



نسخه از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS
سال دوم، شماره دوم، تابستان ۱۳۸۹
Vol.2, No.2, Summer 2010
۱۷-۳۴

شبیه‌سازی رشد شهری در تهران، با استفاده از مدل CA-Markov

محمد مهدی خوش‌گفتار^۱، محمد طالعی*^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۹/۱۲/۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۴/۷

چکیده

با توجه به رشد سریع شهرها در کشورهای در حال توسعه، نیاز به مدیریت و برنامه‌ریزی مناسب، به پرهیز از تأثیرات مخرب زیست‌محیطی و اجتماعی-اقتصادی آن، همواره احساس می‌شود. در این زمینه، طراحان و برنامه‌ریزان شهری به اطلاعات مکانی و زمانی مرتبط با الگو و میزان رشد، به‌منظور درک بهتر فرایند رشد شهری و تأثیرات آن نیاز دارند. تلفیق سامانه‌های اطلاعات مکانی و سنجش از دور، ابزار مؤثری را برای جمع‌آوری و آنالیز اطلاعات زمانی- مکانی فراهم می‌سازد. این تحقیق، ضمن بررسی و مدل‌سازی توسعه شهری در دو دهه گذشته، به پیش‌بینی توسعه شهر تهران طی دو دهه آینده می‌پردازد تا پایه و اساسی را برای مدیریت شهری فراهم سازد. در این تحقیق، مدل شبیه‌سازی و پیش‌بینی رشد شهری CA-Markov به کار برده شد و این مدل با استفاده از داده‌های تاریخی به‌دست آمده از مجموعه‌های زمانی تصاویر ماهواره‌ای لندست - مربوط به سال‌های ۱۹۸۸، ۲۰۰۰ و ۲۰۰۶ - کالیبره گردید. با توجه به نقشه‌های پوشش / کاربری زمین به‌دست آمده از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای، منطقه شهری در این مدت با ۱۱ درصد (حدود ۵۶ کیلومتر مربع) افزایش مواجه شده است. همچنین مدل CA-Markov به‌منظور شبیه‌سازی رشد شهری برای سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۵ اجرا گردید و نتایج به‌دست آمده بیانگر رشد ۳ درصدی (حدود ۱۵ کیلومتر مربع) در مناطق شهری از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۵ است. نتایج تحقیق حاکی از کارایی بالای مدل تلفیقی CA-Markov در پایش روند توسعه شهر در سال‌های گذشته و پیش‌بینی رشد شهری برای سال‌های آتی براساس الگوی رشد سال‌های گذشته است. همچنین کاربرد روش تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط نرم‌افزار Idrisi برای در نظر گرفتن پارامترهای توسعه و رشد شهری، از دیگر ویژگی‌های این تحقیق است.

کلیدواژه‌ها: Cellular Automata (CA)، زنجیره مارکوف، سامانه اطلاعات مکانی، پیش‌بینی رشد شهری، ارزیابی چندمعیاره.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولی‌عصر، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده نقشه‌برداری. تلفن: ۸۸۷۸۶۲۱۲

۱- مقدمه

رشد و توسعه سریع و پراکنده شهری، به کار بسته‌اند و می‌کوشند که از عهده تقاضاهای جدید به وجود آمده به‌واسطه تمرکز رو به افزایش مردم در شهرها و انجام برنامه‌ریزی کارآمد برای تغییر در کاربری زمین، برآیند. این سیاست‌های برنامه‌ریزی شامل پیش‌بینی تغییرات یا گرایش‌ها به سمت توسعه و گسترش در آینده با استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی شهری است. برای غلبه بر مشکلاتی مانند پراکندگی شهری، در مطالعات گسترش شهری به بررسی و تحقیق در مورد فرم‌های شهری بهتر پرداخته می‌شود تا بتوان به توسعه پایدار محیط شهری کمک کرد. به این دلیل، مطالعه پدیده رشد و پراکندگی شهری، با کمک مدل‌سازی‌های مبتنی بر داده‌ها و اطلاعات زمانی و مکانی اهمیت یافته است و از نیروهای محرکه اصلی برای این تحقیق به شمار می‌آید. در این مطالعه نیز به شبیه‌سازی رشد شهری در مناطق غیرشهری و مستعد شهری شدن، با تمرکز بر کاربری‌های اصلی شهر و بدون در نظر گرفتن نوع طبقه‌بندی جزئی کاربری زمین، پرداخته می‌شود.

در سال‌های اخیر، علاقه گسترده و فزاینده‌ای برای به‌کارگیری ابزارهای مرتبط با فناوری یا تکنولوژی اطلاعات - مانند سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) و مدل‌سازی رشد شهری - به عنوان ابزارهای حامی تصمیم‌گیری در زمینه برنامه‌ریزی و طراحی شهری، ایجاد شده است (Yeh and Sudhira, 2004, Liu and Zhou, 2005, Jat et al., 2003 Li, 2003, Herold, et al., 2008). سنجش از دور ماهواره‌ای موجب فراهم آمدن داده‌های چندطیفی و چندزمانه‌ای شده است، که هم از نظر هزینه کارآمد هستند، و هم اطلاعات ارزشمندی را برای درک و فهم و پایش الگوها و پروسه‌های توسعه زمین به دست می‌دهند، و مجموعه‌ای از داده‌های پوششی و کاربری زمین را نیز به وجود می‌آورند. این داده‌های می‌توانند

در سرتاسر جهان، پوشش‌های طبیعی زمین تحت تأثیر رشد شهری قرار گرفته‌اند. این رشد و گسترش سبب تغییر کاربری و پوشش زمین در بسیاری از کلان‌شهرهای دنیا و به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه می‌شود - و ایران نیز مستثنی نیست. در زمان حاضر گرایش جمعیتی به سمت زندگی در محیط‌های شهری است. جمعیت دنیا از ۲/۵۲ میلیارد نفر در سال ۱۹۵۰ به ۶/۹ میلیارد نفر در سال ۲۰۰۸ رسیده است و بیش از نیمی از این جمعیت اکنون در مناطق شهری سکونت دارد (United Nations Populations Division, 2010). رشد جمعیت منجر به توسعه سریع شهرها می‌شود، و این خود سبب تغییرات در کاربری و پوشش زمین در اکثر مناطق کلان‌شهرها می‌گردد.

ایران، به عنوان کشوری در حال توسعه، به مانند بیشتر کشورهای دنیا، با رشد سریعی در شهرهای خود، چه از نظر مکانی و چه از نظر جمعیتی مواجه بوده است. این امر در چند شهر بزرگ همچون تهران، مشهد، تبریز، اصفهان و شیراز در حال رخ دادن است. نسبت جمعیت شهری به کل جمعیت ایران در سال ۱۳۵۵، حدود ۴۷ درصد بود که این نسبت به ۶۸ درصد در سال ۱۳۸۵ رسیده است (SCI, 2008). تعداد شهرهای کوچک و بزرگ نیز بسیار افزایش یافته‌اند. تهران به عنوان بزرگ‌ترین شهر ایران، گواه این رشد سریع، چه در وسعت و چه در جمعیت در دو دهه گذشته بوده است. مطابق با سرشماری ملی، جمعیت تهران از ۱/۵ میلیون نفر در سال ۱۳۳۵ به حدود ۷ میلیون نفر در سال ۱۳۸۵ رسیده است و بدین ترتیب تقریباً ۱۹ درصد از کل جمعیت کشور در این کلان‌شهر سکونت می‌کنند (SCI, 2008).

بیشتر کشورهای دنیا، سیاست‌های برنامه‌ریزی توسعه‌یافته‌ای را برای فائق آمدن بر مشکلات ناشی از

توسعه فعلی مناطق شهری، زیرساخت‌های حمل‌ونقل اصلی، فاصله تا کالاهای بازارهای ورودی، شرایط توپوگرافی و موقعیت ویژه زمین (مناطق حفاظت شده، مناطق آبخیزداری و مانند اینها) است. این مدل‌ها در شناسایی و تعریف فاکتورهای فیزیکی و اجتماعی - اقتصادی نقش دارند، به گونه‌ای که بتوان فشار وارد بر کاربری‌های قبلی زمین و روند حرکت آنها به سوی کاربری شهری را تعیین کرد. مدل‌سازی شهری در اواخر سال ۱۹۵۰ آغاز گردید و در زمان حاضر مدل‌های شهری فراوانی که جنبه تحلیلی و آماری دارند، تکوین و توسعه یافته‌اند. برخی از این مدل‌ها، الگوهای رشد شهری را به جای پیش‌بینی رشد شهری در آینده بیان می‌کنند. بنابراین برای فهم پیامدهای مکانی رشد شهری، روش مدل‌سازی دینامیک ترجیح داده می‌شود و مورد استفاده قرار می‌گیرد (Li and Yeh, 2000; Sui and Hui, 2001).

رشد سریع در تکنولوژی‌های سنجش از دور و سامانه‌های اطلاعات مکانی و همچنین پیشرفت در علم رایانه و کاربرد آن در برنامه‌ریزی شهری سبب به وجود آمدن روش‌های مدل‌سازی مکانی جدیدی چون Cellular Automata (Clarke et al., 1997)، شبکه‌های عصبی هوشمند (Pijanowskia et al., 2002)، مدل‌های آماری (Cheng and Masser, 2003) و برخی دیگر شده است.

در زمینه مدل‌سازی و شبیه‌سازی رشد شهری در داخل کشور صرفاً تحقیقات معدودی صورت گرفته‌اند. برای مثال می‌توان به مظفری و اولی‌زاده (۱۳۸۷) در این زمینه اشاره کرد. در تحقیق مذکور، ابتدا توسعه گذشته شهر سقز، مورد بررسی قرار گرفته، و سپس با دخالت دادن متغیرهای مؤثر در توسعه فیزیکی شهر، جهات توسعه آتی شهر، با استفاده از توابع تحلیلی نظیر هم‌پوشانی، اشتراک دو مجموعه، ادغام، برش و وزن‌دهی به لایه‌ها در سامانه اطلاعات مکانی تعیین

برای تعیین نوع، مقدار و محل تغییر کاربری زمین مورد استفاده قرار گیرند. GIS محیط انعطاف‌پذیری را برای نمایش، ذخیره‌سازی و آنالیز داده‌های رقومی مورد نیاز برای بازسازی تغییر و توسعه پایگاه داده، آماده و مهیا می‌سازد.

بر این اساس، مطالعه رشد شهری آینده تهران برای طراحی و برنامه‌ریزی و مدیریت شهری، ضروری و دارای اهمیت است. این مطالعه به شبیه‌سازی رشد شهری در مناطق غیرشهری و مستعد شهری شدن، با تمرکز بر کاربری‌های اصلی شهر و بدون در نظر گرفتن نوع طبقه‌بندی جزئی کاربری زمین، می‌پردازد. اهداف اصلی این تحقیق، آنالیز تغییرات زمانی و مکانی شهر تهران در دوره زمانی ۱۹۸۸ تا ۲۰۰۶ و شبیه‌سازی و پیش‌بینی رشد شهری تهران در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۵ براساس مدل CA-Markov است.

در ادامه، پیش‌زمینه تحقیق بیان می‌گردد و سپس به بحث و استدلال در مورد داده‌ها و روش‌های اجرا پرداخته می‌شود. در قسمت بعدی بررسی نتایج و آنالیز تحقیق صورت می‌پذیرد و در پایان نیز نتیجه‌گیری مطرح می‌گردد.

۲- پیش‌زمینه تحقیق: مدل‌سازی تغییرات کاربری زمین

توانایی مدل‌سازی و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف رشد شهری، پیشرفتی پراهمیت را در زمینه تحقیق درباره تغییر کاربری زمین ایجاد می‌کند. استفاده از یک مدل پیش‌بینی که الگوهای تغییر کاربری زمین را به صورت مکانی نمایش دهد، راهکار ارزیابی دقیق نتایج مکانی و زیست‌محیطی تغییرات کاربری زمین است.

بیشترین مطالعات اخیر در این زمینه، در امریکا و اروپا و آسیا (به‌ویژه در شهرهای به سرعت در حال رشد چین) انجام گرفته است. پارامترهای مدل‌سازی به‌کار رفته به‌منظور شبیه‌سازی رشد مکانی شهری شامل

ریاضیات کاربردی—است. این روش را یکی از ریاضی دانان روسی به نام Andrei A. Markov در سال ۱۹۰۷ ارائه کرد. در روش زنجیره‌های مارکوف فرض می‌شود که تغییر کاربری زمین، روند یا پروسه‌ای تصادفی است که تغییر گروه‌های کاربری زمین به موقعیت آنها برای تغییر بستگی می‌یابد. آنالیز مارکوف بر روی مطالعه انواع پوشش گیاهی (Balzter, 2000) و تغییر پوشش شهری و غیرشهری متمرکز شده است. اگر چه بی‌توجهی این مدل‌ها به مکان نقدهایی را متوجه آنها می‌سازد، لیکن با این حال در تحقیقات مختلفی تغییر کاربری زمین با ماتریس مارکوف به گونه‌ای موفقیت‌آمیز پیش‌بینی و شبیه‌سازی شده است (Lo'pez, et al., 2001 و Weng, 2002).

روش‌های مکانی، استاتیک، خطی، مقطعی و قطعی مانند آنالیز رگرسیون، برنامه‌نویسی ریاضی و آنالیز ورودی و خروجی، که در گذشته در مدل‌سازی به‌کار برده می‌شدند، چندان برای بازتاب فاکتورهای پیچیده و دینامیک و غیرخطی موجود در سیستم شهری مناسب نیستند. مدل رگرسیونی برخلاف مدل‌های مبتنی بر CA، توانایی واردسازی دینامیک زمانی با دقت بالا را ندارد و مدل‌سازی را صرفاً با فرض ثابت بودن شرایط در آینده انجام می‌دهد. توابع موجود در سامانه اطلاعات مکانی، در نمایش پدیده‌ای دینامیک، عملکردی ضعیف و استاتیک دارند و در انجام آنالیزهای عددی و پردازش سیستم‌های زمانی—مکانی چندبعدی، ناتوان‌اند (به‌خصوص هنگامی که با داده‌های بزرگ مقیاس سر و کار یابند).

زنجیره مارکوف و CA، هر دو در واقع مدل دینامیک گسسته در زمان و موقعیت‌اند. مشکل ذاتی زنجیره مارکوف این است که اطلاعات و موقعیت مکانی را در نظر نمی‌گیرد. احتمال تبدیل ممکن است روی هر گروه پایه با صحت و دقت همراه باشد؛ اما فاقد دانش و آگاهی از توزیع مکانی تصادفی درون هر گروه کاربری

شده است. به‌علاوه، کامیاب و همکارانش (۱۳۸۹) نیز به منظور مدل‌سازی توسعه شهری برای شهر گرگان، روش رگرسیون لجستیک را—که از روش‌های برآورد تجربی است—به کار گرفته و الگوی رشد را برای منطقه مورد مطالعه در آینده استخراج کرده‌اند.

در میان مدل‌های دینامیکی، CA به احتمال زیاد، مؤثرترین روش در مدل‌سازی رشد شهری با توجه به انعطاف‌پذیری و سادگی در کاربرد و روابط نزدیک با داده‌های سنجش از دور و سامانه اطلاعات مکانی، به شمار می‌آید (Torrens, 2000). این روش را Ulam ('Cellular') و Von Neumann ('Automata') در سال ۱۹۴۰ به‌منظور آماده‌سازی و تهیه چارچوبی برای بررسی رفتار سیستم‌های پیچیده، طراحی کردند. (Schatten, 1999). CAها، سیستم‌هایی دینامیک و گسسته‌اند و رفتار آنها کاملاً بسته به روابط محلی است. فضا به عنوان شبکه‌ای یکنواخت (آرایه‌ای از سلول‌ها) سازماندهی می‌شود و هر سلول می‌تواند در یکی از حالت‌های ممکن و محدود باشد. حالت هر سلول در مرحله زمانی گسسته‌ای براساس قوانین تبدیل محلی و یکسان و موقعیت سلول‌های همسایگی آن، روزآمد یا به‌نگام می‌شود. کاربرد CA را در مدل‌سازی مکانی، در اصل Tobler (۱۹۷۹) مطرح و پیشنهاد کرد. از سال ۱۹۸۰، CA به پرکاربردترین روش در مطالعه شهری بدل گردید. Batty از پیشگامانی است که چارچوب ساده‌ای از CA را در مدل‌سازی رشد شهری به وجود آورده و توسعه داده است. نخستین کوشش در شبیه‌سازی و پیش‌بینی واقعی رشد شهری در اوایل دهه ۹۰ به‌وسیله White و Engelen (۱۹۹۳) انجام گرفت. در مطالعه فراوانی، CA برای مدل‌سازی رشد شهری به کار برده شده است (White and Engelen, 1993, White et al., 1997, Kamusoko et al., 2009). روش دیگر برای پیش‌بینی تغییر کاربری زمین، روش زنجیره‌های مارکوف—نتیجه گرفته شده از

شرقی مرکز ایالت مرکزی Mashonaland کشور زیمبابوه شبیه‌سازی شده است. دقت کلی شبیه‌سازی مدل در این تحقیق برای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۵ به ترتیب ۶۹ و ۸۳ درصد به دست آمده است.

۳- داده‌ها و روش اجرا

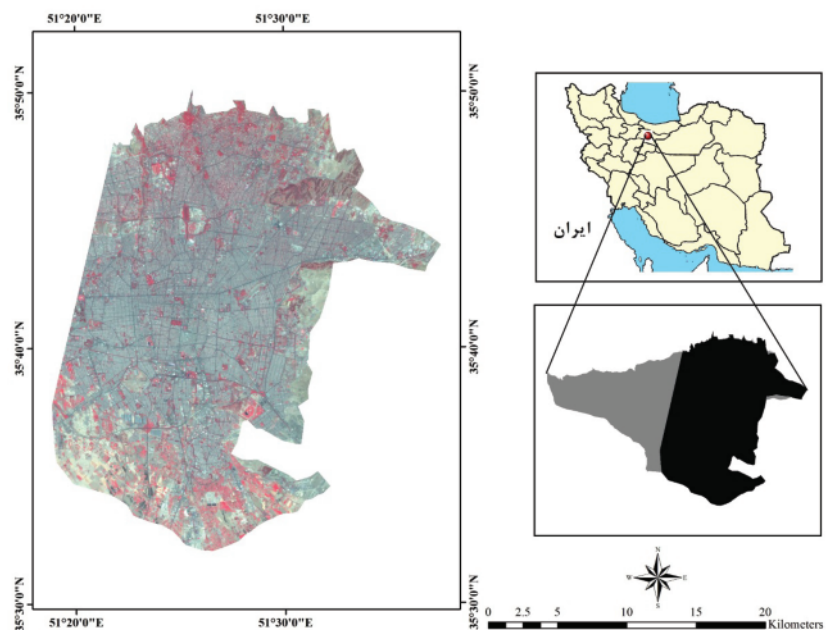
۳-۱- داده‌های مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه، بخشی از شهر تهران است (شکل ۱). در این تحقیق از تصاویر لندست (TM, ETM+) مربوط به سال‌های ۱۹۸۸ و ۲۰۰۰ و ۲۰۰۶ استفاده شده است که بخش غربی شهر تهران را در بر نمی‌گیرد (شکل ۱). تصاویر در نرم‌افزار ENVI 4.4 پردازش گردیدند. به منظور تصحیح هندسی از روش نقطه کنترل جمع‌آوری شده از نقشه توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ استفاده شد، و با استفاده از روش چندجمله‌ای درجه ۱، خطای انحراف معیار (RMS) کمتر از ۱ پیکسل به دست آمد. سپس تصاویر به دست آمده، با روش نزدیک‌ترین همسایگی با اندازه سلول ۱۵ متری، بازنویسی شدند.

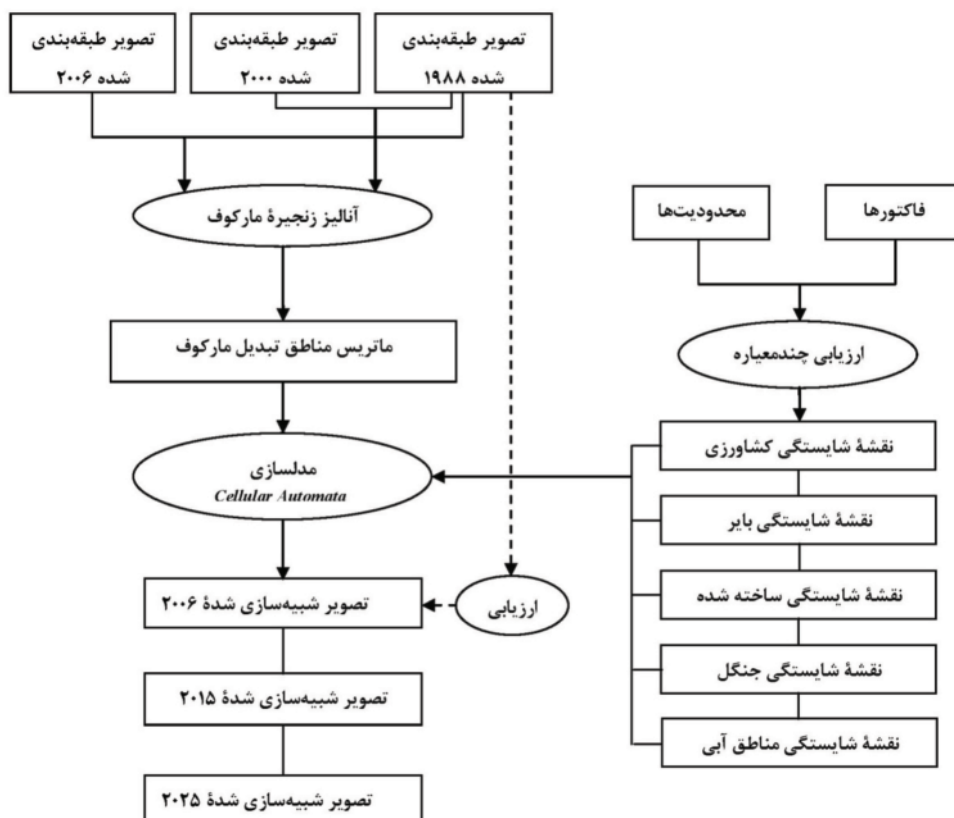
سپس تصاویر مذکور با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده Maximum Likelihood، طبقه‌بندی شدند. پس از آن، دقت طبقه‌بندی تصاویر با استفاده از داده‌های واقعی به دست آمده از نقشه پوشش / کاربری زمین تهیه‌شده به وسیله سازمان نقشه‌برداری کشور مورد بررسی قرار گرفت. دقت طبقه‌بندی کلی پوشش / کاربری زمین برای داده‌های به دست آمده بین ۸۵/۹ تا ۸۶/۴ درصد، با شاخص‌های کاپایی در حدود ۰/۷۶ به دست آمد. برای طبقه‌بندی نوع پوشش زمین، ۵ کلاس پوشش / کاربری زمین در نظر گرفته شده است. این کلاس‌ها عبارت‌اند از: زمین کشاورزی، جنگل (شامل پارک‌ها و پارک‌های جنگلی)، زمین بایر، منطقه ساخته‌شده (شامل منطقه شهری و حمل‌ونقل) و آب. نرم افزار Arc GIS 9.3 برای تفسیر و استخراج داده‌های برداری مورد نیاز، به کار برده شد.

زمین است - و به عبارتی مؤلفه مکانی در خروج مدل‌سازی وجود ندارد. به همین خاطر از CA برای اضافه کردن مشخصه مکانی به مدل استفاده می‌شود. مدل CA-Markov، روشی مناسب در مدل‌سازی دینامیک زمانی و مکانی تغییرات پوشش / کاربری زمین است و داده‌های GIS و RS می‌توانند به‌طور مؤثری مشارکت داده شوند (Li and Reynolds, 1997). در مدل CA-Markov، پروسه زنجیره مارکوف تغییرات زمانی را میان کلاس پوشش / کاربری زمین براساس احتمالات تبدیل کنترل می‌کند، در حالی که تغییرات مکانی به وسیله قوانین محلی تعیین شده از طریق فیلتر مکانی CA یا نقشه‌های شایستگی کنترل می‌گردند (Eastman et al., 2005). در سال‌های اخیر، مطالعاتی در زمینه استفاده از CA-Markov به منظور پیش‌بینی تغییرات پوشش / کاربری زمین صورت گرفته است. Pontius و Malanson (۲۰۰۵) با استفاده از مدل CA-Markov و ارزیابی چندمعیاره و به کار بردن داده‌های سه زمان مختلف که از نقشه‌های کاربری زمین موجود به دست آمده و به صورت رستری تبدیل شده‌اند، به پیش‌بینی تغییرات در Massachusetts مرکزی آمریکا پرداخته است.

در سال ۲۰۰۶، Henriquez و همکارانش نیز با استفاده از روش ذکر شده و کاربرد نقشه‌های پوشش / کاربری زمین مربوط به ۳ زمان متفاوت که از تصاویر فتوگرامتری هوایی استخراج گردیده و به فرمت رستری تبدیل شده‌اند، رشد شهری را در شهرهای Chillán و Los Angeles کشور شیلی شبیه‌سازی کرده‌اند. در ارزیابی مدل، دقت کاپایی به دست آمده برای شهر Chillán حدود ۷۹ درصد و برای شهر Los Angeles حدود ۶۴ درصد به دست آمده است. در مطالعه دیگری که Kamusoko و گروه همکار وی انجام داده‌اند، با استفاده از روش CA-Markov و داده‌های ماهواره‌ای مربوط به ۴ زمان مختلف، تغییرات پوشش / کاربری زمین در آینده، در مناطق روستایی واقع در شمال



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه: شهر تهران



شکل ۲. چارچوب مفهومی شبیه‌سازی تغییرات پوشش / کاربری زمین

۳-۲- شبیه‌سازی رشد شهری

برای پایش الگوهای مکانی رشد کاربری زمین شهری، یک مدل شبیه‌سازی تغییرات در پوشش / کاربری زمین، در نرم‌افزار Idrisi Andes شکل گرفت و توسعه داده شد، که شامل این ۳ مرحله است (نیز ن.ک. شکل ۲):

- محاسبه احتمالات تبدیل، با استفاده از آنالیز زنجیره مارکوف؛
- محاسبه نقشه‌های شایستگی پوشش / کاربری زمین براساس مرحله ارزیابی چندمعیاره؛ و
- اختصاص مکانی پوشش / کاربری زمین شبیه‌سازی شده براساس عملگر مکانی CA.

۳-۳- محاسبه احتمالات تبدیل با استفاده از

آنالیز زنجیره مارکوف

آنالیز زنجیره مارکوف، برای محاسبه احتمالات تبدیل براساس نقشه‌های پوشش / کاربری زمین استخراج شده از تصاویر لندست برای سال‌های ۱۹۸۸ و ۲۰۰۰ و ۲۰۰۶ مورد استفاده قرار گرفت. دو ماتریس تبدیل به صورت جداول متقاطع از نقشه‌های پوشش / کاربری زمین (یعنی ۱۹۸۸-۲۰۰۰ و ۱۹۸۸-۲۰۰۶) ساخته شد. فاصله زمانی به کار رفته برای کالیبراسیون، به ترتیب ۱۲ و ۱۸ سال برای ماتریس‌های تبدیل ۱۹۸۸-۲۰۰۰ و ۱۹۸۸-۲۰۰۶ بودند.

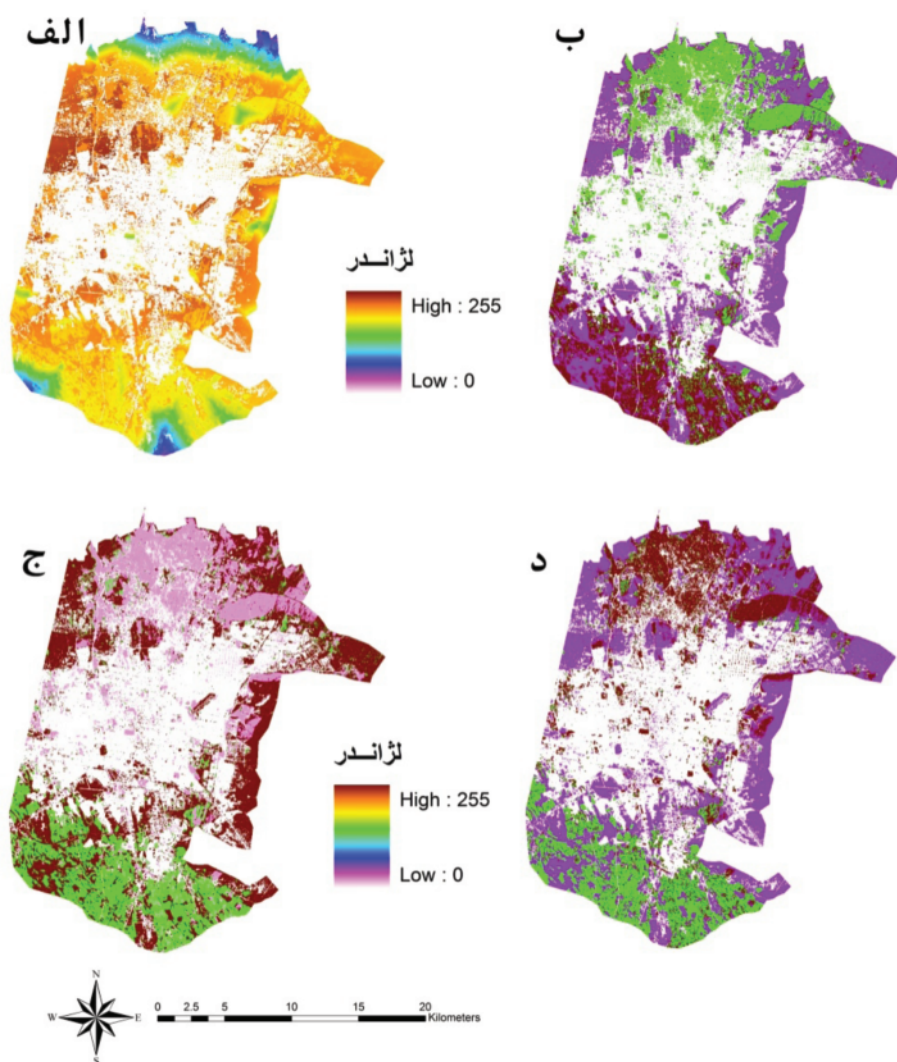
۳-۴- محاسبه نقشه‌های شایستگی پوشش /

کاربری زمین

در مرحله دوم، برای ارزیابی شایستگی پوشش / کاربری زمین به منظور تعیین کاربری زمین مناسب، از روش ارزیابی چندمعیاره استفاده شد. شایستگی شهری نیز مورد توجهی ویژه قرار گرفت، زیرا دینامیک تغییر آن بسیار پرشتاب است. در ارزیابی چندمعیاره، دو محدودیت مکانی تأثیرگذار بر رشد شهری و سه فاکتور رشد شهری تعیین شده، در کانون توجه‌اند.

محدودیت‌های مکانی شامل مناطقی است که قبلاً ساخته شده‌اند (شهری و حمل‌ونقل) و نیز منابع آبی (حریم ۵۰ متری). این در حالی است که فاکتورهای رشد شهری عبارت‌اند از: نزدیکی به جاده‌های اصلی، نزدیکی به مرکز شهر و کاربری‌های دارای بیشترین احتمال برای تبدیل به شهر شدن. اهمیت میان فاکتورها با اختصاص وزن نسبی به زوج فاکتورها از طریق پروسه تحلیل سلسله‌مراتبی (Saaty, 1997) که ابزاری برای استخراج وزن است، تعیین گردید. سپس تحلیل چندمعیاره با مشارکت محدودیت‌ها و فاکتورهای وزن‌دهی شده مذکور اجرا گردید. نتیجه، تصویر نهایی از شایستگی شهری در محدوده ۰-۲۵۵ بود، در جایی که صفر نشان‌دهنده عدم شایستگی است و ۲۵۵ بیشترین شایستگی را بیان می‌کند. نقشه‌های شایستگی در عین حال برای زمین‌های کشاورزی و بایر و جنگل نیز براساس کاربری‌های مستعد ایجاد می‌گردند (شکل ۳).

در این سه کاربری، منابع آبی و مناطقی که قبلاً ساخته شده‌اند به عنوان محدودیت در نظر گرفته می‌شوند. برای تولید نقشه فاکتور هر کاربری، کاربری‌های دیگر در محدوده ۰-۲۵۵ براساس میزان شایستگی برای تبدیل به کاربری مورد نظر، امتیازدهی می‌شوند. امتیازدهی براساس دیدگاه‌های کارشناسی و نتایج به دست آمده از آنالیز زنجیره مارکوف صورت می‌گیرد. در نهایت این فاکتور در محدودیت‌ها ضرب می‌شود و نقشه شایستگی هر کاربری به دست می‌آید. پوشش آب که برای دیگر کاربری‌ها به عنوان نوعی محدودیت در نظر گرفته می‌شد، برای خودش به مثابه فاکتور رشد مد نظر قرار می‌گیرد و تصویر به دست آمده برای آن به صورت باینری است (یعنی در محدوده ۰-۱، که صفر نشانگر عدم شایستگی است، و یک بیشترین شایستگی را نشان می‌دهد). به بیان دیگر، برای این نوع از کاربری زمین، تنها احتمال تغییر، توسعه کاربری زمان حاضر است.



شکل ۳. نقشه‌های شایستگی: الف) منطقه ساخته‌شده؛ ب) کشاورزی؛ ج) بایر؛ و د) جنگل

تلفیق شدند. شش بار تکرار برای مدل CA، به دلیل فاصله زمانی سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۶، اختصاص داده شد. با هر بار اجرای CA، هر نقشه شایستگی به دلیل اعمال فیلتر مجاورت 5×5 ، مجدداً وزن‌دهی گردید تا مکان کلاس پوشش / کاربری زمین شبیه‌سازی شده تعیین شود (Pontius and Malanson, 2005). ماتریس منطقه تبدیل به دست آمده از آنالیز زنجیره مارکوف

۳-۵- تخصیص مکانی پوشش / کاربری زمین شبیه‌سازی شده

سه مجموعه داده‌ها، یعنی: ۱) نقشه پوشش / کاربری زمین سال ۲۰۰۰ به عنوان نقشه مبنا؛ ۲) نقشه‌های شایستگی سال ۲۰۰۰؛ و ۳) ماتریس مناطق تبدیل ۲۰۰۰-۱۹۸۸، با استفاده از عملگر مکانی CA برای شبیه‌سازی نقشه کاربری زمین سال ۲۰۰۶ با یکدیگر

که مناطق ساخته‌شده و بایر و جنگل کلاس‌های پوشش / کاربری زمین بارز در منطقه مورد مطالعه بودند.

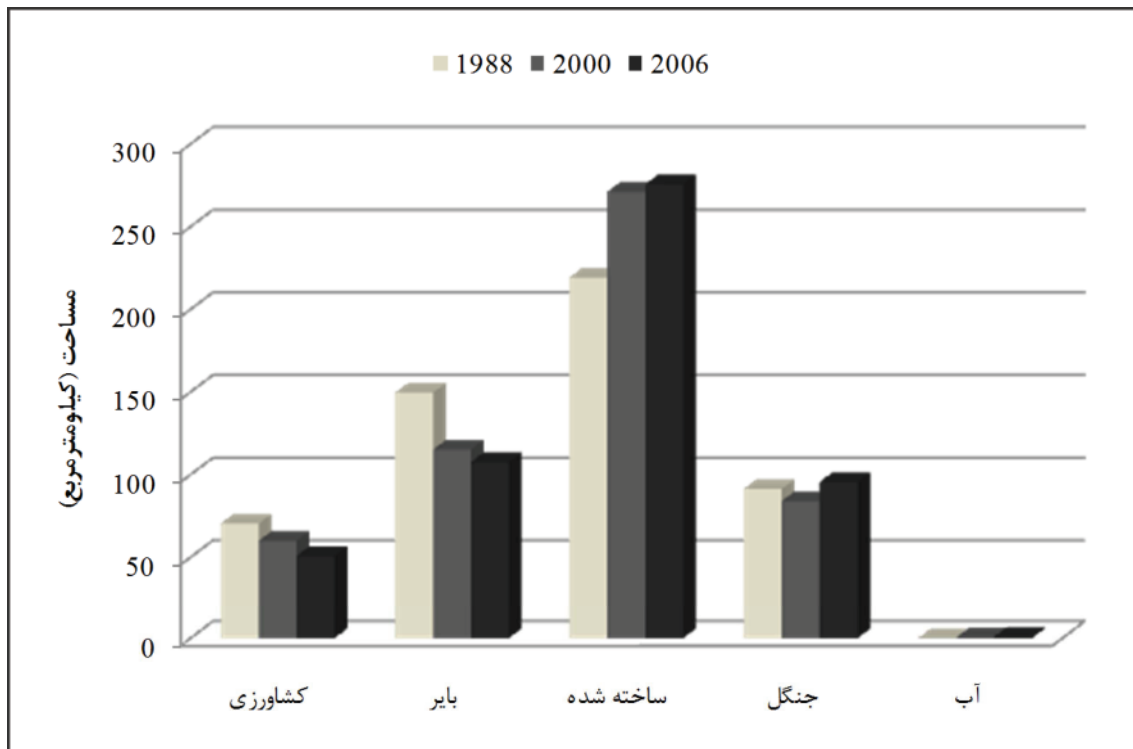
در فاصله سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۰۶، مناطق ساخته‌شده (شهری) از ۲۱۹ کیلومتر مربع به ۲۷۶ کیلومتر مربع افزایش یافته، و این خود بدان معناست که تهران در این دوره ۱۸ ساله با ۱۱ درصد افزایش در شهرسازی مواجه بوده است. همچنین در این دوره زمانی مناطق زمین‌های بایر از ۱۵۰ به ۱۰۸ کیلومتر مربع کاهش یافته است، که خود به دلیل ساخت‌وسازهایی است که در این دوره ۱۸ ساله - و به‌خصوص در فاصله سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۰۰- رخ داده است.

مقدار زمینی را که در دوره‌ای n ساله به یک کلاس اختصاص یافته است تعیین می‌کند (Myint and Wang, 2006). بدین ترتیب در پایان هر تکرار، نقشه پوشش / کاربری زمین جدیدی به‌وسیله همپوشانی تمامی نتایج به‌دست آمده از مراحل پیشین تولید می‌گردد.

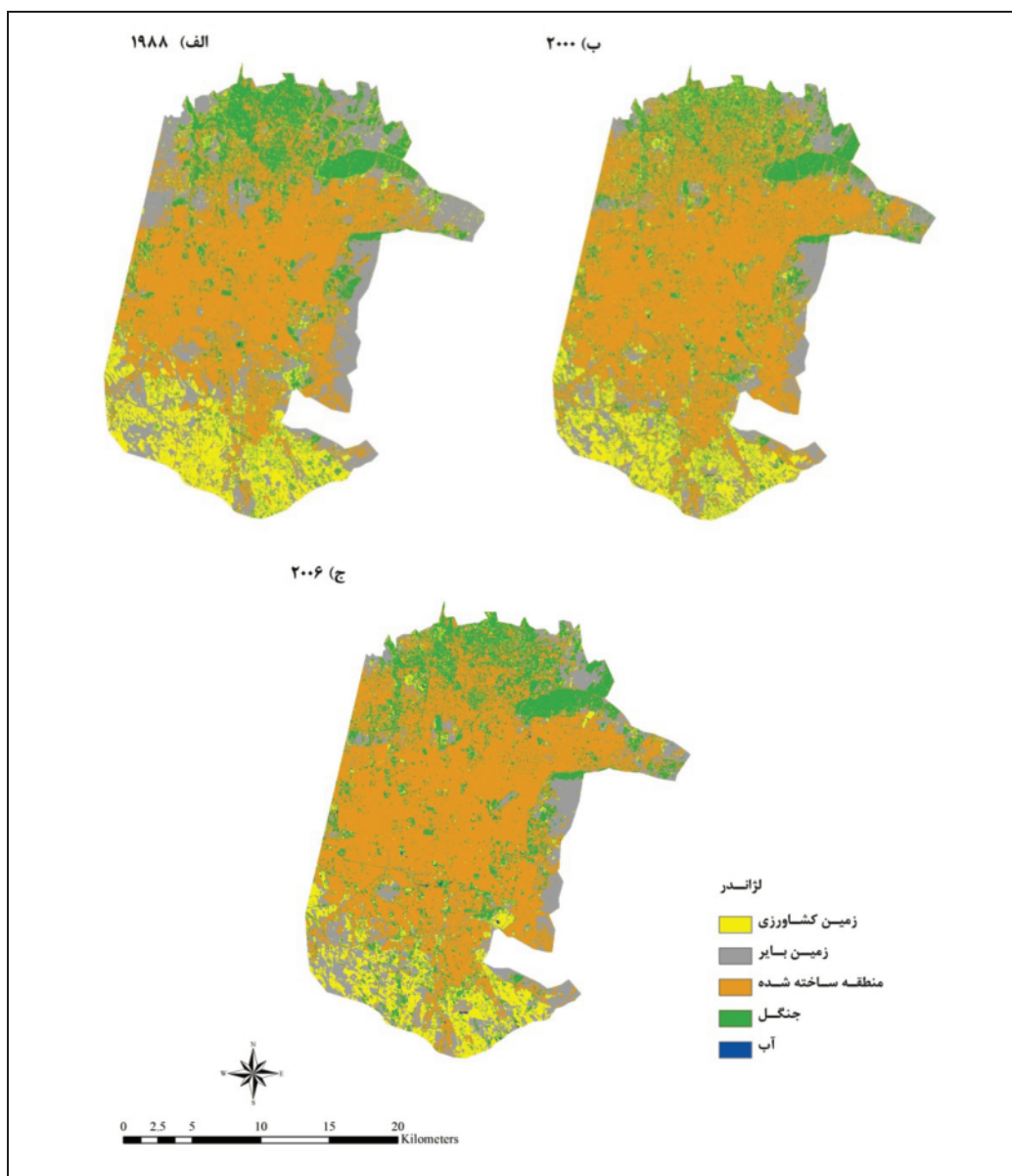
۴- تجزیه و تحلیل نتایج

۴-۱ تحلیل تغییرات پوشش / کاربری زمین

تغییرات در پوشش/ کاربری زمین در سال‌های ۱۹۸۸-۲۰۰۶ در واقع رشد شهری گسترده‌ای را در تهران در بر می‌گیرند. شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهند



شکل ۴. تغییر در کلاس‌های پوشش / کاربری زمین در تهران طی سال‌های ۱۹۸۸ الی ۲۰۰۶ میلادی



شکل ۵. نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده کاربری و پوشش زمین تهران: (الف) ۱۹۸۸؛ (ب) ۲۰۰۰؛ (ج) ۲۰۰۶

شهر، مناطق جنگلی کاهش یافتند، اما از سال ۲۰۰۰ به بعد تمهیداتی برای افزایش فضاهای سبز در نظر گرفته شد، و حتی برخی از مناطق مسکونی به مرور زمان به پارک بدل گردیدند. در این دوره ۱۸ ساله، کاربری زمین‌های کشاورزی با حدود ۲۰ کیلومترمربع کاهش مواجه بوده است.

در طول سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۰۰، مناطق جنگلی از ۹۱ به ۸۴ کیلومترمربع کاهش یافتند، در حالی که بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶، حدود ۱۲ کیلومترمربع افزایش در این مناطق به چشم می‌خورد. البته این بدان معناست که بین سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۰۰ به دلیل افزایش روند شهرسازی و بی‌توجهی به لزوم ایجاد فضاهای سبز و قطع درختان، به‌ویژه در مناطق شمالی

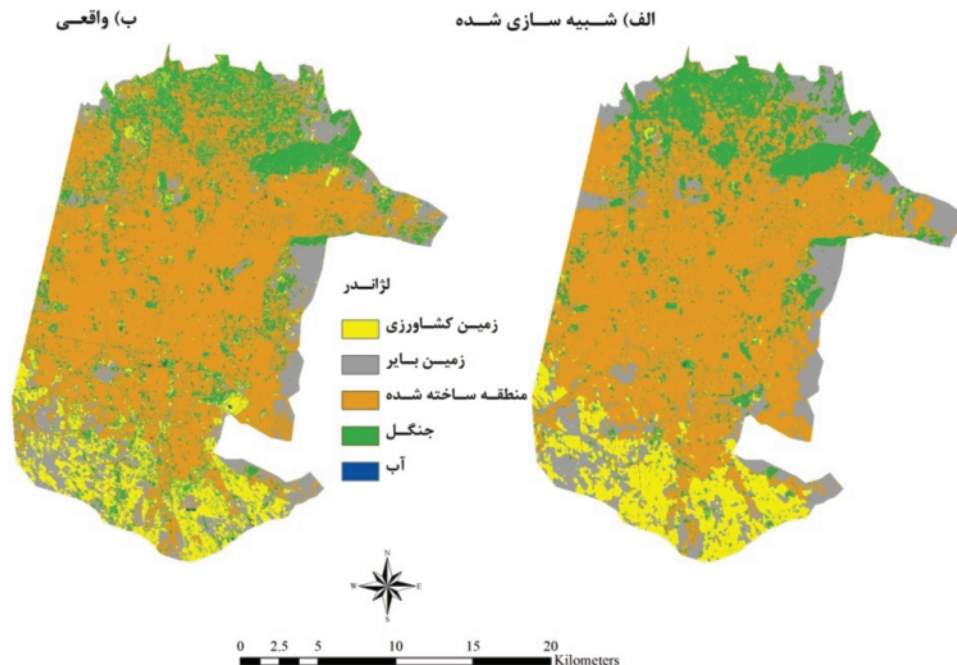
۴-۲- ارزیابی نتایج کالیبراسیون مدل

با توجه به نقشه پوشش / کاربری زمین به‌دست آمده از اجرای مدل برای سال ۲۰۰۶ (شکل ۶)، کلاس‌های ساخته‌شده و جنگل در نقشه شبیه‌سازی‌شده، با کلاس‌های متناظر در نقشه پوشش / کاربری زمین مرجع در سال ۲۰۰۶ نسبتاً مشابه‌اند.

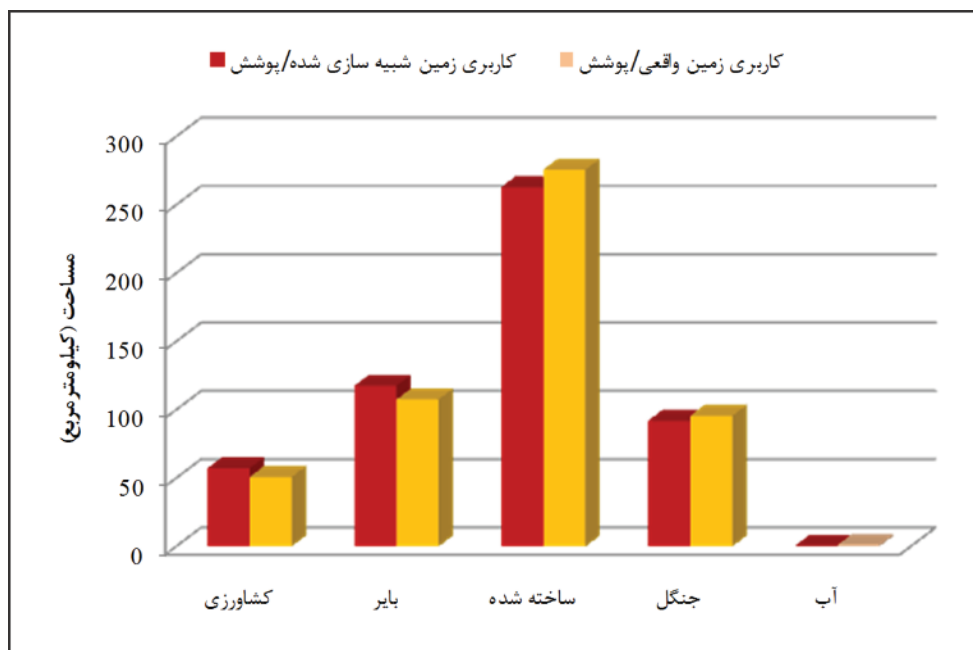
با توجه به شکل ۷، بیشترین تناسب از نظر مساحت کلاس‌های کاربری و سطح اشغال منطقه، در کلاس کاربری جنگل نشان داده شده، که مساحت کلاس مرجع آن ۹۵/۶ کیلومترمربع است؛ در حالی که کلاس متناظر شبیه‌سازی‌شده آن ۹۱/۹ کیلومترمربع است. مساحت کلاس مناطق ساخته‌شده در نقشه مرجع، ۲۷۵/۷ کیلومترمربع است که این مقدار در نقشه شبیه‌سازی‌شده ۲۶۳ کیلومترمربع محاسبه شده است. برای آنالیز دقیق‌تر شبیه‌سازی، به بررسی جزئی و

تفصیلی بر روی تصویر نیاز است. در جدول ۱، که از مقایسه پیکسل به پیکسل دو نقشه پوشش / کاربری زمین شبیه‌سازی‌شده و مرجع به‌دست آمده است، به بررسی تعداد پیکسل‌هایی پرداخته می‌شود که به درستی شبیه‌سازی شده‌اند و در همان کلاس کاربری که در نقشه مرجع جای دارند، قرار گرفته‌اند. همچنین در آن، تعداد پیکسل‌هایی نشان داده شده که به‌صورت اشتباه شبیه‌سازی شده‌اند. شاخص کاپای کلی به‌دست آمده نیز ۰/۸۰۲۴ است.

آنالیز رشد شهری شبیه‌سازی‌شده در سال ۲۰۰۶ آشکار می‌سازد که در مدل CA-Markov مکان کمتری برای کلاس‌های ساخته‌شده و بایر پیش‌بینی می‌شود. این موضوع، کالیبراسیون ضعیف نقشه شایستگی ساخته‌شده (مصنوع) و بایر را بیان می‌دارد.



شکل ۶. نقشه‌های پوشش/کاربری زمین شبیه‌سازی‌شده در مقابل مرجع در سال ۲۰۰۶



شکل ۷. کلاس‌های پوشش / کاربری زمین شبیه‌سازی شده در مقابل نقشه کاربری مرجع در سال ۲۰۰۶

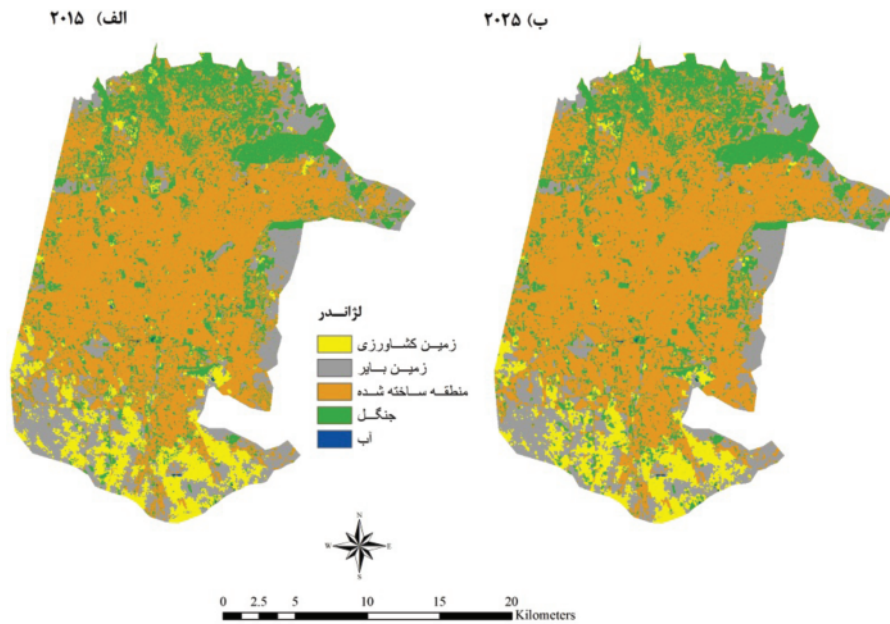
جدول ۱. ماتریس مقایسه نقشه‌های پوشش / کاربری زمین شبیه‌سازی شده و مرجع سال ۲۰۰۶ (برحسب پیکسل)

مرجع	شبیه‌سازی شده				
	کشاورزی	بایر	ساخته شده	جنگل	آب
کشاورزی	۴۶۶۳۸	۲۶۲۰۹	۱۵۲۱۲	۱۴۲۲۵	۳۶
بایر	۲۲۰۶۴	۱۱۸۶۱۹	۲۷۴۴۸	۱۱۵۵۵	۴۳
ساخته شده	۱۰۷۴۲	۴۲۳۸۵	۳۶۱۹۶۵	۳۲۳۴۲	۱۵۵
جنگل	۲۰۱۵۳	۲۱۵۷۴	۳۶۴۶۹	۸۱۶۹۸	۶۱
آب	۱۹	۲۴	۸۳	۴۵	۳۱۰

۴-۳ - پیش‌بینی تغییرات پوشش / کاربری زمین در آینده

براساس موفقیت مدل برای سال ۲۰۰۶، رشد شهری آینده تهران برای سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۵ (شکل ۸) با استفاده از نقشه مبنای پوشش / کاربری زمین سال ۲۰۰۶، ماتریس مناطق تبدیل ۱۹۸۸-۲۰۰۶ و نقشه شایستگی سال ۲۰۰۶ شبیه‌سازی گردید.

در مورد کاربری زمین‌های ساخته شده می‌توان به فقدان فاکتورهای کافی تأثیرگذار در رشد این مناطق اشاره کرد. دیگر اینکه ضعف داده‌های مکانی همچون منطقه توسعه یافته یا به حال خود رها شده زمین‌های کشاورزی و تحت کشت برای کلاس زمین‌های بایر، موجب شبیه‌سازی ضعیف مدل شده است.



شکل ۸. نقشه‌های پوشش / کاربری زمین شبیه‌سازی شده آینده: (الف) ۲۰۱۵؛ و (ب) ۲۰۲۵

شبیه‌سازی شده برای آینده، دربردارنده نتایج و پیشنهادهای زیست‌محیطی و اجتماعی - اقتصادی بااهمیتی در زمینه برنامه‌ریزی شهری پایدار در منطقه مورد مطالعه‌اند. با توجه به تراکم بالای جمعیت در تهران، تغییرات شهری شبیه‌سازی شده برای آینده، افزایش فشار روی منابع زمین در تهران را نمایش می‌دهند.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

با استفاده از نقشه‌های پوشش / کاربری زمین به‌دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای (سال‌های ۱۹۸۸ و ۲۰۰۰ و ۲۰۰۶)، داده‌های فیزیکی و مدل CA-Markov که تلفیقی از آنالیز زنجیره مارکوف و مدل‌های CA است، در تحقیق حاضر، رشد شهری و تغییرات پوشش/ کاربری زمین در شهر تهران با موفقیت شبیه‌سازی شد.

طبق پیش‌بینی شبیه‌سازی‌های مدل CA-Markov، مناطق کشاورزی از ۹/۶ درصد در سال ۲۰۰۶ به ۸/۴ درصد در سال ۲۰۱۵، و سپس ۷/۶ درصد در سال ۲۰۲۵ در منطقه مورد مطالعه کاهش خواهند یافت؛ و این در حالی است که مناطق شهری و ساخته‌شده از ۵۱/۹ درصد در سال ۲۰۰۶ به ۵۲/۷ درصد در سال ۲۰۱۵، و در نهایت به ۵۴/۸ درصد در سال ۲۰۲۵ افزایش خواهند یافت. مناطق زمین‌های بایر نیز با کاهش ۲/۸ درصدی تا سال ۲۰۲۵ مواجه خواهند بود. به‌طور معکوس، مناطق جنگلی که ۱۸ درصد منطقه مورد مطالعه را در سال ۲۰۰۶ تشکیل می‌دادند، در سال ۲۰۱۵ حدود ۱۹/۳ درصد و در سال ۲۰۲۵ حدود ۱۹/۴ درصد از کل مناطق را تشکیل خواهند داد. در این مدت مناطق آبی تغییرات چندانی نخواهند داشت. تغییرات پوشش/ کاربری زمین

متعادل روند توسعه گذشته در سال‌های آتی و نمایان نشدن سیاست‌های مقطعی و خاص در برخی از دوره‌هاست (از قبیل سیاست‌های تشویقی دولت در خصوص مسکن مهر و نوسازی و نظایر اینها). به‌منظور دستیابی به نتایج بهتر، پیشنهاد می‌شود که از فاکتورهای بیشتری برای تولید نقشه‌های شایستگی کاربری و پوشش زمین، به خصوص نقشه‌های شایستگی مناطق شهری و ساخته شده، استفاده گردد.

۶- منابع

Balster, H., 2000, **Markov Chain Models for Vegetation Dynamics**, Ecological Modeling, 126, 139–154.

Cheng, J. and Masser, I., 2003, **Urban Growth Pattern Modeling: A Case Study of Wuhan City**, PR China, Landscape & Urban Planning 62, 199–217.

Clarke, K.C., Hoppen, S. and Gaydos, L., 1997, **A Self-modifying Cellular Automaton Model of Historical Urbanization in the San Francisco Bay Area**, Environment and Planning B: Planning & Design 24, 247–261.

Eastman, J.R., Solorzano, L.A., & Van Fossen, M.E., 2005, **Transition Potential Modeling for Land-cover Change**, In D. J. Maguire, M. Batty, & M. F. Goodchild (Eds.), GIS, spatial analysis, and modeling (pp. 357–385). California: ESRI Press.

کلان‌شهر تهران در فاصله سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۰۶ با حدود ۱۰/۶ درصد رشد شهری مواجه بوده است. موفقیت کلی مدل در شبیه‌سازی، برای نقشه کاربری زمین شبیه‌سازی‌شده سال ۲۰۰۶ به میزان ۸۰/۲۴ درصد برآورد گردید. آنالیزهای آماری صورت‌گرفته مشخص ساختند در حالی‌که شبیه‌سازی کاربری‌های جنگل و کشاورزی نسبتاً خوب بوده است، لیکن شبیه‌سازی کلاس زمین‌های بایر به سبب فقدان داده‌های مکانی ضعیف بوده است.

براساس سناریوی کالیبراسیون سال ۲۰۰۶، مدل CA-Markov، رشد شهری و تغییرات پوشش / کاربری زمین را تا سال ۲۰۲۵ شبیه‌سازی کرد، که نشان از کاهش مناطق کشاورزی و زمین‌های بایر، و افزایش مناطق ساخته‌شده و جنگلی واقع در منطقه مورد مطالعه طی ۱۵ سال آینده دارد. شبیه‌سازی‌های پوشش / کاربری زمین در آینده تا سال ۲۰۲۵، نشان‌دهنده آن بود که اگر گرایش و روند موجود رشد شهری رایج بدون تدوین سیاست‌های توسعه‌ای پایدار ادامه یابد، به کاهش فضاهای کشاورزی و اختصاص فضای محدود موجود به کاربری‌های ساخته‌شده شهری منجر خواهد گشت.

نقشه شبیه‌سازی‌شده تولیدشده در این مطالعه براساس مفاهیم تصمیم‌سازی چندمعیاره، راهنمای استراتژیکی مناسبی را برای برنامه‌ریزان شهری مهیا می‌سازد. علاوه بر این، نقشه‌های کاربری شبیه‌سازی‌شده می‌توانند به عنوان سیستم هشداردهنده درباره پیامدها و تأثیرات آینده تغییرات کاربری و رشد شهری، به‌ویژه در دیگر مناطق ایران، به خدمت گرفته شوند. البته ذکر این نکته ضروری است که شبیه‌سازی رشد شهری صورت‌گرفته، با فرض ادامه

- Cellular Automaton Approach**, In D. A. Quattrochi, & M. F. Goodchild (Eds.), *Scale in remote sensing and GIS* (pp. 211–230), Boca Raton, Florida: Lewis Publishers.
- Li, X., & Yeh, A. G-O., 2000, **Modeling Sustainable Urban Development by Integration of ConStrained Cellular Automata and GIS**, *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2), 129–214.
- Liu, H., Zhou, Q., 2005, **Developing Urban Growth Predictions from Spatial Indicators Based on Multi-temporal Images**, *Computers, Environment and Urban Systems*, 29 (2005), pp. 580–594.
- Lo'pez, E., Bocco, G., Mendoza, M., & Duhau, E., 2001, **Predicting Land Cover and Land-use Change in the Urban Fringe, A Case in Morelia City, Mexico**, *Landscape and Urban Planning*, 55(4), 271–285.
- Mozaffari, G. and Olazadeh, A., 2008, **A Study and Analysis of Physical Development of Saghez and it's Future Optimization Development with the Use of GIS**, *Journal of Natures (Mohitshenasi)*, 47, 11-20 (in Persian).
- Myint, S. W., & Wang, L., 2006, **Multi-criteria Decision Approach for Land use Land Cover Change Using Markov Chain Analysis and a Cellular Automata Approach**, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32(6), 390–404.
- Henriquez, C., Azócar, G., & Romero, H., 2006, **Monitoring and Modeling the urban Growth of Two Mid-sized Chilean Cities**, *Habitat International*, 30, 945-964.
- Herold, M., Goldstein, N.C., Clarke, K.C., 2003, **The Spatiotemporal Form of Urban Growth: Measurement, Analysis and Modeling**, *Remote Sensing of Environment*, 86 (2003), 286–302.
- Jat, M.K., Garg, P.K., Khare, D., 2008, **Monitoring and Modeling of Urban Sprawl Using Remote Sensing and GIS Techniques**, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10 (2008) 26-43.
- Kamusoko, C., Aniya, M., Adi, B., & Manjoro, M., 2009, **Rural Sustainability under Threat in Zimbabwe – Simulation of Future Land Use/cover Changes in the Bindura District Based on the Markov-Cellular Automata Model**, *Applied Geography*, 29, 435-447.
- Kamyab, H.R., Mahini, S., Hosaeni, M., Gholamifard, M., 2010, **A Knowledge-Based Approach to Urban Growth Modeling in Gorgan City Using Logistic Regression**, *Journal of Natures (Mohitshenasi)*, 54, 89-96 (in Persian)
- Li, H., & Reynolds, J.F., 1997, **Modeling Effects of Spatial Pattern, Drought, and Grazing on Rates of Rangeland Degradation: A Combined Markov and**

- Pijanowskia, B.C., Brown, D.G., Shellitoc, B.A. and Manikd, G.A., 2002, **Using Neural Networks and GIS to Forecast Land Use Changes: A Land Transformation Model**, Computers, Environment and Urban Systems 26(6), 553–575.
- Pontius, R. G., Jr., & Malanson, J., 2005, **Comparison of the Structure and Accuracy of Two Land Change Models**, International Journal of Geographical Information Science, 19(2), 243–265.
- Saaty, T. L., 1977, **A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures**, Journal of Mathematical Psychology, 15, 234–281.
- Schatten, A., 1999, **Cellular Automata: Digital Worlds**, Retrieved February 13, 2004, from http://www.ifs.tuwien.ac.at/~aschatt/info/ca/ca_print.html.
- SCI, 2008, **2006 National Population and Housing Census in the Islamic Republic of Iran**, Department of, Statistical Centre of Iran (SCI).
- Sudhira, H.S., 2004, **Integration of Agent-based and Cellular Automata Models for Simulating Urban Sprawl**, Thesis submitted to the International Institute for Geo-information Science and Earth Observation in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Geo-informatics.
- Sui, D. and Hui, Z., 2001, **Modeling the Dynamics of Landscape Structure in Asia's Emerging Desakota Regions: a Case Study in Shenzhen**, Landscape and Urban Planning 53, 37–52.
- Tobler, W.R., 1979, **Cellular Geography**, In Philosophy in Geography, S Gales and G Olson (eds.), pp. 339–346. D. Reidel, Dortrecht.
- Torrens, P.M., 2000, **How Cellular Models of Urban Systems Work**, CASA Working Paper 28, University College London, Centre for Advanced Spatial Analysis.
- United Nations Populations Division, 2010, **Press Conference on 2009 Revision of World Urbanization Prospects**, Department of Public Information, News and Media Division, New York, March 25.
- Weng, Q., 2002, **Land Use Change Analysis in the Zhujiang Delta of China using Satellite Remote Sensing, GIS, and Stochastic Modeling**, Journal of Environmental Management, 64, 273–284.
- White, R., & Engelen, G., 1993, **Cellular Automata and Fractal Urban form: A Cellular Modelling Approach to the Evolution of Urban Land-use Patterns**, Environment and Planning A, 25, 1175–1199.

White, R., Engelen, G., & Uljee, I., 1997, **The Use of Constrained Cellular Automata for High-resolution Modelling of Urban Land Use Dynamics**,. Environment and Planning B, 24, 323–343.

Yeh, A.G.O., Li, X., 2003, **Urban Simulation Using Neural Networks and Cellular Automata for Land Use Planning**, ISPRS proceeding, symposium on geospatial theory, Ottawa.