# Certificate

This is to certify that the paper entitled

*Evaluation of uncertainty in the process of modeling and forecasting urban growth using cellular automata and fuzzy logic (case study in Mashhad)*

by

*Farhad Rostami Gale ,Rouzbeh Shad ,Marjan Ghaemi*

Has been accepted in the International conference on architecture civil and urban development at the beginning of the third millennium – Tehran .

The conference was hold on July , 2015 .

level : Published In The Article Books

Association of Iranian Architects

| Sonay Cevik ( Prof.Dr ) | Vahid Ghobadian ( Prof.Dr ) | Babak Ghoseiri | Jafar Sarafzadeh Tabriz |
|---|---|---|---|
| Karadeniz Technical Univercity Faculty of Architecture | Congress Academic Advisor | Head of R.C of association of Iranain Architects | General Secretary of Association of Iranain Architects |

www.AIA Iran.ir

کانون سراسری انجمن های صنفی مهندسان معمارایران
همایش بین المللی معماری،عمران و شهرسازی در هزاره سوم
تهران - تیر ماه ۹۴

# بررسی عدم قطعیت در فرایند مدل‌سازی و پیش‌بینی رشد شهری با استفاده از اتوماتای سلولی و منطق فازی (مطالعه موردی شهر مشهد)

**فرهاد رستمی گله[۱]*، روزبه شاد[۲]، مرجان قائمی[۳]**

**فرهاد رستمی گله**
دانشجوی کارشناسی ارشد عمران – سیستم اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
**روزبه شاد**
استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
**مرجان قائمی**
استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

## چکیده

توسعه شهری پدیده مکانی پیچیده‌ای است که به وسیله‌ی تعداد زیادی فاکتور غیرقطعی کنترل می‌شود. شرایط جغرافیایی منطقه، وضعیت اقتصادی و اجتماعی، پتانسیل رشد جمعیت، برنامه‌ریزی شهری و تصمیم‌گیری مدیران از جمله فاکتورهایی می‌باشند که نقش مهمی در توسعه شهری ایفا می‌کنند. هیچ یک از این فاکتورها رفتار قطعی نداشته و به‌وسیله‌ی منطق بولین کنترل نمی‌شوند. لذا وارد نمودن منطق فازی در فرایند مدل‌سازی باعث افزایش کارایی مدل شده و نتایج واقع بینانه‌تری را برای تصمیم‌گیرندگان فراهم می‌سازد. بدین منظور، با به کارگیری مدل اتوماتای سلولی فازی (FCA) توسعه یافته بر مبنای سیستم اطلاعات مکانی و ارائه مدلی قدرتمند و ساده وضعیت گسترش فیزیکی شهر مشهد از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۵ شبیه‌سازی شده و پس از تعیین مدل مناسب، رفتار شهری در سال ۲۰۲۸ پیش‌بینی می‌گردد. به این منظور ابتدا عوامل موثر(فیزیکی و انسانی) در رشد شهری و همچنین نقشه کاربری اراضی در دوره اول(۲۰۰۲ الی ۲۰۱۵) جمع‌آوری و پردازش شده است. در ادامه قوانین انتقال مورد نظر مطابق با منطق فازی بر روی عوامل مذکور اعمال گردیده و نقشه همسان‌سازی تهیه می‌شود. سپس طی کالیبراسیون (به صورت تجربی) وزن فاکتورها برای شرکت در الگوریتم اتوماتای سلولی به‌دست آمده و مطابق با عملکرد این الگوریتم مدل سازی انجام می‌شود. در این تحقیق از ضریب همبستگی برای اعتبار سنجی نتایج استفاده شده و در نهایت رشد شهری برای سال ۲۰۲۸ پیش‌بینی می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** مدل‌سازی شهری، عدم قطعیت، اتوماتای سلولی فازی، سیستم اطلاعات مکانی.

## ۱- مقدمه

### ۱-۱- تعریف شهر و توسعه شهر

از منظر علم جغرافیا، شهر منظره ای مصنوعی از خیابان‌ها، ساختمان‌ها و بناهایی است که از ترکیب عوامل طبیعی، اجتماعی، اقتصادی و سیاسی پدید آمده است. در تعریفی دیگر شهر به مجموعه‌ای اطلاق می‌شود که جمعیت به طور منظمی در آن ساکن شده و آداب و رسومی را برای خود ابداع کرده‌اند. پدیده توسعه شهری مفهوم متفاوتی نسبت به رشد شهرنشینی دارد. رشد شهری صرفاً شامل افزایش فیزیک شهری می‌باشد. یعنی نوعی از تجمع که تصمیم‌گیری مناسبی برای آموزش، فرهنگ و بهداشت آن نشده و فاقد زیرساخت‌های مورد نیاز باشد. لازم به ذکر است که در این تعریف، پدیده‌ای به نام شهر فقط از نظر جمعیت، محدوده جغرافیایی و ساختمان‌ها قابل گسترش است. این درحالی است که فرایند توسعه شهری شامل توزیع بهینه فیزیکی، امکانات، تسهیلات زندگی، اشتغال و عوامل اقتصادی- اجتماعی در مراکز شهری می‌باشد. این نوع از توسعه عبارت است از ارتقای سطح زندگی شهری در ابعاد مختلف، به منظور دستیابی همه شهروندان به زندگی بهتر، به نحوی که پایداری اجتماعی، اقتصادی، سیاسی، کالبدی و زیست محیطی شهر فراهم آید [۱].

در موضوعات شهری و توسعه آن‌ها، دو نوع نظریه مهاجرتی، رشد و مساحت شهر وجود دارند. نظریه‌های مهاجرتی عموما پدیده رشد شهری را ناشی از افزایش نیروی انسانی در روستا، بالا بودن درآمد شهر نسبت به روستا به خصوص در بخش خدمات، صنعت، سطح بهداشت و رفاه می‌دانند. معروفترین نظریه‌ها در زمینه رشد و توسعه شهر، نظریه دوایر متحمدالمرکز "ارنست برگس" محقق امریکایی است. وی گسترش شهر را به صورت دایره‌ای فرض کرده که در توسعه فیزیکی شهر، فرآیند تعامل کاربری‌ها اتفاق می‌افتد و درنتیجه این جریان افراد، گروهها و حتی کاربری‌ها جابجا می‌شوند و توسعه شهر به صورت شعاعی در حومه شهرها اتفاق می‌افتد. البته این مسأله وابستگی زیادی به مناسب بودن شرایط فیزیکی زمین در حومه شهرها دارد [۱].

### ۱-۲- مفهوم توسعه شهری

در کشورهای در حال توسعه، تمایل زیاد برای تمرکز جمعیت در مناطق شهری و به تبع آن رشد سریع و ناموزون شهرها سبب گردیده، طراحان و برنامه‌ریزان، سیاست‌های مناسب شهری را جهت اجتناب از تأثیرات مخرب زیست محیطی و اجتماعی- اقتصادی اتخاذ کنند. در این راستا، اطلاعات مکانی و زمانی مرتبط با الگوهای نرخ رشد، درک بهتر فرآیند رشد شهری را میسر نموده و کمک فراوانی را به مدیران شهری جهت اخذ سیاست‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی می‌نماید. لازم به ذکر است که سامانه‌های اطلاعات مکانی، ابزارهای کارآمدی را جهت جمع‌آوری و آنالیز اطلاعات لازم فراهم می‌کنند [۲].

از طرفی پراکندگی شهری در مقیاس بالا و تغییرات کاربری زمین شهری در تمامی جهات، سبب گردیده شهرها همواره در حال توسعه باشند. برای طراحان و برنامه‌ریزان، در چنین محیط‌هایی که با سرعت در حال دگرگونی هستند، درک و فهم تغییر و نحوه رشد شهری از اهمیت خاصی برخوردار است. اکثر کشورهای دنیا، سیاست‌های برنامه‌ریزی توسعه‌یافته‌ای را جهت غلبه بر مشکلات به‌وجود آمده از رشد و توسعه سریع و پراکنده‌ی شهری، به‌کار گرفته‌اند. همچنین سعی دارند که تقاضاهای جدید ایجاد شده، به‌واسطه افزایش تمایلات شهرنشینی را برآورده نموده و برنامه‌ریزی کارآمدی را برای تغییر در کاربری زمین اجرا نمایند. سیاست‌های برنامه‌ریزی مربوطه شامل پیش‌بینی تغییرات یا گرایش به سمت توسعه و گسترش در آینده، با استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی شهری می‌باشد [۳].

### ۱-۳- توسعه پایدار

یکی از اهداف برنامه‌ریزی کاربری اراضی شهری، پایداری است. این موضوع به آن معناست که از امکانات و توان بالقوه هر قطعه زمین چنان بهره گیری شود که به طور مداوم بر ظرفیت و ایستایی آن افزوده گردد. زیرا که زمین کالایی محدود و تجدید ناپذیر بوده و از طرف دیگر بستر زندگی انسان و نیاز مبرم بشری است[۴]. از اصولی که برای برنامه‌ریزی کاربری اراضی شهری جهت تحقق پایداری در رشد فیزیکی شهر پیشنهاد گشته است، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

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

### ۱-۴- عوامل ناپایداری

از عوامل ناپایداری رشد شهری می‌توان به رشد پراکنده اشاره کرد. رشد پراکنده نوعی از انواع رشد فیزیکی شهری است که در آن قطعات اراضی توسعه نیافته به وسیله کاربری‌های مسکونی اشغال شده و سطحی که شهر بر روی آن قرار می‌گیرد، شکلی ناپیوسته می یابد [۶]. ویژگی‌های این نوع از 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. همچنین رشد پراکنده قادر نیست که با کاربری‌های محیط خود نیز ارتباط برقرار کند. شکل ظاهری رشد پراکنده به صورت تراکم کم به شکل نواری بوده و از رشد پراکنده، جهشی و منزوی برخوردار است.

همان‌طور که از ویژگی‌های افقی شهر بر می‌آید، این نوع از رشد فیزیکی در بسیاری از موارد برخلاف توسعه پایدار شهری است. عمده تاثیراتی که موجب ناپایداری شهری در رشد افقی می‌شوند، عبارتند از:

الف-تاثیرات محیطی: مهم‌ترین تاثیراتی که رشد افقی بر روی محیط می گذارد از بین بردن چشم اندازهای طبیعی و آلودگی هوا می باشد [۷]. آلودگی هوا به دلیل استفاده بیش‌تر از اتومبیل‌های شخصی و نبود وسایل نقلیه عمومی در فضاهای جدید شهری، به وجود می‌آید.

ب-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 [۸].

ج-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.

### ۱-۵- سیستم‌های پیچیده شهری

شهرها به عنوان یک سیستم پیچیده شناخته می‌شوند. این موضوع با در نظر گرفتن خصوصیات ذاتی آن‌ها نظیر خود سازماندهی، رفتار غیر خطی و غیرمنظره و نظیر آن درک می گردد [۹]. 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. از این موضوع می‌توان دریافت که رشد شهری یک سیستم خود سازمان‌ده و خود همانند[۱] است. به عنوان یک سیستم پیچیده، رشد شهری دارای درجه‌ای از غیر قابل پیش‌بینی بودن می‌باشد، که شامل تغییرات سریع و غیرمنتظره است [۱۰]. 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 [۹]. اتوماسیون سلولی برای مدل‌سازی شهری (که به طور ذاتی پویا بوده) مناسب است. با وجود آن که این مدل از مکانیزم ساده‌ای استفاده می کند، توانایی ایجاد الگوهای زمانی – مکانی به پیچیدگی‌های نامحدود را دارا می‌باشد[۱۴][۱۳][۱۲][۱۱]. در مدل‌سازی اتوماسیون سلولی به کارگیری عوامل موثر بر رشد شهری از طریق قوانین انتقال محلی ممکن می‌باشد[۱۵]. 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[۲] استفاده می‌نمایند [۱۶]. 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[۱۷] .

## ۲- پیشینه تحقیق

اتوماتای سلولی، اولین بار در اواخر ۱۹۴۰ توسط Ulam و Neumann با الگوبرداری از ماشین تورینگ توسعه یافت [۱۸]. در سال ۱۹۸۴ نیز Wolfram ثابت کرد که پدیده های طبیعی را می‌توان با اتوماتای سلولی نشان داد. این نظریه پایه-ای 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. شبیه سازی با اتوماتای سلولی خیلی زود برای علوم فیزیکی، علوم طبیعی و ریاضیات کاربردی شد. در سال ۱۹۷۹ توبلر برای اولین‌بار از مدل‌های فضای سلولی برای مدل‌سازی جغرافیایی استفاده کرد[۱۹]. قابلیت CA برای شبیه سازی رشد شهری منجر به ظهور انواع قوانین انتقال شد. کارهای انجام شده را بر اساس قوانین انتقال می‌توان به پنج دسته تقسیم‌بندی کرد[۱۹].

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 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 به‌کار 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 حاظر سلول و دیگر عوامل محدود کننده تکامل برای کاربری زمین می‌باشد. با مقایسه قوانین انتقال پتانسیلی به‌کار گرفته شده در تحقیقات بررسی شده می‌توان نتیجه گرفت که پتانسیل انتقال معمولا به عنوان یک مجموع وزنی یا به عنوان ترکیب تعدادی از فاکتورها که خارج از اثر همسایگی وضعیت‌ها

[۱] Self similarity
[۲] Geospatial Information System

هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این، از پارامتر اختلال تصادفی[۳] 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 توسعه‌یافتن می‌باشد، تعریف می‌گردد. این گونه ارزش‌دهی سبب به‌وجود 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[۱۹]. 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 به‌کار 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 نظرگرفتن این موضوع که وضعیت‌ها با امتیاز بالاتر، تمایلشان برای توسعه بیشتر می‌باشد، مدل پتانسیل را با استفاده از توابع نمایی توجیه نمودند[۱۹]. 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 Kamدر 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 به‌کار بردند[۱۹].

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[۴] 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[۱۹]. 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 ازجمله 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 پشیبان (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.

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 می-

[۳] Stochastic Disturbancel
[۴] Pattern-Extrapolation Model

توان به روابط زبان طبیعی[۵] 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- روش تحقیق

### ۳-۱- اتوماسیون سلولی و کاربردهای شهری

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 (سلول ها)، (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[۱٤]. 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، میکروارگانیزها 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 میکرو ارگانیزم 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 [۲۰]. نقش اساسی قوانین انتقال استفاده به عنوان الگوریتم هدایت‌کننده تغییرات سلول ها از وضعیت اول به وضعیت دوم در گذر زمان می‌باشد [۲۱]. 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[۶]" 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. [۲۲]
- همسایگی‌های ترتیب‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته، تا نشان‌دهنده سطوح مختلف ساختارهای شهری باشد. در دنیای شهری، همسایگی‌های تاثیرات 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 [۲۳].

---

[۵] Natural language interface

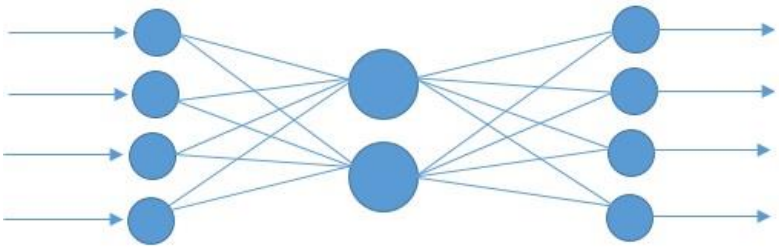
[۶] External Observer

- عوامل در سطح بالاتر از همسایگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، این فاکتورها معمولا نشان‌دهنده میزان در دسترس بودن واحد زمین هستند. این موضوع تعیین میزان تاثیر زیرساخت‌ها را در تکامل شهری ممکن می‌سازد [۲۲].
- سلول‌ها و همسایگی‌ها در اتوماسیون سلولی - جغرافیایی الزاما یکسان نبوده و قسمتی از فضای شهری در مدل‌ها می‌تواند هم‌زمان با شبیه‌سازی تغییر کند [۲۲] .
- لایه‌هایی از رستر و بردار از GIS برای مرحله آغازین اعتبارسنجی و تکامل مدل‌ها استخراج گردیده‌اند [۲۲]. 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 کرده. 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 تقریبا غیرممکن است [۲٤]. ترکیب CA و GIS و داده های 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[۲۰].

### ۳-۲- شبکه عصبی پرسپترون چندلایه

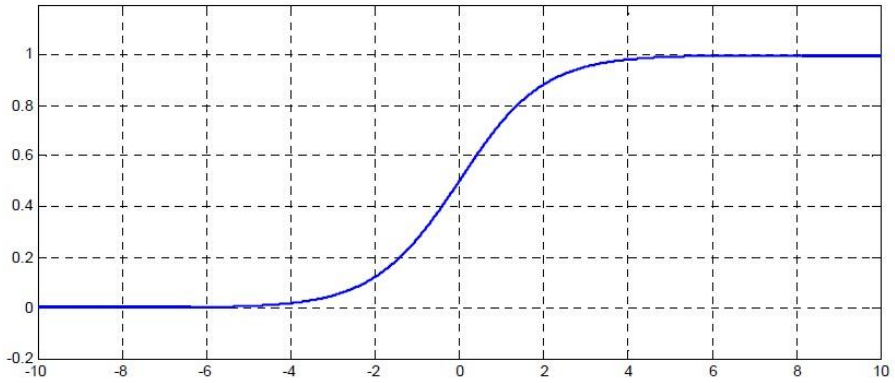
از متدهای متفاوتی برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای از جمله، طبقه‌بند فازی ARTMAP، طبقه‌بند بیشترین شباهت (MLC)، طبقه‌بند کمترین فاصله، روش Parallelepiped و شبکه عصبی پرسپترون چندلایه[۷] استفاده می‌گردد. شبکه عصبی برپایه تئوری دانش بیولوژیک توسعه یافته و در واقع یک مدل ساده شده از سیستم عصبی واقعی انسان 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 چندصدهزار 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 مستقیما 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 سیگموید (شکل ۲) می‌باشد. ساختار کلی این مدل در شکل ۱ آمده است.



**شکل (۱): ساختار کلی پرسپترون چندلایه**

[۷] Multilayer Perceptron




**شکل (۲) : نمودار تابع سیگموید**

### ۳-۳- اتوماتای سلولی فازی

مدل‌سازی رشد شهری یک فرایند پیوسته در فضا بوده و یک پیکسل می‌تواند به طور کامل یا بخشی از آن توسعه یابد[۲۵]. استفاده از تئوری فازی برای مشاهده فرایندهای پیوسته شهری مناسب می‌باشد. میزان فازی بودن درجه درجه میزان اتفاق افتادن هر پدیده را نشان می‌دهد[۲۶]. 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 [۲۷]. به علاوه توسعه شهری در نتیجه‌ی قیود فیزیکی و رفتارهای تصمیم‌گیرندگان به‌وجود 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. Benenson و Torrens 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:

$$U=\{x, \mu u(x) \in [۰,۱] | x \in X\} \quad (۷)$$

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. $\mu u(x) = ۰$ به مفهوم آن است که یک سلول به هیچ عنوان توسعه نیافته است. $\mu u(x) = ۱$ 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 [۲۲].

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) ارایه گردیده است.

### ۳-۴- منطقه مورد مطالعه

شهر مشهد با مختصات طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۱۵دقیقه تا ۶۰ درجه و ۳۶ دقیقه و عرض جغرافیی 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

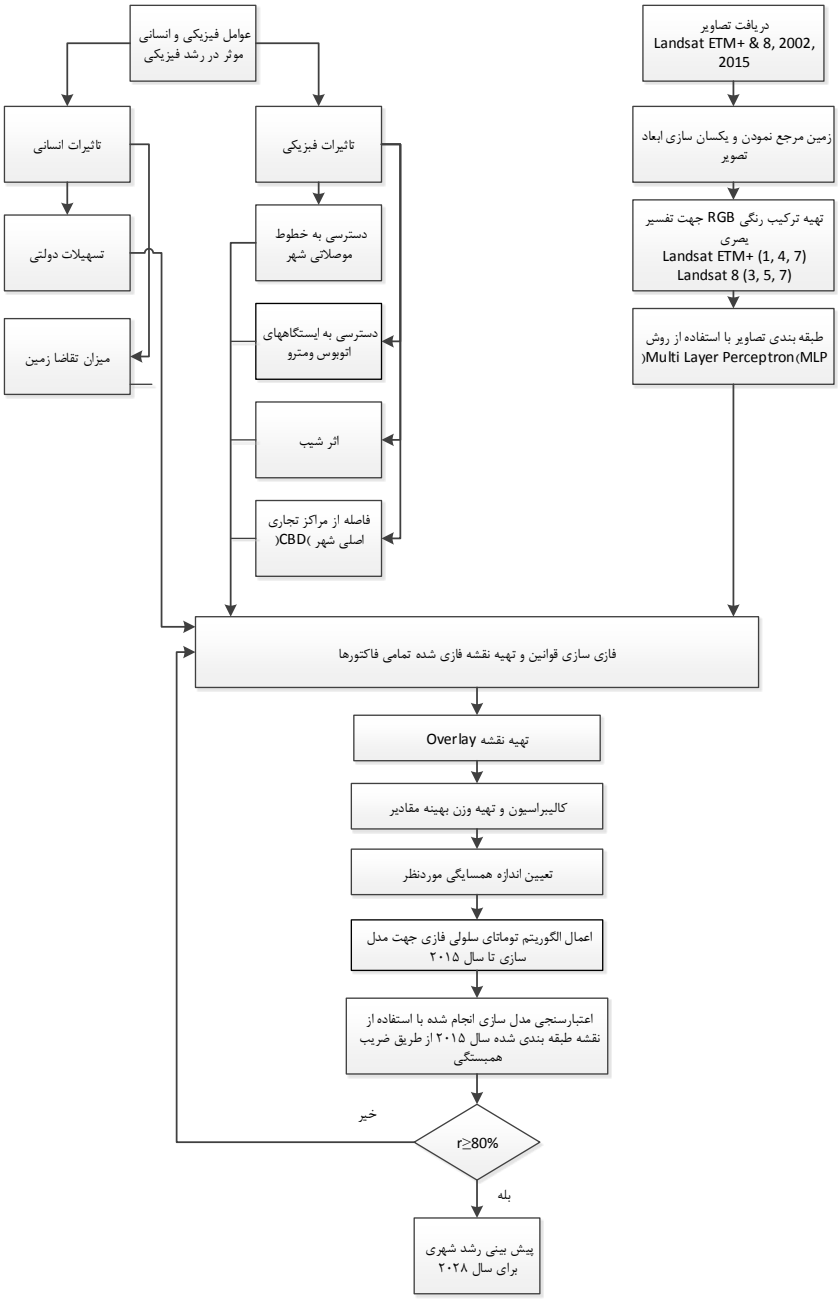
زائران است. شهر مشهد با ارتفاع متوسط ۹۸۵ متر از سطح دریا، در حوضه آبریز کشف رود ، بین رشته کوه‌های بینالود و هزار مسجد واقع شده است. عواملی از قبیل رشد صنعت و خدمات توریستی و در ادامه آن نیاز به نیروی کار سبب گردیده است از لحاظ جمعیت شناسی شهر مشهد، در سده اخیر از رشد جمعیت بالایی برخوردار باشد. براساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۰ خورشیدی، جمعیت شهر مشهد در این سال، بالغ بر ۲۷۴۹۳۷۴تن بوده‌است.

### ۳-۵- آماده‌سازی داده‌ها

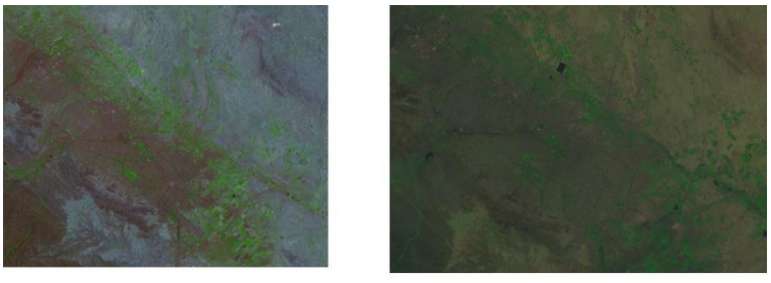
در این قسمت ابتدا تصاویر موردنیاز برای پیاده‌سازی مدل، از ماهواره‌ها اخذ شده و ترکیب باندهای لازم از آن‌ها تشکیل می‌گردد. کلاس‌های آموزش سیستم تعریف شده و در نهایت پارامترهای موثر بر رشد شهری در شهر مشهد انتخاب می‌گردند.

#### ۳-۵-۱- طبقه‌بندی تصاویر

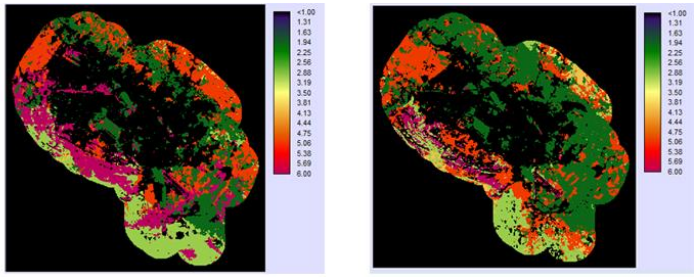
در این مقاله از تصاویر ETM+ و LANDSAT ۸ که در سال ۲۰۰۲ و ۲۰۱۵ اخذ شده اند برای پردازش رقومی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای تحلیل بصری، ترکیب رنگی از باندهای تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده است. در این مقاله برای تصویر ETM + از باندهای (۷- ۴-۱) و برای تصویر LANDSAT ۸ از باندهای (۷- ۵ - ۳) جهت ایجاد ترکیب رنگی استفاده شده است. شکل ۴-الف و ۴-ب تصاویر مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. در گام بعدی پیاده سازی، داده-های 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 ودیم، 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 ۵-الف و ۵-ب نقشه کاربری‌های طبقه بندی شده را برای سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۵ نشان می‌دهد.




**شکل (۳) : فلوچارت مطالعه پیش‌رو**




**شکل(۴): تصاویر ETM+ و ۸ LANDSAT**



(ب) (الف)

**شکل(۵): نقشه کاربری های سال ۲۰۰۲ و ۲۰۱۵**

### ۳-۵-۲- 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 است. در این مقاله برای شناسایی نیروهای محرکه رشد شهری مشهد عوامل موثر بر توسعه شهری در گذشته مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ۷پارامتر دسترسی به خطوط مواصلاتی (راه‌ها) (شکل۶-ه) ، دسترسی به ایستگاههای اتوبوس (شکل۶-ج) ، دسترسی به مترو (شکل۶-د) ، اثر شیب (شکل۶-و) ، فاصله از مراکز تجاری اصلی شهر (شکل۶-ب)، تسهیلات شهری (شکل۶-ز) ، و میزان تقاضای زمین (شکل۶-الف) به عنوان فاکتورهایی با بیشترین تاثیر بر رشد شهری انتخاب گردید.

### ۳-۶- فازی سازی قوانین انتقال و تهیه نقشه OVERLAY

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 فازی ارزش پارامترها در تعریف قوانین انتقال به بازه‌ی [۰,۱] تبدیل می‌شود. تابع عضویت در برگیرنده طیفی از اعداد است که بین حالت قابل قبول (یک) و غیرقابل قبول (صفر) درجات مختلف پذیرش را نمایش می‌دهند. با انجام عمل فازی سازی، نقشه یکنواخت شده فاکتورها در وزن فاکتورها ضرب، حاصل‌ضرب‌ها به صورت‌برداری جمع، سپس نتایج در نقشه محدودیت‌ها ضرب می‌شوند و مجموع امتیازات هر پیکسل به‌دست می‌آید. نقشه حاصله، نقشه OVER LAY یا نقشه روی هم گذاری لایه ها نامیده می‌شود. نقشه در شکل (۷) قابل مشاهده است.

### ۳-۷- 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 کالیبره‌کردن 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 همسایگی‌های بزرگ مقیاس دارد.

### ۳-۸- اجرای اتوماتای سلولی فازی

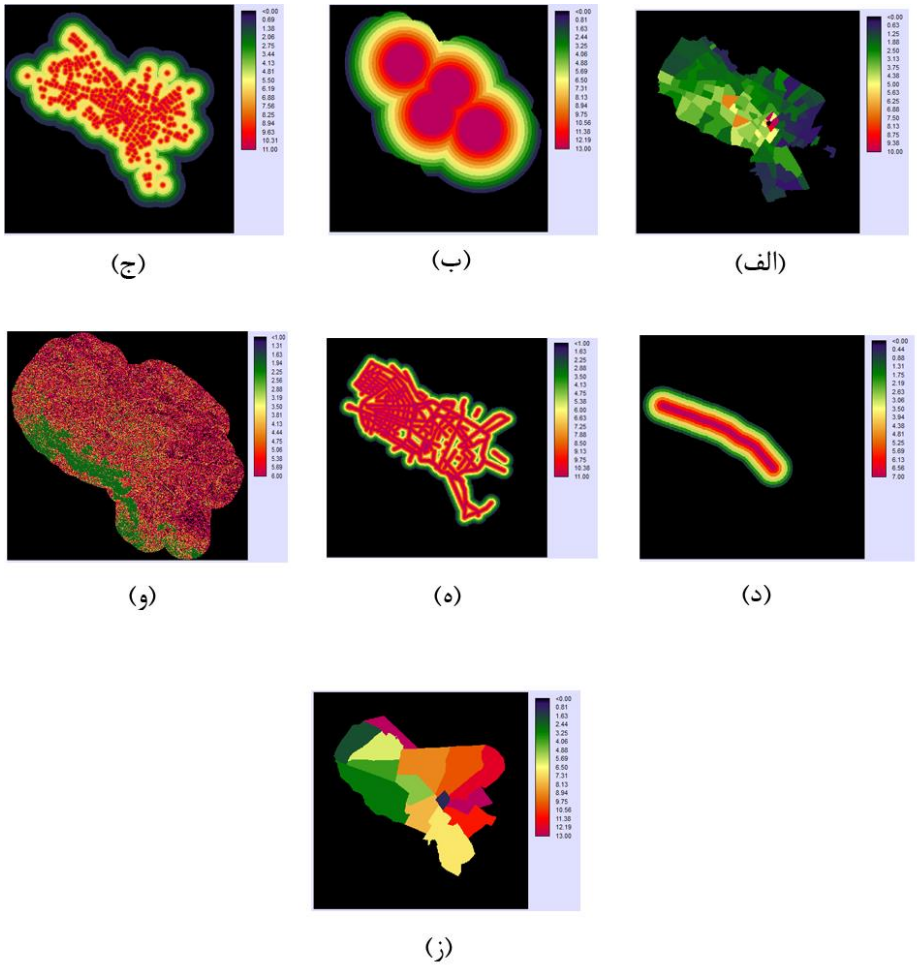
با اعمال قوانین انتقال فازی و تهیه نقشه overlay برای پارامترهای تاثیرات فیزیکی و تاثیرات انسانی، الگوریتم FCA بر روی پارامترهای مذکور و نقشه کاربری سال ۲۰۰۲ به منظور مدل‌سازی کاربری سال ۲۰۱۵ اجرا گردید. نتایج حاصل از مدل‌سازی در شکل ۱۶ قابل مشاهده است.

### ۳-۹- اعتبار سنجی مدل CA

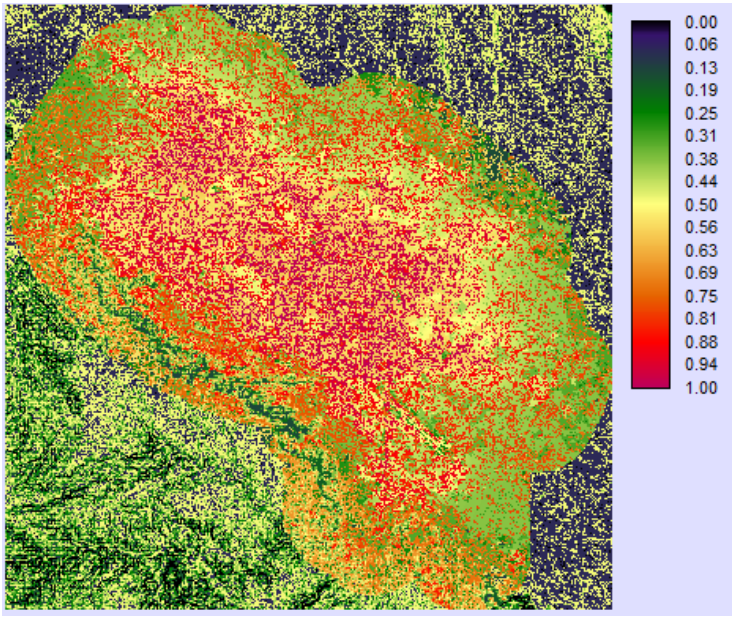
منظور از اعتبار سنجی آن است که یک مدل در زمینه کاربردی دارای محدوده‌ای از دقت رضایت بخش باشد[۱۷]. مدل‌های شهری عموما از طریق مقایسه خروجی شبیه سازی شده با مشاهدات دنیای واقعی (از طریق روش‌های مقایسه‌ای، بصری، ماتریس‌های Confusion و خطا ) اعتبارسنجی می‌گردند. اعتبار سنجی مدل CA یکی از چالش‌های پیش‌رو می‌باشد. تا به امروز بیشتر مدل‌های CA از مقایسه بصری برای تایید نتایج شبیه سازی 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 کاربری‌های مختلف شهری در مدل (به عنوان مثال دریافت شباهتی ساختاری بین توسعه واقعی و شبیه سازی شده زمین) مورد ارزیابی قرار بگیرد. در این مطالعه از ضریب همبستگی (r) برای ارزیابی مدل مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج مقایسه شبیه‌سازی نهایی و نقشه کاربری سال ۲۰۱۵ با استفاده از ضریب همبستگی در شکل (۸) 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. لازم به ذکر است که در نمودار مشاهده شده محور افقی نقشه کاربری اراضی در سال ۲۰۱۵ و محور قائم نتایج پیش‌بینی مدل‌سازی می‌باشد.

**جدول (۱): نتایج کالیبراسیون مدل CA**

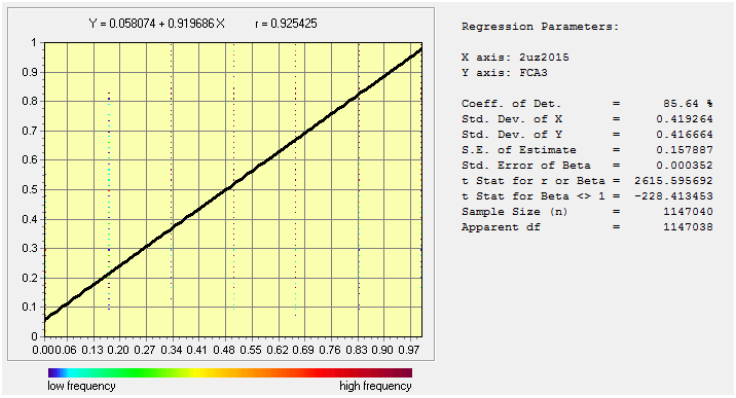
| Intercept/Variables | Coefficient |
|---|---|
| نقشه کاربری سال ۲۰۰۲ | ۰.۷٤٦ |
| دسترسی به ایستگاههای اتوبوس | ۰.۱۱۱ |
| فاصله از مراکز تجاری اصلی شهر | ۰.۱۱٦ |
| میزان تقاضای زمین | ۰.۰۳۲ |
| دسترسی به مترو | -۰.۰۷۹ |
| دسترسی به خطوط مواصلاتی (راه‌ها) | ۰.۰۷۱ |
| اثر شیب | ۰.۰۰۲ |



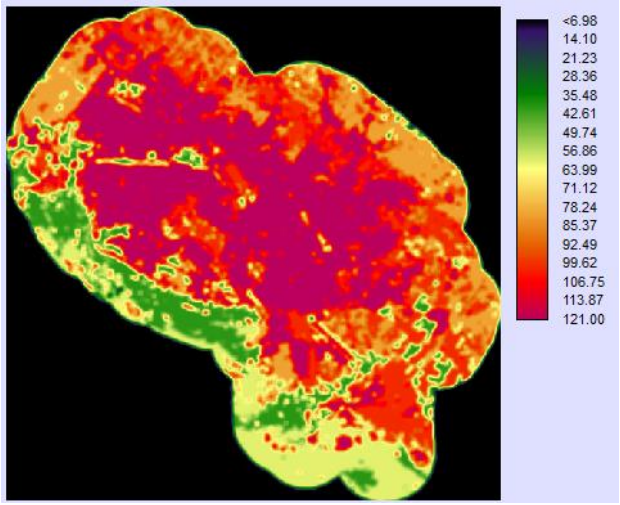

**شکل(۶): نقشه های تاثیرات فیزیکی و انسانی**




**شکل (۷): نقشه OVERLAY**




شکل (۸) : نتایج اعتبارسنجی از طریق ضریب همبستگی




شکل (۹) : پیش‌بینی رشد شهری در مشهد در سال ۲۰۲۸

## ۴- نتیجه‌گیری

CA یکی از بهترین و پرطرفدارترین مدل‌ها در مدل‌سازی رشد شهری می‌باشد. از طرفی بیان قوانین انتقال به صورت فازی سبب واقع‌بینانه تر شدن مدل CA و افزایش اعتماد پذیری مدل خواهد شد. در این مقاله، سعی بر تاثیر دادن اثرات فیزیکی و تاثیرات انسانی در مدل‌سازی رشد شهری به وسیله CA گردیده است. مدل ایجاد شده 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 (۹) 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 تصمیم-گیرندگان شهری جهت درک چشم‌انداز پیش‌رو می‌نماید.

## مراجع

[۱] سروستانی م .،"بررسی روند رشد شهر شیراز و تاثیر آن بر فضای سبز طی سه دهه گذشته" مجموعه مقالات همایش ژئوماتیک سال ۱۳۸۸، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران.

[۲] حسین‌زاده کریم ."دیدگاه‌ها، عناصر و عوامل موثر بر رشد فیزیکی شهرهای ایران" ، *مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای،شماره ششم*؛ ۲۱۴-۲۲۶.

[۳] آقا محمدی م، "بسط مفهومی توسعه پایدار" ، *فصل‌نامه مدرس علوم انسانی، دوره ۴، شماره ۱۰ ، ۱۳۸۵، ۴۳-۷۶*

[۴] زیاری ک، "مدلسازی توسعه شهری با استفاده از اتوماتای سلولی مبتنی بر منطق فازی با تاکید بر توسعه قوانین انتقال"، *پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خواجه نصیرالدین توسی، تهران، ۱۳۹۲.*

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

[٦] Caruso G, Peeters D, Cavailhès J, Rounsevell M, "*Space-time patterns of urban sprawl, a ۱D cellular automata and microeconomic approach.",* Louvain: CORE DISCUSSION., ۲۰۰۸

[۷] Williams K, "Urban intensification policies in England: problems and contradictions.", *Land Use Policy*, ۱۹۹۹, ۱۶۱-۱۷۸.

[۸] Hillman M, "In Favour of the Compact City.", *Jenks*, ۱۹۹٦, ۳٦-٤٤.

[۹] Barredo J.I, Kasanko M, McCormick N, & Lavalle C," Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata.", *Landscape and Urban Planning*, Vol. ٦٤, No. ۳, ۲۰۰۲, PP. ۱٤٥-۱٦۰.

[۱۰] Cheng J. Modelling Spatial & Temporal Urban Growth [*Doctoral Dissertation]*. Netherlands: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC) ; ۲۰۰۳

[۱۱] Langton, C., "Computation at the edge of chaos: phase transitions and emergent computation.", Physica D, ٤۲(٤), ۱۹۹۰, ۱۲–۳۷.

[۱۲] 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. ٤۱–۹۲). Redwood City: Addison-Wesley.; ۱۹۹۲

[۱۳] Bak P, Chen K, & Creutz M., "Self-organized criticality in the 'game of life'". Nature, Vol. ۳٤۲, No. ٦, ۱۹۸۹, PP. ۷۸۰–۷۸۲.

[۱٤] Wolfram S., "Universality and complexity in cellular utomata.", Physica D, Vol. ۱۰, No. ۲, ۱۹۸٤, PP. ۱–۳٥.

[۱٥] Torrens P. M., Automata-based models of urban systems., In P. Longley & M. Batty (Eds.), Advanced spatial analysis ,PP. ٦۱–۷۹, ۲۰۰۳, Redlands: ESRI Press.

[۱٦] Li X., & Yeh A. G., "Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata.", International Journal of Geographical Information Science, Vol. ۱٤, No. ۲, ۲۰۰۰, PP. ۱۳۱–۱٥۲.

[۱۷] Rykiel E. J., "Testing ecological models: The meaning of validation." Ecological Modelling, Vol. ۹۰, ۱۹۹٦, PP. ۲۲۹–۲٤٤

[۱۸] Wolfram S., Cellular automata: a model of complexity. Nature ۳۱, ۱۹۸٤, ٤۱۹–٤۲٤.

[۱۹] 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. ۹٦, ۲۰۱۰, PP. ۱۰۸–۱۲۲

[۲۰]Torrens, P. M., Cellular automata." International Encyclopedia of Human Geography, Vol.۳, No.۱۰, ۲۰۰۹, PP. ۱–٤.

[۲۱] Liu, Y., Modelling urban development with geographical information systems and cellular automata. New York: CRC Press (Taylor & Francis Group)., ۲۰۰۹

[۲۲] 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*, ۲۰۰٤

[۲۳] Torrens, P.M. "How cellular models of urban systems work. CASA working paper ۲۸. Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London. , ۲۰۰۰

[۲٤] 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.۱۲, No.۱, ۱۹۹۸, PP. ٦۹۹–۷۱٤

[۲۵] Alkheder, S., Wang, J., Shan, J. Fuzzy, "cellular automata approach for urban growth modelling. In: Proceedings ASPRS." ۲۰۰۶ Annual Conference. Reno, Nevada., ۲۰۰۶
[۲۶] Openshaw, S., & Openshaw, C., Artificial intelligence in geography. New York: Wiley Press., ۱۹۹۷
[۲۷] Wu F., (۱۹۹۶). "A linguistic cellular automata simulation approach for sustainable land development in a fast growing region." Computers, Environment, and Urban Systems, Vol. ۲۰, ۱۹۹۶, PP. ۳۶۷–۳۸۷.