علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره هجدهم، شماره یک، بهار ۹۵

مطالعه تغییر کاربری و مدل سازی توسعه شهری با آتوماتای سلولی و الگوریتم ژنتیک در مشهد

حامد بیدل[1*]

hamedbidel@gmail.com

علی‌اصغر آل شیخ [2]

نعمت‌الله خراسانی [3]

عالیه حاجی زاده[4]

تاریخ دریافت: ۹۴/۵/۲۳ **تاریخ پذیرش:۹۴/۶/۲۹**

چکیده

از مهمترین شاخص‌هایی که انسان از طریق آن محیط زیست خود را تحت تاثیر قرار داده کاربری زمین است. عموماً تغییر کاربری در سرزمین کنشی انسان ساخت و تغییر پوشش در سرزمین کنشی طبیعی است. به طور کلی تغییرات اقلیمی و عوامل تکنولوژیکی و اقتصادی مهم ترین عوامل تعیین کننده در تغییر کاربری در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی هستند. مطالعه تغییرات کاربری/پوشش در هر تحقیق بسته به نیاز و هدف متفاوت است. به عنوان مثال تغییر از هر نوع کاربری/پوشش به کاربری شهری را اصولاً تحت عنوان توسعه شهری بررسی می‌کنند.

در تحقیق حاضر ابتدا به بررسی تغییر کاربری و پوشش شهر مشهد پرداخته شده است. سپس بر اساس تئوری‌ها و نتایج عملی پژوهش‌های پیشین، از فناوری‌ها و روش‌های به روز مانند سنجش از دور، آتوماتای سلولی و الگوریتم ژنتیک، توسعه شهری مشهد مدلسازی شده است. بررسی تغییر کاربری و پوشش محدوده شهر مشهد برای ۳ دوره و یا ۴ سالِ ۱۹۸۴، ۱۹۹۲، ۲۰۰۱ و ۲۰۱۴ انجام شده است.

۱- کارشناس ارشد، گروه ارزیابی و آمایش سرزمین، دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران. (مسئول مکاتبات)

۲- استاد، گروه سامانه اطلاعات جغرافیایی، دانشکده نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

۳- استاد، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه هوش مصنوعی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

طبق نتایج رشد مناطق شهری طی ۳۰ سال از ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۴ حدود ۲۰۷۴۱ هکتار بوده است. این مقدار به طور متوسط برابر نرخ رشدی معادل ۶۹۱ هکتار در هر سال میباشد. توسعه شهر نیز طی سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۴ با آتوماتای سلولی مدلسازی و پارامترهای مدلسازی توسط الگوریتم ژنتیک کالیبره شده است.

بر اساس ارزیابی دقت، مدل به ۸۷,۴ درصد دقت کلی دست یافت. به این ترتیب این مدل برای شهر مشهد آزموده شد و کارایی خوبی از خود نشان داد. مدل قابلیت توسعه و بهبود بیشتر هم در زمینه تغییر کاربری و هم در زمینه توسعه شهری را دارا است.

واژه های کلیدی: تغییر کاربری، توسعه شهری، مدلسازی، الگوریتم ژنتیک، مشهد.

J.Env. Sci. Tech., Vol 18, No.1, spring 2016

Study on Land Use/Cover Change and Urban Growth Modeling through Cellular Automata and Genetic Algorithm in Mashhad

Hamed Bidel[1] *

hamedbidel@gmail.com

Ali Asghar Alesheikh[2]

Nematollah Khorasani[3]

Alieh Hajizadeh[4]

Abstract

Land use has always been one of the most important indicators through which man affects his surrounding environment. Land use change is a man-made intervention whereas vegetation change is a natural phenomenon. Generally, climate change and technological and economic factors are the main determinants of the change at spatial and temporal scales. Each study may vary depending on its particular need. For example, any change from urban use/cover is primarily treated as urban development. The present study, which is based on theoretical and practical results of earlier research, uses technology and techniques such as remote sensing cellular automata and genetic algorithms to study changes in the land use/cover in the city of Mashhad. land use/cover changes are investigated in Mashhad for 3 periods or 4 years. The development of Mashhad in 2001 and 2014 are calibrated with cellular automata modeling and simulation parameters using genetic algorithm. Based on careful assessment model has been developed to achieve 87.4 percent accuracy.

Keywords: Land use change, Urban growth, Modeling, Cellular Automata, Mashhad

1- M.Sc. / Department of Environmental Science, Faculty of Environment and Energy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. * (*Corresponding Author*)

2- Full Professor / Department of GIS, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

3- Full Professor / Department of Environment, Faculty of Natural Resource, University of Tehran, Tehran, Iran.

4- M.Sc. Student / Department of Computer Engineering - Artificial Intelligence, Faculty of Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

مقدمه

تغییر کاربری در سرزمین و رشد شهرها در بعد جمعیت و در بعد توسعه مکانی موجب تغییر در چشم‌انداز و تأثیر بر محیط زیست می شود. بنابراین، در کنار تحلیل رشد جمعیت، بررسی توسعه مکانی شهر نیز ضروری است (۱). کاربری سرزمین فعالیتی کلیدی است که انسان از طریق مصرف منابع طبیعی، رشد و توسعه اجتماعی اقتصادی خود را فراهم می کند و در عین حال ساختارها و فرایندهای موجود در محیط زیست را تغییر می‌دهد (۲). از نظر تاریخی مهم ترین تغییر کاربری اراضی که انسان انجام داده از میان بردن جنگل‌ها و تبدیل آنها به اراضی کشاورزی و سکونتگاه‌ها بوده است (۳). به طور کلی تغییرات اقلیمی و عوامل تکنولوژیکی و اقتصادی مهم ترین عوامل تعیین کننده در تغییر کاربری در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی هستند (۴).

آگاروال و همکاران معتقدند تغییر کاربری سرزمین یک گرایش بوم شناختی قابل توجه جهانی و نافذ محلی است (۵). ویتاسک[1] در ۱۹۹۴ (۶) ذکر کرده است که "سه تغییر جهانی آشکار، تجمع فزاینده کربن دی اکسید در اتمسفر؛ دگرگونی‌های زیست شیمیایی چرخه جهانی نیتروژن؛ و تغییر کاربری/پوشش سرزمین پیش رو هستند". به عبارتی تغییر کاربری را یکی از سه اتفاق مهم بوم شناسانه در جهان معرفی کرده است که اثر قابل توجهی بر محیط جهان و به تبع آن بر زیستمندانش دارد.

عموماً تغییر کاربری در سرزمین کنشی انسان ساخت و تغییر پوشش در سرزمین کنشی طبیعی است. تغییر کاربری/ پوشش ممکن است، از بایر به کشاورزی، از جنگل (به عنوان پوشش) به کشاورزی (به عنوان کاربری)، از کشاورزی (به عنوان کاربری) به جنگلداری[2](به عنوان کاربری)، از کشاورزی به بایر، از کشاورزی به شهر، یا از شهر به پهنه آبی و ... باشد. مطالعه این تغییرات در هر تحقیق بسته به نیاز و هدف متفاوت است. برای مثال: تغییر از هر نوع کاربری به کاربری شهری را اصولاً تحت عنوان توسعه شهری بررسی می‌کنند. با توجه به اهمیت افزایش جمعیت و نیاز به محلی برای سکنا و شهر، برخی مدل‌ها برای توسعه شهری اختصاصی شده اند.

تغییر کاربری از هر کاربری به کاربری شهری که با اصطلاح بزرگ شدن شهر هم قابل بیان است، در زبان فارسی با واژه‌هایی همچون توسعه شهری، گسترش شهری و رشد شهری و در انگلیسی با واژه‌هایی همچون Urban growth، Urban sprawl، Urban expansion شناخته می‌شود. تغییر کاربری به شهر یکی از مهمترین انواع تغییر کاربری است.

نرخ رشد شهری مهم ترین پدیده ی تغییر شکل سکونتگاه‌های انسانی در کشورهای در حال توسعه است و نیاز به مدیریت بهتر برای این رشد توسط اشخاص، اجتماعات و حکومت‌ها حیاتی است. در این کشورها، شهرها به طور معمول دو سوم افزایش جمعیت کل، و بیش تر از نصف رشد جمعیت شهری حاصل از افزایش طبیعی و مهاجرت روستا به شهر را جذب می‌کنند (۷). در سال‌های اخیر، اراضی بسیاری از شهرهای ایران مخصوصاً اراضی حاشیه ای شهرها تحت تأثیر روند شهر نشینی، تغییر کاربری داده و به اراضی ساخته شده تبدیل شده است.

رشد جمعیت شهرها همواره با تغییراتی در کالبد و محیط زیست شهری همراه بوده است. در ایران سیاست‌های رشد جمعیت در دوره ای خاص، جاذبه زیاد شهرها و وجود عوامل دافعه در روستاها و به تبع آن‌ها رشد مهاجرت از روستاها به شهرها، باعث تغییرات شگرفی در جمیعت شهرها گردیده است. این افزایش جمعیت باعث افزایش ساخت و سازهای شهری، به خصوص واحدهای مسکونی شده و این عامل به نوبه خود باعث تغییر سایر کاربری‌ها به اراضی ساخته می‌شود. یکی از پیش شرط‌های اصلی جهت استفاده بهینه از زمین، اطلاع از الگوهای کاربری اراضی و آگاهی از تغییرات هر کدام از کاربری‌ها در طول زمان است (۸).

در کنار مطالعه تغییرات انواع کاربری به کاربری شهری، مدل سازی تغییر کاربری اعم از تغییر به کاربری شهری و توسعه شهری، اهمیت زیادی در سطح جهانی و کشورها بخصوص کشورهای در حال توسعه دارد. چراکه از این طریق میتوان به پیش بینی روند توسعه کاربری‌ها پرداخت. فهرست طولانی از

1- Vitousek
2- Forestry

مدل‌ها و روش‌های مدل سازی در دسترس پژوهشگران است و مسلماً هر نوع بسته به هدف تحقیق معایب و مزایایی دارد. کاربری سرزمین توسط تعامل بین فضا و زمان، عوامل (محدودیت‌ها) زیست فیزیکی از قبیل خاک‌ها، اقلیم، پستی و بلندی و غیره و عوامل انسانی مانند جمعیت، فناوری، شرایط اقتصادی و غیره تعیین می‌شود (۱۰). در زمینه توسعه شهری نیز مدلهای فضایی، ابزارهایی مفید برای درک فرایند توسعه شهری، ابزار کمکی سیاستگذاری مدیریت و برنامه ریزی شهری و فراهم کننده اطلاعات برای ارزیابی تأثیرات شهری بر محیط زیست و اکوسیستم هستند (۱۱).

طی دو دهه گذشته پژوهشگران، از روش جدیدی به نام مدل آتوماتای سلولی که دارای ویژگیهای پویاست، استفاده کرده اند. مدل آتوماتای سلولی روشی کارا برای شبیه سازی دو بعدی کاربری ها است. با استفاده از مدل آتوماسیون سلولی در شبیه سازی رشد شهری، می‌توان به درک چگونگی سیستم پیچیده شهری، شناخت سیستماتیک تغییرات ساختاری شهر، شناخت و پیش بینی فرایندهای فضایی-زمانی سیستم رشد شهری، شناخت عوامل مؤثر بر رشد شهر، طراحی سناریوهای مختلف رشد شهری و گزینش بهینه آنها در جهت جلوگیری و کاهش خطرات محیطی، اجتماعی و ... دست یافت (۱۲). این مدل یک مدل عامل مبناست. تحقیقات در زمینه مدلسازی کاربری و تغییرات کاربری زمین با دیدگاه عامل مبنا از اواخر دهۀ ۱۹۸۰ آغاز گردید (۱۳). در رابطه با مدلسازی تغییر کاربری با آتوماتای سلولی و کالیبراسیون آن با الگوریتم ژنتیک، در مطالعه ای در سال ۱۹۹۹ از یک الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار جستجو برای یافتن مجموعه بهینه از موارد امکان پذیر آمایش سرزمینی پروو[1]استفاده شد (۱۴). کلونا[2]و همکاران نیز از یک الگوریتم ژنتیک برای تولید قوانین جدید در مدل سازی با آتوماتای سلولی کاربری سرزمین در رُم[3]ایتالیا استفاده کردند (۱۵).

در ایران پژوهش‌های متعددی در زمینۀ تغییر کاربری و مدلسازی گسترش شهرها انجام شده است. رفیعی و همکاران تغییر کاربری ها در شهر مشهد را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند رشد کاربری شهری در مشهد طی ۲۰ سال از ۱۳۶۶ تا ۱۳۸۵ معادل ۷۴ کیلومتر مربع بوده است. آنها ۵ طبقه مناطق صنعتی، کوهستان های صخره ای، مناطق شهری، زمین های بایر و پوشش گیاهی را مورد مطالعه قرار داده اند. در زمینه مدلسازی گسترش شهر ها، طیبی و همکاران برای مدل سازی توسعۀ شهر شیراز از دو روش رگرسیون لجستیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده کردند. در این تحقیق از داده‌های سال ۱۹۹۰ و ۲۰۰۰ میلادی برای تنظیم و از داده‌های سال ۲۰۰۵ میلادی برای آزمایش و همچنین از شاخص عامل نسبی برای بررسی میزان درستی نتایج استفاده شده است (۱۶). کامیاب و همکاران نیز دو روش یاد شده را برای مدل سازی توسعۀ شهری گرگان مورد استفاده قرار دادند. آنان علاوه بر شبیه سازی دوره‌های گذشته، الگوی توسعه شهری گرگان را برای چشم انداز سی ساله و با فواصل زمانی ۱۰ سال استخراج نمودند (۱۷). حسینعلی و همکاران گسترش کاربری اراضی شهری برای قزوین با استفاده از سه پارامتر ارزش زمین، دسترسی و جذابیت که هر یک حاصل اثر و ترکیب چندین نقشۀ دیگر بوده است در سال ۱۳۹۱ مدل سازی کردند (۱۸).

در زمینه کاربرد آتوماتای سلولی و الگوریتم ژنتیک در توسعه شهری در ایران داود ملکی برای مدل سازی توسعه شهر همدان از پارامترهای شیب، فاصله از جاده و مناطق مستثنی استفاده کرد و مدل آتوماتای سلولی خود را برای این شهر با الگوریتم ژنتیک کالیبره نمود و به دقت کلی ۸۶,۷ دست یافت (۱۹). زارعی و آل شیخ هم در سال ۱۳۹۱ این مدل سازی را برای شهر شیراز تکرار کردند. آنها مدل سازی را با سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۰۰ میلادی انجام دادند (۲۰). این روش توانسته است با سرعت و دقتی قابل توجه شهرهای مذکور را مدل کند و به نظر میرسد به مرور زمان به جهت قابلیت های خاص خود کاربردهای بیشتری پیدا کند.

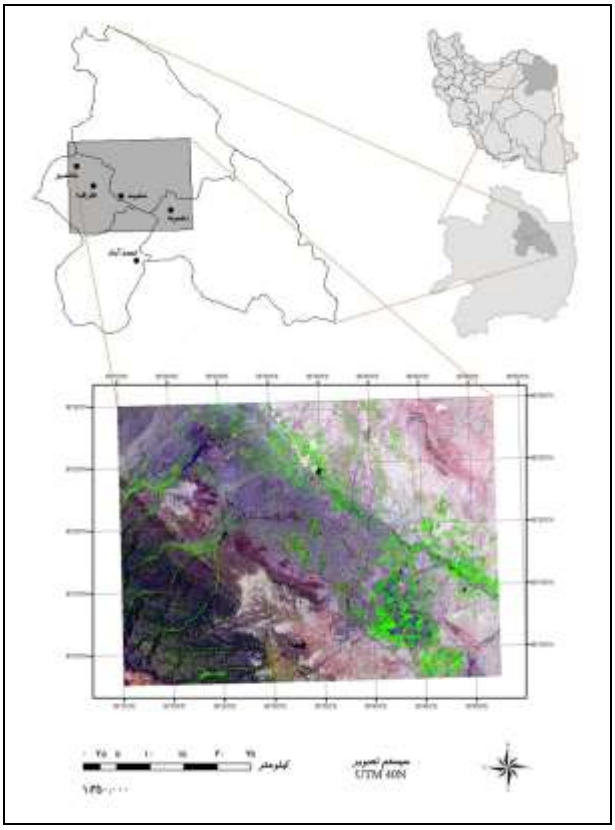
1- Provo
2- Colonna
3- Rome

در این مطالعه تلاش شده است ابتدا تغییر کاربری های شهر مشهد طی چند دوره زمانی بررسی و سپس تغییر کاربری به شهر و توسعه شهری مشهد نیز مدلسازی شود. مدل مورد استفاده، حاصل کاربرد آتوماتای سلولی و استفاده از الگوریتم ژنتیک برای کالیبراسیون آن است.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه: مشهد

مشهد کلان‌شهری در شمال شرقی ایران و مرکز استان خراسان رضوی است. این شهر در محدوده جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۹ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی واقع شده است. بیشینه و کمینه ارتفاع در شهرستان مشهد به ترتیب ۲۲۱ و ۳۲۲۵ متر از سطح دریا می‌باشد و بین دو رشته کوه هزارمسجد در شمال و بینالود در جنوب واقع شده است (شکل ۱). این شهر در زمان افشاریان، پایتخت ایران بود. مشهد، دومین شهر پرجمعیت ایران پس از تهران است. این شهر مانند سایر شهرها به واسطه رشد شهرنشینی رشد زیادی داشته است، به طوری که بر اساس آمار، جمعیت آن از حدود ۲۴۱ هزار نفر در سال ۱۳۳۵ به حدود ۲,۴ میلیون نفر درسال ۱۳۸۵ افزایش یافته است (۲۱).



شکل۱- منطقه مورد مطالعه و تصویر رنگ طبیعی سنجنده OLI ماهواره Landsat ۸ از منطقه مورد مطالعه.

داده‌ها، ابزار و روش‌های مورد استفاده

مرز منطقه مورد مطالعه از نمایه[1] ۲۵۰ سازمان نقشه برداری کشور، شامل ۱۵ بلوک ۲۵۰، استخراج شد. (به نظر می‌رسد خود این نمایه که دارای تقسیمات ۱۰۰ و ۵۰ نیز می‌باشد بر اساس نمایه مدل رقومی ارتفاع سنجنده Aster تهیه شده باشد.) این کار باعث ایجاد معیاری ثابت برای مقایسه مطالعات بعدی بر روی شهر مشهد می‌شود. همچنین از مرز حوزه آبریز به علت گسترده شدن بیش از حد منطقه، و از مرز زیر حوزه آبریز به علت پوشش ندادن تمام شهر در یک زیر حوزه، و از مرز

1- Index

شهرستان مشهد نیز به علت باز هم گسترده شدن بیش از حد منطقه، که نتیجه آن کاهش دقت در تهیه نقشه کاربری/پوشش سرزمین و همچنین مدل سازی می‌شد، پرهیز شد. در شکل ۱ تصویر رنگ طبیعی سنجنده OLI ماهواره Landsat ۸ از منطقه مورد مطالعه مربوط به تاریخ ۲۰۱۴ (۱۳۹۳) مشاهده می‌شود. در این مطالعه از تصاویر ماهواره لندست مربوط به سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۷۱، ۱۳۸۰ و ۱۳۹۳ استفاده شده است. یکی از علل انتخاب این سال‌ها فاصله زمانی تقریباً یکسان هم برای مقایسه مقدار تغییر کاربری/پوشش و هم به عنوان معیاری نسبتاً برابر (تعداد سال‌ها) در هر دوره در مدل سازی بوده است. بعلاوه این تصاویر مناسب ترین تصاویر موجود از شهر مشهد (ردیف ۱۵۹ و گذر ۳۵) در بین تصاویر ماهواره لندست قابل تهیه در محدوده زمانی خود، از سازمان نقشه برداری آمریکا بوده اند.

جدول ۱- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در پژوهش حاضر.

ماهواره	سنجنده	ردیف و گذر (WRS2)	تاریخ برداشت میلادی	تاریخ برداخت خورشیدی	شناسه	اندازه سلول	RMSE هندسی
LANDSAT_5	TM	۱۵۹-۳۵	۱۹۸۴-۰۶-۲۵	۱۳۶۳-۰۴-۰۴	LT51590351984177XXX02	۳۰	۰,۲۴۶
LANDSAT_4	TM	۱۵۹-۳۵	۱۹۹۲-۰۷-۲۵	۱۳۷۱-۰۵-۰۳	LT41590351992207XXX02	۳۰	۰,۲۳۱
LANDSAT_7	ETM	۱۵۹-۳۵	۲۰۰۱-۰۵-۱۵	۱۳۸۰-۰۲-۲۵	LE71590352001135SGS00	۳۰	۰,۰
LANDSAT_8	OLI_TIRS	۱۵۹-۳۵	۲۰۱۴-۰۵-۱۱	۱۳۹۳-۰۲-۲۱	LC81590352014131LGN00	۳۰	۴,۶۷۵

تهیه نقشه تغییر کاربری/پوشش سرزمین

به منظور بررسی و مطالعه تغییر کاربری/پوشش سرزمین در شهر مشهد ابتدا تصاویر ماهواره از منطقه مورد مطالعه مربوط به زمان‌های خاص و مورد نظر از طریق سازمان زمین شناسی آمریکا تهیه شد. سپس این تصاویر و باندهای آنها برای استفاده در نرم افزار آماده سازی شد. یکی از معیارهای مهم انتخاب این تصاویر کیفیت آنها از جهات مختلف بوده است. برای تهیه نقشه کاربری/پوشش سرزمین از روش مقایسه پس از طبقه بندی استفاده شد.

پنج کاربری عمده زیر در طبقه بندی نقشه ها مدنظر بوده است:

۱. شهری (ساخته شده)
۲. پوشش گیاهی (فضای سبز)
۳. کشاورزی (انواع محصولات)
۴. پهنه آبی (دریاچه، تالاب، منبع آب و ...)
۵. سایر (بایر، ساخته نشده، دست نخورده، کوه و ...)

علت انتخاب این ۵ کاربری و بیشتر نبودن آنها به هدف تحقیق باز می‌گردد. زیرا مقصود ما رسیدن به جهت و مقدار تغییر کاربری‌ها به کاربری ساخته شده و نه صرفاً مسکونی، همچنین تغییر میزان پوشش گیاهی و سطح کشاورزی و تغییر سطح پهنه‌های آبی بوده است. این در واقع پاسخ به این سوال نیز هست که چرا به عنوان مثال کاربری‌های تجاری و صنعتی یا مرتع متراکم و تنک یا جنگل پهن برگ و سوزنی برگ جزو طبقات نیست. بعد از طبقه بندی تصاویر تمام سال‌های مورد مطالعه برای تعیین تغییرات، ۵ تصویر طبقه بندی شده به صورت دو به دو در نرم افزار ایدریسی روی هم گذاری شد. در واقع به روش جدول بندی متقاطع و پیکسل به پیکسل تصاویر با هم مقایسه شدند تا اختلاف بین تصاویر بدست آید.

مدلسازی توسعه شهری

پس از مطالعه و بررسی تغییرات کاربری/پوشش سرزمین شهر مشهد، توسعه شهر مشهد طی یک دوره زمانی مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور نقشه کاربری/پوشش تهیه شده بر اساس ۵ طبقه شهری، پوشش گیاهی، کشاورزی، پهنه آبی و سایر به نقشه ای با دو طبقه شهری و غیر شهری تبدیل شد. به طوری که طبقه شهر خودش یعنی شهر و ۴ طبقه دیگری غیر شهر در

نظر گرفته شد. در واقع مدل سازی توسعه شهر مشهد بر پایه تغییرکاربری اراضی از کاربری ساخته نشده[1] به کاربری ساخته شده[2] است.

سپس پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی توسعه شهر مشهد با الگوریتم ژنتیک، نقشه سازی و سپس طبقه بندی شدند. الگوریتم ژنتیک حدود آستانه را با مقایسه نقشه واقعت زمینی و مدل سازی شده بدست می‌آورد و مدل را کالیبره می‌نماید. نقشه‌ها و پارامترها مورد استفاده در شهری شدن مناطق غیرشهری مشهد در زیر آمده است:

- ارتفاع
- شیب
- فاصله از راه اصلی در دوره قبل
- سلول‌های شهری دوره قبل
- مناطق مستثنی

آتوماتای سلولی[3]

برای اولین بار در دهه ۱۹۳۰ اصطلاح Automata توسط ریاضیدان انگلیسی، آلن تورینگ ارائه شد (۲۲). همچنین مفهوم آتوماتای سلولی برای اولین بار در دهه ۱۹۴۰ در رشته کامپیوتر توسط نیومن[4] و اولام[5] بوجود آمد (۲۳). بعدها ریاضیدانی به نام کانوی[6] در دانشگاه کمبریج این مفهوم را توسعه داد که نظریه او به نام بازی زندگی مشهور شد.

تنوع و سادگی رفتار آتوماتای سلولی، امکان استفاده از آن را در علوم مختلفی از اکولوژی و بیولوژی گرفته، تا کامپیوتر، ریاضی و فیزیک فراهم می سازد. در آتوماتای سلولی هدف، مدلسازی سیستمی با معادلات پیچیده مشابه معادلات دیفرانسیل نیست. بلکه سعی در بیان سیستم با عناصری ساده و نمایش پیچیدگی آن با استفاده از تعامل این عناصر بر طبق قوانینی ساده است (۲۴, ۲۵). درعلوم مختلف همیشه سعی بر این بوده است تا با شکستن سیستم‌ها به اجزای کوچکتر، آنها را تجزیه و تحلیل نمایند. اما در مدل آتوماتای سلولی روش دیگری در پیش گرفته می شود و آن قرار دادن اجزای ساده در کنار هم، بمنظور ایجاد یک سیستم پیچیده می باشد.

عناصر آتوماتای سلولی در یک مدل توسعه شهری شامل ۵ عنصر اصلی زیر است: ۱-فضای سلولی[7] (شبکه ای یک یا چندبعدی از پیکسل ها با شکل منظم یا نامنظم) ۲-وضعیت سلول[8] (حالتی که هر سلول در فرایند تکامل آتوماتای سلولی میتواند داشته باشد.) ۳-همسایگی[9] (شامل خود سلول و تعدادی سلول دیگر در شعاع خاصی از سلول مورد آزمایش است.) ۴-زمان[10] (شامل مراحل زمانی T1 تا Tn) ۵-قانون انتقال[11] (موتور اصلی تغییرات در مدل آتوماتای سلولی است که رفتار سلول‌ها را در مراحل زمانی مختلف مشخص و وضعیت آینده سلول را مشخص می‌کند).

الگوریتم ژنتیک[12]

خوارزمی یا الگوریتم مجموعه‌ای متناهی از دستورالعمل‌ها است که به ترتیب خاصی اجرا می‌شوند و مسئله‌ای را حل می‌کنند. به عبارت دیگر یک الگوریتم، روشی گام به گام برای حل مسئله است. شیوه محاسبه معدل در مدرسه، یکی از نمونه‌های الگوریتم است. ایده اصلی الگوریتم‌های تکاملی[13] در سال ۱۹۶۰ میلادی توسط ریچنبرگ[14] مطرح گردید (۲۶). الگوریتم‌های ژنتیک که منشعب از این نوع الگوریتم‌ها می‌باشد، در حقیقت روش جستجوی کامپیوتری بر پایه الگوریتم‌های بهینه سازی وبر اساس ساختار ژن‌ها و کروموزم‌ها است. الگوریتم ژنتیک شاخه ای از هوش مصنوعی است که در سال ۱۹۷۵ توسط هالند[15] و دانشجویانش بر اساس تئوری تکامل و به تقلید از

1- Non-Builtup
2- Builtup
3- Cellular automata (CA)
4- Newman
5- Ulam
6- Conway

7- Cell space or Grid of cells
8- Cell State
9- Neighborhood
10- Time
11- Transition rule
12- Genetic Algorithm (GA)
13- Evolutionary
14- Rechenberg
15- Holland

فرآیند میوز[1]در تقسیم سلولی برای حل مسائل پیچیده معرفی گردید (۲۷, ۲۸).

جریان اجرای یک الگوریتم ژنتیک از آغاز تا پایان، به صورت زیر خلاصه می‌شود:

۱. یک جمعیت تصادفی با n کروموزوم تولید میشود. n اندازه جمعیت یا تعداد اعضاء است و هرکروموزوم نماینده یک جواب امکان پذیر برای مساله است.
۲. میزان شایستگی هر کروموزوم با توجه به تابع ارزیابی محاسبه می شود.
۳. یک جفت از کروموزوم‌ها براساس میزان شایستگی به عنوان والد انتخاب می شوند.
۴. دو والد انتخاب شده با هم ترکیب می شوند و یک یا دو فرزند بوجود می آید.
۵. هر فرزند با توجه به احتمال جهش P_m جهش می یابد.
۶. فرزند در جمعیت جدید قرار میگیرد.
۷. مراحل ۳ تا ۶ آنقدر تکرار میشود تا n عضو برای جمعیت جدید تولید شود. سپس الگوریتم به مرحله ۸ می رود.
۸. جمعیت جدید، جایگزین جمعیت قدیمی می شود.
۹. الگوریتم از مرحله ۲ تکرار می شود.
۱۰. الگوریتم آنقدر تکرار میشود تا جواب‌ها به سمت خاصی همگرا شوند و بدین ترتیب، جستجو به پایان می‌رسد.

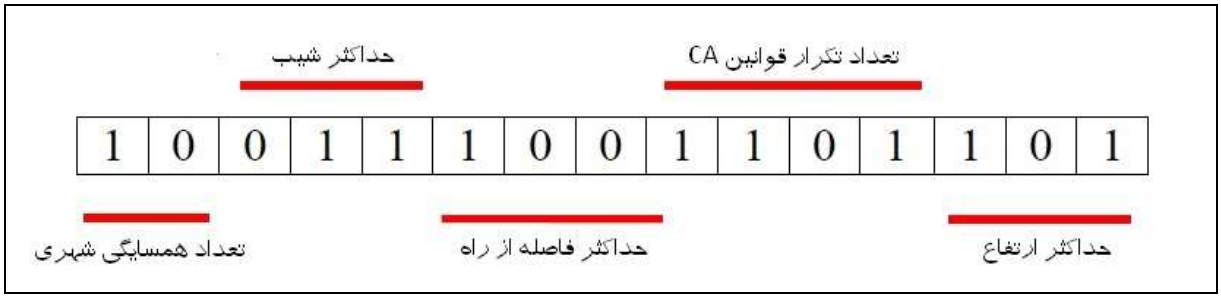
کالیبراسیون آتوماتای سلولی با الگوریتم ژنتیک

نقش الگوریتم ژنتیک در فرآیند مدلسازی حاضر، استخراج حد آستانه‌های مختلف برای انجام مدلسازی است. طراحی الگوریتم یکی از مهم ترین بخش‌های کالیبراسیون با الگوریتم ژنتیک است. به این منظور، ابتدا تابع هدف طراحی شد. سپس کد کردن راه حل‌ها انجام شد. در اجرای الگوریتم ژنتیک جمعیت اولیه آماده و از عملگرهای انتخاب به همراه نخبه گرایی، ترکیب و جهش کروموزوم‌ها استفاده شد.

مقادیر هر پارامتر کدگذاری شد و در پایان انجام الگوریتم مجدداً رمزگشایی شد. تولید جمعیت اولیه می تواند به صورت تصادفی و یابه صورت هدفمند انجام شود. برای تولید جمعیت اولیه مجموعه تعدادی از کروموزوم‌ها به صورت تصادفی تولیدشد.

در کدگذاری به روش باینری همه کروموزوم‌ها به کدهایی از ۰ و ۱ تبدیل می شوند. هر کروموزوم شامل ۱۵ ژن می باشد که از این ۱۵ ژن جهت کدگذاری ۵ پارامتر ارتفاع، شیب زمین، فاصله از راه اصلی، تعداد همسایگی با سلول‌های شهری و تعداد تکرار قوانین استفاده شده است.

1- Meiosis



شکل ۲- نمونه یک قانون به صورت یک کروموزوم با ۱۵ ژن.

در شکل ۲ از چپ به راست، ۲ ژن اول برای پارامتر حداقل تعداد همسایگی شهری، ۳ ژن دوم برای پارامتر شیب زمین، ۳ ژن سوم برای پارامتر فاصله از راه اصلی، ۴ ژن برای پارامتر تعداد تکرار قوانین برای رسیدن به تصویر واقعیت زمینی و ۳ ژن آخر برای پارامتر حداکثر ارتفاع می‌باشد.

برای ارزیابی مدل طراحی شده در تحقیق حاضر از شاخص دقت کلی بعنوان تابع هدف به منظور ارزیابی کارایی هر مجموعه از قوانین استفاده شد. مجموعه قوانین با ماکزیمم مقدار تابع هدف به عنوان مجموعه بهینه انتخاب می شود. چوانگ و همکاران (۲۹) بیان کردند که چنانچه دقت کلی در نقشه‌های تولید شده بیش از ۷۰ درصد باشد صحت نقشه‌های تولیدی قابل اعتماد است.

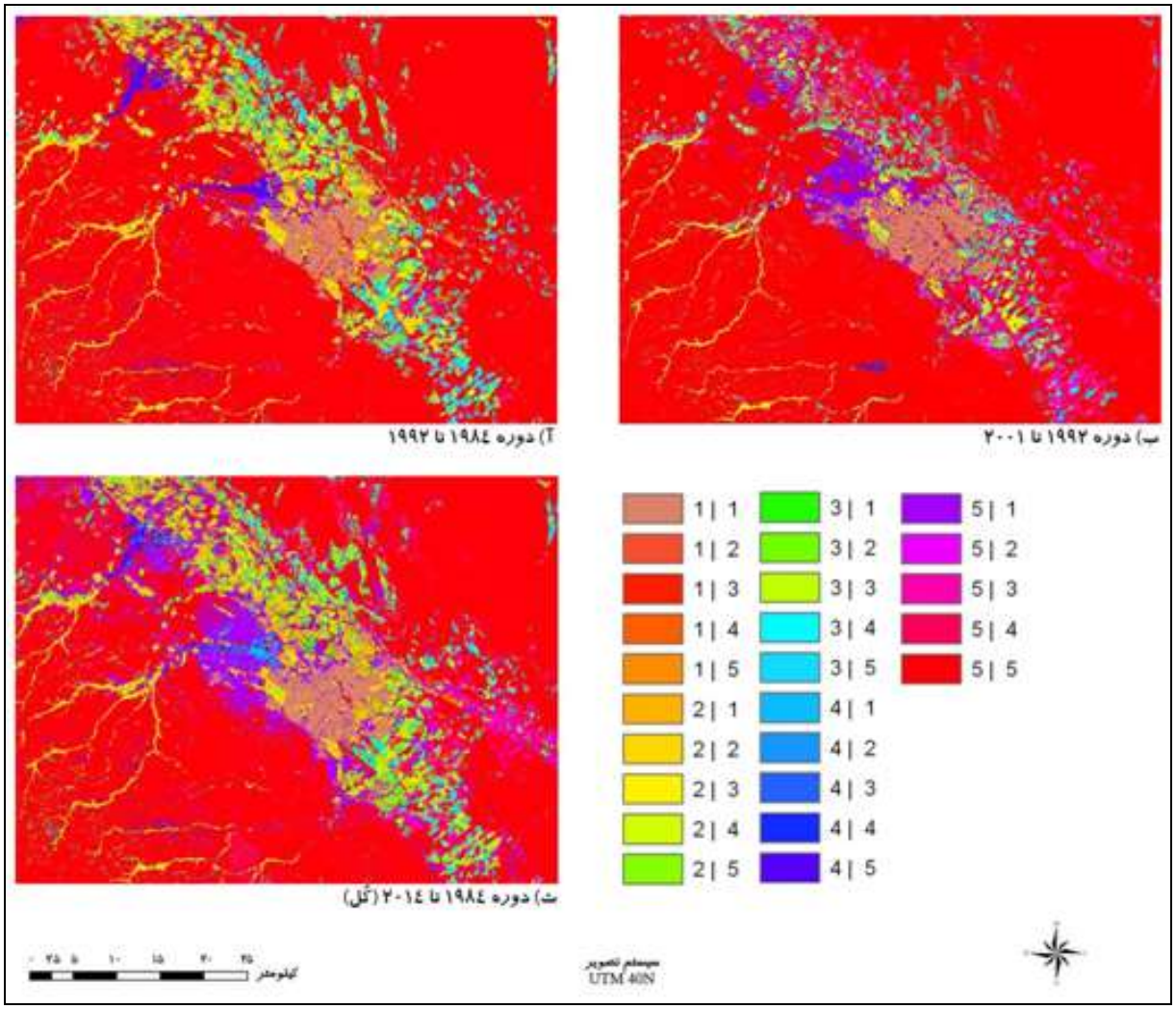
شکل ۳- نمودار جریان تحقیق حاضر.

نتایج

نتایج مطالعه تغییر کاربری

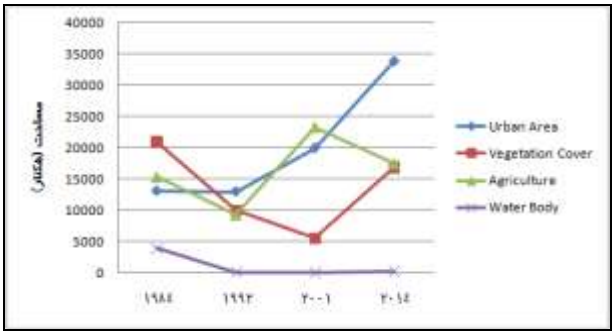
بر اساس نتایج تغییرات مساحت کاربری/پوشش‌ها طی دوره‌های مورد مطالعه تغییر کاربری از شهر به بایر و بالعکس بیش از دیگر کاربری‌ها بوده است. یک علت این امر رشد شهر و تبدیل اراضی بایر همراه با دیگر کاربری‌ها به شهر بوده است البته الگوی پاسخ طیفی برخی مناطق بایر که نزدیک به الگوی پاسخ طیفی نواحی شهری بوده نیز می‌تواند مزید بر علت باشد. در مجموع ۱۱,۳۱ درصد از اراضی بایر بین سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۴ به شهر تبدیل شده اند. نواحی شهری در منطقه مورد مطالعه از ۱۳۰۹۹ هکتار در سال ۱۹۸۴ به ۳۳۸۴۰ هکتار در سال ۲۰۱۴ رسیده است. یعنی رشد مناطق شهری طی ۳۰ سال حدود ۲۰۷۴۱ هکتار بوده است. این مقدار برابر نرخ رشدی معادل ۶۹۱ هکتار در هر سال میباشد. مساحت کل منطقه ۲۴۶۷۶۱ هکتار می‌باشد. همچنین در رابطه با کاربری کشاورزی، نتایج نشان می‌دهد تبدیل کاربری کشاورزی به شهر پس از تبدیل به پوشش گیاهی در همه دوره‌ها (البته به جز زمین‌های بایر) در رتبه دوم بوده است.

با توجه به وجود ۵ طبقه یا کاربری/پوشش در مطالعه حاضر، خروجی مقایسه تغییر کاربری‌ها شامل ۲۵ طبقه خواهد بود. شکل ۴ نقشه تغییرات کاربری/پوشش طی دوره‌های زمانی مورد مطالعه است. در راهنمای این نقشه اعداد سمت چپ نشان دهنده کد کاربری در سال شروع دوره و اعداد سمت راست نشان دهنده کد کاربری در سال پایان دوره می‌باشد.



شکل ۴- نقشه تغییرات کاربری/پوشش سرزمین مشهد و حومه طی دوره‌های زمانی مورد مطالعه.

شکل ۵ روند تغییرات کاربری/پوشش‌ها را طی کل دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد. علت عمده کاهش چشمگیر مساحت پهنه‌های آبی، ساخت سد از سال ۱۹۹۲ به بعد است که موجب جمع شدن آبها پشت سدها شده است. مساحت شهر به طور کلی زیاد شده است. به جهت مساحت زیاد زمین‌های بایر در تمام سال‌ها و قابلیت مقایسه بهتر بین مساحت کاربری‌ها، زمین‌های بایر از نمودار شکل ۵ حذف شده است.



شکل ۵- نمودار تغییر مساحت کاربری/پوشش‌ها در منطقه و دوره زمانی مورد مطالعه برحسب هکتار.

نتایج مدلسازی توسعه شهری

پس از مطالعه و بررسی تغییرات کاربری/پوشش سرزمین شهر مشهد، توسعه شهر مشهد طی یک دوره زمانی مورد بررسی قرار گرفت. از نتایج جالب توجه در ارتباط با رشد شهر مشهد میزان رشد شهر از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۴ است. به طوری که مناطق شهری در منطقه مورد مطالعه از ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۴ به میزان ۱.۲ برابر بیشتر از همه میزان رشد شهر تا سال ۲۰۰۱ رشد داشته است. این مقدار از تقسیم میزان مساحت شهری بوده، در سال ۲۰۰۱ بر مساحت شهری شده، در سال ۲۰۱۴ بدست می‌آید.

پس از اجرای مدل آتوماتای سلولی کالیبره شده با الگوریتم ژنتیک مقادیری از پارامترها که منجر به بیشترین شباهت بین تصویر واقعیت زمینی و تصویر شبیه سازی شده بودند به صورت کدهای باینری استخراج و مجدد کدهای باینری به کد طبقه تبدیل شده است. در جدول زیر (جدول ۳-۳) مقادیر خروجی این پارامترها آمده است. در انتهای جدول میزان دقت کلی ۸۷,۴ نشان دهنده حداکثر شباهت بدست آمده بین دو تصویر است.

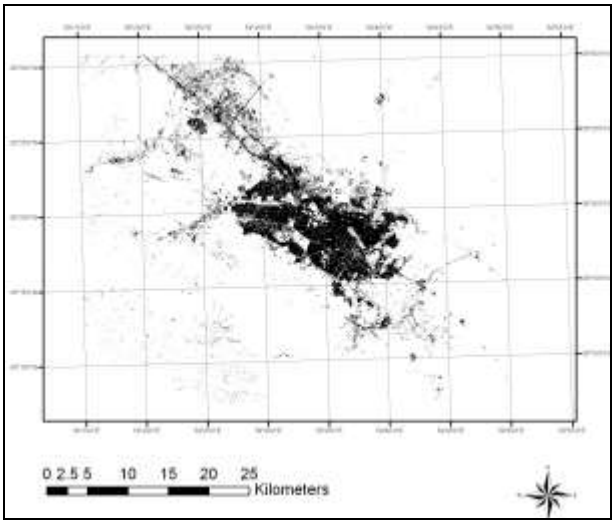
جدول ۲-مقادیر خروجی مدل سازی بر پایه الگوریتم ژنتیک بین تصاویر سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۴ .

پارامتر	خروجی مدل	
	طبقه	مقدار
حداقل تعداد سلول همسایه شهری	-	۴ سلول
حداکثر شیب	۵	تا ۱۵ درجه
حداکثر ارتفاع	۱	تا ۹۰۰ متر
حداکثر فاصله از راه اصلی	۵	تا ۱۲۵۰ متر
تعداد تکرار قوانین CA	-	۷ تکرار
دقت کلی	-	۸۷,۴ درصد

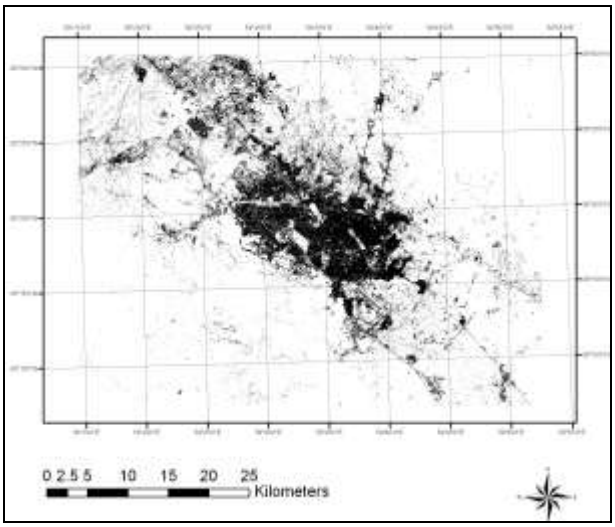
همان طور که جدول نشان می دهد، برای شهری شدن سلول های جدید به حداقل ۴ سلول شهری از ۸ سلول همسایه نیاز است. سلول های جدید صرفاً تا طبقات ۵ راه اصلی و شیب امکان شهری شدن دارند. همچنین حداکثر ارتفاع برای رشد

شهری در مدل طبقه ۱ میباشد که به طور قابل توجهی باعث ایجاد محدودیت در مدل شده است. نقشه نهایی مدلسازی شده نیز پس از ۷ بار تکرار قوانین CA بدست آمده است.

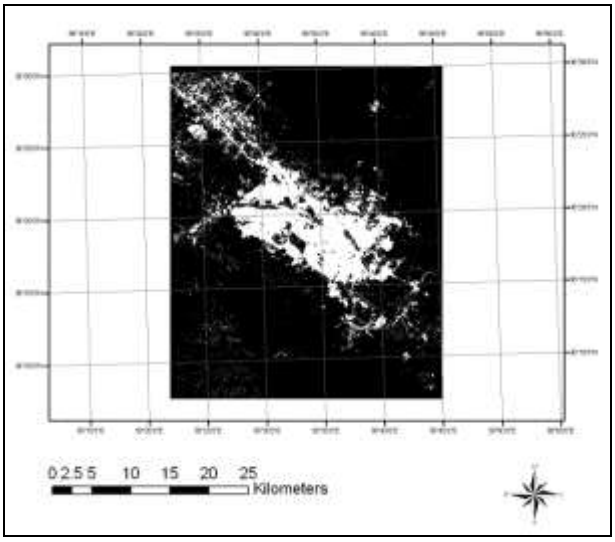
شکل های ۶ تا ۸ به ترتب بافت شهری مربوط به سال های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۴ و شبیه سازی شده سال ۲۰۱۴ را نشان می دهد. در شکل ۸ شبیه سازی توسعه شهر مشهد در قابی کوچکتر قابل مشاهده است که به علت افزایش دقت، فضای قاب تصویر مدلسازی شده، کاهش یافته است. همان طور که مشاهده می شود توسعه مدل سازی شده وابسته به نقاط پرتراکم سلول های شهری است چراکه برای شهری شدن سلول جدید به ۴ سلول شهری قدیمی نیاز است. همچنین به علت ایجاد محدودیت توسط پارامتر ارتفاع مشاهده می شود که هرچند سلول ها برای شهری شدن تا ۱۲۵۰ متر فاصله از راه اصلی اجازه توسعه دارند اما سلول های شهری جدید صرفاً در طبقه ۱ ارتفاع یعنی تا ۹۰۰ متر رشد کرده اند و سول های جدید در شکل ۸ نسبت به سال ۲۰۰۱ (شکل ۶) پراکندگی قابل توجهی ندارند.



شکل ۶- لایه بافت شهری مشهد در سال ۲۰۰۱.



شکل ۷- بافت شهری مشهد در سال ۲۰۱۴.



شکل ۸- نقشه شبیه سازی شده توسعه شهر مشهد در سال ۲۰۱۴ .

بحث و نتیجه گیری

در مطالعه حاضر با استفاده از داده‌های ماهواره ای و نیز روش مقایسه پس از طبقه بندی تصاویر ماهواره ای تغییرات کاربری/پوشش شهر مشهد و حومه طی سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۴ (۴ دوره) مشخص گردید. بر اساس نتایج، به دلیل افزایش جمعیت شهر و متعاقب آن افزایش تقاضا جهت ساخت و ساز، شهر رشد قابل ملاحظه ای داشته است. همچنین زمین‌های کشاورزی و پوشش گیاهی طی این مدت تغییرات زیادی داشته که بخش قابل توجهی از آن به مصرف توسعه شهری رسیده است. همچنین با استفاده مجدد از نتایج تغییرات کاربری منطقه مورد مطالعه مربوط به سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۴ به مدل سازی رشد شهر مشهد پرداخته شد. به طوری که تصویری از رشد شهر مشهد بین این دو سال بر اساس پارامترهای همسایگی شهری، فاصله از راه، ارتفاع و شیب و مناطق مستثنی شبیه سازی شد. مدل سازی در محیط سلولی- رستری و مدل آتوماتای سلولی انجام شد و مقادیر پارامترها با الگوریتم ژنتیک کالیبره شد.

نتایج این پژوهش در کنار سایر پژوهش‌های صورت گرفته در رابطه با تغییر کاربری/پوشش سرزمین و همچنین مدل سازی توسعه شهری به پژوهشگران در مطالعه تغییر کاربری و انتخاب مدل مناسب برای مدل سازی‌های مشابه کمک خواهد کرد.

برای شهر مشهد پیش تر رفیعی و همکاران به بررسی تغییر کاربری/پوشش سرزمین به روش مقایسه پس از طبقه بندی پرداخته اند (۳۰). روش مطالعه تغییرکاربری/پوشش در مطالعه حاضر مشابه با روش کار رفیعی و همکاران بوده است با این تفاوت که منطقه مورد مطالعه بزرگتر و دوره‌های زمانی مورد مطالعه علاوه بر تفاوت در سال‌ها کاملاً جدیدتر و به روز است. البته آنها از دو ماهواره IRS و Landsat در مطالعه شان استفاده کرده بودند که قدرت تفکیک مکانی متفاوتی داشته است. بر اساس نتایج آنها، مشهد ۷۳۸۰ هکتار طی ۲۰ سال از ۱۳۶۶ تا ۱۳۸۵ رشد فضایی داشته است. منطقه مورد مطالعه رفیعی و همکاران محدود به مشهد بوده در حالی که مطالعه حاضر مناطق طرقبه، شاندیز ورضویه و ... را نیز شامل شده است. در این پژوهش یکی از مهمترین مشکلات که در طبقه بندی تصاویر وجود داشت، انتخاب نمونه‌های آموزشی مناسب برای نرم افزار و در عین حال اختلاط بازتاب‌های طیفی ثبت شده طبقه زمین‌های بایر، مناطق شهری و کوهستان‌های صخره ای بود که مشکل جدیدی نیست و رفیعی و همکاران نیز با این مشکل مواجه بوده اند (۳۰).

در رابطه با مدل سازی توسعه شهری، پارامترهای بهینه بدست آمده توسط زارعی و آل شیخ برای شهر شیراز شامل، تعداد تکرار قوانین آتوماتای سلولی ۸ بار، شیب مناسب برای توسعه کمتر ۹ درصد، فاصله ی از شبکه ی راه‌های اصلی کمتر ۲۱۰۰ متر و همسایگی با حداقل ۳ پیکسل با بافت شهری بوده است. آنها در نهایت به دقت کلی ۰,۹۱۸ دست یافتند (۲۰).

پارامترهای بدست آمده تحقیق حاضر در مقایسه با مطالعه مطالعه شهر شیراز متفاوت است. مدل ها برای شهرهای متفاوت با توجه به شرایط محلی پاسخ های متفاوتی نیز دارند. دقت کلی بدست آمده توسط این مدل سازی کمتر از شهر شیراز است که علت آن احتمالاً مساحت و حجم بیشتر محاسبات مدل نسبت به شهر شیراز است. بعلاوه اینکه احتمالا شهر مشهد از پارامترهای دیگر و شرایط پیچیده تری نسبت به شهر شیراز تبعیت می کند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

مدل توسعه یافته در تحقیق حاضر توانست تا حدودی انتظارات ما را برطرف کند و به دقتی خوبی برسد هرچند این مدل همچنان قابلیت‌های بیشتری برای توسعه دارد. به این ترتیب الگوریتم ژنتیک نشان می دهد می‌تواند به خوبی به عنوان روشی کارا در کالیبراسیون مدل‌های توسعه شهری عمل کند و پاسخگوی سریعی برای رسیدن به هدف مدلسازی که همانا بیشترین شباهت و یا کمترین خطا در شبیه سازی است، باشد.

با این حال پیشنهاد میشود مدلسازی های بیشتری با استفاده از آتوماتای سلولی با الگوریتم ژنتیک انجام شود. این تلاش ها موجب یافتن کارایی های بیشتر الگوریتم ژنتیک برای کالیبراسیون مدل آتوماتای سلولی می شود و دقت های بالاتری در مدلسازی را موجب خواهد شد. همچنین می توان فوصل زمانی کوتاهتری بین دو لایه شهری را برای مدلسازی انتخاب کرد. بعلاوه پیشنهاد می شود از پارامترهای مؤثر دیگری مانند تراکم جمعیت نیز در مدلسازی استفاده شود.

منابع

1. Jantz CA, Goetz SJ, Shelley MK. Using the SLEUTH urban growth model to simulate the impacts of future policy scenarios on urban land use in the Baltimore-Washington metropolitan area. Environment and Planning B. 2004;31(2):251-72.
2. Helming K. Sustainability Impact Assessment of Land use Changes. Berlin, Heidelberg, New York: Springer; 2008. 507 p.
3. Lausch A, Herzog F. Applicability of Landscape Metrics for the Monitoring of Landscape Change: Issues of Scale, Resolution and Interpretability. Ecological Indicator. 2002:3-15.
4. Koomen E. Modelling Land- use Change: Progress and Applications: Springer; 2007. 392 p.
5. Agarwal C, Green GM, Grove JM, Evans TP, Schweik CM. A review and assessment of land-use change models: dynamics of space, time, and human choice. 2002.
6. Vitousek PM. Beyond global warming: ecology and global change. Ecology. 1994;75(7):1861-76.
7. Mc Gill R. Urban Management in Developing Countries. Cities. 1998;1(6.(

۸. ب. فز, ح. ع, خ. وک. استخراج کاربری های اراضی شهرستان ملکان با استفاده از تصاویر ماهواره ای ETM لندست ۷ مجله آمایش. ۱۳۸۶؛۱(۳):۷۴-۹۳.

9. Torrens PM, O'Sullivan D. Cellular automata and urban simulation: where do we go from here? Environment and Planning B: Planning and Design. 2001;28(2):163-8.
10. Veldkamp A, Fresco LO .CLUE: a conceptual model to study the Conversion of Land Use and its Effects. Ecological Modelling. 1996;85(2–3):253-70.
11. He C, Okada N, Zhang Q, Shi P, Li J. Modelling dynamic urban expansion

processes incorporating a potential model with cellular automata. Landscape and Urban Planning. 2008;86(1):79-91.

۱۲. رضازاده ر, میراحمدی م. مدل اتوماسیون سلولی روشی نوین در شبیه سازی رشد شهری. نشریه علمی پژوهشی فناوری آموزش. ۱۳۸۸;۴(۱):۴۷-۵۵.

13. Parker DC, Manson SM, Janssen MA, Hoffman MJ, Deadman P. Multi-agent systems for the simulation of land use and land cover change: A review. Annals of the Association of American Geographers. 2003(93):314-37.

14. BALLING RJ, TABER JT, BROWN MR, DAY K. Multiobjective urban planning using genetic algorithm. Journal of Urban Planning and Development-ASCE. 1999;125(2):86-99.

15. COLONNA A, DISTEFANO V, LOMBARDO S, PAPINI L, RABINO GA. Learning urban cellular automata in a realworld. The case study of Rome Metropolitan Area. In: S. BANDINI, R. SERRA, and F. SUGGI LIVERANI)Eds.), Cellular Automata: Research Towards Industry: ACRI'98-Proceedings of the Third Conference on Cellular Automata for Research and Industry, Trieste, 7–9 October 1998. London; New York: Springer; 1998.

۱۶. طیبی ا. پیشبینی و ارزیابی تغییر کاربری اراضی. تهران: دانشگاه تهران; ۱۳۸۸.

۱۷. کامیاب ح. مدلسازی توسعهٔ فیزیکی شهر گرگان با استفاده از داده های سنجش از دور و رگرسیون لجستیک: دانشگاه تربیت مدرس; ۱۳۸۷.

۱۸. حسینعلی ف, شیخ عاآ, نوریان ف. توسعهٔ مدلی عامل-مبنا برای شبیه سازی گسترش کاربری اراضی شهری (مطالعه موردی: قزوین). مطالعات و پژوهشهای شهری و منطقه ای. ۱۳۹۱;۴(۱۴):۲۲-۱.

۱۹. ملکی د. مدلسازی توسعه شهری با استفاده از روش آتوماتای سلولی. تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی; ۱۳۸۹.

۲۰. زارعی ر, شیخ عاآ. مدلسازی توسعه شهری با استفاده از اتوماسیون سلولی و الگوریتم ژنتیک (منطقه مورد مطالعه: شهر شیراز). پژوهش و برنامه ریزی شهری. ۱۳۹۱;۳(۱۱):۱-۱۶.

۲۱. ایران مآ. نتایج سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۳۸۵. In: جمهوری مبرونرر, editor. تهران: مرکز آمار ایران; ۱۳۹۳.

22. Benenson I, Torrens PM. Geosimulation: Automata-Based Modeling of Urban Phenomena. England: John Wiley & Sons, Ltd.; 2004. null p.

23. Junfeng J. Transition Rule Elicitation for Urban Cellular Automata models. Case Study: Wuhan-China. The Netherlands: International institute for geo-information science and earth observation (ITC); 2003.

24. Sloot P. Cellular Automata 2000. Available from: http://carol.wins.uva.nl/sloot/CSS/CA.pdf.

25. Schatten A. Cellular Automata: Digital Worlds 1999. Available from: http://www.ifs.tuwien.ac.at/aschatt/info/ca/ca.html.

26. Rechenberg I. Evolutionsstrategie - Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. Reprinted by Fromman-Holzboog (1973)1971.

27. HOLLAND JH. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor: University of Michigan Press; 1975.

28. Goldberg DE. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. 1st Ed. ed. New York: Addison-Wesley Publishing Company; 1989.

29. Chuang C-W, Lin C-Y, Chien C-H, Chou W-C. Application of Markov-chain model for vegetation restoration assessment at landslide areas caused by a catastrophic earthquake in Central Taiwan. Ecological Modelling. 2011;222(3):835-45.

۳۰. رفیعی ر, ماهینی عس, خراسانی نا. تعیین تغییرات کاربری اراضی به روش مقایسه پس از طبقه بندی تصاویر ماهواره های IRS و LandSat. مجله کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی. ۱۳۹۰;۲(۳):۵۳-۶۳.