اضمحلال شدیدی در منابع جهان رخ خواهد داد و تنها راه حل تغییر این جریان، رشد و تثبیت شرایط جدید اقتصادی و زیست محیطی (که پایداری مداوم برای آینده را نیز تضمین کند) می‌باشد [1].

<sup>1</sup> The Limits of Growth



این اثر مقدمه‌ای برای چالش‌های جهانی در زمینه پایداری منابع بوده و شدت توجهات به این موضوع موجب گسترش نظریه‌ها و مباحثی در این غالب گردید، که خود را در غالب اصطلاحاتی مانند توسعه پایدار، توسعه پایدار شهری و نظیر آن تداعی کرد. در واقع توسعه پایدار توسعه‌ای است که تداوم بیابد [2] و بر پایه هوشیاری انسان نسبت به خود و نسبت به منابع کره زمین استوار است و خواهان یک سبک زندگی پایدار برای همه انسان‌ها بوده، و مخالف مصرف بیش از اندازه و اتلاف منابع و بی‌توجهی به نسل‌های آینده و قطع رابطه با گذشته است [3]. توسعه پایدار خود شامل سه محور اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی می‌باشد و معمولاً در قالب این سه محور به بررسی پایداری توسعه در سیستم‌ها می‌پردازد. توسعه پایدار شهری نیز یکی از مفاهیمی است که برگرفته از مفاهیم پایداری و توسعه پایدار بوده و خواهان توسعه‌ای است که منطبق با نیازهای ساکنان شهری (زیستی، اقتصادی و اجتماعی) باشد. همچنین در توسعه پایدار شهری به نقش دولت و تصمیم‌گیرندگان توسعه شهری در تحقق این نوع توسعه تاکید می‌گردد [4].

### ۱-۲- توسعه پایدار کاربری اراضی شهری

یکی از اهداف برنامه‌ریزی کاربری اراضی شهری، پایداری است. این موضوع به آن معناست که از امکانات و توان بالقوه هر قطعه زمین چنان بهره‌گیری شود، که این توان نه تنها کاهش نیابد و از بین نرود بلکه به طور مداوم بر ظرفیت و ایستایی آن افزوده گردد. زیرا که زمین کالایی محدود و تجدیدنپذیر بوده و از طرف دیگر بستر فضای زندگی و نیاز مبرم و حیاتی بشر است [4].

از اصولی که برای برنامه‌ریزی کاربری اراضی شهری جهت تحقق پایداری در رشد فیزیکی شهر پیشنهاد گشته است، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- رشد شهری فشرده و کارا
- گسترش مسکن و محیط زندگی مناسب
- تنوع و تعادل در توزیع فضایی کاربری‌ها و گسترش هم‌زمان کاربری‌های مسکونی و تجاری و نظیر آن
- وجود زیرساخت‌های شهری (مانند سیستم فاضلاب، آب‌رسانی و نظیر آن)
- توجه به ویژگی‌های زیست محیطی در مکان‌گزینی کاربری‌ها
- حفظ اراضی کشاورزی پیرامون شهر

### ۱-۳- رشد پراکنده (Sprawl) به عنوان یکی از عوامل ناپایداری‌های شهری

Sprawl اصطلاحی است که معمولاً به رشد افقی شهر، پراکندگی شهری و گستردگی شهری اطلاق می‌گردد و نوعی از رشد فیزیکی شهر است که در آن قطعات اراضی توسعه نیافته به وسیله سکونت‌گاه‌های مسکونی اشغال شده و سطحی که شهر بر روی آن قرار گرفته است، شکل ناپیوسته می‌یابد [6].

ویژگی‌های این نوع رشد فیزیکی عبارتند از: رشد بدون برنامه‌ریزی، بدون کنترل و ناهماهنگ با سایر قسمت‌های شهر، که در عین حال نتوانسته ترکیب کاربردی از کاربری‌ها را در درون خود ایجاد کند. با کاربری‌های محیط خود نیز نتوانسته ارتباط برقرار کند. مظاهر آن نمایی از تراکم کم و به شکل نواری بوده و از رشد پراکنده، جهشی و منزوی برخوردار می‌باشد. همان‌طور که از ویژگی‌های افقی شهر بر می‌آید، این نوع از رشد فیزیکی شهر در بسیاری از موارد برخلاف توسعه پایدار شهری است. عمده تاثیراتی که موجب ناپایداری شهری در رشد افقی می‌شوند، عبارتند از:

۱. تاثیرات محیطی: مهم‌ترین تاثیراتی که رشد افقی بر روی محیط می‌گذارد از بین بردن چشم اندازهای طبیعی و آلودگی هوا می‌باشد [7]. آلودگی هوا به دلیل استفاده بیش‌تر از اتومبیل‌های شخصی و نبود وسایل نقلیه عمومی در فضاهای جدید شهری، به وجود می‌آید.
۲. تاثیرات اقتصادی: تاثیرات منفی اقتصادی در ارائه خدمات و زیرساخت‌های شهری توسط دولت، موجب ناپایداری‌هایی در رشد افقی می‌شوند. از آنجایی که تراکم در این نوع فرم شهری بسیار پایین بوده و جمعیت

در فضاهای وسیعی پخش شده است؛ برای دولت استقرار زیرساخت‌های شهری از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد.

۳. تاثیرات اجتماعی: کاهش عدالت اجتماعی تاثیر منفی بر روی سلامت افراد گذاشته و باعث از بین بردن زندگی اجتماعی، تبعیض نژادی، تفکیک طبقاتی جامعه، ناتوانی برای پذیرفتن شیوه جدید زندگی و نابودی ساختار خانواده توسط ساکنین می‌گردد. این موارد می‌تواند اثراتی منفی بر رشد افقی شهر را در بر داشته باشد [8].

#### ۴-۱- شهرها به عنوان سیستم پیچیده

شهرها به عنوان یک سیستم پیچیده شناخته می‌شوند. این موضوع با در نظر گرفتن خصوصیات ذاتی شهرها نظیر خود سازماندهی، رفتار غیر خطی و غیرمنظره و نظیر آن درک می‌گردد [9]. یکی از پیچیدگی‌های زمانی و مکانی شهرها رشد افقی شهری می‌باشد. تعاملات به وجود آمده بین تعداد زیادی از عوامل دخیل در رشد شهری، دارای یک رابطه غیرخطی می‌باشد. این عوامل معمولا با متراکم‌سازی مکانی بزرگ مقیاس و یا با الگوهای خوشه‌بندی نشان داده می‌شوند. از این موضوع می‌توان دریافت که رشد شهری یک سیستم خود سازمان‌ده و خود همانند<sup>۲</sup> است. به عنوان یک سیستم پیچیده، رشد شهری دارای درجه‌ای از غیر قابل پیش‌بینی بودن می‌باشد، که شامل تغییرات سریع و غیرمنتظره است [10]. لذا مدل‌های به کار گرفته شده در مدل‌سازی شهری باید قادر به شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده باشند. این سیستم‌ها دارای الگوهای زمانی و مکانی بوده و همچنین عوامل اشاره شده، در آن‌ها دخیل هستند. این موضوع باعث به وجود آمدن رفتارهای غیرخطی در سیستم می‌گردد. یکی از مدل‌های استفاده شده در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده، اتوماسیون سلولی می‌باشد [9]. اتوماسیون سلولی برای مدل‌سازی شهری (که به طور ذاتی پویا بوده) مناسب است. با وجود آن که این مدل از مکانیزم ساده‌ای استفاده می‌کند، توانایی ایجاد الگوهای زمانی - مکانی به پیچیدگی‌های نامحدود را دارا می‌باشد [11][12][13][14]. در مدل‌سازی اتوماسیون سلولی به کارگیری عوامل موثر بر رشد شهری از طریق قوانین انتقال محلی ممکن می‌باشد [15]. این قوانین براساس عوامل اجتماعی، فیزیکی و اقتصادی، که بر رشد و توسعه شهری موثر هستند، ایجاد گردیده‌اند. اتوماسیون سلولی می‌تواند در تعریف قوانین انتقال از اطلاعات به دست آمده از سیستم اطلاعات مکانی<sup>۳</sup> استفاده می‌نماید [16]. بنابراین یک مدل خوب شهری بر پایه اتوماسیون سلولی، نیازمند متدهای توانمند و مناسب اعتبارسنجی می‌باشد. این متدها نقش مهمی را در توسعه مدل ایفا می‌کنند [17].

#### ۲- پیشینه موضوع

اتوماتای سلولی، اولین بار در اواخر ۱۹۴۰ توسط Ulam و Neumann با الگوبرداری از ماشین تورینگ توسعه یافت [18]. در سال ۱۹۸۴ نیز Wolfram ثابت کرد که پدیده‌های طبیعی را می‌توان با اتوماتای سلولی نشان داد. این نظریه پایه‌ای شد که اتوماتای سلولی را سیستم‌های دینامیکی گسسته‌ای که در آن‌ها امکان برقراری تعامل میان اجزای تولید کننده تغییرات (در ابعاد فضا و مکان) می‌باشد، تعریف کنند. شبیه‌سازی با اتوماتای سلولی خیلی زود برای علوم فیزیکی، علوم طبیعی و ریاضیات کاربردی شد. در سال ۱۹۷۹ توبلر برای اولین بار از مدل‌های فضای سلولی برای مدل‌سازی جغرافیایی استفاده کرد [19]. قابلیت CA برای شبیه‌سازی رشد شهری منجر به ظهور انواع قوانین انتقال شد. کارهای انجام شده را بر اساس قوانین انتقال می‌توان به پنج دسته تقسیم‌بندی کرد [19].

در قوانین انتقال Strictly Orthodox وضعیت یک سلول تابعی از وضعیت سلول فعلی و سلول‌های همسایه است که با استفاده از قوانین ساده تعیین می‌شوند. در پژوهش Jeneratte و Wu در سال ۲۰۰۱ و Yuzer در سال ۲۰۰۴ قوانین انتقال بر پایه تعداد منحصر به فردی از سلول‌های همسایه در هر کاربری زمین تعریف شدند. از دیگر تحقیقات مرتبط با قوانین

<sup>2</sup> Self similarity

<sup>3</sup> Geospatial Information System

انتقال Strictly Orthodox می‌توان به Besussi و همکاران در سال ۱۹۹۸ و همچنین Stevens و Dragicevic در سال ۲۰۰۷ و Ward و همکاران در سال ۲۰۰۰ اشاره کرد که قوانین انتقال به کار رفته، بر پایه قوانین پیچیده تری بودند. در قوانین انتقال بر اساس پتانسیل انتقال و احتمالات، عامل اصلی تکامل شهری پتانسیل انتقال است. به این صورت که احتمال تغییر هر سلول برای کاربری زمین تابعی از کاربری در حال حاضر سلول و دیگر عوامل محدود کننده تکامل برای کاربری زمین می‌باشد. با مقایسه قوانین انتقال پتانسیلی به کار گرفته شده در تحقیقات بررسی شده می‌توان نتیجه گرفت که پتانسیل انتقال معمولاً به عنوان یک مجموع وزنی یا به عنوان ترکیب تعدادی از فاکتورها که خارج از اثر همسایگی وضعیت‌ها هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این، از پارامتر اختلال تصادفی<sup>۴</sup> نیز جهت مدل‌سازی عدم قطعیت (مرتبط با فرایندهای شهری)، استفاده شده است. در مدل مذکور، ارزش صفر برای زمانی که یک سلول نمی‌تواند توسعه یابد و ارزش یک برای وضعیتی که قادر به توسعه یافتن می‌باشد، تعریف می‌گردد. این گونه ارزش‌دهی سبب به وجود آمدن محدودیت‌هایی در مدل خواهد شد. هنگامی که پتانسیل انتقال به عنوان یک مجموع وزنی مورد استفاده قرار می‌گیرد، از تکنیک‌های مختلفی می‌توان برای تعیین وزن استفاده نمود [19]. به عنوان مثال در تحقیقات Wu در سال ۲۰۰۲، Sui و Zeng در سال ۲۰۰۱، از رگرسیون لجستیک برای وزن‌دهی استفاده شده است. همچنین روش‌های ارزیابی چندمعیاره، در تحقیقات Wu و Webster در سال ۱۹۹۸ و Wu در سال ۱۹۹۸، به منظور وزن دهی به پارامترهای مختلف به کار گرفته شدند. با بررسی سایر تحقیقات مرتبط به این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که از توابع پیچیده‌تری برای محاسبه پتانسیل استفاده می‌شود. به عنوان مثال، Wu در سال ۱۹۹۸ با در نظر گرفتن این موضوع که وضعیت‌ها با امتیاز بالاتر، تمایلشان برای توسعه بیشتر می‌باشد، مدل پتانسیل را با استفاده از توابع نمایی توجیه نمودند [19]. نوع دیگری از توابع پیچیده در محاسبه پتانسیل، مبتنی بر نظریه‌های آماری یا شهری می‌باشند. در مدل Almedia در سال ۲۰۰۳ احتمال انتقال بر اساس وزن شواهد (برای عوامل مختلف)، محاسبه شد. Li و Yeh نیز در سال ۲۰۰۲ با استفاده از آنالیز PCA قوانین انتقال را تعریف نمودند. همچنین Yeh و Kam در سال ۲۰۰۵ به کمک ابزارهای آماری به شناسایی عوامل رشد (به شکل توصیفات و اثر عدم تجانس) پرداختند. مدل Caruso و همکاران در سال ۲۰۰۵ نیز بر پایه اکونومیک شهری بنا شده و اجازه درک بهتری را در رابطه با فرایندهای شهری به محققان داده است. He و همکاران در سال ۲۰۰۸ پتانسیل توسعه شهری را با در نظر گرفتن اثر توزیع فضایی سرمایه و جمعیت محاسبه کردند. Yeh و Li در سال ۲۰۰۲، تراکم و محدودیت توابع را به منظور شبیه‌سازی انواع الگوهای شهری به کار بردند [19].

قوانین انتقال نوع سوم، روابطی بر پایه شکل و فرم شهری می‌باشند که به منظور تولید الگوهای فضایی رشد شهری به کار گرفته می‌شوند. نمونه‌ای از قوانین مذکور در مدل SLEUTH مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین مدل الگو-برون‌یابی<sup>۵</sup> که قادر است چهار نوع رشد شهری خودبه‌خودی، گسترش قسمت مرکزی، گوشه‌ها و رشد جاده‌ها را مدل‌سازی کند، نمونه دیگری از روش‌های مبتنی بر قوانین انتقال نوع سوم می‌باشد [19]. این قوانین انتقال در تحقیقات Li و همکاران در سال ۲۰۰۳ و Clarke و همکاران در سال ۱۹۹۷ استفاده شده است.

نوع چهارم قوانین، از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی از جمله شبکه عصبی مصنوعی، روش‌های مبتنی بر کرنل و یا از استدلال بر اساس CBR (Case-Based Reasoning) استفاده می‌کند. در روش‌های مذکور، فرایند یادگیری الگوریتم (با هدف شناخت الگوهای پیچیده) بر اساس مجموعه‌ای از داده‌های آموزشی و یا از طریق روش‌های داده کاوی (Data Mining) که به طور اتوماتیک قوانین انتقال را بازسازی می‌کنند، انجام می‌شود. این نوع از قوانین را می‌توان در تحقیقات Li و Yeh در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۴، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸ مشاهده نمود. همچنین Yeng و همکاران در سال ۲۰۰۸ برای اولین بار، اتوماتای سلولی مبتنی بر بردار ماشین پشتیبان (SVM) را ارائه کردند. در تحقیق ارائه شده SVM به عنوان روشی برای ساخت قوانین انتقال استفاده شده است زیرا SVM در برخورد با روابط پیچیده غیرخطی خوب عمل می‌کند.

<sup>۴</sup> Stochastic Disturbancel

<sup>۵</sup> Pattern-Extrapolation Model

قوانین انتقال نوع پنجم بر پایه منطق فازی استوارند؛ به نحوی که در آن‌ها عدم اطمینان از رفتار انسان در فرایند شبیه‌سازی معین شده و قوانین انتقال از طریق یک زبان طبیعی بررسی می‌شود. Wu در سال ۱۹۹۶ رویکرد شبیه‌سازی اتوماتای سلولی Linguistic را توسعه داد. هدف از این مطالعه کشف و تعریف قوانین انتقال برای شبیه‌سازی تبدیل کاربری زمین، در حاشیه شهر و روستاهای اطراف کلان شهرها بوده است. در این تحقیق از تئوری فازی به منظور تکمیل روند توسعه زمین ناهماهنگ (uncoordinated)، استفاده شده است. از ویژگی‌های نوآورانه استفاده از تئوری فازی در تحقیق مذکور می‌توان به روابط زبان طبیعی<sup>۶</sup> اشاره نمود که سبب واقعی‌تر و شفاف‌تر شدن عمل شبیه‌سازی می‌شود. از طرفی دیگر، این مدل می‌تواند سناریوهای توسعه شبیه‌سازی را به خوبی اجرا کند. Al-kheder و همکاران در سال ۲۰۰۸ اتوماتای سلولی هدایت شده با استنتاج فازی را به کمک تصاویر ماهواره‌ای چند زمانی ارائه نمودند. در این تحقیق براساس دانش معنایی یا زبانی موجود در قوانین فازی، از استنتاج‌گری فازی برای تعیین پتانسیل توسعه شهری هر پیکسل استفاده شد. فرایند فازی‌سازی، پتانسیل توسعه را به سطح توسعه همسایگی مورد نیاز (به عنوان تقریب اولیه در قوانین انتقال اتوماتای سلولی)، تبدیل می‌کند. Al-Ahmadi و همکاران در سال ۲۰۰۹ مدل اتوماتای سلولی فازی را برای شهر ریاض عربستان سعودی پیاده‌سازی نمودند. در این تحقیق، محققان با استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی، مشکل عدم قطعیت در ارتباط با قوانین انتقال را رفع نموده و از دو الگوریتم ژنتیک و Simulated annealing برای کالیبراسیون مدل و همسایگی استفاده کردند. مدل اجرا شده، برای سه دوره زمانی مختلف که با توجه به الگوهای کوناگون توسعه شهری مشخص شده بودند، نتایج را محاسبه نمود.

### ۳- روش‌شناسی تحقیق

#### ۳-۱- اتوماسیون سلولی و مدل‌سازی جغرافیایی

اتوماسیون سلولی استاندارد، یک مدل ریاضی برای سیستم‌های پیچیده طبیعی است. این سیستم‌ها شامل تعداد زیادی از بخش‌های ساده مشابه با تعاملات محلی می‌باشند. همچنین آن‌ها شامل شبکه‌ای از محل‌ها (سلول‌ها) (که هر کدام دارای تعداد محدودی حالت ممکن است) می‌باشند. مقادیر این محل‌ها (سلول‌ها) بر اساس قوانین انتقال، در بازه‌های زمانی مجزا به طور همگام و هم‌زمان تغییر می‌کند. مقدار یک محل به خصوص با استفاده از مقادیر قبلی محل‌های همسایه در اطراف آن مشخص می‌گردد [14]. استفاده از این مدل در کاربردهای شهری و جغرافیایی باعث وارد شدن مفاهیم شهری و جغرافیایی در بخش‌ها و قسمت‌های مختلف مدل می‌شود. از سلول‌ها می‌توان در نمایش تمام موجودیت‌های جغرافیایی نظیر ماشین‌ها، قطعات زمین، بازه‌های اکوسیستم، میکروارگانیسم‌ها و نظیر آن استفاده نمود. از همسایگی‌ها برای نمایش مرزهای مکانی (و زمانی) روندها استفاده می‌شود. این روندها بر موجودیت‌های جغرافیایی تاثیرگذار هستند؛ به عنوان مثال مسیر حرکت خودرو، منطقه قرارگیری قطعه زمین، حالات مختلف میکروارگانیسم و نظیر آن. همچنین از این روندها برای توصیف ویژگی‌های موجودیت‌های سلولی نظیر کاربری قطعه زمین، سرعت خودرو و نظیر آن استفاده می‌شود. قوانین انتقال تمام این قسمت‌ها را به یکدیگر متصل می‌کنند [20]. نقش اساسی قوانین انتقال استفاده به عنوان الگوریتم هدایت‌کننده تغییرات سلول‌ها از وضعیت اول به وضعیت دوم در گذر زمان می‌باشد [21]. به علاوه تغییرات قسمت‌های مختلف اتوماسیون سلولی استاندارد و مدل‌سازی جغرافیایی مدرن دارای چندین نقش مشترک با اتوماسیون سلولی ریاضی استاندارد هستند.

- استفاده از پتانسیل‌های تغییر علاوه بر وضعیت کنونی به عنوان ویژگی‌های یک سلول. پتانسیل به عنوان یک ویژگی میانی استفاده شده که به کمک یک "مشاهده‌کننده خارجی"<sup>۷</sup> محاسبه می‌گردد. این ویژگی برای مقایسه واحدهای زمین در تغییرات ممکن، قبل از وقوع آن‌ها می‌باشد.
- تصادفی بودن انتقالات: تصادفی بودن مدل در این تحلیل به شدت مهم بوده، چرا که نمایان‌گر تغییرات کنترل‌نشده در عوامل محلی می‌باشد [22].

<sup>۶</sup> Natural language interface

<sup>۷</sup> External Observer

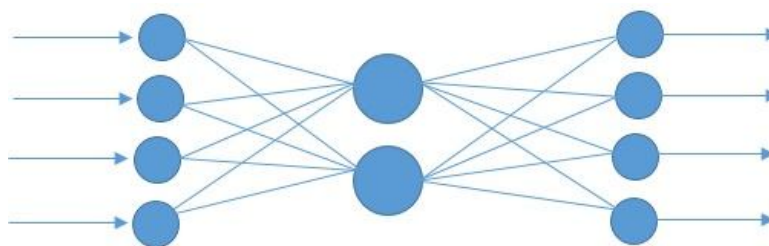
- همسایگی‌های ترتیب‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته، تا نشان‌دهنده سطوح مختلف ساختارهای شهری باشد. در دنیای شهری، همسایگی‌های تأثیرات به طور گسترده تغییر می‌کند و در بیش‌تر مواقع قادر به قرارگیری در توپولوژی ارائه شده توسط اتوماسیون سلولی پایه نیستند. به عنوان مثال تعاملات اجتماعی هم می‌تواند بین موجودیت‌های نزدیک به هم صورت گرفته و هم در یک مقیاس شهری صورت بگیرد [23].
- عوامل در سطح بالاتر از همسایگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، این فاکتورها معمولاً نشان‌دهنده میزان در دسترس بودن واحد زمین هستند. این موضوع تعیین میزان تأثیر زیرساخت‌ها را در تکامل شهری ممکن می‌سازد [22].
- سلول‌ها و همسایگی‌ها در اتوماسیون سلولی - جغرافیایی الزاماً یکسان نبوده و قسمتی از فضای شهری در مدل‌ها می‌تواند هم‌زمان با شبیه‌سازی تغییر کند [22].
- لایه‌هایی از رستر و بردار از GIS برای مرحله آغازین اعتبارسنجی و تکامل مدل‌ها استخراج گردیده‌اند [22]. حتی در هنگام استفاده از یک رویه نه چندان محکم برای جفت‌کردن GIS و CA، GIS می‌تواند اطلاعات مکانی اولیه را برای تنظیمات اولیه مدل CA فراهم کند. همچنین نتایج شبیه‌سازی به GIS بازگردانده شده تا تحلیل‌ها، ذخیره‌سازی و به نمایش درآوردن بر روی آن‌ها انجام شود. کاربرد CA در مدل‌سازی توسعه شهری بدون استفاده از توانمندی‌های GIS در مدیریت داده‌ها تقریباً غیرممکن است [24]. ترکیب CA و GIS و داده‌های رستری و تصاویر ماهواره‌ای چند زمانه باعث ورود بیش‌تر مفاهیم جغرافیایی به مدل می‌گردد. CA همچون دیگر اتوماسیون‌ها، محاسبه‌گرهای جهانی بوده که با اختصاص زمان و منابع کافی و مجموعه قوانین مناسب قابل استفاده در هر حالت محاسبه‌ای می‌باشد [20].

### ۳-۲- شبکه عصبی پرسپترون چندلایه

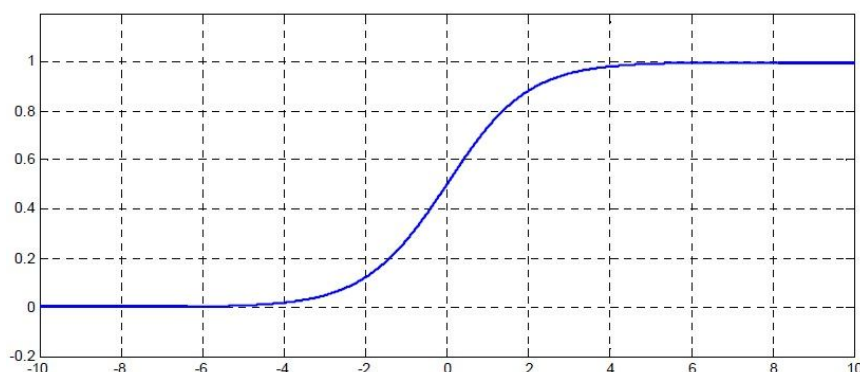
از متدهای متفاوتی برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای از جمله، طبقه‌بند فازی ARTMAP، طبقه‌بند بیشترین شباهت (MLC)، طبقه‌بند کمترین فاصله، روش Parallelepiped و شبکه عصبی پرسپترون چندلایه<sup>۸</sup> استفاده می‌گردد. شبکه عصبی برپایه تئوری دانش بیولوژیک توسعه یافته و در واقع یک مدل ساده شده از سیستم عصبی واقعی انسان می‌باشد. این شبکه‌ها دارای درجه بالایی از پایداری در نگهداری اطلاعات مربوط به یادگیری‌های گذشته می‌باشند؛ اما با این وجود قادر به تحلیل و یادگیری از اطلاعات جدید نیز هستند. یک شبکه عصبی مصنوعی بزرگ ممکن است چندصد هزار واحد پردازشگر داشته باشد، در صورتی که مغز پستانداران دارای میلیاردها نورون پردازشگر می‌باشد. شبکه‌های عصبی مصنوعی در حل مسائلی در زمینه‌های درون‌یابی، آشکارسازی و نظیر آن کاربرد دارند. در این مطالعه از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه برای طبقه‌بندی تصاویر استفاده شده است.

پرسپترون چندلایه به صورت لایه‌ای می‌باشد و به همین علت به آن پرسپترون چندلایه اطلاق می‌شود. در این مدل سه لایه وجود دارد. لایه ورودی، لایه خروجی و یک لایه بین آن‌ها که داده‌های ورودی و نتایج خروجی مستقیماً متصل نمی‌باشد. به این لایه، لایه پنهان گفته می‌شود. هر واحد در این مدل مانند یک سیستم مجزا عمل می‌کند. تابع آستانه در این شبکه تابع سیگموئیدی می‌باشد (شکل ۲). ساختار کلی این مدل در شکل ۱ آمده است.

<sup>8</sup> Multilayer Perceptron



شکل (۱): ساختار کلی پرسپترون چندلایه



شکل (۲): نمودار تابع سیگموئید

عملکرد پرسپترون چندلایه به صورت یادگیری نظارت شده<sup>۹</sup> بوده و روال آن بدین صورت است که الگویی به شبکه معرفی شده و خروجی آن محاسبه می‌گردد، مقایسه خروجی واقعی با خروجی محاسباتی باعث تغییر در ضرایب وزنی شبکه می‌شود. این تغییرات در راستای نزدیک‌تر شدن خروجی محاسباتی به خروجی واقعی است. برای موفقیت در آموزش شبکه باید خروجی آن را به تدریج به خروجی مطلوب نزدیک کنیم. به عبارت دیگر میزان تابع خطا بایستی به طور دائم کاهش یابد. برای این منظور ضرایب وزنی با استفاده از قانون دلتا تنظیم می‌شوند. قاعده دلتا مقدار تابع خطا را محاسبه کرده و آن را به عقب از یک لایه به لایه قبلی انتشار می‌دهد (پس انتشار خطا). این عمل در مورد لایه خروجی ساده می‌باشد؛ چرا که خروجی واقعی و خروجی مطلوب مشخص هستند. اما این موضوع در مورد لایه پنهان چندان روشن نیست. فرض این است که ضرایب وزنی واحدهای پنهانی که به واحدهای خروجی با خطایی بزرگ مرتبط هستند، باید بیش‌تر از واحدهای پنهانی که به واحدهای خروجی تقریباً صحیح متصل هستند، تغییر یابد. خروجی عصب  $\alpha_m$  در لایه آخر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$O_i = \text{sgm} \left[ \sum_m \text{sgm} \left[ \sum_l x_l w_{lm}^h \right] w_{mi}^o \right] \quad (۱)$$

که در آن  $h$  و  $o$  نشان دهنده لایه‌های پنهان و لایه خروجی هستند و  $w$  نیز همان وزن است. تابع  $\text{sgm}$  (سیگموئید) بدین ترتیب تعریف می‌شود:

$$\text{sgm}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (۲)$$

<sup>۹</sup> Supervised Learning

شکل ۲ نشان‌دهنده‌ی رفتار تابع آستانه سیگمویدی است، که همواره مقداری بین صفر و یک دارد.

حال برای تابع تحریک می‌توان نوشت (تابع تحریک هر عصب به صورت جمع وزن‌دار ورودی‌های آن عصب است):

$$A_j(\bar{x}, \bar{w}) = \sum_{i=0}^n x_i w_{ji} \quad (3)$$

در فرمول فوق  $w$  وزن متناظر بین لایه ورودی و لایه بعد است. پس مشخص است که خروجی تابع تحریک تنها به ورودی‌ها و وزن‌ها وابسته است. با فرض اینکه تابع خروجی سیگموئید باشد، می‌توان خروجی عصب  $j$ ام را به این صورت تعریف کرد:

$$O_j(\bar{x}, \bar{w}) = \text{sgm}(A_j(\bar{x}, \bar{w})) = \frac{1}{1 + e^{-A_j(\bar{x}, \bar{w})}} \quad (4)$$

از رفتار تابع سیگموئید مشخص است به ازای اعداد منفی به صفر نزدیک بوده و به ازای اعداد مثبت بزرگ به ۱ نزدیک است و در  $x = 0$  مقدار آن ۰,۵ می‌باشد. از رابطه ۴ نیز مشخص می‌گردد که خروجی تنها به مقدار تابع تحریک وابسته بوده و خود تابع تحریک نیز به ورودی‌ها و وزن‌ها وابسته می‌باشد، لذا برای تغییر خروجی‌ها باید وزن‌ها را تغییر داد و همان‌گونه که بیان شد؛ در هر اپک منظور از خطا، میزان اختلاف خروجی به دست آمده از شبکه با خروجی واقعی می‌باشد، که به آن خطای نرون اطلاق می‌شود.

$$E_j(\bar{x}, \bar{w}, d_j) = (O_j(\bar{x}, \bar{w}) - d_j)^2 \quad (5)$$

در رابطه فوق  $d_j$  میزان خروجی واقعی است. وجود توان دوم در رابطه ۵ باعث همواره مثبت بودن میزان خطای بدست آمده می‌شود. همچنین اگر اختلاف بین دو مقدار خروجی محاسبه شده و خروجی واقعی زیاد باشد، وجود توان دوم باعث بزرگتر شدن این مقدار می‌گردد و برعکس آن اگر اختلاف این دو کم باشد ( $1 >$ ) توان ۲ باعث کمتر شدن میزان اختلاف می‌گردد. با توجه به این موضوع خطای کلی شبکه را که مجموع خطای همه‌ی عصب‌های حاضر در لایه خروجی است، را می‌توان به این صورت نوشت:

$$E(\bar{x}, \bar{w}, \bar{d}) = \sum_j E_j(\bar{x}, \bar{w}, d_j) = \sum_j (O_j(\bar{x}, \bar{w}) - d_j)^2 \quad (6)$$

### ۳-۳- اتوماتای سلولی فازی و مدل‌سازی رشد شهری

مدل‌سازی رشد شهری یک فرایند پیوسته در فضا بوده و یک پیکسل می‌تواند به طور کامل یا بخشی از آن توسعه یابد [25]. استفاده از تئوری فازی برای مشاهده فرایندهای پیوسته شهری مناسب می‌باشد. میزان فازی بودن درجه درجه میزان اتفاق افتادن هر پدیده را نشان می‌دهد [26]. تعریف قوانین انتقال با استفاده از منطق فازی انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به قوانین انتقال قطعی جهت مدل‌سازی رفتار سیستم‌های پیچیده شهری دارد. این امر نشان دهنده آن است که تعریف قوانین انتقال بر پایه نظریه فازی نتایج قابل اعتمادتری را ارائه می‌دهد [27]. به علاوه توسعه شهری در نتیجه‌ی قیود فیزیکی و رفتارهای تصمیم‌گیرندگان به وجود می‌آید که این دو دارای ویژگی‌های عدم قطعیت و فازی بودن می‌باشند. کاربرد نظریه مجموعه فازی و منطق فازی در تعریف قوانین کنترل رشد شهری بسیار زیاد است. مدل‌های اتوماتای سلولی فازی (FCA) با استفاده از ویژگی‌ها و توابع عضویت سلول‌ها عمل کرده و قوانین انتقال آن‌ها به توصیف قواعدی برای به‌روز رسانی ویژگی‌ها بر

اساس توابع عضویت می‌پردازد. Torrens و Benenson در سال ۲۰۰۴ قوانین انتقال بر پایه توابع عضویت را در رابطه با شاخص‌های ساده جغرافیایی یافتند. محققین مذکور این موضوع را با میانگین‌گیری و نسبت به وضعیت همسایگی‌های هر سلول تعریف نمودند.

به طور خلاصه، نظریه مجموعه فازی اینگونه کار می‌کند: اگر  $X$  مجموعه‌ای از واحدهای زمینی (نشان‌دهنده منطقه شهری) باشد، آن‌گاه مجموعه فازی کاربری زمین  $U$  شامل جفت‌های زیر در رابطه خواهد بود:

$$U = \{x, \mu_u(x) \in [0,1] | x \in X\} \quad (7)$$

در رابطه بالا  $\mu_u(x)$  نشان‌دهنده‌ی تابع عضویت می‌باشد که منظور از تابع عضویت درجه عضویت فازی درصد شهری شدن هر سلول  $(x)$  می‌باشد.  $\mu_u(x) = 0$  به مفهوم آن است که یک سلول به هیچ عنوان توسعه نیافته است.  $\mu_u(x) = 1$  به مفهوم توسعه کامل سلول بوده و مقادیر بین ۰ و ۱ میزان توسعه شهری این دو را نشان می‌دهد. رویه نظریه فازی نیازمند یک الگوریتم مناسب برای اندازه‌گیری میزان توسعه شهری می‌باشد [22].

در این مقاله از نظریه مجموعه فازی برای استخراج قوانین انتقال CA استفاده شده است. همچنین از این نظریه برای نشان دادن پتانسیل مناطق مختلف برای تبدیل شدن به مناطق توسعه یافته شهری استفاده گردیده است. فلوچارت مطالعه در شکل ۳ ارائه گردیده است.

#### ۳-۴- منطقه مورد مطالعه

شهر مشهد با مختصات طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۳۶ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۸ دقیقه در شمال شرق ایران قرار گرفته و مرکز استان خراسان رضوی می‌باشد. این شهر پس از تهران بزرگ‌ترین شهر ایران است. همچنین مشهد دومین کلان شهری مذهبی جهان سالانه پذیرای شمار بالایی از مسافران و زائران است. شهر مشهد با ارتفاع متوسط ۹۸۵ متر از سطح دریا، در حوضه آبریز کشف رود، بین رشته کوه‌های بینالود و هزار مسجد واقع شده است. عواملی از قبیل رشد صنعت و خدمات توریستی و در ادامه آن نیاز به نیروی کار سبب گردیده است از لحاظ جمعیت شناسی شهر مشهد، در سده اخیر از رشد جمعیت بالایی برخوردار باشد. براساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۰ خورشیدی، جمعیت شهر مشهد در این سال، بالغ بر ۲۷۴۹۳۷۴ تن بوده است.

#### ۴- یافته‌ها

در این قسمت، نتایج حاصل از طبقه‌بندی، تاثیر عوامل موثر در رشد فیزیکی، کالیبراسیون، شبیه‌سازی سال ۲۰۱۵ و اعتبارسنجی آورده شده است.

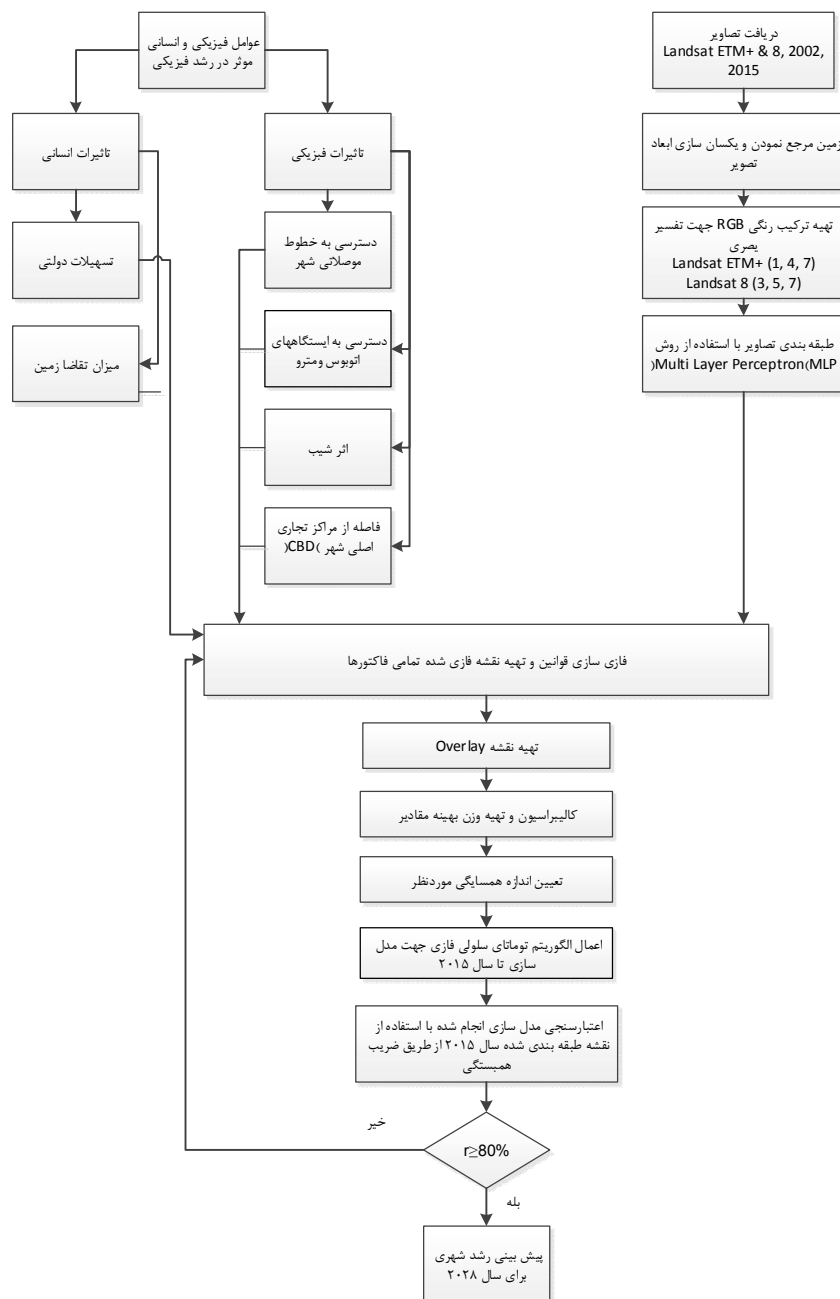
##### ۴-۱- آماده‌سازی داده‌ها

ابتدا تصاویر موردنیاز برای پیاده‌سازی مدل، از ماهواره‌ها اخذ شده و ترکیب باندهای لازم از آن‌ها تشکیل می‌گردد. در ادامه کلاس‌های آموزش سیستم تعریف شده و در نهایت پارامترهای موثر بر رشد شهری در شهر مشهد انتخاب می‌گردند.

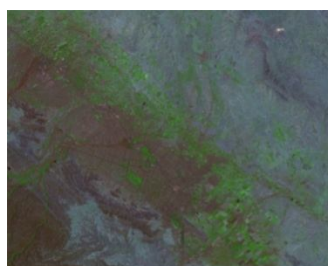
##### ۴-۱-۱- طبقه‌بندی تصاویر

در این مقاله تصاویر Landsat 8, ETM+ که در سال ۲۰۰۲ و ۲۰۱۵ اخذ شده اند برای پردازش رقومی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای تحلیل بصری ترکیب رنگی از باندهای تصاویر ماهواره‌ای برای تشخیص بهتر چشم انسان استفاده شده است. در این مقاله برای تصویر ETM+ از باندهای (۷-۴-۱) و برای تصویر Landsat 8 از باندهای (۷-۵-۳) استفاده شده است. شکل ۴ و ۵ تصاویر مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. در گام بعدی داده‌های آموزشی برای کاربری زمین انتخاب شده و کلاس‌های کاربری زمین تعریف گردیده‌اند. این کلاس‌ها عبارتند از اراضی ساخته شده، فضای سبز و باغات، مراتع، اراضی کشاورزی و دیم، زمین‌های بایر و سنگلاخ که با کمک نقشه‌های موضوعی GIS تصاویر ماهواره ای تشخیص داده

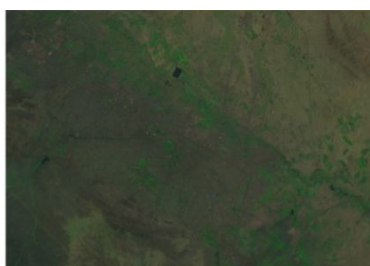
شده‌اند. در این تحقیق از روش MLP برای طبقه بندی تصاویر استفاده شده است. شکل ۶ و ۷ نقشه کاربری‌های طبقه بندی شده را برای سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۵ نشان می‌دهد.



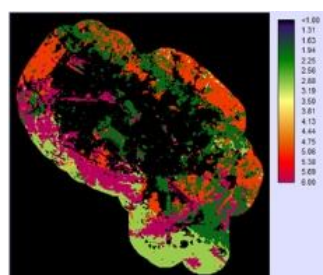
شکل (۳): فلوچارت مطالعه پیش‌رو



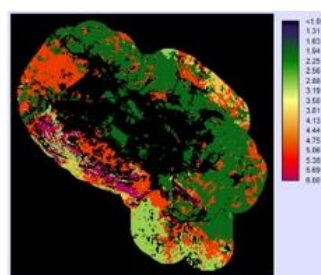
شکل (۵): ۲۰۰۲



شکل (۴): ۲۰۱۵



شکل (۷): نقشه طبقه بندی سال ۲۰۱۵



شکل (۶): نقشه طبقه بندی سال ۲۰۰۲

## ۴-۱-۲- عوامل فیزیکی و انسانی موثر در رشد فیزیکی

رشد شهری نتیجه‌ی اثرات فیزیکی و تاثیرات انسانی می‌باشد. شدت این تاثیرات متفاوت از دینامیک زمانی و مکانی می‌باشد. در این مقاله برای شناسایی نیروهای محرکه رشد شهری مشهود عوامل موثر بر توسعه شهری در گذشته مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ۷ پارامتر دسترسی به خطوط مواصلاتی (راه‌ها)، دسترسی به ایستگاههای اتوبوس، دسترسی به مترو، اثر شیب، فاصله از مراکز تجاری اصلی شهر، تسهیلات شهری، و میزان تقاضای زمین به عنوان فاکتورهایی با بیشترین تاثیر بر رشد شهری انتخاب گردید. شکل‌های ۸ تا ۱۴ نشان‌دهنده پارامترهای فوق می‌باشد.

## ۴-۲- فازای سازی قوانین انتقال و تهیه نقشه OVER LAY

بعد از آماده سازی نقشه‌ها، یکی از مهمترین مراحل پیش‌رو، بحث هم‌سایز نمودن کلیه نقشه‌های تهیه شده می‌باشد. این عمل یکی از ریزترین نکات اتوماتای سلولی بوده که دقت شبیه‌سازی وابستگی زیادی به این موضوع دارد. در ادامه روند پیاده‌سازی مطابق با فلوچارت آورده شده، با استفاده توابع عضویت فازای ارزش پارامترها در تعریف قوانین انتقال به بازه‌ی [0,1] تبدیل می‌شود. تابع عضویت در برگرنده طیفی از اعداد است که بین حالت قابل قبول (یک) و غیرقابل قبول (صفر) درجات مختلف پذیرش را نمایش می‌دهند با انجام عمل فازای سازی، نقشه یکنواخت شده فاکتورها در وزن فاکتورها ضرب، حاصل ضرب‌ها به صورت‌برداری جمع، سپس نتایج در نقشه محدودیت‌ها ضرب می‌شوند و مجموع امتیازات هر پیکسل به دست می‌آید. نقشه حاصله، نقشه OVER LAY یا نقشه روی هم گذاری لایه‌ها نامیده می‌شود. نقشه در شکل 15 قابل مشاهده است.

## ۴-۳- کالیبره کردن مدل CA و تعیین همسایگی

هدف اصلی از کالیبره کردن مدل تولید مقادیر یا وزن‌های بهینه متغیرهای ورودی است. به عبارت دیگر هدف کالیبره کردن ایجاد رابطه بین تغییرات کاربری زمین و فاکتورهای موثر بر احتمال تبدیل زمین می‌باشد. این مرحله مرحله‌ای حیاتی در توسعه یک شبیه‌سازی CA منطبق بر واقعیت می‌باشد. کالیبراسون مدل ایجاد شده از طریق مشاهده بصری، مقایسه

نتایج شبیه‌سازی با نقشه کاربری سال ۲۰۱۵ انجام شده است. مقدار نهایی پارامترها در جدول ۱ قابل مشاهده است. همچنین در این تحقیق اندازه همسایگی شبکه ۱۱\*۱۱ انتخاب شده است. با مقایسه اندازه همسایگی مذکور با سایر همسایگی‌ها، مشاهده گردید همسایگی کوچک مقیاس دقت بهتری نسبت به سایر همسایگی‌ها دارد.

## ۴-۴- اجرای اتوماتای سلولی فازی

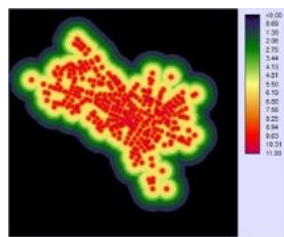
با اعمال قوانین انتقال فازی و تهیه نقشه overlay برای پارامترهای تاثیرات فیزیکی و تاثیرات انسانی، الگوریتم FCA بر روی پارامترهای مذکور و نقشه کاربری سال ۲۰۰۲ به منظور مدل‌سازی کاربری سال ۲۰۱۵ اجرا گردید. نتایج حاصل از مدل‌سازی در شکل ۱۶ قابل مشاهده است.

## ۴-۵- اعتبار سنجی مدل CA

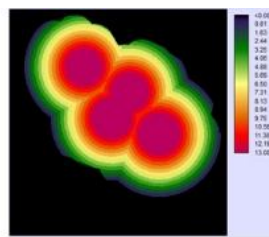
منظور از اعتبار سنجی آن است که یک مدل در زمینه کاربردی دارای محدوده‌ای از دقت رضایت بخش باشد [17]. مدل‌های شهری عموماً از طریق مقایسه خروجی شبیه‌سازی شده با مشاهدات دنیای واقعی (از طریق روش‌های مقایسه‌ای بصری ماتریس‌های Confusion و خطا اعتبارسنجی می‌گردند. اعتبار سنجی مدل CA یکی از چالش‌های پیش‌رو در کاربرد CA می‌باشد. تا به امروز بیشتر مدل‌های CA از مقایسه بصری برای تایید نتایج شبیه‌سازی استفاده کرده‌اند. بررسی عملکرد خود مدل نیز بسیار بحث برانگیز می‌باشد. این به آن علت است که در سیستم‌های خود سازمان‌ده وضعیت خاص وجود دارد. مدل‌های CA بایستی برپایه معقولیت این مدل‌ها ارزیابی شوند. ارزیابی صحیح مدل نیازمند آن است که ویژگی‌های کاربری-های مختلف شهری در مدل مورد ارزیابی قرار بگیرد. به عنوان مثال دریافت شباهتی ساختاری بین توسعه واقعی و شبیه‌سازی شده زمین در این مطالعه از ضریب همبستگی برای ارزیابی مدل مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق اعتبارسنجی از طریق ضریب همبستگی (r) انجام شده است. نتایج مقایسه شبیه‌سازی نهایی و نقشه کاربری سال ۲۰۱۵ در شکل ۱۷ قابل مشاهده است. مدل دارای دقت ۹۲٪ می‌باشد، که این دقت برای شبیه‌سازی در میان دیگر روش‌های مرسوم شبیه‌سازی، جز بهترین نتایج قابل دستیابی است. در نمودار مشاهده شده محور افقی نقشه کاربری اراضی در سال ۲۰۱۵ و محور قائم نتایج پیش‌بینی مدل‌سازی می‌باشد.

جدول (۱): نتایج کالبراسیون مدل CA

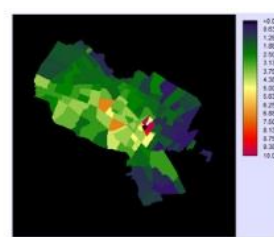
| Intercept/Variables              | Coefficient |
|----------------------------------|-------------|
| نقشه کاربری سال ۲۰۰۲             | 4.9925      |
| دسترسی به ایستگاههای اتوبوس      | 0.7399      |
| فاصله از مراکز تجاری اصلی شهر    | 0.7766      |
| میزان تقاضای زمین                | 0.2165      |
| دسترسی به مترو                   | -0.5283     |
| دسترسی به خطوط مواصلاتی (راه‌ها) | 0.4762      |
| اثر شیب                          | 0.0166      |



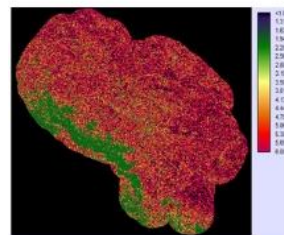
شکل (۱۰): دسترسی به ایستگاههای اتوبوس



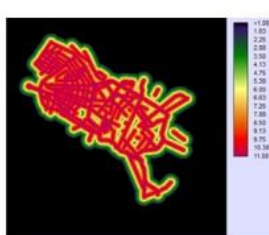
شکل (۹): فاصله از مراکز اصلی تجاری شهر



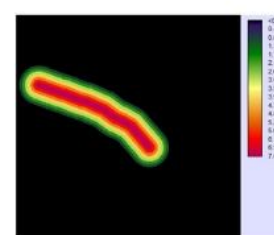
شکل (۸): میزان تقاضای زمین



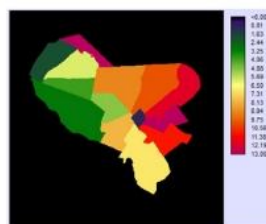
شکل (۱۳): اثر شیب



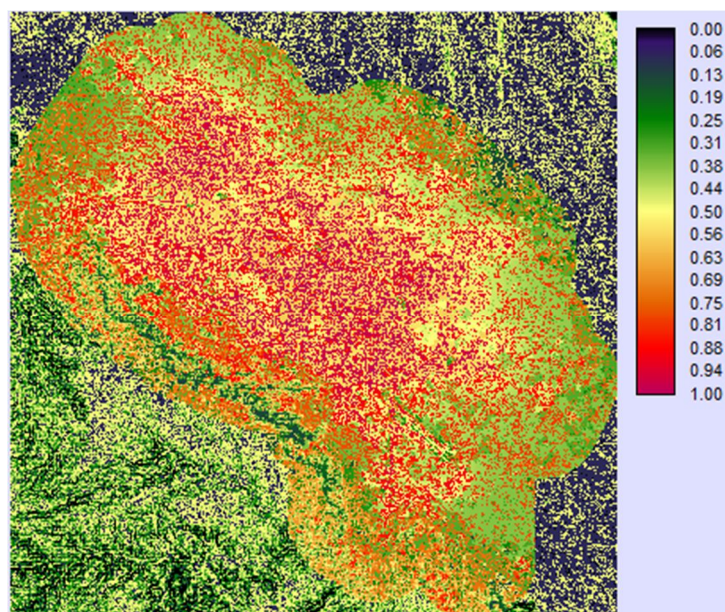
شکل (۱۲): دسترسی به خطوط مواصلاتی



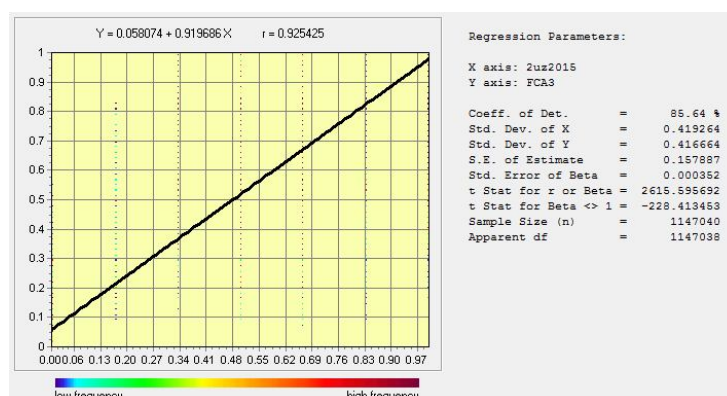
شکل (۱۱): دسترسی به ایستگاههای مترو



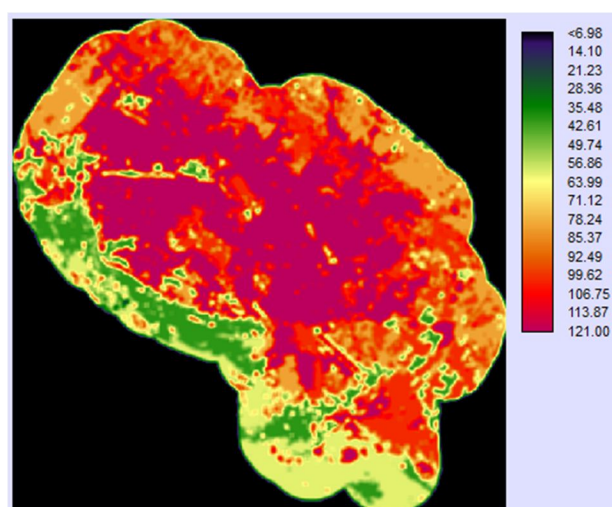
شکل (۱۴): تسهیلات شهری



شکل (۱۵): نقشه OVERLAY



شکل (۱۷): نتایج اعتبارسنجی از طریق ضریب همبستگی



شکل (۱۸): پیش‌بینی رشد شهری در مشهد در سال ۲۰۲۸

## ۵- نتیجه‌گیری

CA یکی از بهترین و پرتعدادترین مدل‌ها در مدل‌سازی رشد شهری می‌باشد. به علاوه می‌توان چندین عامل جغرافیایی را با شدت‌های مختلف در آن دخالت داد. در این مقاله، سعی بر تاثیر دادن اثرات فیزیکی و تاثیرات انسانی در مدل‌سازی رشد شهری به وسیله CA گردیده است. همچنین داده‌های تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های کاربری زمین نیز جز ورودی‌ها بودند. مدل در چندین مرحله اعتبارسنجی و کالیبره شده و نتایج اعتبارسنجی به ضریب همبستگی، نشان‌دهنده دقت بالایی در مدل حاصل می‌باشد. نتیجه حاصل از اعتبارسنجی در حدود ۹۲٪ دقت مدل را نشان می‌دهد. در نهایت پیش‌بینی آینده توسعه شهری با استفاده از FCA در محیط GIS تا سال ۲۰۲۸ انجام گرفته است. همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، رشد شهری مشهد در آینده در دو جهت شمال‌غربی و شرق پیشرفت چشم‌گیری خواهد داشت. نتایج حاصل از تحقیق کمک فراوانی به برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیرندگان شهری جهت درک چشم‌انداز پیش‌رو و نیل به توسعه پایدار شهری می‌نماید.

## مراجع

[1] Meadows D M, *The Limits to Growth*, New York, Universe Books, 1972

[۲] مقدم م. ش، "توسعه پایدار شهری، دیدگاه‌ها و اصول اجرایی آن در کشورهای در حال توسعه"، فصل‌نامه بین‌المللی پژوهشی ساخت شهر، ۱۵-۲۵.

[۳] زاهدی ش، نجفی غ، "بسط مفهومی توسعه پایدار"، فصل‌نامه مدرس علوم انسانی، دوره ۴، شماره ۱۰، ۱۳۸۵، ۴۳-۷۶



[۴] زیاری ک، "توسعه پایدار و مسئولیت برنامه‌ریزان شهری در قرن ۲۱"، *مجله دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه تهران* زمستان ۱۳۸۰، ۳۷۱-۳۸۵

[۵] زیاری ک، "برنامه ریزی کاربری اراضی شهری"، *یزد، دانشگاه یزد*، ۱۳۸۱

[6] Caruso G, Peeters D, Cavailhès J, Rounsevell M, "Space-time patterns of urban sprawl, a 1D cellular automata and microeconomic approach.", Louvain: CORE DISCUSSION., 2008

[7] Williams K, "Urban intensification policies in England: problems and contradictions.", *Land Use Policy*, 1999, 167-178.

[8] Hillman M, "In Favour of the Compact City.", *Jenks*, 1996, 36-44.

[9] Barredo J.I, Kasanko M, McCormick N, & Lavallo C, "Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata.", *Landscape and Urban Planning*, Vol. 64, No. 3, 2002, PP. 145-160.

[10] Cheng J. Modelling Spatial & Temporal Urban Growth [*Doctoral Dissertation*]. Netherlands: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC) ; 2003

[11] Langton, C., "Computation at the edge of chaos: phase transitions and emergent computation.", *Physica D*, 42(4), 1990, 12-37.

[12] Langton, C., "Life at the edge of chaos", *Artificial Life II: Proceedings of an Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*. In C. Langton et al. (Eds.), Santa Fe Institute Studies in the Science of Complexity (pp. 41-92). Redwood City: Addison-Wesley.; 1992

[13] Bak P, Chen K, & Creutz M., "Self-organized criticality in the 'game of life'". *Nature*, Vol. 342, No. 6, 1989, PP. 780-782.

[14] Wolfram S., "Universality and complexity in cellular automata.", *Physica D*, Vol. 10, No. 2, 1984, PP. 1-35.

[15] Torrens P. M., Automata-based models of urban systems., In P. Longley & M. Batty (Eds.), *Advanced spatial analysis*, PP. 61-79, 2003, Redlands: ESRI Press.

[16] Li X., & Yeh A. G., "Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata.", *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 14, No. 2, 2000, PP. 131-152.

[17] Rykiel E. J., "Testing ecological models: The meaning of validation." *Ecological Modelling*, Vol. 90, 1996, PP. 229-244

[18] Wolfram S., Cellular automata: a model of complexity. *Nature* 31, 1984, 419-424.

[19] Santé Inés, Garcia Andrés M., Miranda David, Crecente Rafael, "Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis.", *Landscape and Urban Planning*, Vol. 96, 2010, PP. 108-122

[20] Torrens, P. M., Cellular automata." *International Encyclopedia of Human Geography*, Vol.3, No.10, 2009, PP. 1-4.

[21] Liu, Y., Modelling urban development with geographical information systems and cellular automata. New York: CRC Press (Taylor & Francis Group)., 2009

[22] Benenson, I., & Torrens, P. M., Geosimulation automata-based modeling of urban phenomena. Chichester: John Wiley & Sons Press. *J Indian Soc Remote Sens Author's personal copy*, 2004

[23] Torrens, P.M. "How cellular models of urban systems work. CASA working paper 28. Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London. , 2000

[24] Clarke, K. C., & Gaydos, L. J. "Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: Long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore."

*International Journal of Geographical Information Science*, Vol.12, No.1, 1998, PP. 699-714

[25] Alkheder, S., Wang, J., Shan, J. Fuzzy, "cellular automata approach for urban growth modelling. In: Proceedings ASPRS." 2006 Annual Conference. Reno, Nevada., 2006

[26] Openshaw, S., & Openshaw, C., Artificial intelligence in geography. New York: Wiley Press., 1997

[27] 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, 1996, PP. 367-387.