



Journal of Environmental Studies

Vol. 47, No. 3, Autumn 2021

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir

Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Simulation of Urban Land Use Growth Scenarios Using the Cellular Automata Method of SLEUTH

Document Type
Research Paper

Fatemeh Jahanishakib^{1*}, Malihe Erfani²

Received
August 23, 2021

1 Faculty of natural resources and environmental studies, University of Birjand, South Khorasan province, Birjand, Iran

Accepted
October 28, 2021

2 Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

DOI: [10.22059/JES.2021.328447.1008215](https://doi.org/10.22059/JES.2021.328447.1008215)

Abstract

Accelerating urban expansion is increasingly challenging the sustainable use of land, since modeling urban growth is important in order to adapt to balanced development. This study was carried out with the aim of simulating the future urban expansion of Birjand Metropolitan from 2020 to 2050 using Cellular Automata (CA) methodology in the SLEUTH modeling considering two scenarios: historical and environmental growth. Calibration results of the SLEUTH model showed Diffusion (65) and slope resistance coefficients (42) have the most effect on historical and environmental growth, respectively. The model was calibrated in three stages: coarse, fine and final, using the best fitted values of OSM and Leesale indices. The simulation results showed that urban expansion in the historical and environmental growth scenarios will be 2201.85 and 2150.91 hectares, respectively, so increasing the area of Birjand metropolis is inevitable in both scenarios. A comparison of the two scenarios denoted that in the historical growth scenario, the urban growth rate is higher and the vegetation destruction is maximal. The findings of this study can help policy makers and managers in formulating informed urban planning strategies to have the least destructive effect on the environment in the future.

Keywords: Machine Learning, Sustainable development, Modeling, Environmental scenario

*Corresponding author:

Email: jahanishakib@birjand.ac.ir

Introduction

The rapid population growth is one of the main variables affecting social and economic factors and urban expansion in developing countries. Small and isolated centers of population become large and continuous over time and become more complex environmentally. Accelerating urban expansion is increasingly challenging the sustainable use of land, since modeling urban growth is important in order to adapt to balanced development. Among all the models for urban simulation, dynamic models based on cellular automata have significant usage in urban modeling because of its applications in different places and times. One of the most widely used spatial models based on cellular automata is the SLEUTH model, which in recent years has improved its accuracy and efficiency for performing calculations, and today it is widely considered in predicting the development trend of different cities in the world.

This study was carried out with the aim of simulating the future urban expansion of Birjand Metropolitan from 2020 to 2050 using Cellular Automata (CA) methodology in the SLEUTH modeling considering two scenarios: historical and environmental growth.

Materials and Methods

Study area

Birjand Metropolitan is the capital of South Khorasan province. The area of Birjand is 14.265 km² and located between 53', 32° N and 59', 12° E in the northeastern margin of The Lut Desert, which is surrounded by mountains. In the last decade, and especially after the division of Khorasan province into three provinces of North Khorasan, South Khorasan and Khorasan Razavi, Birjand Metropolitan as center of South Khorasan province faced to socio-economic and political changes that led to rapid urban growth and physical and functional changes.

SLEUTH model

In this research, modeling the expansion of Birjand has been considered using cellular automata by SLEUTH method. SLEUTH name is derived from the names of input layers: Slope, Land use, Excluded areas, Urbanization, Transportation and Hillshade. The main attribute of SLEUTH is that it be calibrated on the base of the region changes in the past and therefore reasonably predicts the future. SLEUTH starts with the oldest data (first year of control) and generates growth cycles. Each growth cycle is assumed to represent one year. A run is the set of growth cycles from the first control year to the final year. Considering the comparison the simulated image with the real image in the control years, evaluation indexes are generated.

SLEUTH modeling performed in four steps:

1- Data gathering

All layers (Slope, Land use, Excluded areas, Urbanization, Transportation and Hillshade) were georeferenced to the same geographical references system (UTM-40N) and pixel size 30*30.

Slope and Hillshade layers extracted from DEM. Land use and Urbanization provided from classification of landsat_TM images 1990, 2000, 2001, 2020 years. These images were belonged to row and path 159 and 37, respectively and classification was performed using Support Vector Machine (SVM) algorithm. In preparing the road layer for four mentioned years, in addition to using satellite images, the existing maps and Google Earth were used for updating. Two Excluded areas layer in this study were prepared according to two scenarios:

historical growth and environmental growth. In the historical growth scenario, roads and cities and in the environmental growth scenario, vegetation and high slopes (slops higher than 30%) were considered as Excluded areas.

2- Confirmation of the correct execution of the model

The SLEUTH model was downloaded from the GigaLapolis project, and the required simulator in the Windows (Cygwin) on the PC was installed. To ensure the correct execution of the model, SLEUTH was performed by experimental data and data from the study area. Surveying the results and outputs of these performances confirms accuracy of execution.

3- The calibration step

Calibration is one of the most important steps in simulating urban growth using SLEUTH. In the calibration step, based on the historical data, the best set for the five global parameters/coefficients (Diffusion, Bread, Spread, Slope and Road Gravity) is extracted. These coefficients, which indicate the contribution of factors to the expansion of the study area, vary from zero to 100 and according to the Brute Force method in four stages, which consist of coarse, fine, final and average, are obtained based on cell size, search range and Monte Carlo execution number. In each forward stage the range of search become narrow and number of Monte Carlo execution become more. Optimum Sleuth Metric (OSM) and Leesale metrics in each stage were used to determining the calibration coefficients for the next stage. These metrics show the overall precision of the simulation too.

4- Prediction the Birjand growth

Four kinds of growth simulate by SLEUTH consist of spontaneous, spread, organic and road influenced. This growth rules and the coefficients obtained from previous step constitute the transfer rules in the Cellular Automata of SLEUTH model for prediction. Output image of prediction was reclassified to 1: urbanization probability > 80% and 0: urbanization probability < 80%

Discussion of Results

In this study, using the SLEUTH model, the expansion of Birjand city was predicted according to historical and environmental growth scenarios from 2020 until 2050. During the study period, the growth of the urbanization is quite evident and it is mainly happening in the northeast and southwest of the city. One scenario of this research was based on the historical growth and the past trend, which means that all the drivers that have caused the growth of the city in the past will continue in the future. In the environmental growth scenario, urban growth will not located in vegetation cover and slopes above 30%. The largest increase will be happened around roads in the historical growth scenario and in the vicinity of urban in the environmental scenario.

The Calibration results showed that there was different coefficients for scenarios. High diffusion in historical growth scenario (87) rather than environmental growth scenario (20) denoted that probability of a new urban center by 2050 is high and spontaneous growth/outlying growth will occur by 2050 but, in the environmental growth scenario the growth will has a more coherent pattern. Bread coefficients in historical growth scenario (73) show the probability of filling around the new urban points by 2050 is high in the future, but in environmental growth scenario (4) does not support new points for urban expansion.

Spread coefficient in environmental growth scenario (32) was more than historical growth scenario (20) that means probability of edge (organic) growth in environmental growth scenario is more than historical growth scenario in the future. Slope Gravity in both scenarios was very low (1) so slope isn't the control factor in this area. The main reason for low rule of slope is the uniformity of the slope and the scarcity of high slopes in the study area. Road Gravity in historical growth scenario (22) and in environmental growth scenario (37) that shows there are high eventuality of linear growth type in both scenario and road-influenced growth is significant for the future growth.

The simulation results showed that urban expansion in the historical and environmental growth scenarios would be 2201.85 and 2150.91 hectares, respectively. Although the extent of the urbanization area is close to each other, the probable places for urbanization are more compact with organic pattern in the environmental scenario and more scattered in the historical scenario. Therefore urban expansion in environmental scenario has lower influence on surrounding environment rather than historical scenario and is more close to sustainable development.

The factors that enhance the modeling results include and can be included in excluded areas layer are the use of driving forces such as population and population growth rate, population-absorbing areas such as road type, university, hospital, etc., land prices for historical growth scenario, and constraints such as saturating the capacity of the city exclusion, the per capita green space in the future and the network of waterways and water canals and their backlines for the environmental scenario, which it is recommended for future studies.

The results of this study can provide useful information for the decisions of land managers and municipalities in the direction of sustainable urban development.

Conclusions

The new political division of South Khorasan Province had significant changes on urban growth of Birjand that turn it to metropolitan. According to simulation of urban growth increasing the area of Birjand city is inevitable in both historical and environmental scenarios. A comparison of the two scenarios denoted that in the historical growth scenario, the urban growth rate is higher, the vegetation destruction and spontaneous settlements is maximal. Although timeless processes of urban growth will be happened, we can lead management orientations that it is considering in this research through two historical and environmental growth scenarios. A spontaneous, edge expansion and linear growth type are simulated as the typical pattern of urban expansion in historical growth scenario and infilling growth and edge expansion (organic pattern) for environmental growth scenario so leading the expansion direction to environmental growth scenario in the future is more near to sustainability. The findings of this study can help policy makers and managers in formulating informed urban planning strategies to have the least destructive effect on the environment in the future.

شبیه‌سازی سناریوهای رشد کاربری شهری با استفاده از روش اتوماتای سلولی SLEUTH

فاطمه جهانی شکیب^{۱*}، ملیحه عرفانی^۲

۱ استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، ایران

۲ استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۸/۶

تاریخ وصول مقاله: ۱۴۰۰/۶/۱

چکیده

رشد بی‌رویه شهری به‌طور فزاینده‌ای استفاده پایدار از اراضی را به چالش کشیده است، از این رو مدل‌سازی رشد شهری به‌منظور انطباق با توسعه متوازن بسیار مهم است. این پژوهش با استفاده از اتوماتای سلولی در بستر مدل‌سازی SLEUTH با هدف شبیه‌سازی گسترش آینده شهر بیرجند از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ با در نظر گرفتن سناریوهای رشد تاریخی و رشد محیط‌زیستی انجام شد. بر اساس نتایج کالیبراسیون مدل SLEUTH ضریب انتشار (۶۵) و ضریب مقاومت به شیب (۴۲) به ترتیب بیشترین اثر را در سناریوی رشد تاریخی و محیط‌زیستی داشتند. کالیبراسیون مدل در سه مرحله درشت، ریز و نهایی و با استفاده از بهترین مقادیر برازش شده نمایه‌های OSM و Leesale انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که گسترش شهری در سناریوی رشد تاریخی ۲۲۰۱/۸۵ و در سناریوی رشد محیط‌زیستی ۲۱۵۰/۹۱ هکتار خواهد شد، بنابراین افزایش گستره کلانشهر بیرجند امری اجتناب‌ناپذیر در هر دو سناریوی است. مقایسه دو سناریوی حاکی از این است که در سناریوی رشد تاریخی نرخ رشد شهری بالاتر و نابودی پوشش گیاهی نیز حداکثر است. یافته‌های حاصل از این مطالعه می‌تواند در تدوین آگهانته‌تر استراتژی‌های برنامه‌ریزی شهری به تصمیم‌گیرندگان و مدیران کمک کند تا کمترین اثر تخریبی را در آینده بر محیط‌زیست بر جای بگذارد.

کلیدواژه

یادگیری ماشینی، توسعه پایدار، کالیبراسیون، مدل‌سازی، سناریوی محیط‌زیست

سرآغاز

۸۶ درصد و در کشورهای در حال توسعه به ۶۴ درصد برسد (Zhou and Chen, 2018; The Economist, 2012). اولین نشانه‌های گسترش شهر گرایش به کاهش تراکم در شهرها است (Bogart, 2009). رشد سریع جمعیت و افزایش مهاجرت در دهه‌های اخیر باعث افزایش تراکم جمعیت در شهرها و به تبع آن افزایش فضای کالبدی شهرها شده است. بشر با پاک‌تراشی جنگل‌ها، پرداختن به کشاورزی، افزایش تولیدات کشتزارها و توسعه مراکز شهری، سیمای سرزمین را دگرگون کرده است. به‌منظور پیش‌بینی مسیر تغییرات کنونی محیط‌زیست، اولین گام

تغییرات کاربری اراضی به علت اثر متقابل فعالیت‌های انسان و محیط‌زیست در گذر زمان و مکان رخ می‌دهند (Chaudhuri and Clarke, 2013). شهرنشینی یکی از مهمترین تغییرات جهانی است. مراکز جمعیتی کوچک و جدا از یکدیگر در گذر زمان مبدل به عارضه‌های بزرگ و پیوسته شده و از نظر فیزیکی، اقتصادی و محیط‌زیستی روز به روز پیچیده‌تر می‌شوند. دهه‌های اخیر رشد شتابان شهری را در مقیاس جهانی شاهد بوده است. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ نرخ متوسط شهرنشینی در کشورهای پیشرفته به

شناخت فعالیت‌های انسان، نتایج و اثرات آنها است. در توسعه پایدار، مدیریت عامل مهمی به شمار می‌آید، ساماندهی وضع موجود و رفع نارسایی‌های حاصل از نابسامانی در بهره‌برداری بیش از حد از زمین، پدیده تغییر کاربری زمین‌های زیرکشت، استقرار مکانی جمعیت حال حاضر و توزیع مکانی مناسب فعالیت‌های اقتصادی در آینده براساس توسعه پایدار اقتصادی اجتماعی و محیطی، مستلزم شناسایی ساختارهای اصلی محیط، تراکم و پراکنش جمعیت، انواع فعالیت‌های اقتصادی و روند تغییرات آن از گذشته تا به حال است (جانعلی‌پور، ۱۳۹۵). درک پویایی سیستم‌های پیچیده شهری و ارزیابی تأثیر رشد شهری بر محیط‌زیست شامل روش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی، نیاز به روش‌های نوآورانه و فنون قوی دارد. تعدادی از مدل‌های تحلیلی و ایستا شهری برای توضیح توسعه شهر و الگوهای در حال تحول، توسعه داده شده اند که به شرایط خاص در زمان خاص و به مکان خاص متعلق است (مانند برنامه‌های کلاسیک شهری). در میان تمام مدل‌ها، مدل‌های پویا که بر اساس اتوماتای سلولی هستند در ارتباط با برنامه‌های کاربردی شهری، کاربرد چشمگیری دارند زیرا برای شرایط مختلف در مکان‌ها و زمان‌های مختلف قابل بهره‌برداری است (ملک‌پور، ۱۳۹۶). پایش تغییرات رشد شهر و ارزیابی آن برای برنامه‌ریزی پایدار منابع طبیعی و استفاده بهینه از آنها و کاهش مسائل مربوط به عدم برنامه‌ریزی مانند تخریب بوم‌شناختی و آلودگی‌ها، ضروری است (Jat et al., 2017). مدل‌های تغییر کاربری اراضی در سال‌های اخیر نقش مهمی در درک علل، مکانیزم‌ها و عواقب تغییرات استفاده از سرزمین ایفا کرده‌اند. مدل‌ها امکان کشف و ارزیابی سیاست‌های مختلف استفاده از اراضی را فراهم آورده و تصویری از آینده را در سناریوهای مختلف پیش‌بینی می‌کنند (Chaudhuri and Clarke, 2013). مدل‌ها و تئوری‌های مختلفی از اوایل قرن نوزده میلادی برای توسعه شهری ارائه شده است که شامل طیف وسیعی از مدل‌های مبتنی بر مشاهدات (Torrens and Sullivan, 2000)، مدل‌های پیچیده ریاضی (Lee, 1994)، مدل‌های کیفی (Allen, 1997) و مدل‌سازی فضایی می‌شود. در این بین مدل‌سازی فضایی بهتر از سایر روش‌ها می‌تواند عوامل موثر بر تغییرات کاربری اراضی را نشان دهد (Chen et al., 2002). مدل‌سازی فضایی به روش‌هایی چون شبکه عصبی مصنوعی^۱، عامل مینا^۲، (Silva and Wu, 2012)، فراکتالی^۳ (Dimitrios, 2012)، آماری فضایی^۴، اتوماتای سلول‌های^۵ و مدل‌های ترکیبی انجام می‌شود (Singh, 2003; Jat et al., 2017). تکنیک‌های بر مبنای سلول‌های خودکار جهت مدل‌سازی توسعه شهر در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه پژوهشگران بوده است (Jat et al., 2017). یکی از پرکاربردترین مدل‌های فضایی بر پایه سلول‌های خودکار مدل SLEUTH است که در سال‌های اخیر صحت و کارایی آن برای انجام محاسبات پیشرفت کرده است (Chaudhuri and Clarke, 2013; Clarke, 2008). اولین کاربردهای مدل‌های رشد شهری در آمریکا و در منطقه خلیجی San Francisco توسط Clarke و همکاران در سال ۱۹۹۷ و منطقه Washington-Baltimore توسط Clarke و Gaydos در سال ۱۹۹۸ انجام شد. در سال‌های بعد این مدل توسط پژوهشگرانی چون Candau و Clarke (۲۰۰۰)، Herold و همکاران (۲۰۰۳)، Goldstein و همکاران (۲۰۰۴) و Dietzel و همکاران (۲۰۰۵) در سایر مناطق شهری ایالات متحده آمریکا مورد توجه قرار گرفت. در خارج از ایالات متحده آمریکا کاربرد SLEUTH به سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۵ و مطالعات Silva و Clarke در منطقه Lisbon و Metropolitan پرتغال بر می‌گردد. SLEUTH در بیش از ۶۶ شهر و منطقه جهت پیش‌بینی تغییرات شهری استفاده شده است (Clarke, 2008) و امروزه به‌طور گسترده‌ای در پیش‌بینی روند توسعه شهرهای مختلف چین مورد توجه است (Huang et al., 2008). از مطالعات دیگر می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد. Akin و همکاران در سال ۲۰۱۳ تغییرات فضایی- زمانی کاربری اراضی/ پوشش اراضی را در شهر Adana ترکیه

شناخت فعالیت‌های انسان، نتایج و اثرات آنها است. در توسعه پایدار، مدیریت عامل مهمی به شمار می‌آید، ساماندهی وضع موجود و رفع نارسایی‌های حاصل از نابسامانی در بهره‌برداری بیش از حد از زمین، پدیده تغییر کاربری زمین‌های زیرکشت، استقرار مکانی جمعیت حال حاضر و توزیع مکانی مناسب فعالیت‌های اقتصادی در آینده براساس توسعه پایدار اقتصادی اجتماعی و محیطی، مستلزم شناسایی ساختارهای اصلی محیط، تراکم و پراکنش جمعیت، انواع فعالیت‌های اقتصادی و روند تغییرات آن از گذشته تا به حال است (جانعلی‌پور، ۱۳۹۵). درک پویایی سیستم‌های پیچیده شهری و ارزیابی تأثیر رشد شهری بر محیط‌زیست شامل روش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی، نیاز به روش‌های نوآورانه و فنون قوی دارد. تعدادی از مدل‌های تحلیلی و ایستا شهری برای توضیح توسعه شهر و الگوهای در حال تحول، توسعه داده شده اند که به شرایط خاص در زمان خاص و به مکان خاص متعلق است (مانند برنامه‌های کلاسیک شهری). در میان تمام مدل‌ها، مدل‌های پویا که بر اساس اتوماتای سلولی هستند در ارتباط با برنامه‌های کاربردی شهری، کاربرد چشمگیری دارند زیرا برای شرایط مختلف در مکان‌ها و زمان‌های مختلف قابل بهره‌برداری است (ملک‌پور، ۱۳۹۶). پایش تغییرات رشد شهر و ارزیابی آن برای برنامه‌ریزی پایدار منابع طبیعی و استفاده بهینه از آنها و کاهش مسائل مربوط به عدم برنامه‌ریزی مانند تخریب بوم‌شناختی و آلودگی‌ها، ضروری است (Jat et al., 2017). مدل‌های تغییر کاربری اراضی در سال‌های اخیر نقش مهمی در درک علل، مکانیزم‌ها و عواقب تغییرات استفاده از سرزمین ایفا کرده‌اند. مدل‌ها امکان کشف و ارزیابی سیاست‌های مختلف استفاده از اراضی را فراهم آورده و تصویری از آینده را در سناریوهای مختلف پیش‌بینی می‌کنند (Chaudhuri and Clarke, 2013). مدل‌ها و تئوری‌های مختلفی از اوایل قرن نوزده میلادی برای توسعه شهری ارائه شده است که شامل طیف وسیعی از مدل‌های مبتنی بر مشاهدات (Torrens and Sullivan, 2000)، مدل‌های پیچیده ریاضی (Lee, 1994)، مدل‌های کیفی (Allen, 1997) و مدل‌سازی فضایی می‌شود. در این بین مدل‌سازی فضایی بهتر از سایر روش‌ها می‌تواند عوامل موثر بر تغییرات کاربری اراضی را نشان دهد (Chen et al., 2002). مدل‌سازی فضایی به روش‌هایی چون شبکه عصبی مصنوعی^۱، عامل مینا^۲، (Silva and Wu, 2012)، فراکتالی^۳ (Dimitrios, 2012)، آماری فضایی^۴، اتوماتای سلول‌های^۵ و مدل‌های ترکیبی انجام می‌شود (Singh, 2003; Jat et al., 2017). تکنیک‌های بر مبنای سلول‌های خودکار جهت مدل‌سازی توسعه شهر در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه پژوهشگران بوده است (Jat et al., 2017). یکی از پرکاربردترین مدل‌های فضایی بر پایه سلول‌های خودکار مدل SLEUTH است که در سال‌های اخیر صحت و کارایی آن برای انجام محاسبات پیشرفت کرده است (Chaudhuri and Clarke, 2013; Clarke, 2008). اولین کاربردهای مدل‌های رشد شهری در آمریکا و در منطقه خلیجی San Francisco توسط Clarke و همکاران در سال ۱۹۹۷ و منطقه Washington-Baltimore توسط Clarke و Gaydos در سال ۱۹۹۸ انجام شد. در سال‌های بعد این مدل توسط پژوهشگرانی چون Candau و Clarke (۲۰۰۰)، Herold و همکاران (۲۰۰۳)، Goldstein و همکاران (۲۰۰۴) و Dietzel و همکاران (۲۰۰۵) در سایر مناطق شهری ایالات متحده آمریکا مورد توجه قرار گرفت. در خارج از ایالات متحده آمریکا کاربرد SLEUTH به سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۵ و مطالعات Silva و Clarke در منطقه Lisbon و Metropolitan پرتغال بر می‌گردد. SLEUTH در بیش از ۶۶ شهر و منطقه جهت پیش‌بینی تغییرات شهری استفاده شده است (Clarke, 2008) و امروزه به‌طور گسترده‌ای در پیش‌بینی روند توسعه شهرهای مختلف چین مورد توجه است (Huang et al., 2008). از مطالعات دیگر می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد. Akin و همکاران در سال ۲۰۱۳ تغییرات فضایی- زمانی کاربری اراضی/ پوشش اراضی را در شهر Adana ترکیه

خواهد داشت. Clarke و Johnson (۲۰۲۰) از حجم بالایی از داده‌های ورودی مدل SLEUTH به‌منظور پیش‌بینی کاربری اراضی شش ایالت کالیفرنیا تا سال ۲۱۰۰ استفاده کردند. هدف آنها بررسی قابلیت مدل SLEUTH در ارائه پیش‌بینی قابل اعتماد بود. آنها مهم‌ترین عامل تفاوت در تغییرات کاربری اراضی و نرخ تغییرات در ایالت‌ها را خود همبستگی مکانی (بر اساس شاخص Moran's I) بیان کردند. همچنین بر اساس پیش‌بینی آنها تقریباً ۹۹٪ از رشد شهری در کالیفرنیا از گسترش سکونتگاه‌های جدید و موجود است. Bajracharya و همکاران (۲۰۲۰) تاثیر رشد شهر را بر سه منطقه مهم شهر آلبوکرکی نیومکزیکو مورد آزمون قرار دادند. آنها رشد شهر بر اساس دو سناریو محتمل با مدل SLEUTH پیش بردند. نتایج تحقیق نشان داد که رشد شهری عمدتاً به‌صورت پر کردن و در حاشیه شهر فعلی رخ می‌دهد.

در ایران نیز کامیاب و همکاران در سال ۱۳۹۰ با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و مدل SLEUTH در دوره زمانی ۱۹۸۷-۲۰۰۱، توسعه شهر گرگان را تا سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ پیش‌بینی کردند. در این مطالعه، سه گروه از متغیرها شامل متغیرهای بیوفیزیکی، اقتصادی-اجتماعی و کاربری زمین به کار برده شد. رسولی و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از مدل SLEUTH برای شهرستان‌های علی‌آباد، رامیان و آزاد شهر ضرایب موثر بر رشد شهری را تعیین نمودند. نتایج آنها نشان داد در طول دوره پیش‌بینی مساحت کاربری شهر به‌طور زیادی افزایش یافته است و با توجه به کاربری‌های موجود در منطقه مطالعاتی، عمده کاربری‌های کشاورزی و جنگل این اراضی به شهر تبدیل شده است. بیهمتا و همکاران (۲۰۱۵) از مدل‌سازی به‌کمک روش سلول‌های خودکار در مدل‌سازی SLEUTH جهت پیش‌بینی گسترش آینده شهر اصفهان استفاده کردند. آنها تغییرات گستره شهری را در سال ۲۰۵۰ شبیه‌سازی کردند و کالیبره کردن مدل را با کمک داده‌های تاریخی برگرفته از سری‌های زمانی تصاویر

بین سال‌های ۱۹۶۷ تا ۲۰۰۷ بررسی کردند و آن را برای سال ۲۰۲۳ با استفاده از مدل SLEUTH پیش‌بینی نمودند. Amato و همکاران (۲۰۱۶) برای یکی از شهرهای جنوبی ایتالیا از مدل SLEUTH جهت شبیه‌سازی رشد شهری استفاده کردند. آنها از نمایه Leesale و OSM برای مرحله کالیبراسیون استفاده کردند و نشان دادند سیاست‌گذاری‌های محلی نقش مهمی در توسعه شهری در آینده خواهند داشت. Jat و همکاران (۲۰۱۷) از مدل‌سازی SLEUTH جهت پیش‌بینی تغییرات حاشیه ناهمگن شهری Ajmer راجستان در هندوستان استفاده کردند. آنها از تصاویر ماهواره‌ای در دوره ۲۱ ساله جهت به‌دست آوردن پارامترهای ارزیابی مدل استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که SLEUTH نسبت به سایر روش‌های شبیه‌سازی در موضوعاتی که عدم قطعیت در پیش‌بینی رشد شهری مناطق ناهمگن شهری دارند، موفق بوده است. Chaudhuri و Clarke (۲۰۱۹) از مدل‌سازی SLEUTH در یکی از شهرهای متروپلیس هندوستان (Kolkata UA) استفاده کردند. هدف آنها از این مطالعه، ارزیابی رابطه بین شهری شدن و نیروهای محرکه آن جهت بررسی اینکه آیا نیاز به یکپارچه کردن اطلاعات نیروهای محرکه در مدل SLEUTH وجود دارد یا خیر، و یافتن اثربخش‌ترین رویکرد برای ادغام این اطلاعات بود. مقایسه نتایج SLEUTH تغییر یافته آنها با SLEUTH تغییر نیافته موید سود بردن مدل از اضافه کردن نیروهای محرکه جدید بود.

Chandan و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه خود بر روی چالش‌های رشد شهری و تغییر دمای سطح زمین ناشی از توسعه شهری در هندوستان متمرکز شدند. این مطالعه با استفاده از SLEUTH، مدل‌سازی کاربری اراضی شهر Chandigarh را برای سال ۲۰۲۵ با هدف کمک به تدوین استراتژی‌ها و برنامه‌های عملیاتی فوری برای کاهش تأثیرات منفی بر محیط و انسان ارائه داده است. حالت کالیبراسیون در این مدل نشان داد که ضریب پراکندگی^۶ بالا بوده و توسعه شهری در آینده رشد ارگانیک (اندام‌وار)

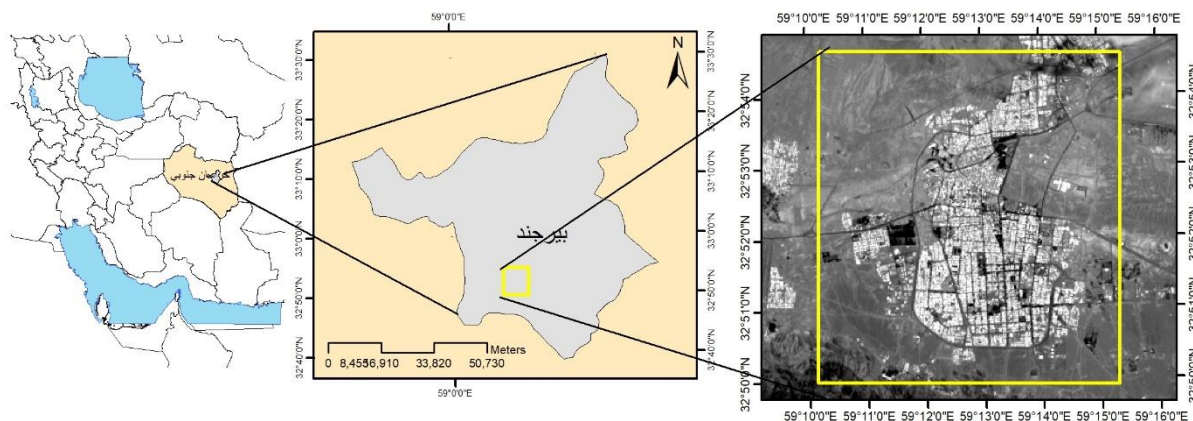
SLEUTH به منظور شبیه‌سازی گسترش شهری آینده بیرجند تا سال ۲۰۵۰ انجام شد. تا به‌عنوان معرفی روشی برای تصمیم‌گیران جهت اتخاذ تدابیر لازم در طرح‌های توسعه شهری قرار گیرد.

مشخصات منطقه مورد مطالعه (شهر بیرجند)

مرکز استان خراسان جنوبی، شهرستان بیرجند دارای مساحت ۱۴,۲۶۵ کیلومتر مربع است. این شهرستان دارای موقعیت جغرافیایی بین ۳۲°۵۳' عرض شمالی و ۱۲° ۵۹' طول شرقی و در حاشیه شمال شرقی دشت لوت قرار گرفته است که از اطراف توسط رشته‌کوه‌ها محصور شده است (حسین‌زاده، ۱۳۸۴). بزرگترین سکونتگاه شهری در این شهرستان (شهر بیرجند) بر اساس سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ جمعیتی معادل ۲۰۳,۶۳۶ نفر داراست. به‌طور کلی می‌توان گفت این شهر جز اقلیم‌های خشک و سرد محسوب می‌شود. تفاوت دما بین شب و روز، زیاد، رطوبت نسبی، کم و میزان بارندگی نیز کم می‌باشد. همچنین در دهه اخیر و به خصوص بعد از انحلال خراسان بزرگ و تاسیس خراسان جنوبی به مرکزیت بیرجند، دگرگونی‌های اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و رشد شتابان شهر منجر به تحولات عمیقی در کالبد شهر و کاربری‌های آن شده است. در شکل شماره ۱ محدوده انتخاب شده زرد رنگ یک محدوده مشخص در اطراف شهر بیرجند است که هدف این مطالعه قرار گرفته است.

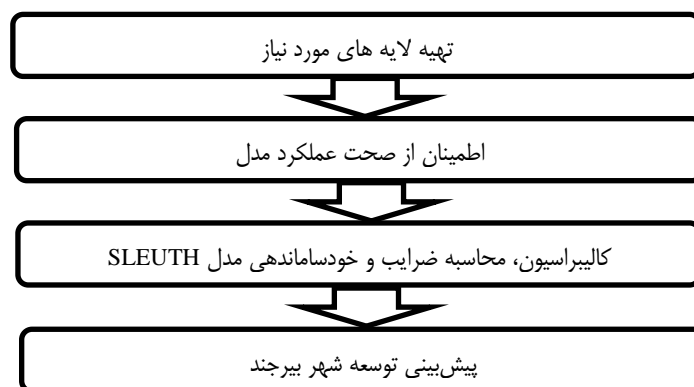
ماهورهای انجام دادند. دو سناریو برای شبیه‌سازی الگوی مکانی در نظر گرفته شد. سناریوی اول رشد تاریخی شهر و سناریوی دوم رشد فشرده‌تر شهری در پاسخ به سیاست‌های فرضی و فقدان زمین است. کالیبراسیون مدل SLEUTH برای کلانشهر اصفهان ضریب پراکندگی بالا را نشان داد، بدین معنی که حالت پیش‌بینی رشد در اصفهان به‌صورت ارگانیک و یا رشد لب‌های^۷ است. ساکیه و همکاران در سال ۲۰۱۵ گسترش شهر کرج را با استفاده از سلول‌های خودکار و مدل SLEUTH شبیه‌سازی کردند. آنها مراحل کالیبراسیون را در سه گام درشت، ریز و نهایی انجام دادند و رشد شهر را تا سال ۲۰۴۰ با توجه به دو سناریوی رشد فشرده و گسترده^۸ پیش‌بینی نمودند.

تغییرات سریع گستره و منظر شهریکی از بارزترین پدیده‌های رخ داده در شهر بیرجند در دهه‌های اخیر بوده است که بعد از تبدیل آن به مرکز استان شتاب چشمگیری داشته است. همواره رشد و توسعه شهر به‌عنوان یک نیاز در جهت برآورده کردن تقاضای مردم شهر، مورد سوال بوده است هرچند ممکن است رشد از پیش تعریف شده در طرح‌های جامع، پاسخ بخشی از سوال باشد اما همیشه اینگونه نبوده و مقوله توسعه شهری چندین بازیگر پیدا و پنهان دارد که روند رشد و مکان گسترش شهر را تغییر می‌دهد، از این‌رو روش‌های نوین مدل‌سازی می‌تواند درک بهتری از آینده ایجاد می‌کنند. لذا مطالعه حاضر با هدف استفاده از روش سلول‌های خودکار در بستر مدل‌سازی



شکل ۱. موقعیت شهر بیرجند و محدوده مطالعاتی

به آن داده شده است، بهترین مجموعه از ضرایب را به دست می‌دهد. SLEUTH با قدیمی‌ترین داده‌ها (اولین سال کنترل) کار خود را شروع می‌کند و چرخه‌های رشد را تولید می‌کند. فرض بر این است که هر چرخه رشد نشان‌دهنده یک سال است. مجموعه چرخه‌های رشد از سال کنترل اول تا سال پایانی یک اجرا (Run) نام دارد. تصویر شبیه‌سازی شده با تصویر واقعی در سال‌های کنترل مقایسه می‌شود و بر این اساس نمایه‌های ارزیابی تولید می‌گردد (Clarke et al., 1997). SLEUTH دارای دو زیر مدل^{۱۵} UGM و^{۱۶} DLM است. زیرمدل اول توسعه شهری را پیش بینی می‌کند و دومی علاوه بر توسعه شهری، توسعه دیگر کاربری‌ها را نیز پیش‌بینی می‌نماید. شکل ۲ گام‌های مختلف اجرای این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۲. مراحل، روش و ابزار مورد استفاده در پژوهش

استفاده گردید. برای لایه‌های مناطق شهری و کاربری اراضی، تصاویر ماهواره لندست سنجنده TM از سایت فضایی آمریکا موسوم به USGS در چهار سال ۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ میلادی دانلود گردید. تصاویر دانلود شده در ردیف و گذر ۱۵۹ و ۳۷ بودند که با توجه به ماه‌های تابستان و درصد ابرناکی قابل قبول انتخاب شدند. طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای با الگوریتم ماشین‌های بردار پشتیبان^{۱۷} (SVM) انجام شد. این الگوریتم یک گروه از الگوریتم‌های طبقه‌بندی نظارت شده یادگیری ماشینی هستند که در زمینه سنجش از دور مورد استفاده قرار

مواد و روش‌ها

در این پژوهش مدل‌سازی توسعه شهر بیرجند به کمک اتوماتای سلولی با استفاده از SLEUTH مورد توجه قرار گرفته است. SLEUTH مخفف لایه‌های ورودی مورد نیاز برای اجرای مدل‌سازی است با استفاده از برنامه‌های شبیه ساز Linux، Unix و Cygwin اجرا می‌شود. این لایه‌ها شامل: شیب^۱، کاربری اراضی^۲، مستثنیات^{۱۱}، مناطق شهری^{۱۲}، شبکه‌های حمل و نقل^{۱۳} و لایه سایه روشن پستی و بلندی^{۱۴} است. ویژگی اصلی SLEUTH این است که با چگونگی تغییرات گذشته منطقه کالیبره می‌شود و بر این اساس به نحو معقولی آینده را پیش‌بینی می‌کند (Silva and Clarke, 2002). با این فرض، مدل با برازش داده‌های حاصل از شبیه‌سازی تصادفی با داده‌هایی که به‌عنوان کنترل

گام اول: تهیه لایه‌های مورد نیاز

مدل UGM به حداقل چهار لایه از مناطق شهری در سال‌های مختلف، دو لایه از شبکه حمل و نقل مربوط به دو سال مختلف و یک لایه شیب و یک لایه مستثنیات و نیز لایه روشن پستی‌ها و بلندی‌های منطقه مورد نظر برای نمایش خروجی نیاز دارد. تمام داده‌های مورد استفاده از نظر هندسی با هم همخوانی داشتند بدین ترتیب همه لایه‌ها از سیستم مختصات یکسان (UTM_40N) و اندازه سلول یکسان ۳۰ در ۳۰ برخوردار بودند. برای تهیه نقشه شیب و سایه روشن پستی‌ها و بلندی‌ها از نقشه رقومی ارتفاعی

پنج‌گانه‌ای که در ادامه آورده شده است، استخراج می‌شود. این ضرایب که نشان‌دهنده سهم تاثیر عوامل بر توسعه شهر هستند (Gandhi and Suresh, 2012)، بین صفر تا صد متغیرند و بر اساس روش Brute Force در سه گام درشت، ریز و نهایی بر اساس اندازه سلول، دامنه جستجو و تعداد اجرای مونت کارلو به دست می‌آیند (Clarke et al., 1997). روش مونت کارلو جهت شبیه‌سازی رشد جهت افزایش استواری نتایج به کار می‌رود. در هر اجرا، چرخه‌های رشد با توجه به تعداد مونت کارلو تعیین شده تکرار می‌شوند. در نهایت نتایج گام کالیبراسیون وارد چرخه رشد نهایی شده (پیش‌بینی ضرایب) و بهترین ضرایب پیش‌بینی توسط مدل تعیین می‌شود. ضرایب رشد در این مدل عبارتند از (کامیاب و سلمان‌ماهینی، ۱۳۹۷):

ضریب پراکندگی (پخش) ۱۸: پراکندگی کلی توزیع سلول‌های شهری منطقه تحت پوشش و حرکت به سمت بیرون، استقرارهای جدید را تعیین می‌نماید.

ضریب زایش ۱۹: احتمال تبدیل هر سلول به سلول مرکز انتشار (موقعیتی که تعداد سه سلول شهری یا بیشتر در مجاور هم قرار می‌گیرند) را معین می‌کند.

ضریب گسترش ۲۰: احتمال اینکه یک سلول مرکز انتشار، سلول شهر اضافی در همسایگی خود را تولید کند معین می‌نماید. به عبارت دیگر، این ضریب چگونگی گسترش به سمت بیرون را کنترل می‌کند.

ضریب مقاومت شیب ۲۱: ارتباط بین توسعه و درصد شیب را کنترل می‌کند. این عامل به صورت خطی نیست بلکه به صورت مضربی عمل می‌کند. مقدار بالای این ضریب نشان می‌دهد که احتمال رشد شهر در شیب‌های تند کم است.

ضریب جاذبه جاده ۲۲: از آنجا که در مدل‌سازی رشد شهری، جاده‌ها به عنوان عوامل جذب توسعه شهری به حساب می‌آیند، این ضریب ارتباط بین استقرارهای جدید و سیستم جاده‌های موجود را کنترل می‌کند.

انجام مراحل ذکر شده تعیین ضرایب، رشد و

گرفته‌اند. دقت طبقه‌بندی حاصل از SVM با توجه به نوع تابع کرنل متغیر است. دقت طبقه‌بندی لایه‌های کاربری اراضی در سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ به کمک تصاویر تاریخی موجود در سایت گوگل ارث، ماتریس خطا و محاسبه ضریب کاپا مورد بررسی قرار گرفت. لایه مناطق شهری از طبقه‌بندی مجدد لایه‌های کاربری اراضی تهیه شده در دوره‌های مختلف استخراج شده است. در تهیه نقشه جاده‌ها علاوه بر استفاده از تصاویر ماهواره‌ای از نقشه‌های موجود و گوگل ارث جهت بروزرسانی استفاده شد. لایه مستثنیات در این پژوهش برای دو نوع سناریوی رشد تاریخی و رشد محیط‌زیستی تهیه شد. در رشد تاریخی جاده‌ها و شهرها و در رشد محیط‌زیستی پوشش گیاهی و شیب‌های بالاتر از ۳۰ درصد به عنوان مستثنیات در نظر گرفته شد.

گام دوم: اطمینان از صحت عملکرد مدل

در این مرحله ابتدا مدل SLEUTH از سایت <http://www.ncgia.ucsb.edu/projects> از پروژه Gigalapolis دانلود شد و شبیه‌ساز مورد نیاز آن در محیط ویندوز بنام Cygwin بر روی رایانه نصب شد. جهت اطمینان از صحت عملکرد مدل، SLEUTH یک بار با داده‌های آزمایشی همراه و بار دیگر با داده‌های منطقه مورد مطالعه، اجرا شد و با بررسی خروجی‌ها و نتایج آن از عملکرد مناسب آن اطمینان حاصل گردید.

گام سه: کالیبراسیون، محاسبه ضرایب و خودساماندهی مدل SLEUTH

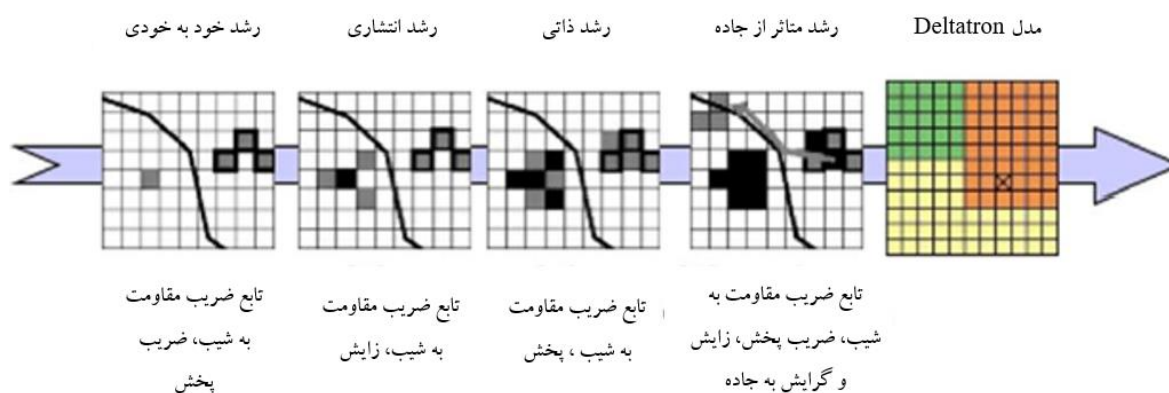
زیرمدل مورد توجه در این پژوهش زیرمدل رشد شهری (Silva and Clarke, 2002) (UGM) است. این مدل شامل دو بخش عمده اجرایی کالیبراسیون و پیش‌بینی است. کالیبراسیون یکی از مهم‌ترین مراحل شبیه‌سازی رشد شهری با استفاده از SLEUTH است (Dietzel and Clarke, 2006). در بخش کالیبراسیون بر اساس سوابق تاریخی منطقه مورد مطالعه، بهترین مجموعه برای ضرایب

واقعی‌تری را نشان می‌دهد (Clarke et al., 1997). در بخش پیش‌بینی، قوانین رشد مختلف مانند رشد خودبه‌خودی^{۲۴}، رشد انتشاری (مرکز انتشار جدید)^{۲۵}، رشد ذاتی، رشد متأثر از جاده^{۲۶} را می‌توان در نظر گرفت. مجموعه این قوانین و ضرایب تعیین شده در مرحله قبل، قوانین انتقال تغییر وضعیت را در سلول‌های خودکار SLEUTH تشکیل می‌دهد. در بخش پیش‌بینی، قوانین رشد مهمترین نقش را دارند که توسط ضرایب پنج‌گانه در قسمت کالیبراسیون کنترل می‌شوند. قوانین رشد و ضرایب توأم قوانین انتقال در سلول‌های خودکار مدل SLEUTH را تشکیل می‌دهند (شکل ۳). پیش‌بینی آخرین مرحله‌ی اجرای مدل است. با استفاده از روند تاریخی و قوانین رشد، توزیع شهری و غیرشهری آینده پیش‌بینی می‌شود. در این مرحله از نتایج به‌دست آمده در مرحله کالیبراسیون، ضرایب نهایی برای منطقه مطالعاتی تعیین شد و بر اساس این ضرایب فایل سناریو مربوط به پیش‌بینی مدل تنظیم گردید و با استفاده از دستور پیش‌بینی، شبیه‌سازی رشد شهری انجام گردید. خروجی مدل، تصاویر مدل‌سازی شده مناطق شهری در منطقه مورد مطالعه تا سال ۲۰۵۰ میلادی با فرمت GIF است. تصاویر خروجی در محیط نرم‌افزار ایدریسی بارزسازی شد.

خودساماندهی به‌عنوان چرخه‌های رشد در دو بخش کالیبراسیون و پیش‌بینی مدل انجام می‌شود. پس از اتمام هر مرحله از کالیبراسیون با استفاده از فایل control_stats.log در پوشه خروجی به تعداد اجرا، ضریب و نمایه آماری (مانند Edge r2, Population r2, Compare, Composite, Cluster r2 و Leesale و OSM) تولید می‌شود. نمایه OSM صحت و درستی اجرای مدل را ارزیابی می‌کند و از ضرب هفت نمایه آماری مذکور به‌دست می‌آید (Dietzel and Clarke, 2007). با توجه به بالاترین مقدار OSM^{۲۳} اجراها در محیط نرم‌افزار اکسل از بزرگ به کوچک مرتب شدند، ضرایب پنج‌گانه رشد انتخاب می‌شوند. در هر مرحله از کالیبراسیون درشت تا نهایی، دامنه جستجو در حال باریک شدن است و تعداد گام‌ها افزایش می‌یابد تا اینکه در مرحله معدل‌گیری تنها یک عدد واحد برای ضرایب با تکرار بالا در نظر گرفته می‌شود. همچنین در این پژوهش برای کنترل بهتر فضای کالیبراسیون از نمایه کمکی دیگری بنام Leesale استفاده شده است.

گام چهارم: پیش‌بینی توسعه شهر بیرجند

آخرین مرحله از اجرای مدل، انجام خودساماندهی توسط پارامترهای رشد بالای بحرانی و رشد پایین بحرانی است. این فرآیند موجب تعدیل مدل شده و الگوی رشد



شکل ۳. خلاصه قوانین و ضرایب رشد (www.ncgia.uscb.deu/projects/gig, 2005)

تهیه گردید. در جدول شماره ۱ منبع تهیه لایه، تعداد و فرمت آنها مشخص شده است. در شکل ۴ و ۵ لایه‌های

نتایج

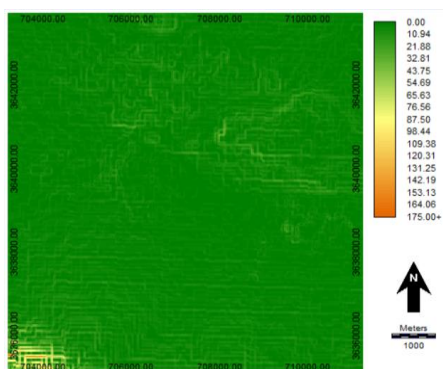
مطابق با روش‌شناسی پژوهش انواع لایه‌هایی مورد نیاز

میلادی)، تصاویر تاریخی گوگل ارث و نقشه‌های کاربری اراضی موجود به کمک رقومی کردن به صورت شکل ۶ به دست آمد. سپس لایه بدست آمده از فرمت وکتوری به رستری با اندازه سلول ۳۰ در ۳۰ تبدیل شد.

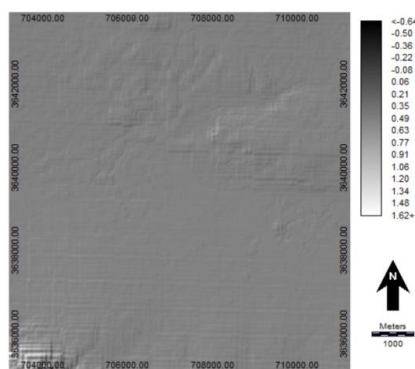
شیب و سایه روشن پستی‌ها و بلندی‌های محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است. هر دو نقشه به کمک مدل رقومی ارتفاع در سامانه اطلاعات جغرافیایی بدست آمد. شبکه راه‌های محدوده شهر بیرجند از روی تصاویر ماهواره‌ای منطقه (سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰

جدول ۱. لایه‌های تهیه شده جهت مدل‌سازی

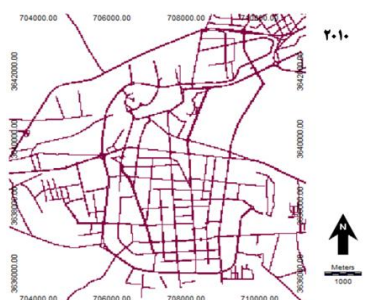
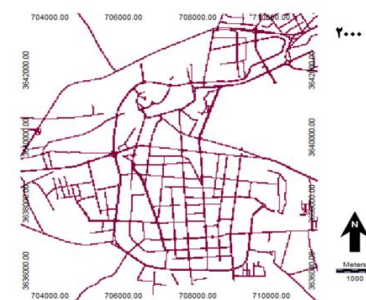
فرمت	تعداد	منبع	لایه
GIF	۱	مستخرج از مدل رقومی ارتفاع	شیب
GIF	۱	مستخرج از مدل رقومی ارتفاع	سایه روشن پستی‌ها و بلندی‌ها
GIF	۱	مستخرج از نقشه کاربری اراضی	مستثنیات
GIF	۴	رقومی‌سازی با نقشه‌های کاربری اراضی موجود، تصاویر ماهواره‌ای و بروزرسانی با تصاویر تاریخی گوگل ارث	شبکه حمل و نقل
GIF	۴	طبقه بندی تصاویر ماهواره‌ای لندست سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ میلادی	مناطق شهری
GIF	۴	طبقه بندی تصاویر ماهواره‌ای لندست سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ میلادی	کاربری زمین



شکل ۵. شیب محدوده مورد مطالعه



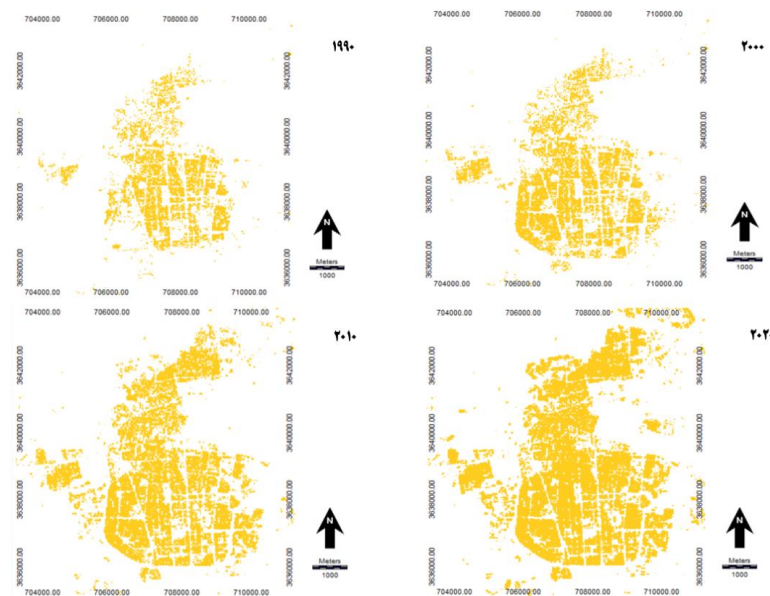
شکل ۴. سایه روشن پستی‌ها و بلندی‌ها



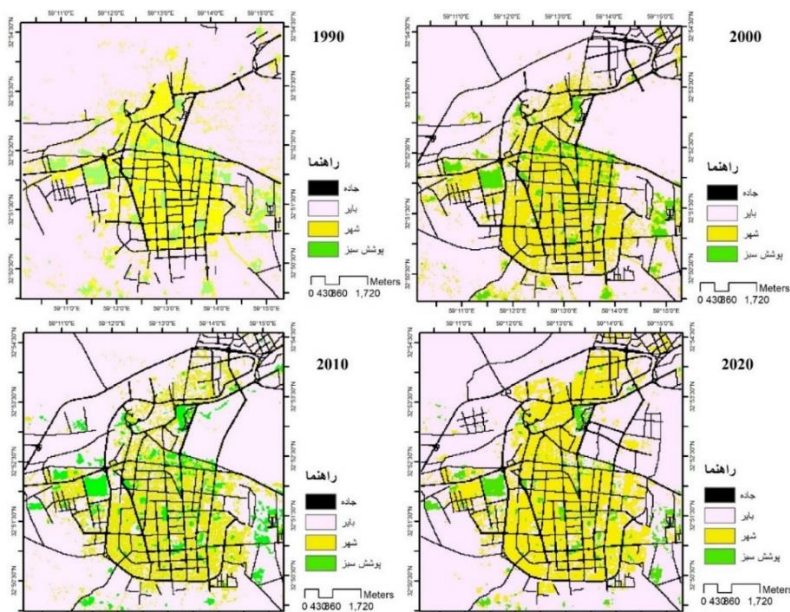
شکل ۶. شبکه راه‌ها در سال‌های مورد مطالعه

دسترس نیز صحت کلی طبقه‌بندی، ۰/۹۱ بدست آمد و ضریب کاپا برای طبقات پوشش سبز، شهر، بایر و جاده به ترتیب ۰/۹۷، ۰/۹۴، ۰/۸۶ و ۰/۸۷ بدست آمد، ضمناً در مدل اجرا شده تنها ضریب کاپا و بررسی ماتریس خطا کفایت نمی‌کند به همین دلیل به لحاظ زمانی دقت مناطق شهری به صورت Forward Check و Backward Check انجام شده است.

لایه‌های مناطق شهری به کمک تصاویر ماهواره‌های برای کسب اطلاعات مکانی و زمانی توزیع مناطق شهری و ساخته شده بدست آمدند (شکل ۷). شکل ۸ نیز طبقات کاربری اراضی بدست آمده از الگوریتم ماشین بردار در سال‌های مختلف را نشان می‌دهد. دقت طبقه‌بندی به روش‌های مختلف تفسیر چشمی و مقایسه با واقعیت زمین (گوگل ارث) در سال‌های مختلف انجام شده است. برای سال آخر با توجه به نقاط در

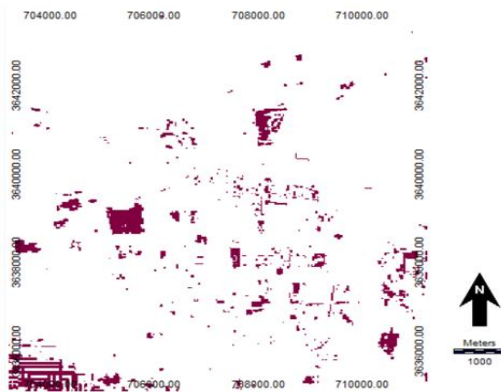


شکل ۷. مناطق شهری در سال‌های مورد مطالعه



شکل ۸. نقشه‌های طبقه‌بندی شده کاربری اراضی در سال‌های مورد مطالعه

محدودیت توسعه مناطق شهری بر روی پوشش‌های سبز (فضای سبز، باغات و زمین‌های کشاورزی) و شیب‌های بالای ۳۰ درصد تعیین گردید و لایه نهایی مستثنیات سناریوی دوم بدست آمد (شکل ۹-ب).



(ب)

در این پژوهش لایه مستثنیات در دو سناریو رشد تاریخی شهر و رشد محیط‌زیستی طراحی گردید. در سناریو رشد تاریخی شهر محدودیت توسعه مناطق شهری بر روی راه‌ها و مناطق شهری سال ۱۹۹۰ میلادی در نظر گرفته شد (شکل ۹-الف). در سناریو رشد محیط‌زیستی



(الف)

شکل ۹. مناطق مستثنی از توسعه شهری (الف: سناریو رشد تاریخی، ب: سناریو رشد محیط‌زیست)

کالیبراسیون ریز دامنه جستجو باز هم باریک‌تر شد. تعداد تکرار مونت کارلو در ۱۰ تکرار تعریف شد و ضرایب پنج-گانه مطابق با جدول ۲ تعیین گردید. مقادیر OSM و Leesale بصورت شکل ۱۰ در محیط نرم‌افزار اکسل محاسبه گردید.

مرحله معدل‌گیری: پس از انجام مرحله نهایی بهترین مجموعه ضرایب معدل‌گیری و انتخاب گردید. گام افزایشی برابر با یک و تعداد مونت کارلو ۱۵۰ تعریف گردید تا در مرحله پیش‌بینی بر اساس ضرایب آنها پیش‌بینی انجام شود. ضرایب معدل‌گیری شده به شرح جدول ۲ برای پیش‌بینی رشد شهر بیرجند مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است مقدار ضرایب مطابق با روش بیان شده در گام سه (کالیبراسیون، محاسبه ضرایب و خودساماندهی مدل) تعیین گردید.

کالیبراسیون سناریوی رشد محیط‌زیستی: همانند سناریوی رشد تاریخی در مراحل درشت، ریز و نهایی برای سناریوی رشد محیط‌زیستی شهر بیرجند به شرح زیر انجام شد.

مرحله درشت: کلیه تنظیمات در این مرحله مطابق با

کالیبراسیون سناریوی رشد تاریخی: نتایج کالیبراسیون مدل رشد شهری SLEUTH در سه مرحله درشت، ریز و نهایی برای سناریوی رشد تاریخی شهر بیرجند به شرح زیر بدست آمد.

مرحله درشت: در مرحله درشت اندازه سلول‌های داده‌های ورودی چهار برابر اندازه سلول داده‌های اصلی در نظر گرفته شد. دامنه جستجو بین صفر تا ۱۰۰ و گام افزایش نیز برابر با ۲۵ در نظر گرفته شد. تعداد مونت کارلو نیز در این مرحله ۴ تعریف گردید.

مرحله ریز: در این مرحله با استفاده از بهترین مقادیر برازش شده OSM و Leesale که در مرحله کالیبراسیون درشت بدست آمد، دامنه جستجو باریک‌تر گردید. جدول ۲ مقادیر هر یک از ضرایب وارد شده در کالیبراسیون ریز را بعد از تصمیم‌گیری بر مبنای ضرایب مرحله قبل نشان می‌دهد. اندازه سلول‌های داده‌های ورودی به دو برابر اندازه سلول‌های داده‌های اصلی کاهش یافت. تعداد مونت کارلو در این مرحله ۸ تعیین گردید.

مرحله نهایی: در مرحله نهایی با استفاده از نتایج مرحله

جدول ۲. تعیین ضرایب در مراحل کالیبراسیون سناریو رشد تاریخی

ضریب انتشار	ضریب زایش	ضریب پخش	ضریب مقاومت به شیب	ضریب جاذبه جاده		
۷۵	۶۵	۰	۰	۱۰	شروع	
۵	۲	۵	۵	۱۰	دامنه	ریز
۱۰۰	۸۵	۳۵	۳۵	۸۰	پایان	
۶۵	۵۵	۱۰	۲۰	۱۰	شروع	
۳	۲	۲	۲	۳	دامنه	نهایی
۸۰	۶۵	۳۶	۳۰	۴۶	پایان	
۶۵	۵۵	۱۵	۲۵	۲۲	شروع	
۱	۱	۱	۱	۱	دامنه	معدل‌گیری
۶۵	۵۵	۱۵	۲۵	۲۲	پایان	

Run	Product	Compar	Pop	Edges	Cluster	s	Size	Leesale	e	Slope	%Urban	Xmean	Ymean	Rad	Fmatch	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG	OSM
42	0.12235	0.65263	0.98907	0.66479	0.79695	0.93819	0.40682	0.96399	0.98492	0.99914	0.99578	0.99231	0	65	55	10	26	19	0.327999		
67	0.11833	0.65425	0.98886	0.66704	0.77506	0.92797	0.40785	0.96468	0.9847	0.99563	0.99598	0.99215	0	65	55	10	30	16	0.320009		
65	0.11844	0.65526	0.98942	0.66704	0.7615	0.9366	0.40609	0.96881	0.98529	0.99868	0.99936	0.99259	0	65	55	10	30	10	0.318422		
66	0.11844	0.65526	0.98942	0.66704	0.7615	0.9366	0.40609	0.96881	0.98529	0.99868	0.99936	0.99259	0	65	55	10	30	13	0.318422		
52	0.11923	0.65389	0.98968	0.66908	0.76651	0.94321	0.40587	0.96861	0.98556	0.99314	0.997	0.99281	0	65	55	10	28	10	0.31831		
53	0.11923	0.65389	0.98968	0.66908	0.76651	0.94321	0.40587	0.96861	0.98556	0.99314	0.997	0.99281	0	65	55	10	28	13	0.31831		
43	0.11968	0.65352	0.98933	0.66748	0.76681	0.94482	0.40756	0.96571	0.98519	0.99983	0.99482	0.99249	0	65	55	10	26	22	0.317866		
0	0.1176	0.65012	0.98931	0.67127	0.76444	0.93353	0.40582	0.97145	0.98518	0.99208	0.99814	0.99247	0	65	55	10	20	10	0.317486		
69	0.11363	0.65098	0.98922	0.66981	0.73529	0.93353	0.40819	0.96747	0.9851	0.9966	0.99735	0.9925	0	65	55	10	30	22	0.304984		
55	0.11621	0.65405	0.98956	0.66999	0.75021	0.92649	0.408	0.97068	0.98544	0.99997	0.9952	0.99274	0	65	55	10	28	19	0.314252		
15	0.11727	0.653	0.98936	0.67203	0.73694	0.95822	0.40787	0.96488	0.98522	0.99937	0.99455	0.99253	0	65	55	10	22	16	0.306842		
67	0.11833	0.65425	0.98886	0.66714	0.77506	0.92797	0.40785	0.96468	0.9847	0.99563	0.99598	0.99215	0	65	55	10	30	16	0.320009		
43	0.11968	0.65352	0.98933	0.66748	0.76681	0.94482	0.40756	0.96571	0.98519	0.99983	0.99482	0.99249	0	65	55	10	26	22	0.317866		
68	0.11596	0.65448	0.98938	0.66742	0.76247	0.92037	0.40725	0.96646	0.98525	0.99589	0.99745	0.9926	0	65	55	10	30	19	0.31635		
56	0.1187	0.65288	0.98975	0.67199	0.74179	0.95822	0.40724	0.96647	0.98565	0.99988	0.99854	0.99292	0	65	55	10	28	22	0.310817		
13	0.11381	0.65198	0.98958	0.66871	0.73355	0.95094	0.40718	0.96278	0.98546	0.99055	0.99548	0.99271	0	65	55	10	22	10	0.300461		

شکل ۱۰. مقادیر OSM و Leesale بدست آمده از کالیبراسیون نهایی در سناریو رشد تاریخی

معدل‌گیری شده به شرح جدول ۳ برای پیش بینی رشد شهر بیرجند مورد استفاده قرار گرفت.

شبیه‌سازی سناریوهای رشد شهری: مدل SLEUTH، بر اساس مجموعه ضرایبی که در مرحله کالیبراسیون تعیین و وارد فایل سناریو شد، پیش‌بینی را انجام داد. در خروجی مدل سلول‌هایی که دارای احتمال بالای ۸۰ درصد جهت تبدیل شدن به شهر بودند، با استفاده از دستور Reclass در نرم‌افزار ArcMap مجدد طبقه‌بندی شدند و به‌عنوان مناطق شهری در نظر گرفته شدند. نتیجه حاصل از اجرای مدل SLEUTH، نقشه مناطق پیش‌بینی شده شهری در سال ۲۰۵۰ میلادی در شهر بیرجند تحت سناریو رشد تاریخی را نمایش می‌دهد (شکل شماره ۱۲-الف). بر اساس نقشه موجود در شکل ۱۲-الف مساحت شهر بیرجند در سال ۲۰۵۰ حدود ۲۲۰۱/۸۵ هکتار اضافه خواهد رسید. بر اساس نقشه موجود در شکل شماره ۱۲-ب مساحت شهر

سناریوی رشد محیط‌زیستی تعریف شد. بقیه تنظیمات مشابه سناریو رشد تاریخی انجام شد.

مرحله ریز: در این مرحله با استفاده از بهترین مقادیر برازش شده OSM و Leesale که در مرحله کالیبراسیون درشت بدست آمد، دامنه جستجو باریک‌تر شد. جدول ۳ مقادیر هر یک از ضرایب وارد شده در کالیبراسیون ریز را نشان می‌دهد.

مرحله نهایی: در این مرحله با استفاده از نتایج مرحله کالیبراسیون ریز دامنه جستجو باز هم باریک‌تر شد و ضرایب پنج گانه مطابق با جدول ۳ تعیین گردید. مقادیر OSM و Leesale بصورت شکل ۱۱ نیز در محیط اکسل محاسبه گردید.

مرحله معدل‌گیری: پس از انجام مرحله نهایی بهترین مجموعه ضرایب معدل‌گیری و انتخاب گردید. بقیه تنظیمات مشابه سناریو رشد تاریخی انجام شد. ضرایب

در هر دو سناریو رشد مدل‌سازی شده نیز در جدول شماره ۴ درج شده است.

بیرجند در سال ۲۰۵۰ حدود ۲۱۵۲/۹۱ هکتار اضافه خواهد رسید.

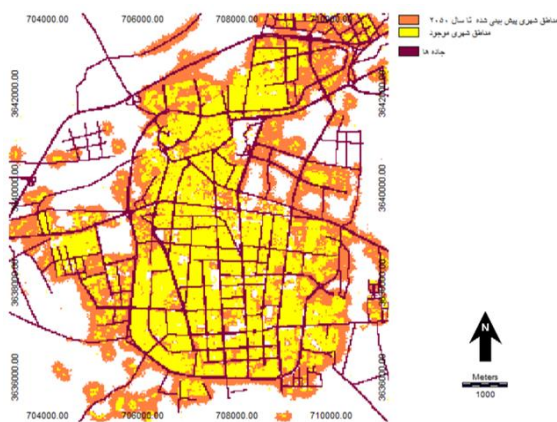
همچنین ضرایب پنج‌گانه بدست آمده در شهر بیرجند

جدول ۳. تعیین ضرایب در مراحل کالیبراسیون سناریو رشد محیط زیستی

ضریب	ضریب	ضریب	ضریب مقاومت	ضریب جاذبه		
انتشار	زایش	پخش	به شیب	جاده		
۱۰	۵	۲۰	۴۰	۱۰	شروع	
۳	۵	۲	۱۰	۹	دامنه	ریز
۲۵	۲۰	۳۰	۸۰	۵۵	پایان	
۱۰	۳	۱۸	۳۵	۱۵	شروع	
۱	۱	۱	۲	۲	دامنه	نهایی
۱۵	۶	۲۵	۴۵	۵۵	پایان	
۱۵	۳	۲۴	۴۲	۳۷	شروع	
۱	۱	۱	۱	۱	دامنه	معدل گیری
۱۵	۳	۲۴	۴۲	۳۷	پایان	

شکل ۱۱. مقادیر OSM و Leasale بدست آمده از کالیبراسیون نهایی در سناریو رشد محیط‌زیستی

Run	Product	Compar	Pop	Edges	Cluster	s	Size	Leasale	e	Slope	%Urban	Xmean	Ymean	Rad	Fmatch	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG	OSM
21028	0.23544	0.94111	0.99978	0.98979	0.93193	0.5587	0.51248	0.95478	0.99845	0.99734	0.99651	0.99999	0	15	3	24	45	29	0.823568		
20718	0.265	0.91788	0.9998	0.99514	0.94352	0.63203	0.51257	0.96604	0.99833	0.99688	0.98744	0.99999	0	15	3	22	39	39	0.819376		
16980	0.25674	0.94302	0.9998	0.98977	0.92656	0.61217	0.51362	0.95511	0.99841	0.99369	0.99662	0.99999	0	14	3	24	43	39	0.817854		
20871	0.23424	0.93144	0.99983	0.99719	0.93293	0.56313	0.51065	0.95302	0.99827	0.99849	0.98974	1	0	15	3	23	41	51	0.815971		
13014	0.29596	0.95358	0.99984	0.98901	0.92884	0.70909	0.51353	0.96137	0.99832	0.96884	0.99827	1	0	13	3	25	37	45	0.814114		
20677	0.26173	0.91276	0.99967	0.99666	0.94578	0.629	0.51191	0.954	0.99854	0.99727	0.99481	0.99996	0	15	3	22	35	41	0.814051		
16925	0.25268	0.93889	0.99971	0.98568	0.93629	0.60635	0.51315	0.95417	0.99856	0.99498	0.98893	0.99997	0	14	3	24	37	55	0.813281		
20928	0.22798	0.94107	0.99983	0.97627	0.95095	0.54861	0.51195	0.95458	0.99831	0.99077	0.98423	1	0	15	3	24	35	39	0.813125		
714	0.23499	0.89851	0.99936	0.97681	0.81514	0.71809	0.51817	0.95448	0.99884	0.99968	0.92693	0.99985	0	10	3	23	43	15	0.632356		
715	0.23499	0.89851	0.99936	0.97681	0.81514	0.71809	0.51817	0.95448	0.99884	0.99968	0.92693	0.99985	0	10	3	23	43	17	0.632356		
766	0.26171	0.92195	0.99932	0.97921	0.82212	0.7408	0.51808	0.96198	0.99899	0.99504	0.96165	0.99981	0	10	3	24	35	35	0.682726		
716	0.23951	0.89659	0.99946	0.97269	0.83349	0.75466	0.51806	0.95294	0.99872	0.99991	0.88621	0.9999	0	10	3	23	43	19	0.613476		
392	0.25332	0.87951	0.99929	0.95804	0.82957	0.76048	0.51778	0.96222	0.99887	0.99991	0.95853	0.99982	0	10	3	21	35	43	0.644184		
698	0.29422	0.90391	0.99945	0.99006	0.88263	0.82644	0.51766	0.95666	0.99876	0.99786	0.91378	0.99989	0	10	3	23	41	25	0.688645		
1580	0.29526	0.89697	0.99976	0.99512	0.88652	0.79345	0.51764	0.95314	0.99828	0.99748	0.95742	0.99999	0	10	4	22	41	25	0.720114		
600	0.23763	0.88904	0.99963	0.96897	0.82011	0.7799	0.51763	0.9499	0.99846	0.99564	0.88267	0.99996	0	10	3	22	43	39	0.589551		



ب) سناریوی رشد محیط زیستی



الف) سناریو رشد تاریخی

شکل ۱۲. شبیه‌سازی رشد شهر بیرجند در سناریوهای سال ۲۰۵۰ میلادی

جدول شماره ۴. ضرایب پنج گانه بدست آمده در شهر بیرجند در سناریوها

ضریب	ضریب	ضریب	ضریب مقاومت	ضریب جاذبه	ضرایب
انتشار	زایش	پخش	به شیب	جاده	
۸۷	۷۳	۲۰	۱	۳۴	مقدار عددی در سناریو رشد تاریخی
۲۰	۴	۳۲	۱	۴۶	مقدار عددی در سناریو رشد محیط زیستی

خودی انتخاب خواهد شد را کنترل می‌کند. از آنجایی که مقدار این ضریب در رشد تاریخی زیاد (۸۷) بوده، احتمال بوجود آمدن کانون جدید شهری تا سال ۲۰۵۰ مطابق با نقشه بدست آمده شکل ۱۲-الف زیاد است. همچنین در سناریوی رشد محیط‌زیستی به دلیل مقدار نسبتاً کم این ضریب (۲۰)، نقشه بدست آمده در شکل ۱۲-ب از کانون‌های جدیدی برخوردار نبوده است و رشد از الگوی منسجم‌تری بهره برده است.

ضریب زایش سناریوی رشد تاریخی (۷۳) و رشد محیط‌زیستی (۴): این ضریب سلول‌هایی را که طی رشد خود به خودی به عنوان مکان‌های جدید شهری در خارج از شهر شکل گرفته‌اند را به عنوان کانون جدید توسعه و شهرسازی هدایت می‌کند. به عبارتی پتانسیل سلول‌های اطراف کانون شهری جدید که مستعد توسعه و شهرسازی هستند را مشخص می‌کند. چون مقدار این ضریب در رشد تاریخی (۷۳) زیاد بوده، احتمال پرشدگی در اطراف کانون جدید شهری تا سال ۲۰۵۰ مطابق با نقشه بدست آمده شکل ۱۲-الف نیز زیاد است. همچنین در سناریوی رشد محیط‌زیستی به دلیل مقدار خیلی کم این ضریب (۴)، در نقشه بدست آمده در شکل ۱۲-ب از کانون‌های جدیدی برای توسعه شهری حمایت نشده است.

ضریب پخش سناریوی رشد تاریخی (۲۰) و رشد محیط‌زیستی (۳۲): ضریب پخش شکل رشد ذاتی و انتشاری را هدایت می‌کند. در نقشه‌ی پیش‌بینی شده رشد تاریخی اگرچه در همسایگی شهری رشد خوبی اتفاق افتاده اما در مقایسه سناریوی محیط‌زیستی، رشد در همسایگی شهر بیشتر رخ داده است. بنابراین الگوی سناریوی رشد محیط‌زیستی از پراکندگی مراکز رشد و الگوی فلفل نمکی در قبال مجاورت شهر ممانعت نموده است.

بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش از مدل‌سازی به‌عنوان ابزاری جهت ساده‌سازی پیچیدگی فرایندهای دخیل در گسترش فضاهای شهری جهت پاسخ به سوال چگونگی رشد شهری در شهرستان بیرجند در سال ۲۰۵۰، تحت دو سناریوی رشد تاریخی و محیط‌زیستی تا سال ۲۰۵۰ استفاده شد. در طول دوره مطالعاتی، بنا بر تقاضای مورد نیاز ساکنین شهر و پرشدگی درون بافت شهر بیرجند (متراکم‌سازی و بلندمرتبه‌سازی)، رشد شهر کاملاً مشهود است و عمدتاً به جهات شمال‌شرقی و جنوب‌غرب در حال پیشروی است. یک سناریوی این پژوهش بر مبنای رشد تاریخی شهر و روند گذشته بنا شد، بدین معنی که تمام پیشران‌هایی که در گذشته باعث رشد شهر شده است در آینده نیز ادامه یافته و در مناطقی که از قبل ساخت و ساز شده (از قبیل مناطق شهری و جاده‌ها)، توسعه جدیدی اتفاق نخواهد افتاد. در سناریوی رشد محیط‌زیستی بنا بر رشد شهری در مناطقی غیر از پوشش‌های سبز و شیب‌های بالای ۳۰ درصد قرار گرفت. بیشترین افزایش در سناریوی رشد تاریخی در اطراف جاده‌ها و در سناریوی محیط‌زیستی در مجاورت شهری است. با این‌حال نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد هر یک از ضرایب رشد شهر در آینده چقدر تاثیر خواهد گذاشت. بطور مثال:

ضریب انتشار سناریوی رشد تاریخی (۸۷) و رشد محیط‌زیستی (۲۰): ضریب انتشار رشد خودبه‌خودی را هدایت می‌کند. چنین رشدی به شهرسازی و مناطق انسان ساختی اطلاق می‌شود که در اراضی با شیب مناسب و در کانون‌هایی دور از مراکز شهر کنونی احداث می‌گردد. بنابراین ضریب انتشار تعداد دفعاتی که یک سلول به‌طور تصادفی به‌عنوان سلول قابل شهرسازی در رشد خود به

OSM در بسیاری از مطالعات چون Rafiee و همکاران (۲۰۰۹)، Sakie و همکاران (۲۰۱۵)، Amato و همکاران (۲۰۱۶)، Li و همکاران (۲۰۱۸) و Saxena و Jat (۲۰۲۰) و Leesale نیز در برخی از مطالعات مانند NCGIA (۲۰۱۱) و Silva و Clarke (۲۰۰۲) استفاده شده است. کاربرد هر دو موجب افزایش اطمینان در انتخاب ضرایب کالیبراسیون می‌شود. نمایه Leesale نوعی نمایه شکل است که مناسب بودن رشد شبیه‌سازی شده را با رشد واقعی در سال‌های کنترل نشان می‌دهد. از این رو انتخاب ضرایب بر اساس این نمایه به افزایش دقت شبیه‌سازی کمک می‌کند که در مطالعه Amato و همکاران (۲۰۱۶) نیز از هر دو رویکرد استفاده شده است و تفاوت آن با مطالعه حاضر این است که در مطالعه Amato و همکاران (۲۰۱۶) در مرحله کالیبراسیون درشت از Leesale و در سایر مراحل کالیبراسیون از OSM استفاده شده است.

تفاوت پراکنش و وسعت مناطق با احتمال شهری شدن تا سال ۲۰۵۰ برای شهر بیرجند نشان می‌دهد که چگونه جهت‌گیری سیاست‌گذاری‌ها می‌تواند در روند توسعه شهری موثر باشد. پژوهشگران بسیاری نیز این مساله را از طریق تعریف سناریوهای مختلف بررسی کردند مانند Amato و همکاران (۲۰۱۶)، Saxena و Jat (۲۰۲۰)، Yin و همکاران (۲۰۱۶)، Chaudhuri و Clarke (۲۰۱۹) و Bajracharya و همکاران (۲۰۲۰).

توسعه سناریوهای مختلف رشد شهری راه‌های گوناگونی وجود دارد که متداول‌ترین آن به کار بردن اطلاعات مورد نظر در هر سناریو در لایه مستثنیات است. از این رو در مطالعه حاضر جهت ایجاد لایه مستثنیات در سناریوی محیط‌زیستی حفظ فضای سبز موجود در کنار توجه به شیب مورد توجه قرار گرفت که مشابه مطالعه انجام شده توسط Yin و همکاران (۲۰۱۶) است. در مطالعه Yin و همکاران (۲۰۱۶) سناریوی امنیت بوم‌شناختی (محیط‌زیستی) کمترین احتمال رشد را نسبت به دو سناریوی توسعه روند تاریخی و توسعه ترانزیت- محور

ضریب مقاومت به شیب سناریوی رشد تاریخی (۱) و رشد محیط‌زیستی (۱): این ضریب انواع مختلف رشد را به نحویکسانی تحت تأثیر قرار می‌دهد. این ضریب بیانگر اثر توپوگرافی بر توسعه شهر است. چنانچه ضریب مقاومت به شیب پایین باشد شیب عامل کنترل‌کننده توسعه شهر نیست و توسعه در مناطق مرتفع نیز صورت می‌گیرد. در این مطالعه این ضریب برای هر دو سناریوی یک به دست آمده است. یک دلیل آن می‌تواند یکنواختی شیب و عدم حضور شیب‌های زیاد در محدوده مورد مطالعه باشد.

ضریب گرایش به جاده سناریوی رشد تاریخی (۳۴) و رشد محیط‌زیستی (۴۶): این ضریب، رشد وابسته به جاده را از طریق کنترل حداکثر شعاع جستجو اطراف سلولی که به‌طور تصادفی انتخاب شده، تحت تأثیر قرار می‌دهد. چنانچه در این محدوده شعاعی جاده‌یافت شود احتمال اینکه سلول مورد نظر به کاربری شهری تغییر پیدا کند افزایش می‌یابد. در این مطالعه تأثیر این ضریب بر رشد شهر در هر دو سناریو مشهود است.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد افزایش گستره بیرجند امری اجتناب‌ناپذیر در هر دو سناریوی رشد تاریخی و محیط‌زیستی است. با این وجود مقایسه دو سناریوی حاکی از این است که در سناریوی رشد تاریخی نرخ رشد شهری بالاتر و نابودی پوشش گیاهی نیز حداکثر است. این نتایج نشان می‌دهد که لایه‌های مستثنیات بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های محیط‌زیستی ممکن است منجر به پیش‌بینی غیرمنطقی رشد شهری شود. توجه به‌هیافته‌های حاصل از این مطالعه می‌تواند در تدوین استراتژی‌های برنامه‌ریزی شهری به برنامه‌ریزان شهری کمک کند تا کمترین اثر تخریبی را بر محیط‌زیست بر جای بگذارد. از این رو مدل SLEUTH ابزاری مناسب به جهت پیش‌بینی و مدل‌سازی توسعه شهری آینده است.

در شبیه‌سازی رشد شهری بیرجند در چندین مرحله کالیبراسیون انجام شد و از مقادیر OSM و Leesale جهت به‌دست آوردن ضرایب کالیبراسیون استفاده شد. روش

نرخ رشد جمعیت، مناطق جاذب جمعیت مانند درجه جاده، دانشگاه، بیمارستان و غیره، قیمت زمین برای سناریوی رشد تاریخی و محدودیت‌هایی چون اشباع ظرفیت محیط فراتر از محدوده مصوب شهری، در نظر گرفتن سرانه فضای سبز در آینده و در نظر گرفتن شبکه آبراهه‌ها، مسیل‌ها و کانال‌های آب و حریم آنها را برای سناریوی محیط‌زیستی اشاره کرد که برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود. فرایندهای مکانی و زمانی توسعه شهری و پیامدهای محیط‌زیستی و اجتماعی چنین توسعه‌های به علت تاثیر عمیق بر زندگی انسان، شایسته مطالعات جدی توسط جغرافی‌دانان و طراحان شهری و سیاست‌گذاران و علاقمندان محیط‌زیست است. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند اطلاعات مفید را برای تصمیمات مدیران سرزمین و شهرداری، در راستای توسعه پایدار شهری ارائه دهد. استفاده از نتایج این تحقیق می‌تواند در تصمیم‌گیری در رابطه با طرح‌ریزی سرزمین، حفاظت و مدیریت منابع طبیعی و هدایت توسعه شهری تحت سناریوهای مختلف توسعه نقش داشته باشد. نتایج این مقاله، امکان و قدرت پیش‌بینی در شرایط مختلف را نشان داد. لذا سازمان‌های مربوطه می‌توانند با تغییر سناریوهای مدنظر خروجی‌های دیگر را در اجراهای مختلف مدل اکتساب نمایند.

یادداشت‌ها

1. Artificial Neural Networks
2. Agent Based
3. Fractal Based Models
4. Spatial- statistical
5. Cellular Automata
6. Spread coefficient
7. Organic or edge growth
8. Compact and Extensive
9. Slope
10. Land use
11. Exclusion
12. Urban
13. Transportation
14. Hill shade
15. Urban Growth Model
16. Deltatron Land cover Model

نشان داد و بیشترین گسترش شهر توسعه در لبه‌های شهر و ترانزیت محور رخ داده بود که در مطالعه حاضر نیز در سناریوی رشد تاریخی وابستگی رشد شهری به جاده‌ها دیده می‌شود. برخی از پژوهشگران به جای تغییر در لایه مستثنیات، یکی از لایه‌های ورودی دیگر جهت اجرای SLEUTH که اهمیت کمتری دارد را حذف و لایه مورد نظر را به جای آن جایگزین کرده‌اند. به‌عنوان نمونه Li و همکاران (۲۰۱۸) کیفیت محیط‌زیست را به‌عنوان یکی از ورودی‌های SLEUTH و به‌جای لایه شیب (به‌علت کم بودن دامنه تغییرات شیب) وارد مدل‌سازی کردند و نتایج به‌دست آمده از این طریق را مناسب‌تر برای توسعه آینده نسبت به استفاده از شیب معرفی کردند. هر دوی این مطالعات بر هدایت توسعه شهری مطابق با ملاحظات محیط‌زیستی در آینده تاکید دارند که مطابق با نتیجه مطالعه حاضر است.

مقایسه رشد تاریخی به‌دست آمده در این مطالعه با نتایج برخی از مطالعات در تضاد است مانند Bihamta و همکاران (۲۰۱۵)، Chandan و همکاران (۲۰۲۰) در شهر Chandigarh هندوستان و Bajracharya و همکاران (۲۰۲۰) در شهر آلبورکری نیومکزیکو. در این مطالعات ضریب پراکندگی (Spread coefficient) بالا بوده و رشد شهری عمدتاً در حاشیه شهر و به‌صورت ارگانیک وار در آینده رخ خواهد داد. نتایج این مطالعات با نتایج حاصل از سناریوی محیط‌زیستی مطالعه حاضر همخوانی دارد.

به‌کار گرفتن مراحل مختلف کالیبراسیون موجب افزایش اطمینان به نتایج شبیه‌سازی می‌شود. به‌طوری‌که در مطالعه Mondal و همکاران (۲۰۲۰) در شهر Udaipur هندوستان نیز استفاده از روش SLEUTH به‌عنوان دقیق‌ترین روش به‌ویژه در تعیین مراکز جدید رشد در مقایسه با روش‌های زنجیره مارکوف سلول‌های خودکار چندمتغیره و زنجیره مارکوف چندلایه معرفی شده است.

از موارد دیگری که موجب ارتقا نتایج مدل‌سازی می‌توان به استفاده از نیروهای محرک‌های چون جمعیت و

17. Support Vector Machine
18. Diffusion or Dispersion Coefficient
19. Breed Coefficient
20. Spread Coefficient
21. Slope-Resistance Coefficient
22. Road-Gravity Coefficient
23. Optimum Sleuth Metric
24. Spontaneous Growth
25. New Spreading Center Growth
26. Road Influenced Growth

تشکر و قدردانی

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی به شماره ابلاغیه ۶۱۵۲
۱۳۹۹/۵/ مورخ ۹۹/۰۴/۲۵ با استفاده از اعتبارات پژوهشی
دانشگاه بیرجند انجام شده است که بدینوسیله تشکر و
قدردانی می‌شود.

فهرست منابع

- کامیاب، ح. ر.، سلمان‌ماهینی، ع. (۱۳۹۷). مقدمه‌ای بر مدل‌سازی توسعه شهری و کاربردهای آن. ناشر دانشگاه گرگان.
- کامیاب، ح. ر.، سلمان‌ماهینی، ع.، حسینی، س. م.، و غلامعلی فرد، م. (۱۳۹۰). کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در مدل‌سازی توسعه شهری (مطالعه موردی: شهر گرگان)، پژوهش‌های جغرافیایی انسانی، ۴۳ (۲)، ۹۹-۱۱۳.
- جانعلی‌پور، س. (۱۳۹۵). مدل‌سازی توسعه شهری قائمشهر با استفاده از SLEUTH (پایان‌نامه کارشناسی ارشد)، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان. ایران.
- رسولی، م.، سلمان‌ماهینی، ع.، و کامیاب، ح. ر. (۱۳۹۵). تعیین ضرایب موثر بر رشد شهری در مدل SLEUTH برای شهرستان‌های علی‌آباد، رامیان و آزادشهر، مجله آمایش جغرافیایی فضا، دوره ششم، شماره ۲۱، گرگان.
- ملک‌پور، سیده‌هانیه. (۱۳۹۶). تحلیل و پیش‌بینی رشد شهر با استفاده از مدل SLEUTH (نمونه موردی شهر شیراز) (پایان‌نامه کارشناسی ارشد). دانشکده هنر و معماری، دانشگاه شیراز. ایران.
- Akin, a., Erdogan, M.A., & Berberoglu, S. (2013). The spatiotemporal land use/ cover change of ADANA city. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-7/W2: 6.
- Allen, M. (1997). *Cities and Region as Evolutionary, Complex System Geographical Systems*, 4: 103-130.
- Amato, F., Maimone, B. A., Martellozzo, F., Nolè, G., & Murgante, B. (2016). The effects of urban policies on the development of urban areas. *Sustainability*, 8(4), 297.
- Bajracharya, P., Lippitt, C. D., & Sultana, S. (2020). Modeling urban growth and land cover change in Albuquerque using SLEUTH. *The Professional Geographer*, 72(2), 181-193.
- Bihamta, N., Soffianian, A., Fakheran, S., & Gholamalifard, M. (2015). Using the SLEUTH urban growth model to simulate future urban expansion of the Isfahan metropolitan area, Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 43(2), 407-414.
- Bogart, W. (2009). *Don't call it sprawl: metropolitan structure in the 21st century*, New York, Cambridge University press.
- Candau, J., & Clarke, K.C. (2000). Probabilistic land cover modeling using deltatrons, *Proceedings of the 38th Annual Conference of the Urban Regional Information Systems Association*, Orlando, FL.
- Chaudhuri, G., & Clarke, K.C. (2013). The SLEUTH land use change model: a review, *Int. J. Environ. Resour. Res.* 1 (1): 88-104.
- Chaudhuri, G., & Clarke, K. C. (2019). Modeling an Indian megalopolis-A case study on adapting SLEUTH urban growth model.

- Chandan, M. C., Nimish, G., & Bharath, H. A. (2020). Analysing spatial patterns and trend of future urban expansion using SLEUTH. *Spatial Information Research*, 28(1), 11-23.
- Chen, J., Gong, P., He, C., Luo, W., Tamura, M., & Shi, P. (2002). Assessment of the urban development plan of Beijing by using a CA-based urban growth model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(10), 1063-1072.
- Clarke, K. C. (2008). *A decade of cellular urban modeling with SLEUTH: Unresolved issues and problems*. Ch, 3, 47-60.
- Clarke, K. C., & Gaydos, L. J. (1998). Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International journal of geographical information science*, 12(7), 699-714.
- Clarke, K. C., Hoppen, S., & Gaydos, L. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and planning B: Planning and design*, 24(2), 247-261.
- Dietzel, C., & Clarke, K. C. (2006). Decreasing computational time of urban cellular automata through model portability. *Geoinformatica*, 10(2), 197-211.
- Dietzel, C., Oguz, H., Hemphill, J. J., Clarke, K. C., & Gazulis, N. (2005). Diffusion and coalescence of the Houston Metropolitan Area: evidence supporting a new urban theory. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32(2), 231-246.
- Dimitrios, P. (2012). Urban growth prediction modelling using fractals and theory of chaos. *Journal of Civil Engineering*, 2 (2): 81-86.
- Gandhi, S. I., & Suresh, V. M. (2012). Prediction of urban sprawl in Hyderabad city using spatial model, remote sensing and GIS techniques geography. *International Journal of Scientific Research*, 1(2), 80-82.
- Herold, M., Goldstein, N. C., & Clarke, K. C. (2003). The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. *Remote sensing of Environment*, 86(3), 286-302.
- Huang, J., Zhang, J., & Lu, X. (2008). Applying SLEUTH for simulating and assessing urban growth scenario based on time series tm images: Referencing to a case study of Chongqing, China. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 37(2), 598-606.
- Jat, M. K., Choudhary, M., & Saxena, A. (2017). Urban growth assessment and prediction using RS, GIS and SLEUTH model for a heterogeneous urban fringe. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 10(3), 1-19.
- Lee, D. B. (1994). Retrospective on large-scale urban models. *Journal of the American Planning Association*, 60(1), 35-40.
- Li, F., Wang, L., Chen, Z., Clarke, K. C., Li, M., & Jiang, P. (2018). Extending the SLEUTH model to integrate habitat quality into urban growth simulation. *Journal of environmental management*, 217, 486-498.
- Mondal, B., Chakraborti, S., Das, D. N., Joshi, P. K., Maity, S., Pramanik, M. K., & Chatterjee, S. (2020). Comparison of spatial modelling approaches to simulate urban growth: a case study on Udaipur city, India. *Geocarto International*, 35(4), 411-433.
- National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA) (2005). Types of urban growth, SLEUTH CA- model. Availale on <http://www.ncgia.ucsb.edu>.

- National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA), (2011). Project Gigalopolis, University Of California, Santa Barbara., USGS, <http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig>, accessed 02 Jun. 2011.
- Rafiee, R., Mahiny, A. S., Khorasani, N., Darvishsefat, A. A., & Danekar, A. (2009). Simulating urban growth in Mashad City, Iran through the SLEUTH model (UGM). *Cities*, 26(1), 19-26.
- Sakieh, Y., Amiri, B. J., Danekar, A., Fegghi, J., & Dezhkam, S. (2015). Simulating urban expansion and scenario prediction using a cellular automata urban growth model, SLEUTH, through a case study of Karaj City, Iran. *Journal of Housing and the Built Environment*, 30(4), 591-611.
- Silva, E. A., & Clarke, K. C. (2002). Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal. *Computers, environment and urban systems*, 26(6), 525-552.
- Silva, E., & Wu, N. (2012). Surveying models in urban land studies. *Journal of Planning Literature*, 27(2), 139-152.
- Singh, A.K. (2003). *Modeling landuse/landcover changes using cellular automata in geospatial environment*. MSc Thesis. ITC, Netherland. 58p.
- The Economist, (2012). Urban Life: Open-air Computers 27 October.
- Torrens, P.M & Sullivan, D.O. (2000). Cellular automata and urban simulation: where do we go from here, *Environment and planning*, 28 (3): 163-168.
- Zhou X, Chen H. (2018). Impact of urbanization-related land use land cover changes and urban morphology changes on the urban heat island phenomenon. *Sci Total Environ*. 635: 1467–1476.