

**Forecasting Land-use Changes in Mashhad, Using Cellular Automata(CA) and Artificial Neural Network Algorithm (ANN) (Case Study: Mashhad metropolitan Region)**

**Hashem Dadashpoor, Nariman Jahanzad**

Associate Professor, Urban and Regional Planning, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

[h-dadashpoor@modares.ac.ir](mailto:h-dadashpoor@modares.ac.ir)

MA degree, Regional Planning, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

[narimanjahanzad@yahoo.com](mailto:narimanjahanzad@yahoo.com)

**Abstract**

Land is the place of interactions, transactions and the node of conflicts between various social groups. It is through the land, the way of using it, and realization of forces that encounter on it (constructing the artificial environment), which the spatial organization shapes. There are lots of factors influence the land-use change, but it is human activities that generally form these changes, and subsequently changing the spatial configurations of region. The concrete crystallization of these uncontrolled activities is unequal accumulation of capital in the metropolitan region, and increasing the regional imbalances more and more. Thus it is essential that through studying the driving forces of changes in land-use, and related spatial factors, one think about the possible future processes. Then, the objective of this study is forecasting land-use changes in Mashhad metropolitan region, using Cellular Automata (ca) and Artificial Neural Network algorithm. The research method was quantitative, and using land maps in the years 1993 and 2011, land-use changes for the years of 2030, 2048, 2066 and 2084 will be simulated in Q Gis2.4 environment. The conclusions show that first, future land-use changes will lead to consuming more and more agricultural lands and grasslands, so that, deteriorating rural settlements. Secondly, the continuing of present development of urban settlements and land-use changes, may cause environmental disasters and consequently leaving irreparable socio-economic damages in the region. According to the results, it is necessary for the planning and management system of the region, to adopt a comprehensive approach in order to prevent the future environmental problems, also to control horizontal expansion of settlements.

**Keywords:** land-use Change, Simulation, Cellular Automata(CA), Artificial Neural Network (ANN), Mashhad metropolitan region.

فصلنامه علمی-پژوهشی برنامه‌ریزی فضایی (جغرافیا)

سال ششم، شماره اول، (پیاپی ۲۰)، بهار ۱۳۹۵

تاریخ وصول: ۹۴/۳/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۳/۱۱

صص: ۳۸ - ۲۱

## پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در مجموعه شهری مشهد با استفاده از سلول‌های خودکار و الگوریتم شبکه

### عصبی مصنوعی

هاشم داداش‌پور<sup>۱\*</sup>، نریمان جهانزاد<sup>۲</sup>

۱- دانشیار برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد برنامه‌ریزی منطقه‌ای، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

### چکیده

زمین مکان برهم‌کنش، تبادل و تداخل منافع گروه‌های مختلف اجتماعی است. سازمان فضایی از طریق زمین، نحوه استفاده از آن و عینیت یافتن برخورد نیروها بر آن، یعنی ساخت محیط مصنوع، شکل می‌گیرد. اگرچه تغییر کاربری اراضی به عوامل گوناگونی بستگی دارد، فعالیت‌های انسانی مهم‌ترین عاملی هستند که عمدتاً سبب تغییر کاربری زمین و در نتیجه، تغییر پیکربندی فضایی منطقه می‌شوند. تبلور عینی این فعالیت‌های افسارگسیخته، انباشت نابرابر سرمایه در منطقه کلان‌شهری و دامن‌زدن بیشتر به بی‌تعدالی‌های منطقه‌ای است. از این رو، باید با مطالعه نیروهای محرک تغییر کاربری اراضی و عوامل فضایی مرتبط با آن از فرایندهای محتمل آتی پرسش شود. بر اساس این، هدف پژوهش حاضر پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در مجموعه شهری مشهد با استفاده از سلول‌های خودکار و الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی است. روش پژوهش، کمی است و با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی در سال‌های ۱۳۷۲ و ۱۳۹۰، تغییرات کاربری اراضی برای سال‌های ۱۴۰۸، ۱۴۲۶، ۱۴۴۴ و ۱۴۶۲ در محیط QGIS2.4 شبیه‌سازی می‌شود. نتایج پژوهش نشان می‌دهند که از یک‌سو، تغییرات کاربری اراضی در سال‌های آتی به توسعه بیشتر اراضی کشاورزی، مراتع و در نتیجه، خشک‌شدن سکونتگاه‌های روستایی منجر خواهد شد و از سوی دیگر، ادامه روند فعلی تغییرات کاربری اراضی به نتایج مضر زیست‌محیطی و به تبع آن آسیب‌های اقتصادی -

اجتماعی جبران‌ناپذیر می‌انجامد. بنابراین، ضروری است دستگاه برنامه‌ریزی و مدیریت منطقه، رویکردی جامع برای جلوگیری از مشکلات زیست‌محیطی آتی و مهار توسعه افقی سکونتگاه‌ها در این منطقه در پیش گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** تغییر کاربری اراضی، شبیه‌سازی، سلول‌های خودکار (CA)، الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، مجموعه شهری مشهد

### طرح مسئله

زمین مکان برهم‌کنش‌ها، تبادلات و گره‌گاه تداخل منافع گروه‌های مختلف اجتماعی است. از طریق زمین، نحوه استفاده از آن و عینیت‌یافتن برخورد نیروها بر آن، یعنی ساخت محیط مصنوع، سازمان فضایی شکل می‌گیرد. اگرچه عوامل متعددی نظیر تغییرات جمعیتی، مهاجرت‌ها، تورم، تغییرات فناوری، ساختار اجتماعی - فرهنگی و ... از جمله محرک‌های انسانی تغییر کاربری زمین هستند (داداش‌پور و همکاران، ۱۳۹۵؛ داداش‌پور و زارعی، ۱۳۹۵)، بازیگران کلان اقتصادی با داشتن حمایت نهادهای سیاسی، تغییر کاربری زمین و از راه آن، پیکربندی فضایی منطقه را شکل می‌دهند؛ تبلور عینی این سیاست‌ها، انباشت نابرابر سرمایه در مناطق کلان‌شهری و دامن‌زدن بیشتر به بی‌تعادلی‌های منطقه‌ای است (داداش‌پور و همکاران، ۱۳۹۵). بنابراین، با مطالعه نیروهای محرک تغییر کاربری اراضی و عوامل فضایی مرتبط با آن‌ها باید از فرایندهای محتمل آتی پرسش و تحولات آینده را با توجه به شاخص‌ها و اهداف برنامه‌ریزی کاربری اراضی پایدار داوری کرد.

مجموعه شهری مشهد با بیش از ۳۰۰۰۰۰۰ نفر جمعیت، دومین منطقه کلان‌شهری کشور از نظر وسعت و اندازه است. این مجموعه شهری به دلیل موقعیت خطیر مرزی، نقش بسزایی در توسعه ملی ایفا می‌کند و از این رو، کانون محرک توسعه ملی و منطقه‌ای است (داداش‌پور و جهان‌زاد، ۱۳۹۴). مجموعه شهری مشهد به‌تنهایی بالغ بر ۹۵ درصد جمعیت شهری ناحیه و نزدیک به ۷۵ درصد جمعیت کل ناحیه مشهد (شامل شهرستان‌های فریمان، مشهد، بینالود، چناران و کلات) و حدود ۹۰ درصد ارزش افزوده کل ناحیه را به خود اختصاص داده است. این امر، نبود تعادل ناحیه‌ای، تمرکز سرمایه و قدرت این مجموعه شهری را نشان می‌دهد (داداش‌پور و همکاران، ۱۳۹۵) و پیامد منطقی این تمرکز، رشد کالبدی شهر مرکزی و انباشت نامتوازن و روزافزون سرمایه و قدرت خواهد بود. رشد کالبدی این کلان‌شهر از نظر زیست‌محیطی موجب تخریب اراضی سبز و کشاورزی، بورس‌بازی زمین و رانت‌خواری، افزایش آلودگی زیست‌محیطی، آسیب‌های اکولوژیکی و نداشتن تناسب اراضی توسعه‌یافته با توان طبیعی آن‌ها شده است. علاوه بر پیامدهای اکولوژیکی، تغییر کاربری اراضی کشاورزی سبب تغییرات نامناسب در اقتصاد و معیشت مردم روستایی منطقه شده است و ادامه این روند به نابودی تولید روستایی می‌انجامد و سبب مهاجرت جمعیت روستایی به کلان‌شهر مشهد، افزایش حاشیه‌نشینی و تخلیه روستاهای منطقه خواهد شد. از این رو، مطالعه بازتاب برهم‌خوردن تعادل و ترسیم آینده توسعه کالبدی این مجموعه بر پایه نیروهای محرک جاری توسعه ضروری به نظر می‌رسد.

هدف پژوهش حاضر، تحلیل عوامل و متغیرهای مؤثر و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در مجموعه شهری مشهد با استفاده از سلول‌های خودکار و الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی است. برای دستیابی به این هدف کلان باید به دو پرسش پاسخ گفت: ۱- چه عوامل و متغیرهایی بر تغییر کاربری اراضی در مجموعه شهری مشهد تأثیرگذار هستند؟ ۲- چهره کالبدی و ساختار فضایی مجموعه شهری مشهد با تکیه بر تداوم نیروهای پیشران جاری توسعه در سال‌های آتی چگونه خواهد بود؟

### مبانی نظری

اصطلاح مجموعه شهری مشتمل بر شمار درخور توجهی از شهرهایی است که گرد هسته اقتصادی مربوط به یک یا دو شهر بسیار بزرگ به شکل خوشه‌ای تکوین یافته‌اند. اگرچه این سکونتگاه‌ها تفاوت‌های بسیاری با یکدیگر دارند، به واسطه شبکه‌های حمل‌ونقل و سیستم‌های اطلاعاتی پیشرفته، پیوند و اندرکنش بسیار زیادی با یکدیگر دارند (Lang and Knox, 2009). این مجموعه‌های شهری اصلی‌ترین مناطق توسعه شهری در سرتاسر جهان هستند و توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند (Gu et al., 2011).

امروزه ابزارهای نوینی برای درک تحولات و پویایی‌های فضایی - زمانی این مناطق ابداع شده‌اند تا از طریق شناخت جنبه‌های توسعه، برنامه‌ریزان را برای تدوین راهبردهای مبتنی بر توسعه پایدار یاری کنند (Berling-Wolff and Wu, 2004). برای الگوسازی تغییرات کاربری به چهار دسته الگوی شبیه‌سازی اشاره می‌شود: دسته نخست، الگوهای پیش از دهه ۱۹۴۰ که کوشش می‌کنند ساختار و ریخت‌شناسی شهری را از راه تحلیل رگرسیونی کمی‌سازی کنند؛ این دسته، الگوهای آماری - اقتصادی هستند و از جمله این الگوها عبارتند از: الگوی منطقه متمرکز<sup>۱</sup>، الگوی بخشی<sup>۲</sup> و الگوی چند هسته‌ای<sup>۳</sup>. دسته دوم، الگوهای تعامل فضایی هستند که بر اساس نظریه جاذبه نیوتون و از دهه ۱۹۶۰ به بعد طراحی شدند؛ این الگوها بیشتر بر ترسیم مناسبات فضایی میان سکونتگاه‌ها متمرکز و الگوی جاذبه و الگوی لآوری از جمله آن‌ها هستند. دسته سوم که در دهه ۱۹۷۰ ظهور کردند، الگوهای بهینه‌یابی هستند که از برنامه‌نویسی خطی و الگوهای تصمیم‌گیری برای ترسیم تحولات فضایی و الگوی بهینه‌یابی بهره می‌گیرند. دسته چهارم، الگوهای یکپارچه هستند که بر اساس نظریه‌های پیچیدگی در سال‌های دهه ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ ظهور کردند و در دهه اخیر با پیشرفت علوم رایانه‌ای، شکل‌های گسترده‌تری یافته‌اند؛ از جمله این الگوها، سلول‌های خودکار، الگوهای چندعاملی و همچنین استفاده از الگوریتم‌های پیچیده‌ای نظیر شبکه عصبی مصنوعی در این الگوها هستند (Berling-Wolff and Wu, 2004; Portugali, 2011; Portugali et al., 2012). برای شبیه‌سازی با استفاده از هر یک از الگوهای یادشده، باید ابتدا نیروهای محرک فضایی تغییر شناخته شوند؛ برای شناخت این نیروهای محرک، بیشتر از روش‌های میدانی و اسنادی استفاده می‌شود.

<sup>1</sup> Concentric zone model

<sup>2</sup> Sector model

<sup>3</sup> Multiple nuclei model

## پیشینه پژوهش

پژوهش‌های متعددی در راستای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی (یا الگوسازی گسترش شهری) انجام شده‌اند:

کامیاب و همکاران (۱۳۹۰) برای شبیه‌سازی توسعه شهر گرگان از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند. آن‌ها پس از بررسی تغییرات شهری طی بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۱ و با اعمال سه دسته متغیر بیوفیزیک، اجتماعی - اقتصادی و کاربری زمین، آینده رشد شهر گرگان را برای سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۲۰، ۲۰۳۰، و ۲۰۴۰ پیش‌بینی کردند. مشخص شد که از میان متغیرهای استفاده‌شده، متغیرهای کاربری زمین‌های کاشت‌شده، تعداد سلول‌های شهری و کاربری مرتعی بیشترین اثر را در دوره زمانی مطالعه‌شده و متغیرهای فاصله تا مراکز آموزشی، کاربری جنگل و زمین‌های بایر، کمترین اثر را بر رشد شهری گرگان داشته‌اند و به عبارتی، نوع کاربری منطقه بر توسعه شهری گرگان تأثیر زیادی داشته است.

احدنژاد روشنی و همکاران (۱۳۹۰) در پژوهشی پس از بررسی و ارزیابی تغییرات کاربری اراضی شهر اردبیل در بازه زمانی ۱۳۶۳ تا ۱۳۹۰ و بر اساس ترکیب روش زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار، تغییرات آتی اراضی شهر اردبیل را برای دوره ده‌ساله پیش‌بینی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که طی ۲۷ سال، حدود ۳۴ درصد تغییر کاربری انجام شده و این تغییر، بیشتر از فعالیت‌های انسانی نظیر گسترش سکونتگاه‌ها و اراضی ساخته‌شده روی اراضی کشاورزی پیرامون شهر ناشی شده است.

Kiavarz Moghaddam و Samadzadegan (۲۰۰۹) در پژوهش خود، الگوی تلفیقی سلول‌های خودکار (CA) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) را برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی در شهر اصفهان پیشنهاد کردند. هدف آن‌ها، آزمودن الگوهای یادشده برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی بود و به این منظور، چهار دهه تغییرات را از سال‌های ۱۹۷۵ تا ۲۰۰۱ رصد کردند و نتیجه پژوهش، دقت بسیار زیاد (بیش از ۹۰ درصد) این الگوی ترکیبی را نشان داد.

Falahatkar و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سال‌های ۱۹۵۵، ۱۹۷۲، ۱۹۹۰ و ۲۰۰۱ و تلفیق زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار تغییرات کاربری، پوشش اراضی را شبیه‌سازی کردند و برای اعتبارسنجی و دقت الگوی تلفیقی از سه روش استفاده کردند. نتایج نشان دادند که چنانچه فرایندهای تغییر پوشش اراضی ثابت باشند، الگو برای پیش‌بینی تغییرات سال‌های آتی مفید است.

Nadoushan و Alebrahim (۲۰۱۲) در پژوهش خود برای شبیه‌سازی تغییرات کالبدی شهر اراک از تلفیق الگوی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار استفاده کردند. آن‌ها پس از بررسی تغییرات شهری در بازه زمانی ۱۹۵۶ تا ۲۰۰۶، تغییرات توسعه شهر را برای سال ۲۰۲۵ محاسبه کردند؛ نتیجه، توانایی زیاد الگو در پیش‌بینی را نشان داد.

داداش‌پور و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۱۳۶۵، ۱۳۷۵ و ۱۳۸۵ و با در نظر گرفتن نیروهای محرک اجتماعی - اقتصادی، توسعه آتی کلان‌شهر تهران را برای سال ۱۴۰۵ پیش‌بینی کردند. آن‌ها

در پژوهش خود، سه سناریوی رشد اندک، رشد میانه و رشد شدید را شبیه‌سازی کردند و نتیجه پژوهش نشان داد که تفاوت‌های اصلی میان سه سناریو، میزان گسترش یا کاهش اراضی است که به تقاضای کاربری اراضی متفاوت در شرایط متفاوت اقتصادی اجتماعی وابسته است.

Sajadi و Mohammadi (۲۰۱۴) برای تخمین آینده تقاضای کاربری‌های شهری در یکی از مناطق اصفهان، تغییرات کاربری شهری را با روش سلول‌های خودکار در این منطقه محاسبه کردند. در این پژوهش، روش CA برای تشخیص بهترین تصمیم درباره مسئله مدنظر، مفید و کارا تشخیص داده شد.

Saeedi Razavi (۲۰۱۴) در شبیه‌سازی رشد شهر کرمانشاه با پردازش تصاویر چندزمانی ماهواره‌ای در بازه زمانی ۱۹ ساله (۱۹۸۷، ۲۰۰۰ و ۲۰۰۶) با روش تلفیقی شبکه عصبی مصنوعی و زنجیره مارکوف، آینده تغییرات را برای سال ۲۰۲۵ پیش‌بینی کرد. نتایج این پژوهش نشان دادند که چند درصد اراضی گوناگون طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۵ تغییر خواهند کرد و چه میزان بدون تغییر خواهند ماند.

بررسی پیشینه نشان می‌دهد که پژوهش‌های مختلفی در سطح شهرهای میانی بزرگ انجام شده‌اند، هرچند مطالعات انجام‌شده در مقیاس مناطق کلان‌شهری محدود بوده‌اند. این پژوهش برخی خلأهای موجود در این زمینه را پر می‌کند.

#### عوامل و محرک‌های تغییر پوشش کاربری زمین استفاده‌شده در الگوهای مبتنی بر CA

تغییرات زمین نه تنها بخش‌های اصلی منابع طبیعی را تحت شعاع قرار می‌دهند، وابستگی تنگاتنگی با مسائل پایدار اجتماعی - اقتصادی دارند. در پژوهش‌های انجام‌شده روشن شده است که فعالیت‌های انسانی در حال حاضر نقش اصلی در تغییر کاربری زمین دارند (Jing-an et al., 2006: 179). محرک‌های تغییر کاربری اراضی به دو دسته کلی عوامل بیوفیزیکی و عوامل انسانی تقسیم می‌شوند: عوامل بیوفیزیکی، الگوی اصلی کاربری اراضی منطقه‌ای را تعیین می‌کنند. در الگوهای اولیه، کوشش می‌شد که تغییرات کاربری اراضی منطقه‌ای بیشتر بر اساس ویژگی‌های بیوفیزیکی (برای مثال، ارتفاع، شیب و نوع خاک) الگوسازی شوند. عوامل بیوفیزیکی، گرایش‌های کلان<sup>۱</sup> در فرایند تغییر کاربری زمین را تعیین می‌کنند. از سوی دیگر، فعالیت‌های انسانی در مقیاس فضایی - زمانی کوتاه، جهت‌گیری و سرعت تحول و نمو<sup>۲</sup> عوامل بیوفیزیکی را تغییر می‌دهند. عوامل انسانی (نهادی، فناوری و اقتصادی) نیروهایی هستند که به ثابت ماندن کاربری زمین کمک می‌کنند و همین عوامل از راه سرمایه‌گذاری و بسط شهرنشینی بر تغییر کاربری اراضی تأثیر می‌گذارند. در مقیاس منطقه‌ای نیز تغییرات کاربری زمین تاحدی محصول تکامل عوامل انسانی هستند که نسل‌های پیشین آن‌ها را تکوین داده‌اند. در این چارچوب، الاحمدی و همکاران (۲۰۰۹) در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که معمولاً از محرک‌هایی به شرح زیر در الگوهای شبیه‌سازی تغییر کاربری زمین استفاده می‌شود: ۱. زمان سفر یا فاصله مکانی تا شبکه‌های ارتباطی، خطوط ریلی یا متروها؛ ۲. زمان سفر یا فاصله مکانی از مراکز شهری یا مراکز سکونتی پراهمیت؛ ۳. تراکم توسعه؛ ۴. مجاورت با منابع حفاظت‌شده؛ ۵. ویژگی‌های کالبدی نظیر ارتفاع، شیب و یا نوع ساختار زمین‌شناسی زمین؛

<sup>1</sup> Macro-tendency

<sup>2</sup> evolvement

۶. مجاورت با نواحی خدمات اجتماعی - اقتصادی، تجاری، صنعتی و...؛ ۷. تناسب زیست‌محیطی؛ ۸. سیاست‌ها و مقررات برنامه‌ریزی و مدیریتی؛ ۹. محرک‌های دسترسی، میزان تراکم شهری (Al-Ahmadi et al., 2009: 84-85). الخدر و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهش خود برای شبیه‌سازی شهر ایندیاناپولیس از سه محرک اصلی دسترسی به راه‌ها، تراکم جمعیت و توپوگرافی استفاده کردند (Al-kheder et al., 2008: 1280). آلمیدا و همکاران (۲۰۰۵) در مقاله خود از شاخص‌های فاصله از رودخانه، فاصله از راه‌ها، فاصله از نواحی مراکز شهری (صنعتی، مسکونی و تفریحی) و همچنین تراکم جمعیتی برای آزمودن الگوی سلول‌های خودکار برای شهری میانه‌اندام در سائوپائولو استفاده کردند (Almeida et al., 2005: 952). باردو و همکاران (۲۰۰۳) در شبیه‌سازی تغییرات شهر دوبلین با الگوی سلول‌های خودکار از سه دسته نیروهای محرک شامل دسترسی، ویژگی‌های همسایگی‌های محلی و تناسب اراضی برای سکونت شهری، پهنه‌بندی و توجه به مناطق حفاظت‌شده استفاده کردند (Barredo et al., 2003: 150). کاروسو و همکاران (۲۰۰۵) در شبیه‌سازی مناطق سکونتگاهی پیراشهری شهر بروکسل با الگوی سلول‌های خودکار از عوامل محرک دسترسی به راه‌ها، عوامل محیطی و نزدیکی به مراکز خدمات‌رسانی استفاده کردند (Caruso et al., 2005: 106). چنگ و ماسر نیز برای شبیه‌سازی رشد شهر ووهان و درک پویایی‌های فضایی آن با الگوی سلول‌های خودکار و محرک‌های دسترسی به راه‌ها، تراکم جمعیتی، پهنه‌بندی و فاصله از مراکز شهری و خدماتی، پژوهش خود را انجام دادند (Cheng and Masser, 2004: 183). هه و همکاران (۲۰۰۸) در مقاله‌ای برای شبیه‌سازی پویایی‌های فضایی منطقه پکن بر اساس الگوی سلول‌های خودکار، الگویی جدید با عنوان UED ارائه کردند و برای این کار، از محرک‌هایی مانند دسترسی، فاصله از خطوط ریلی، فاصله از مراکز شهری، شیب، ارتفاع و پهنه‌بندی کاربری‌ها استفاده کردند (He et al., 2008: 175). لی و یه (۲۰۰۲) با الگوی سلول‌های خودکار مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی، منطقه‌ای از محرک‌های فاصله از مراکز شهری، دسترسی و شیب تغییرات کاربری زمین در دلتای رودخانه مروارید در جنوب چین را شبیه‌سازی کردند (Li and Yeh, 2002: 333).

شان و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از سلول خودکار و تلفیق الگوریتم ژنتیک به‌عنوان الگوریتم تولید قواعد انتقال سلول‌ها در منطقه ایندیاناپولیس، تغییرات کاربری اراضی را شبیه‌سازی و برای این کار تنها از محرک تراکم جمعیت استفاده کردند (Shan et al., 2008: 1267). یانگ و همکاران (۲۰۰۸) در پژوهش خود با روش سلول خودکار و تلفیق آن با روش انتقال غیرخطی SVM، تغییرات توسعه شهر شنژن<sup>۱</sup> در چین را الگوسازی کردند. عوامل محرک این پژوهش شامل دسترسی، فاصله از خطوط ریلی و فاصله از مراکز شهری بودند (Yang et al., 2008: 597).

<sup>۱</sup> Shenzhen

جدول - ۱: عوامل استفاده‌شده در پژوهش‌های پیش‌بینی مبتنی بر مدل CA

ارتفاع	شیب	تراکم جمعیتی / تراکم شهری	پهنه بندی / مقررات مدیریتی	فاصله از خطوط ریلی	فاصله از مراکز شهری	فاصله از راه / دسترسی به راه	
*	*	*	*			*	الاحمدی و همکاران (۲۰۰۹)
	*	*	*			*	القدر و همکاران (۲۰۱۰)
*	*	*		*	*	*	آلمیدا و همکاران (۲۰۰۵)
			*		*	*	باردو و همکاران (۲۰۰۳)
	*				*	*	کاروسو و همکاران (۲۰۰۵)
		*	*		*	*	چنگ و ماسر (۲۰۰۴)
*	*	*	*	*	*	*	هه و همکاران (۲۰۰۸)
	*				*	*	لی و همکاران (۲۰۰۲)
		*					شان و همکاران (۲۰۰۸)
				*	*	*	یانگ و همکاران (۲۰۰۸)

منبع: نویسندگان، ۱۳۹۵

## روش‌شناسی پژوهش

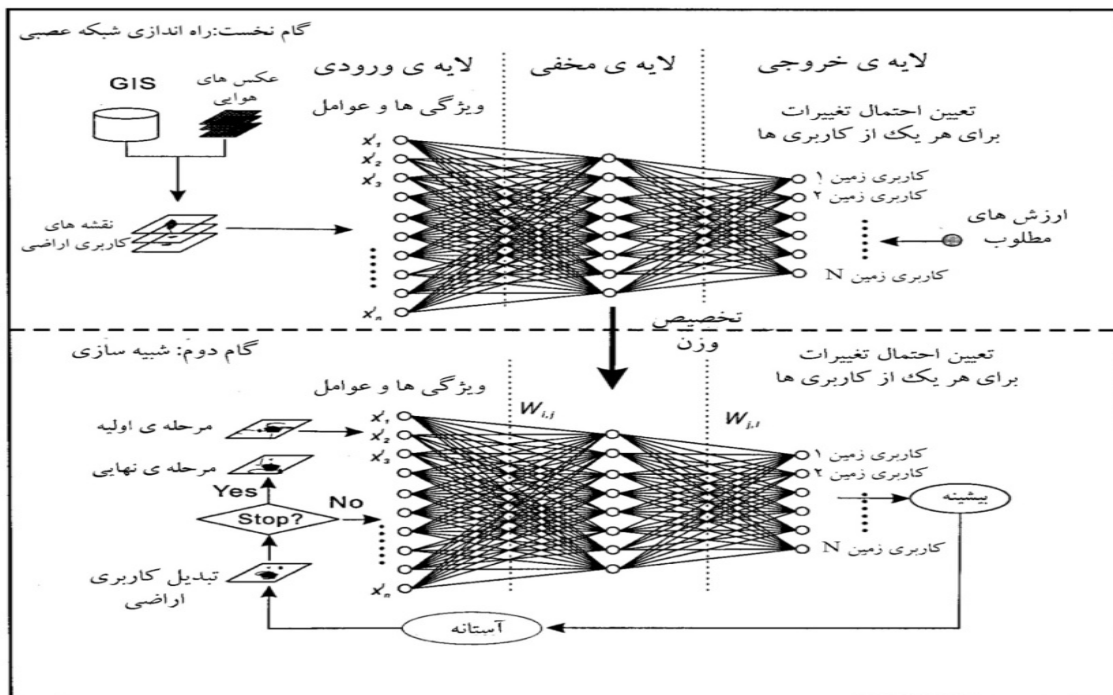
روش پژوهش در مطالعه حاضر، کمی و منطق حاکم بر آن، استقرایی است. برای دستیابی به داده‌ها، ابتدا نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۱۳۷۲ و ۱۳۹۰ به کمک سازمان‌های مربوطه و تصاویر هوایی تهیه و پردازش می‌شوند. برای به‌روزرسانی نقشه‌های GIS برای سال ۱۳۹۰ از نرم‌افزار Google earth و سایر تصاویر هوایی موجود استفاده می‌شود. سپس، آن‌ها وارد محیط GIS می‌شوند و فایل‌هایی با فرمت Shape file تهیه می‌شوند. سپس، کاربری/پوشش اراضی با توجه به ویژگی‌های بومی محدوده در پنج گروه شهری، کشاورزی، مرتع، جنگل و سایر اراضی دسته‌بندی می‌شود. از فایل‌های ایجادشده، فایل‌های رستری ایجاد می‌شوند. همچنین، عوامل محرک فضایی به روش گفته‌شده در محیط GIS به فایل‌های رستری تبدیل می‌شوند. عوامل در نظر گرفته‌شده در پژوهش حاضر عبارتند از: دسترسی به راه‌های اصلی، دسترسی به مراکز شهری، تراکم جمعیتی/تراکم شهری و شیب. برای رسیدن به عوامل فضایی مؤثر بر تغییر کاربری زمین، دو مرحله باید طی شود: نخست، باید سکونتگاه‌های واجد ظرفیت تغییر کاربری شناسایی شوند؛ این عامل به‌مثابه عامل انسانی تغییر است یعنی فرایند شهری‌شدن سرمایه،



منطق و کارکرد سرمایه‌گذاری در منطقه و برای تعیین آن‌ها، دو دسته عوامل بیوفیزیکی و انسانی بررسی می‌شوند. معیارهای بررسی شده برای سنجش عبارتند از: جمعیت، دسترسی سکونتگاه‌ها به منابع آب زیرزمینی، ارتفاع مناسب برای توسعه، شیب مناسب برای توسعه و میزان فاصله تا راه‌های اصلی. از طریق این معیارها، عوامل مؤثر بر تداوم روند توسعه وضع موجود شناسایی شدند. دوم، خروجی کار، یکی از لایه‌های اصلی تغییر پس از شناخت سکونتگاه‌های واجد ظرفیت معرفی شد. همچنین عوامل راه، شیب، ارتفاع و دسترسی به آب نیز شناسایی شدند. در گام سوم، از تفاضل نقشه‌های سال‌های ۱۳۷۲ و ۱۳۹۰، نقشه تغییرات کاربری زمین حاصل شد؛ بر اساس این نقشه، ماتریس انتقال کاربری‌ها استخراج می‌شود که همان منطق تغییرات گذشته است. خروجی گام سوم، نقشه و ماتریس انتقال است. در گام چهارم، الگوسازی ظرفیت تغییرات آینده انجام می‌شود؛ در این گام، ظرفیت انتقال کاربری‌ها با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی در محیط Quantum GIS 2.4 الگوسازی می‌شود و داده‌های مراحل پیش با استفاده از سلول‌های خودکار در محیط Quantum GIS 2.4 وارد الگو می‌شوند و تغییرات کاربری برای چهار دوره ۱۴۰۸، ۱۴۲۶، ۱۴۴۴ و ۱۴۶۲ شبیه‌سازی می‌شوند.

### شرح اجمالی فرایند عملکرد الگوی CA-ANN

الگو به دو بخش راه‌اندازی الگوریتم یادگیری توسط ANN و بخش شبیه‌سازی به CA تقسیم می‌شود. برای این منظور، دو گام اساسی باید برداشته شود: گام نخست، وارد کردن اطلاعات به شبکه برای شبیه‌سازی آینده تغییرات است. داده‌های ورودی شامل ویژگی‌های مکان (عوامل فضایی نظیر شیب، تراکم و دسترسی) و کاربری‌های اراضی دو دوره ۱۳۷۲ و ۱۳۹۰ هستند. گام دوم، الگوسازی با CA است. با توجه به قواعد انتقال تعریف‌شده توسط ANN، ماتریس انتقال حاصل از نقشه تفاضل و عوامل و محرک‌های تعریف‌شده، شبیه‌سازی برای دوره زمانی مدنظر انجام می‌شود.

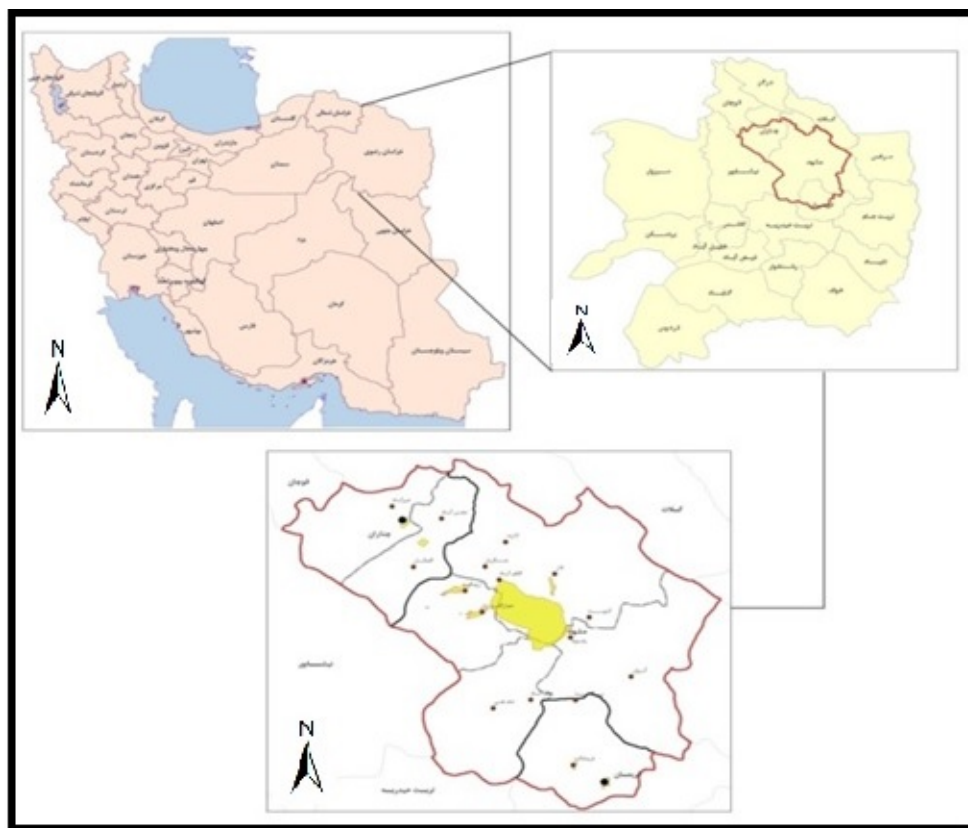


شکل - ۱: فرایند انجام شبیه‌سازی با الگوریتم شبکه عصبی و سلول خودکار (منبع: Li and Yeh, 2002)

## محدوده و قلمرو پژوهش

مجموعه شهری مشهد با مساحتی بالغ بر ۱۱۳۰۰ کیلومترمربع و حدود ۱۰ درصد سطح استان خراسان رضوی، مهم‌ترین پهنه این استان است. این منطقه بین ۵۸ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۱۸ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. مجموعه شهری از نظر تقسیم‌بندی حوضه آبریز، قسمتی از حوضه‌های کشف‌رود، کویر مرکزی و جامرود را در بر می‌گیرد. محدوده مطالعاتی از نظر توپوگرافی دارای دو ناحیه کم‌ارتفاع و دشتی و مناطق کوهستانی و پرشیب است. سرتاسر ناحیه غرب و شمال‌غرب منطقه را رشته ارتفاعات بینالود پوشانده است. ناحیه جنوب حوضه به ارتفاعات قره‌کمر و شادی‌محمد محدود می‌شود. سمت جنوب‌شرق ناحیه به بلندی‌های کوه شاهان و جهت شرق آن به رشته‌کوه بزنگان منتهی می‌شود. رشته ارتفاعات هزارمسجد، دومین بلندی مهم مجموعه شهری، سرتاسر شمال‌شرق و شمال‌محدوده را پوشش می‌دهد.

بررسی روند تحول سهم جمعیت مجموعه شهری مشهد از جمعیت منطقه خراسان و استان خراسان رضوی طی سال‌های ۱۳۶۵، ۱۳۷۵ و ۱۳۸۵، روند افزایشی سهم آن را نشان می‌دهد. سهم جمعیت مجموعه شهری مشهد از جمعیت منطقه طی سال‌های یادشده به ترتیب معادل ۳۵/۹، ۳۹ و ۴۲/۷ درصد و از جمعیت استان معادل ۴۶/۱، ۴۹/۵ و ۵۳/۷ درصد بوده است. طی این دوره، نرخ رشد جمعیت مجموعه شهری مشهد معادل ۲/۴۴، منطقه خراسان معادل ۱/۵۷ و استان خراسان رضوی معادل ۱/۶۶ بوده است (داداش‌پور و جهانزاد، ۱۳۹۴).



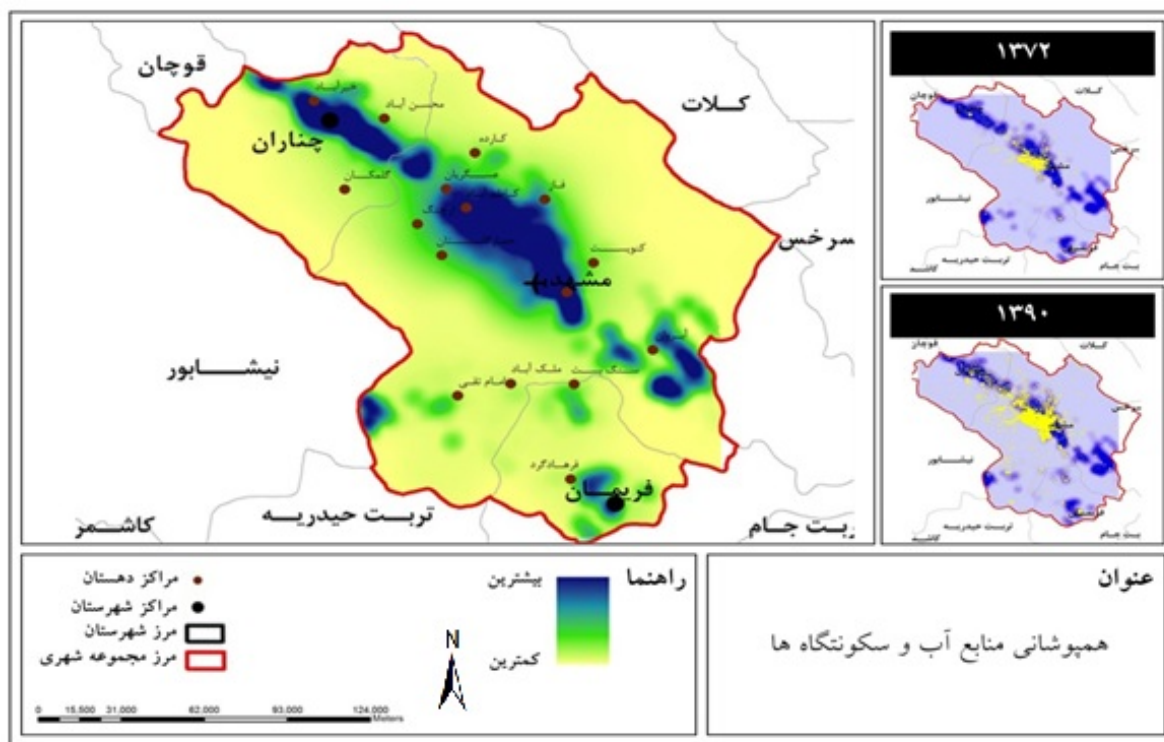
شکل - ۲: محدوده منطقه کلان‌شهری مشهد

### بحث و یافته‌های پژوهش

با توجه به روش‌شناسی تشریح‌شده در بخش پیش، دو فرایند عمده برای پاسخگویی به دو پرسش پژوهش طی شد: نخست، شناسایی محرک‌های فضایی توسعه در مجموعه شهری مشهد و دوم، پیش‌بینی تغییرات احتمالی آبی بر اساس محرک‌های شناخته‌شده.

همپوشانی سکونتگاه‌ها با لایه دسترسی به آب

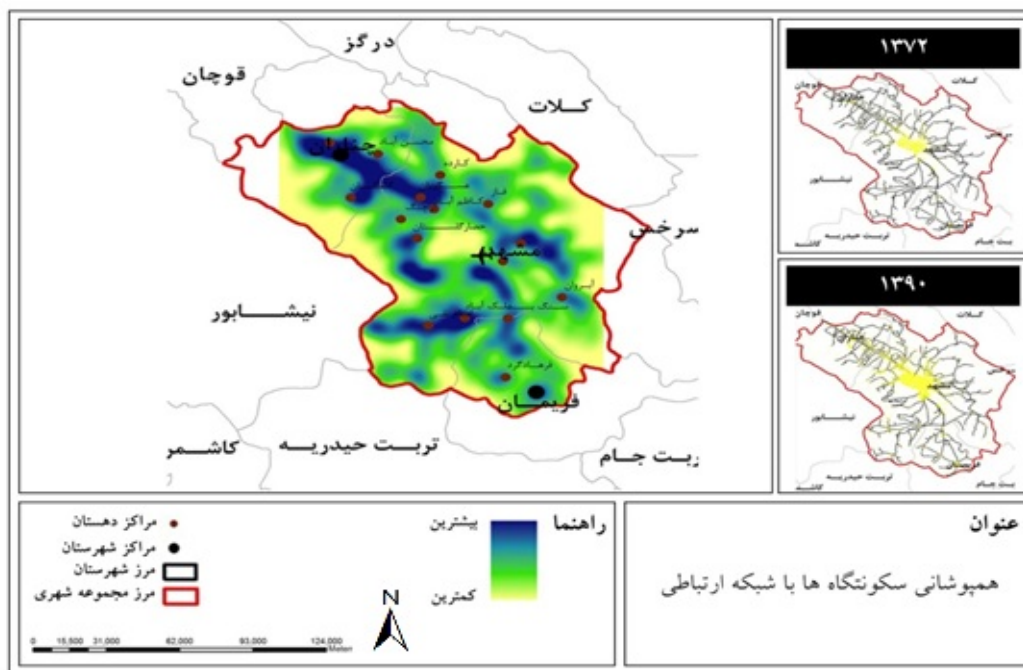
رشد شهرنشینی طی سال‌های ۱۳۷۲ و ۱۳۹۰ بر اساس نسبت آن‌ها به دسترسی به منابع آب زیرزمینی بررسی شد (شکل ۳). همان‌طور که شکل (۳) نشان می‌دهد، بخش‌های اصلی سکونتگاه‌های مجموعه شهری مشهد در ناحیه‌هایی رشد و توسعه یافته‌اند که امکان دسترسی به آب بیشتری وجود داشته است. با وجود این، سکونتگاه‌های طبقه و شانزدهم به دلیل دسترسی به سایر منابع آبی (بجز چاه‌ها) توسعه یافته‌اند و از این رو، دسترسی به آب‌های زیرزمینی عامل مهمی در توسعه سکونتگاه‌هاست، اما تعیین‌کننده نیست (شکل ۳).



شکل - ۳: همپوشانی لایه منابع آب و سکونتگاه‌ها

### همپوشانی راه‌ها با سکونتگاه‌ها

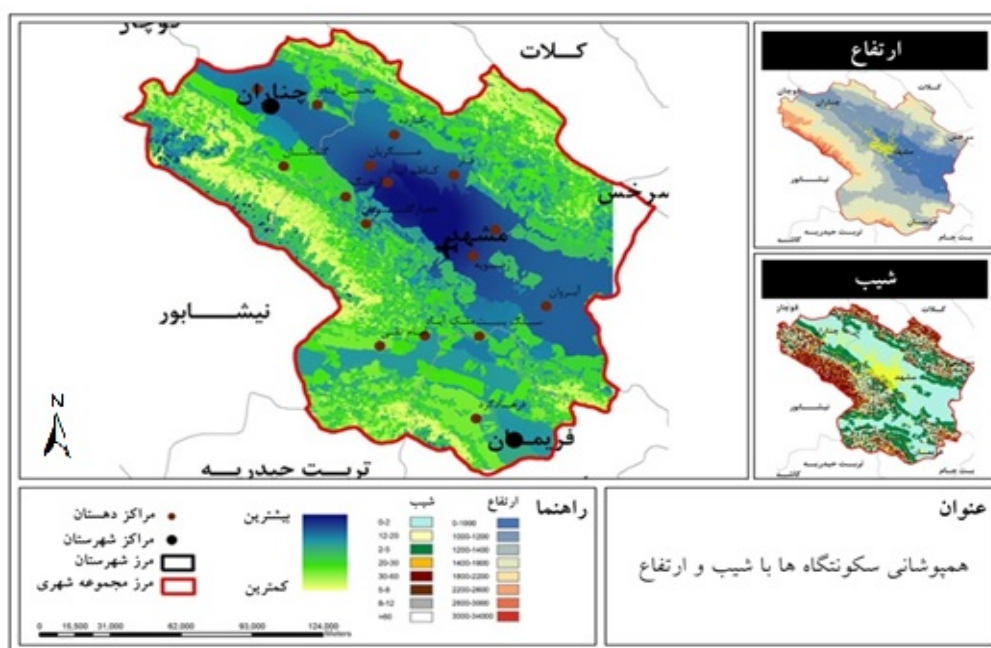
در این قسمت نیز با رصد تحولات رشد کالبدی در دو دوره ۱۳۷۲ و ۱۳۹۰ و با روی هم‌گذاری آن‌ها با یکدیگر، راه‌های اصلی و کلیدی در توسعه کالبدی شناسایی می‌شوند. هدف از شناسایی راه‌های اصلی این است که وجود زیرساخت‌های اساسی و مهم، ابزار نیرومندی برای جذب سرمایه و به تبع آن، جهت‌گیری رشد در آن راستا خواهد بود (شکل ۴).



شکل - ۴: همپوشانی سکونتگاه‌ها با شبکه ارتباطی

#### همپوشانی شیب و ارتفاع با سکونتگاه‌ها

در این بخش نیز با بررسی تحولات سکونتگاه‌ها بر اساس لایه‌های شیب و ارتفاع، لایه مؤثر نهایی شناسایی می‌شود. شکل ۵ نشان می‌دهد که در مکان‌هایی که شیب و ارتفاع زیاد بوده، توسعه چندانی اتفاق نیفتاده است؛ به این معنا که توسعه در شیب‌ها و ارتفاعات برای سرمایه‌گذاری مقرون به صرفه نبوده است و بنابراین، نواحی یادشده باید از دور خارج شوند (شکل ۵).

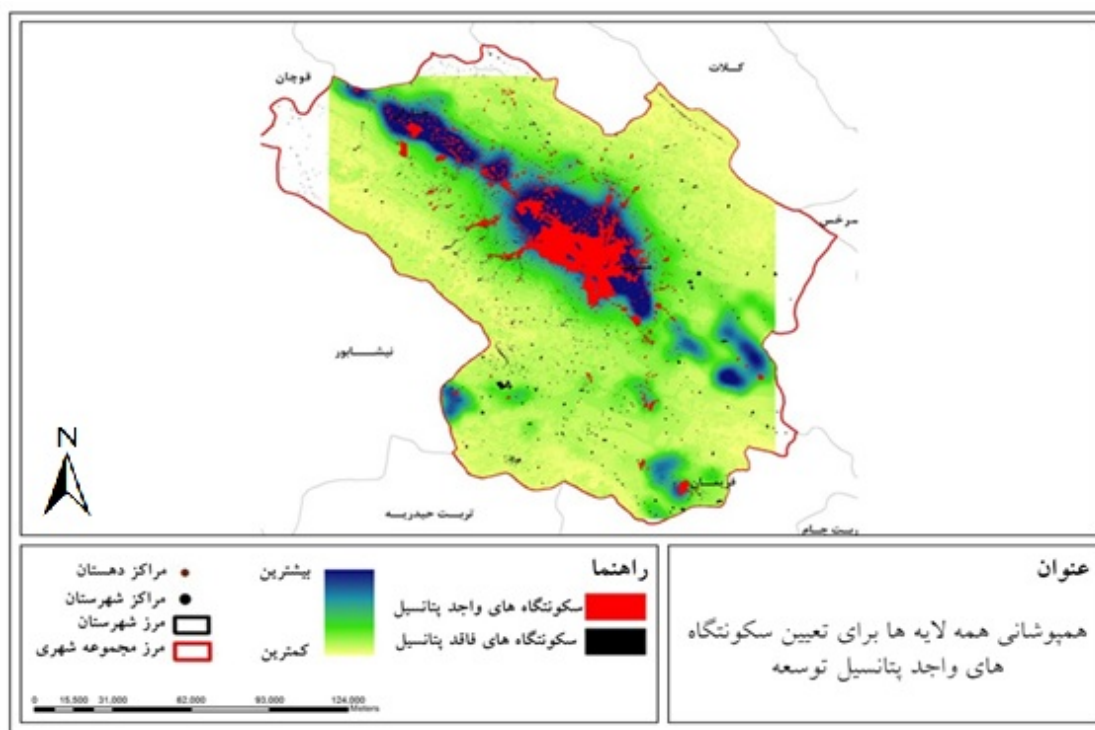


شکل - ۵: همپوشانی سکونتگاه‌ها با شیب و ارتفاع

### همپوشانی لایه‌ها برای یافتن لایه سکونتگاه‌های واجد ظرفیت تغییر

در این بخش، لایه‌های جمعیت، شیب، ارتفاع، فاصله نسبت به منابع آب زیرزمینی و فاصله سکونتگاه‌ها از راه‌ها و شبکه‌های ارتباطی با استفاده از دستور محاسبه‌گر رستری<sup>۱</sup> روی هم انداخته می‌شوند و خروجی کار، دو دسته سکونتگاه خواهد بود: سکونتگاه‌هایی که با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند، واجد ظرفیت تغییر بوده‌اند و به‌عنوان عامل انسانی تغییر کاربری اراضی برای شبیه‌سازی انتخاب شده‌اند. سکونتگاه‌های سیاه‌رنگ فاقد ظرفیت تغییر هستند و بنابراین از دایره عوامل مؤثر توسعه برای شبیه‌سازی خارج می‌شوند.

تفسیر فضایی این امر چنین است که سکونتگاه‌های قرمز رنگ واجد شرایط اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مناسب برای سرمایه‌گذاری هستند و در چرخه انباشت سرمایه قرار می‌گیرند ولی سکونتگاه‌های سیاه‌رنگ به دلیل نداشتن ویژگی‌های یادشده درخور توجه سرمایه‌گذاران نخواهند بود و نقشی در رشد آتی مجموعه نخواهند داشت (شکل ۶).

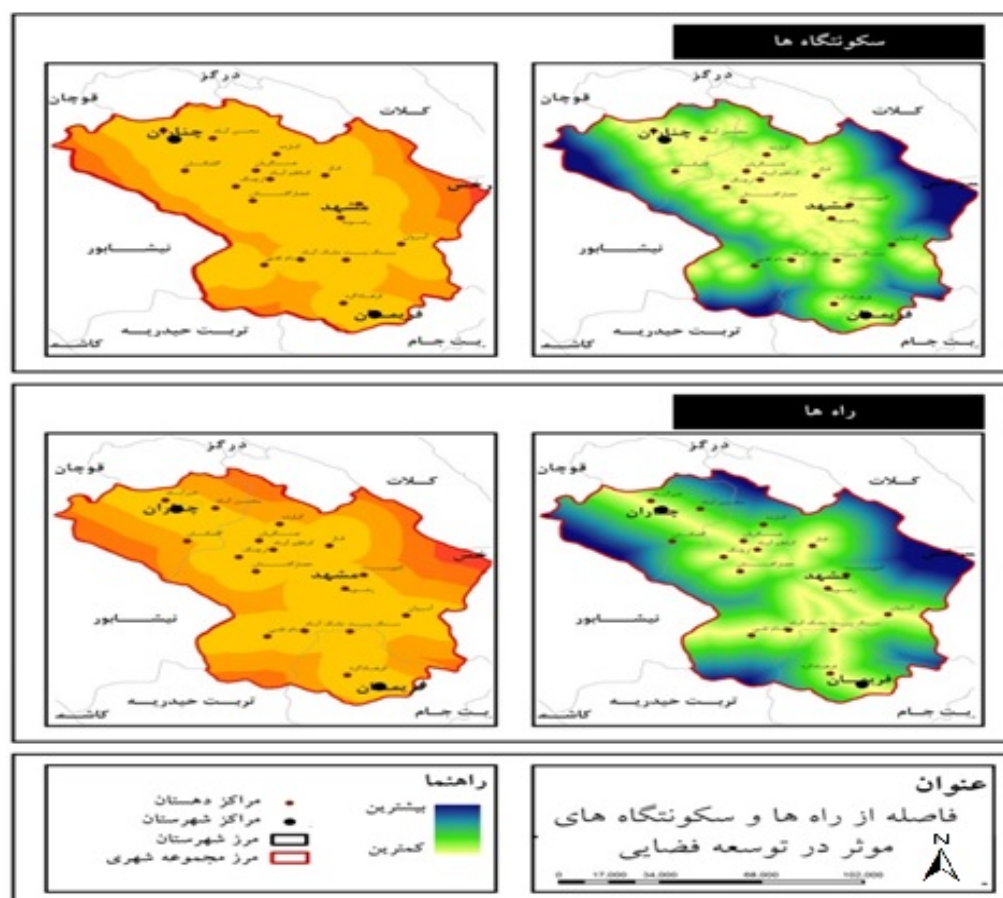


شکل - ۶: همپوشانی همه لایه‌ها برای تعیین سکونتگاه‌های واجد ظرفیت توسعه

### تعیین عوامل فضایی نهایی برای تغییر کاربری

در بخش پیش، سکونتگاه‌های واجد ظرفیت تغییر انتخاب شدند. در این بخش، سایر عوامل مؤثر بر اساس روش گفته‌شده شناسایی می‌شوند. ابتدا، بر اساس لایه سکونتگاه‌های بخش پیش، نقشه «فاصله» تهیه می‌شود تا آستانه‌های فضایی مؤثر در تغییر مشخص شوند. سپس، به همین روش برای لایه راه‌ها که در بخش پیش بررسی شد، آستانه فضایی مؤثر در توسعه شناسایی می‌شود (شکل ۷). در نهایت، متغیرهای مؤثر در تغییر عبارتند از: سکونتگاه‌های دارای ظرفیت توسعه، راه‌های اصلی واجد ظرفیت توسعه، شیب، دسترسی به آب و ارتفاع از سطح دریا.

<sup>1</sup> Raster calculator

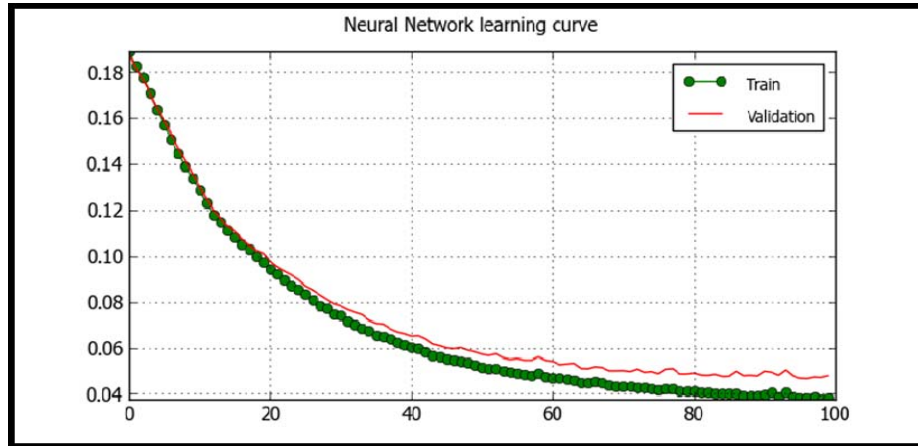


شکل - ۷: فاصله از راه‌ها و سکونتگاه‌های مؤثر در توسعه فضایی

شبیه‌سازی تغییرات کاربری آینده بر اساس الگوی CA

الگوسازی ظرفیت تغییرات و شاخص کاپا

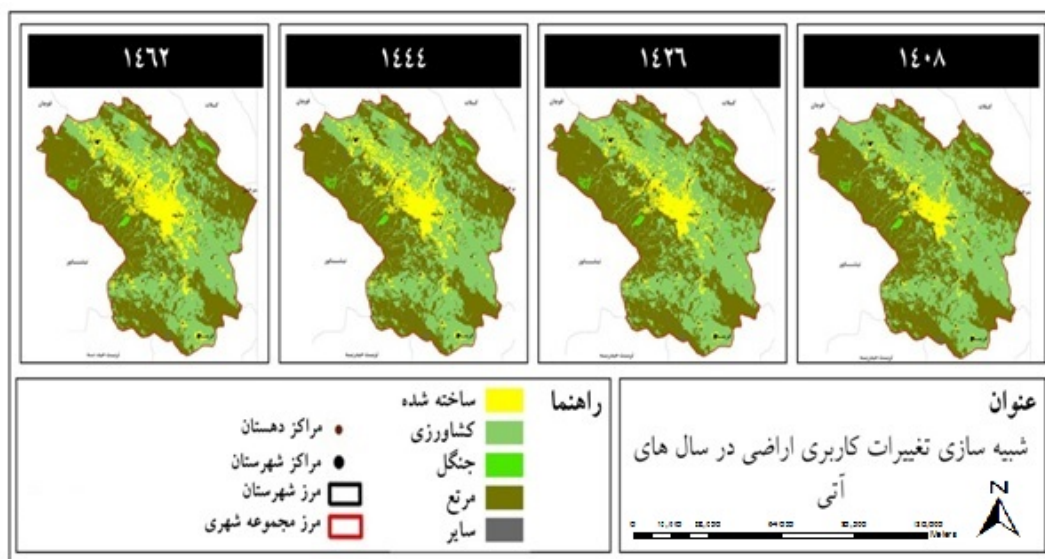
در این بخش با الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه، ظرفیت تغییرات تعیین می‌شود که خود، مبنای شبیه‌سازی با سلول‌های خودکار است. نمودار یادگیری شبکه عصبی در شکل (۸) مشاهده می‌شود. شاخص اعتبارسنجی کاپا معادل ۰/۸۲، خطای کلی اعتبارسنجی حداقل معادل ۰/۰۴۶ و دلتا (شاخص دقت کلی) معادل منفی ۰/۰۰۱ محاسبه شد. زیاد بودن مقدار عددی شاخص کاپا، دقت زیاد و اعتبار روند شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همچنین مقدار دلتا، فاصله بین خطای اعتبارسنجی حداقل و خطای اعتبارسنجی جاری را نشان می‌دهد؛ این مقدار، دقت زیاد الگو و سازگاری زیاد عوامل فضایی انتخاب‌شده با یکدیگر را نشان می‌دهد. تفسیر اعداد چنین است که خروجی‌های حاصل از مراحل پیش در تعیین عوامل مؤثر فضایی معنادار بودند و همبستگی نیرومندی با یکدیگر دارند. در غیر این حالت (یعنی معنادار نبودن و یا هم‌بسته نبودن عوامل)، شاخص کاپا عددی زیر ۰/۵ را نشان می‌داد و خطای کلی اعتبارسنجی بیشتر از ۰/۱ می‌بود (شکل ۸).



شکل - ۸: یادگیری شبکه عصبی مصنوعی

بر اساس ظرفیت تغییرات با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و روشی که در بخش پیش تشریح شد، تغییرات کاربری اراضی برای سال‌های ۱۴۰۸، ۱۴۲۶، ۱۴۴۴ و ۱۴۶۲ شبیه‌سازی شدند (شکل ۹). همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، هرچه مرکز مجموعه بیشتر بزرگ شود، کریدور مشهد- چناران نیرومندتر می‌شود. این رشد با توسعه یافتن اراضی کشاورزی و مراتع همراه است، به طوری که فعالیت‌های صنعتی در آینده به واسطه ویژگی افسارگسیختگی و کنترل نشده بودن آنها، تأثیرات گسترده‌ای بر شرایط زیست‌محیطی خواهند گذاشت (شکل ۹).

مطابق جدول (۲)، در سال ۱۴۰۸ مساحتی معادل ۲۴۷ کیلومتر مربع به مساحت اراضی ساخته‌شده در سال ۱۳۹۰ اضافه می‌شود، در سال ۱۴۲۶ این رقم به ۵۰۴ کیلومتر مربع می‌رسد و معادل ۱۰۰۴ کیلومتر مربع می‌شود، در سال ۱۴۴۴ مساحتی معادل ۷۵۸ کیلومتر مربع به اراضی ساخته‌شده اضافه می‌شود و در نهایت در سال ۱۴۶۲، مساحت ۱۰۱۳ به مساحت اراضی ساخته‌شده در سال ۱۳۹۰ اضافه خواهد شد و معادل ۱۵۱۴ کیلومتر مربع خواهد شد (جدول ۲).



شکل - ۹: شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی در سال‌های ۱۴۰۸ تا ۱۴۶۲

جدول- ۲: مساحت کاربری‌های زمین در سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۴۶۲

مساحت سال	مساحت سال	مساحت سال	مساحت سال	مساحت سال	مساحت سال	
۱۴۶۲	۱۴۴۴	۱۴۲۶	۱۴۰۸	۱۳۹۰	۱۳۷۲	
۱۵۱۴/۱۴	۱۲۵۹/۲۲	۱۰۰۴/۷	۷۴۸/۰۵	۵۰۰/۶۴	۲۵۴/۷۲	ساخته شده
۴۳۷۶/۰۷	۴۵۸۹/۵۳	۴۸۰۳/۵۳	۵۰۱۶/۷۶	۵۲۲۸/۸۳	۵۴۴۱/۷۶۴	کشاورزی
۹۷/۳۹	۹۷/۴۷	۹۷/۶۶	۹۷/۸۵	۹۸/۱۹	۹۸/۴	جنگل
۵۲۵۰/۹۹	۵۲۹۳/۵۴	۵۳۳۵/۹۲	۵۳۷۷/۹۱	۵۴۲۰/۲۳	۵۴۶۱/۶۹	مرتع
۷۱/۳۵	۷۱/۶۶	۹۴/۷۱	۷۲/۲۷	۷۲/۶۶	۷۲/۹۹	سایر

منبع: نویسندگان، ۱۳۹۵

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با استفاده از روش CA و الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی برای الگوسازی ظرفیت تغییرات کاربری اراضی، تحولات آینده کاربری اراضی برای چهار دوره زمانی ۱۴۰۸، ۱۴۲۶، ۱۴۴۴ و ۱۴۶۲ پیش‌بینی شد.

یافته‌ها نشان می‌دهند که از ۱۱۳۲۰ کیلومترمربع مساحت کل مجموعه شهری مشهد، سهم اراضی ساخته شده در سال ۷۲ حدود ۲ درصد و در سال ۹۰ نزدیک به ۴/۴ درصد بود و این روند به شکل فزاینده تغییر خواهد کرد و به رقم ۶/۶۱ در سال ۱۴۰۸، رقم ۸/۸۸ در سال ۱۴۲۶، رقم ۱۱/۱۲ در سال ۱۴۴۴ و رقم ۱۳ درصد در سال ۱۴۶۲ خواهد رسید. گفتنی است که هدف پیش‌بینی این نیست که توسعه دقیقاً در آن سال ویژه به مقدار مشخص شده خواهد رسید، بلکه فرض الگو این است که اگر متوسط نرخ سرمایه‌گذاری در سال‌های آتی نظیر روند سال‌های پیش باشد، اعداد و ارقام گفته شده به احتمال زیاد محقق خواهند شد؛ هر تغییری در نرخ رشد جمعیت و نرخ سرمایه‌گذاری، روند رسیدن به اعداد یادشده را در سال‌های آتی تسریع می‌کند یا به تعویق می‌اندازد.

ادامه روند توسعه وضع موجود (بدون دخالت ناگهانی نیروهای خارجی) ناگزیر شکلی مشابه نتایج پژوهش حاضر خواهد داشت، هرچند نمی‌توان تاریخ چندان دقیقی برای آن تعیین کرد. با توجه به یافته‌های پژوهش، نتیجه‌گیری می‌شود که اول، تغییرات کاربری اراضی در سال‌های آتی به تبدیل هرچه بیشتر اراضی کشاورزی و مراتع و خشک‌شدن سکونتگاه‌های روستایی منجر خواهد شد. دوم، با توجه به دارایی‌های زیست‌محیطی و طبیعی منطقه، ظرفیت چندان برای توسعه در مجموعه شهری وجود ندارد و سوم، ادامه روند فعلی تغییرات کاربری اراضی نتایج زیست‌محیطی و به تبع آن اقتصادی-اجتماعی جبران‌ناپذیری برجای می‌گذارد. بر اساس این، باید دستگاه برنامه‌ریزی و مدیریت منطقه رویکرد جامعی برای جلوگیری از مشکلات زیست‌محیطی آتی و مهار توسعه افقی سکونتگاه‌ها در این منطقه برگزیند.

بررسی و مطالعات در زمینه پیش‌بینی تغییرات در کاربری زمین نشان می‌دهند که عوامل و سنجه‌های مختلفی بر این پدیده تأثیر می‌گذارند. تفاوت‌ها و نحوه تأثیرگذاری هر یک از این سنجه‌ها سبب شده است که روش‌ها و الگوهای مختلفی در بررسی مفهومی و الگوسازی آن‌ها به کار گرفته شود. از این رو، بررسی این تغییرات برای



پیش‌بینی تغییرات آتی کاربری زمین در سایر مناطق کلان‌شهری، بر شناخت شباهت‌ها و تفاوت‌های اثرگذار بر تغییرات کاربری زمین مؤثر است. از سوی دیگر، فهم تغییرات در کاربری زمین فقط به عوامل کمی محدود نیست بلکه بازیگران کلان رسمی و غیررسمی دیگری نیز هستند که موجب تغییر کاربری زمین می‌شوند و از راه آن، پیکربندی فضایی منطقه را شکل می‌دهند؛ تبلور این امر، در انباشت نابرابر سرمایه در مناطق کلان‌شهری تجلی می‌یابد. بنابراین با لنز روش‌شناختی کیفی، نیروهای محرک تغییر کاربری اراضی و عوامل فضایی مرتبط با آن مطالعه می‌شوند تا تحولات آتی پیش‌بینی و ارزیابی شوند.

## منابع

- ۱- احدنژاد روشتی، محسن، زلفی، علی، شکرپور دیزج، حسین (۱۳۹۰)، ارزیابی و پیش‌بینی گسترش فیزیکی شهرها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: شهر اردبیل ۱۴۰۰-۱۳۶۳)، آمایش محیط، دوره ۴، شماره ۱۵، صص ۱۲۴-۱۰۷.
- ۲- داداش‌پور، هاشم، زارعی، عبدالله (۱۳۹۵)، تحلیل عوامل محرک انسانی اثرگذار بر تغییرات کاربری زمین در شهرستان چالوس، آمایش جغرافیایی فضا، دوره ۶، شماره ۲۰، صص ۳۴-۱۷.
- ۳- داداش‌پور، هاشم، جهانزاد، نریمان (۱۳۹۴)، شبیه‌سازی تغییرات آتی کاربری زمین بر اساس الگوی بهینه اکولوژیک در مجموعه شهری مشهد، پژوهش‌های جغرافیایی برنامه‌ریزی شهری، دوره ۳، شماره ۴، صص ۳۵۹-۳۴۳.
- ۴- داداش‌پور، هاشم، جهانزاد، نریمان، جلیلی، هما (۱۳۹۵)، تحلیل و پیش‌بینی تحولات ساختار فضایی منطقه کلان‌شهری مشهد طی دوره ۱۳۷۵-۱۴۲۰، مطالعات شهری، شماره ۱۸، صص ۶۳-۵۱.
- ۵- داداش‌پور، هاشم، خیرالدین، رضا، یعقوب‌خانی، مرتضی، چمنی، بهنام (۱۳۹۳)، مدل‌سازی تغییرات کاربری زمین در کلان‌شهر تهران با استفاده از مدل MOLAND، برنامه‌ریزی منطقه‌ای، دوره ۴، شماره ۱۶، صص ۶۴-۴۹.
- ۶- داداش‌پور، هاشم، لواسانی، امیررضا (۱۳۹۴)، تحلیل الگوهای فضایی پراکنده‌رویی در منطقه کلان‌شهری تهران، برنامه‌ریزی فضایی، (۱)۵، دوره ۳، شماره ۲، صص ۱۴۶-۱۲۳.
- ۷- کامیاب، حمیدرضا، سلمان ماهینی، عبدالرسول، حسینی، محسن، غلامعلی‌فرد، محسن (۱۳۹۰)، کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در مدل‌سازی توسعه شهری (مطالعه موردی: شهر گرگان)، پژوهش‌های جغرافیایی انسانی، ۷۹، صص ۹۹-۱۱۳.
- 8- Al-Ahmadi, K., Heppenstall, A., Hogg, J.(2009), **Calibration of a fuzzy cellular automata model of urban dynamics in Saudi Arabia**, Ecological Complexity, 6(2), pp. 80-101.
- 9- Al-kheder, S., Wang, J., Shan, J.(2008), **Fuzzy inference guided cellular automata urban-growth modelling using multi-temporal satellite images**, International Journal of Geographical Information Science, 22 (11-12), pp. 1271-1293.
- 10- Almeida, C. M., Monteiro, A. M. V., Camara, G., Soares-Filho, B. S., Cerqueira, G. C., Pennachin, C. L., Batty, M.(2005), **GIS and remote sensing as tools for the simulation of urban land-use change**, International Journal of Remote Sensing, 26 (4), pp. 759-774.

- 11- Barredo, J. I., Kasanko, M., McCormick, N., Lavalle, C. (2003), **Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata**, Landscape and Urban Planning, 64(9), pp. 145-160.
- 12- Berling-Wolff, S., Wu, J. (2004), **Modeling urban landscape dynamics: A review**, Ecological Research, 19(1), pp. 119-129.
- 13- Caruso, G., Rounsevell, M., Cojocaru, G.(2005), **Exploring a spatio-dynamic neighbourhood-based model of residential behaviour in the Brussels periurban area**, International Journal of Geographical Information Science, 19(2), pp. 103-123.
- 14- Cheng, J., Masser, I. (2004), **Understanding spatial and temporal processes of urban growth: cellular automata modelling**, Environment and Planning. B, Planning and Design, 31(3), pp. 167-194.
- 15- Falahatkar, S., Soffianian, A. K., Ahmadi-Nadoushan, M. (2011), **Integration of Remote Sensing Data and GIS for prediction of Land cover map**, International Journal of Geomatics and Geosciences, 1(4), pp. 112-132.
- 16- Gu, C., Hu, L., Zhang, X., Wang, X., Guo, J.(2011), **Climate change and urbanization in the Yangtze River Delta**, Habitat International, 35, pp. 544-552.
- 17- He, C., Okada, N., Zhang, Q., Shi, P., Li, J. (2008), **Modelling dynamic urban expansion processes incorporating a potential model with cellular automata**, Landscape and Urban Planning, 86, pp. 79-91.
- 18- Jing-an, S., chao-fu, W., De-ti, X. (2006). **Insight on drivers of landuse change at regional scale**, Chinese geographical science, 16(2), pp. 176-182.
- 19- Kiavarz Moghaddam, H., Samadzadegan, F. (2009), **Urban simulation Using Neural Network and Cellular Automata for Land Use Planning**, Proceedings REAL CORP, 12(5), pp.10-24.
- 20- Lang, R., Knox, P. K. (2009), **The new Metropolis: Rethinking Megalopolitan**, Regional Studies, 43(6), pp. 789-802.
- 21- Li, X., Yeh, A.(2002), **Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS**, International Journal of Geographical Information Science, 16(4), pp. 323-343.
- 22- Nadoushan, M., Alebrahim, A.(2012), **Predicting Urban Expansion in Arak Metropolitan Area Using Two Land Change Models**, World Applied Sciences journal, 18(8), pp. 1124-1132.
- 23- Portugali, J. (2011), **Complexity, Cognition and the City**, Springer, Berlin.
- Portugali, J., Meyer, H., Stolk, E. (2012), **Complexity Theories of Cities Have Come of Age**, Springer, Berlin.
- 24- Sajadi, M., Mohammadi, M. (2014), **The Urban Land-use Planning Using Cellular Automata: A case Study of first Municipal district of Isfahan city, Iran**, Vol 3(5),pp. 33-42.
- 25- Saeedi Razavi, B. (2014), **Predicting the trend of Land Use Changes Using Artificial Neural Network and Markov Chain Model (case study: Kermanshah City)**, Research Journal of Environmental and earth sciences 6(4), pp. 215-226.
- 26- Shan, J., Al-kheder, S., Wang, J. (2008), **Genetic algorithms for the calibration of cellular automata urban growth modeling**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 74 (10), pp. 1267-1277.
- 27- Yang, Q., Li, X., Shi, X. (2008), **Cellular automata for simulating land use changes based on support vector machines**, Computers and Geosciences, 34, pp. 592-602.