



# Journal of Environmental Studies

Vol. 47, No. 1, Spring 2021

Journal Homepage: [www.Jes.ut.ac.ir](http://www.Jes.ut.ac.ir)

Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

## Simulation and Prediction of Urban Growth Pattern Until 2050 Using SLEUTH-3R Model (Case Study: Coastal Area of Parsian City)

**Document Type**  
Research Paper

Sorour Esfandeh<sup>1</sup>, Afshin Danehkar<sup>1\*</sup>, Abdolrassoul Salmanmahini<sup>2</sup>

**Received**  
February 13, 2021

<sup>1</sup> Department of Environmental Engineering, Natural Resources Faculty, University of Tehran, Karaj, Iran

**Accepted**  
May 19, 2021

<sup>2</sup> Department of Environmental Sciences, Fisheries and Environmental Sciences Faculty, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gogan, Iran

DOI: [10.22059/JES.2021.324700.1008185](https://doi.org/10.22059/JES.2021.324700.1008185)

### Abstract

The purpose of this study is to identify historical patterns and predict future urban growth and land-use changes in coastal areas. Despite the importance of coastal areas, no studies have been conducted in this field in the country. Therefore this study was performed in the coastal area of Parsian city using SLEUTH-3R model as a new version of automated cell models. According to the results, urban growth in this region is most affected by slopes and urban development has a linear relationship with the transportation network. Also, the growth of cities is more formed than the inner urban lands and the growth caused by the margins of the city will play a less role in the formation of the cities. The area of urban will increase from 1,200 hectares to 3,481 hectares from 2019 to 2050, which is equivalent to a growth rate of 73.58. Also, 47% of barren lands area changing to urbans. These results can provide a suitable perspective for decision making to planning land and natural resource and playing an important role in guiding sustainable urban development in this region.

**Keywords:** Modelling, Urban Development, Cellular Automata, SLEUTH-3R, Parsian

---

\* Corresponding Author:

Email: [danehkar@ut.ac.ir](mailto:danehkar@ut.ac.ir)

## Introduction

The urbanization Phenomenon is expanding rapidly in most parts of the world due to population growth. The migration from rural to urban areas and, consequently, urban development has become a significant challenge worldwide. Urban development and changes in land-use patterns cause social and environmental impacts, Such as reducing natural and agricultural land with high production capacity, water quality, and local climate change. All of these are somehow related to changes in land-use patterns due to human activities. Because of extensive effects on the environment, water cycles, and natural habitats, understanding the quantity and spatial patterns of land-use/land-cover changes is vital. On the other hand, studying these effects in coastal areas with ecotone and more sensitive habitats is more important than in other areas. In this regard, models are a suitable tool to express the complexity of development processes in simple terms. Cellular Automata Models (CA) are dynamic tools in modeling natural and physical features of the land surface and have been widely used in predicting land-use change and urban development. In all of the CA models, the SLEUTH model is probably the most appropriate. It is a hybrid of two CA models that can model urban development and land-use change simultaneously. The SLEUTH model was developed to simulate urban growth based on automated networks. The abbreviation of the SLEUTH included its six input layers: slope, land-cover, the excluded area from development, urban areas, transportation network, and hillshade layer. There are two general steps in implementing SLEUTH: the model calibration to extracting patterns and trends in the past and the forecasting step in which past trends are used for the future. The original version of the SLEUTH model has some constraints such as the number of historical data required, memory limitation, the problem of the road search algorithm with spending time and more memory. This model also tends to the edge or organic growth, so it cannot produce a good level of dispersed growth. These constraints in the latest version of the model (SLEUTH-3r) have been fixed or improved. Reviewing the studies conducted in Iran shows that the new version of this model has been used in none of these studies. Also, modeling and forecasting urban growth in the coastal areas of Iran has not been done so far. Overseas studies have not been conducted in coastal areas too. Therefore, this study aims to identify historical patterns and predict future urban growth and land-use change in a part of the Persian Gulf coastline.

## Materials and Methods

### Case Study

Parsian city is located in the southwest of Hormozgan province. The population of the city is 50,596 people. Parsian, with about 1619.5 square kilometers of area, two districts, two cities, four villages, and 42 towns, constitutes about 2.7% of the total population and 2.2% total area of Hormozgan province. Parsian coastal area includes large parts of Kushkenar, Behdasht, Buchir, and Mehregan. With an area of 1021 square kilometers, this sub-area involves about 63% of the Parsian city.

Research Method:

The steps for setting up the SLEUTH-3r model are as follows:

- Preparation of model database and its validation
- Model testing
- Model calibration
- Prediction validation
- Model Prediction
- Preparation of SLEUTH-3r model database:

In order to model the development of cities in the study area by the SLEUTH-3r model, the following maps should be prepared:

- Historical urban maps and their validation
- Historical land-use maps
- Historical maps of the transportation network
- Slope map
- Map of excluded areas from development
- Hillshade Map

- Model testing:

The test scenario file was defined, and then this test was performed to check the model installation and ensure the layers setting in the model.

- Model Calibration:

In the SLEUTH-3r model, the coefficients of diffusion, breed, spread, slope, and roads gravity affect how the growth rules are applied. These coefficients are calculated in the calibration step and on historical maps. The initial coarse calibration step was performed with 10 Monte Carlo. The SLEUTH-3r version uses two measures: Cluster Fraction Difference (CFD) and Area Fraction Difference (AFD). Then, by obtaining suitable coefficients, another execution was performed by setting 100 Monte Carlo to average these coefficients. The coefficients obtained in this step were used in the forecasting process.

- Prediction validation:

In this step, the model was implemented with a historical city map in 2013 to obtain a future city map in 2019.

- Model Predicting:

Ensuring the accuracy of the model prediction, the model with the historical city map in 2019 as the start year of the forecasting was implemented to obtain the city map in 2050.

### Discussion of Results

Validation of historical urban maps shows that all of them have high accuracy. The accuracy of these maps in 1984, 1993, 2002, and 2019 is 99% and in 2013 is 98%. The calibration section lasted about 60 hours. Also, the value of AFD and CFD were about 0.1 means that the fraction difference between the modeled clusters and the modeled urban areas than observes one is the lowest. The distribution coefficient of 25 indicates the low probability of city distribution outside the main urban centers. According to the breed coefficient (50), about half of the city's growth will from the vacant land within the city; this means the possibility of the city's growth through its edges is low. Also, the relationship between urban growth and transportation networks is linear, and the effect of slopes on the city's development in this region is high. Also, the kappa statistic (0.99) shows that predicting urban growth has been done with great accuracy. Urban growth in the Parsian coastal area will occur with a very high rate (73.58) from 2019 to 2050. The urban area will increase to 2281.2 hectares and reach about 3481.4 hectares during these 31 years, indicating the rapid and extensive development of residential places in this area. The trend of changes in residential places over 66 years shows that the rate of urban growth from 1984 to 2019 had a slight slope, while from 2019 to 2050, increasing sharply, Which indicates the significant population changes followed by the rapid development of human settlements. Over 31 years, 47.14% of the barren lands will become urban; this confirms a breed coefficient and a road gravity coefficient of 50. Also, 4.96% of the vegetation area will be converted into urban, which indicates the conversion of urban vegetation into residential areas.

### **Conclusions**

This study was performed using the SLEUTH-3r model, which is an improved version of the SLEUTH model. The pattern of urban growth in this region is most affected by the slopes, and the growth of residential places has a linear relationship with the transportation network. Urban areas will increase from 1,200 hectares to 3,481 hectares from 2019 to 2050, equivalent to a growth rate of 73.58 and 2281 hectares. Furthermore, about 47% of the barren lands area will be turned into urban. This rapid growth trend will lead to other environmental changes, and it will be accompanied by an increase in the needs of future residents. Therefore, policymakers and land planners must be fully aware of these issues and their consequences. These results can provide a practical perspective for planning land and be an essential role in guiding sustainable urban development in this region.

## شبیه‌سازی و پیش‌بینی الگوی رشد شهری تا سال ۲۰۵۰ با استفاده از مدل SLEUTH-3R (مطالعه موردی: ناحیه ساحلی شهرستان پارسین)

سرور اسفنده<sup>۱</sup>، افشین دانه‌کار<sup>۱\*</sup>، عبدالرسول سلمان ماهینی<sup>۲</sup>

۱ گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران  
۲ گروه محیط زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۲/۲۹

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵

### چکیده

هدف این پژوهش شناسایی الگوهای تاریخی و پیش‌بینی اندازه و نحوه رشد آینده شهری و تغییرات کاربری اراضی در مناطق ساحلی است. موضوعی که با وجود اهمیت سرزمین‌های ساحلی تاکنون به آن پرداخته نشده است. این مطالعه در ناحیه ساحلی شهرستان پارسین و با استفاده از مدل SLEUTH-3R به عنوان نسخه‌ای جدید از مدل‌های سلول‌های خودکار انجام شد. بر اساس نتایج، رشد شهری در این منطقه بیش از همه تحت تاثیر پستی و بلندی‌ها بوده و ایجاد لکه‌های سکونت‌گاهی با شبکه حمل و نقل رابطه‌ای خطی دارد. همچنین رشد شهرها بیشتر از اراضی درونی شهری شکل گرفته و ایجاد لکه‌های پراکنده شهری و رشد ناشی از حاشیه‌های شهر با نسبت کمتری در شکل‌گیری سکونت‌گاه‌های این منطقه نقش دارند. از سوی دیگر، مساحت مناطق شهری از سال ۲۰۱۹ تا سال ۲۰۵۰، از ۱۲۰۰ هکتار به ۳۴۸۱ هکتار افزایش خواهد یافت که معادل نرخ رشد برابر با ۷۳/۵۸ است. احتمال انتقال سایر کاربری‌ها به شهر نیز نشان می‌دهد که در حدود ۴۷ درصد از مساحت اراضی بایر به کاربری شهری تبدیل خواهد شد. نتایج این مطالعه می‌تواند چشم‌انداز مناسبی برای تصمیم‌گیران در طرح‌ریزی سرزمین و مدیریت منابع طبیعی فراهم نموده و در راستای توسعه پایدار شهری در این منطقه نقش بسزایی داشته باشد.

### کلید واژه

مدل‌سازی، توسعه شهری، شبکه خودکار، SLEUTH-3R، پارسین

### سرآغاز

درصد برسد. رشد سریع جمعیت، شهرنشینی و پیامدهای ناشی از آن در شهرها، پدیده‌ای انکارناپذیر است؛ چرا که شهرها به پیروی از نقش و موقعیت جدیدی که پیدا کرده‌اند، شکل‌های تازه‌ای از زندگی اجتماعی را بر خود و فضای پیرامونی خویش تحمیل می‌کنند که آثار آن بر آب و هوا، محصولات کشاورزی، بهداشت عمومی و عدالت

گرایش به شهرنشینی به دلیل افزایش جمعیت در اغلب مناطق جهان به شدت در حال گسترش است. بر اساس گزارش سازمان ملل متحد از سال ۲۰۰۷، بیش از نیمی از جمعیت جهان در شهرها زندگی می‌کنند و پیش‌بینی می‌شود میزان جمعیت شهرنشین جهان تا سال ۲۰۳۰ به ۶۰

Email: danehkar@ut.ac.ir

DOI: [10.22059/JES.2021.324700.1008185](https://doi.org/10.22059/JES.2021.324700.1008185)

DOR: [20.1001.1.10258620.1400.47.1.4.0](https://orcid.org/20.1001.1.10258620.1400.47.1.4.0)

\* نویسنده مسئول:

نظریه سلول‌های خودکار<sup>۲</sup> (CA)، (۲) تئوری عامل‌ها<sup>۳</sup>، (۳) تئوری فراکتال‌ها<sup>۴</sup>. بر این اساس، جهت بررسی سیستم‌ها و فرآیندهای پویای مکانی (مانند فرآیند رشد شهری)، مدل‌های متفاوتی حاصل از تلفیق GIS با یک یا چند مورد از این مدل‌ها توسعه یافته‌اند. به این ترتیب انواع مدل‌های برپایه سلول‌های خودکارکه بارزترین وجه تمایز در بکارگیری این مدل‌ها، نحوه تعیین و محاسبه قوانین انتقال در آنها است، عبارتند از (۱) مدل ماکرو و میکرو تلفیق شده با سلول‌های خودکار، (۲) مدل سلول‌های خودکار فازی، (۳) مدل سلول‌های خودکار شبکه‌های عصبی مصنوعی، (۴) مدل سلول‌های خودکار تصادفی، (۵) مدل سلول‌های خودکار بر پایه آمار (ساکیه، ۱۳۹۴).

مدل‌های CA به دلیل داشتن ماهیت پویا و همچنین خصوصیات منحصر به فرد آنها در مدل‌سازی از عوارض طبیعی و فیزیکی سطح زمین، کاربرد وسیعی در پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین و همچنین توسعه زمین‌های شهری پیدا کرده‌اند (رسولی و همکاران، ۱۳۹۵). مدل CA اولین بار در دهه ۱۹۴۰ توسط دو ریاضیدان به نام‌های اولام و نیومن به منظور شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده در فیزیک و زیست‌شناسی به کار گرفته شد. از آن پس در سایر حوضه‌های مطالعاتی مانند مدل‌سازی شهری مورد استفاده قرار گرفت (زارعی و آل شیخ، ۱۳۹۱). هر شبکه خودکار یک سیستم پویای گسسته است که فضا در آن به سلول‌های مکانی منظم و جریان زمانی به مراحل مختلف تقسیم می‌گردد. هر سلول در این سیستم دارای یکی از وضعیت‌های محدود مانند زنده یا مرده است. وضعیت هر سلول بر اساس قوانین محلی، که در آن مقطع زمانی خاص بستگی به وضعیت کنونی آن و وضعیت همسایگانش در مرحله زمانی قبل دارد، تعیین خواهد شد (Wolfram, 1984). در شبکه خودکار پنج عنصر اصلی وجود دارد که شامل سلول، وضعیت، قوانین انتقال، قوانین همسایگی و زمان می‌شوند. در جدول ۱ برخی از انواع مدل‌های CA از جنبه‌های متفاوت با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در میان تمام

اجتماعی تأثیرگذار است (مزیدی و نارنگی فرد، ۱۳۹۵). هنگامیکه شهرها از نظر اندازه و تعداد جمعیت رشد می‌کنند، توجه به هماهنگی میان جنبه‌های کالبدی، اجتماعی و محیط زیستی آنها بسیار حائز اهمیت است و پایداری شهر در گرو همخوانی میان این عوامل خواهد بود. در این میان محیط زیست به عنوان بستر توسعه نقش بسزایی در روند شکل‌گیری شهرها دارد و بهره‌مندی از محیط زیست سالم و بوم سازگان‌های پایدار نه تنها تأمین‌کننده نهاده‌های لازم در فرآیند توسعه است، بلکه فراهم‌کننده محیطی مناسب برای زیستن بشر و شرکت مناسب او در این فرآیند خواهد بود (میرقی، ۱۳۸۹؛ رسولی و همکاران، ۱۳۹۵). همانطور که گفته شد، توسعه شهری و تغییرات الگوی کاربری زمین باعث ایجاد تأثیرات گسترده اجتماعی و محیط زیستی می‌گردد. این تأثیرات شامل کاهش فضاها، طبیعی، تجمع وسایل نقلیه، کاهش زمین‌های کشاورزی با توان تولید بالا، تأثیر بر زهکش‌های طبیعی و کاهش کیفیت آب و تغییر اقلیم محلی است، لذا درک چگونگی تغییرات پوشش و کاربری زمین، چه از نظر کمیت تغییرات و چه از نظر الگوی مکانی آنها به دلیل اثرات گسترده بر محیط زیست، چرخه‌های آبی و زیستگاه‌های طبیعی، حیاتی به نظر می‌رسد (کامیاب و همکاران، ۱۳۹۰). اهمیت بررسی این اثرات در مناطق ساحلی که زیستگاه‌های اکوتون و حساس‌تری نسبت به سایر مناطق دارند، بیشتر است.

در این راستا مدل‌ها، ابزار مناسبی برای بیان پیچیدگی فرآیندهای توسعه در بیانی ساده هستند. از ویژگی‌های بارز فرآیند رشد شهری متغیر بودن آن در بستر زمان و مکان است. از آنجا که مدل‌سازی اینگونه فرآیندها توسط سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی که در ابتدا برای کار با داده‌های مکانی (بدون قید زمان) توسعه یافته‌اند، صورت می‌گیرد، بنابراین روش معرفی بعد زمان در GIS<sup>۱</sup> می‌تواند از اهمیت بسزایی در این زمینه برخوردار باشد. به طور کلی سه روش مجزا جهت تلفیق ابعاد پویای زمانی با تجزیه و تحلیل‌های مکانی در GIS وجود دارد (کریمی، ۱۳۹۱)

شهری در طول هر چرخه رشد به کار برده می‌شوند و از طریق کنش متقابل با پنج ضریب رشد (پخش، زایش، گسترش، جاذبه جاده و مقاومت شیب) کنترل می‌گردند (Clarke and Gaydos, 1998; Clarke et al., 1997). چهار ضریب اول فشار رشد را در سیستم‌های شهری بیان می‌کنند. برای مثال، ضریب پخش، ماهیت پخش‌کنندگی بیرونی توزیع را برآورد می‌کند؛ ضریب زایش، احتمال قرارگیری واحد مسکونی جدید در چرخه رشد خود را بیان می‌دارد؛ ضریب گسترش میزان توزیع از واحدهای مسکونی موجود را کنترل می‌کند؛ و عامل جاذبه جاده میزان گرایش واحد مسکونی جدید به سمت جاده‌ها را نشان می‌دهد. مقاومت در برابر رشد از طریق ضریب شیب بیان می‌گردد که تأثیر شیب زیاد در مقاومت به توسعه را نشان می‌دهد. ضمن آنکه مقاومت از طریق یک لایه مناطق مستثنی نیز بیان می‌گردد. مناطق مستثنی یا به صورت کلی (آب‌ها یا پارک‌ها) یا به شکل جزئی (زون‌بندی محدود کننده) غیرقابل توسعه هستند. هر پنج ضریب برای کنترل نرخ رشد کالیبره می‌گردند تا اینکه رشد به طور غیرمعمول افزایش یا کاهش نیابد. نرخ کلی رشد شهری مجموع چهار نوع رشد است. مدل SLEUTH در دو مرحله کلی اجرا می‌شود: مرحله کالیبراسیون، جهت استخراج الگوها و روندهای توسعه در گذشته و مرحله پیش‌بینی که در آن روندهای گذشته برای آینده مورد استفاده قرار می‌گیرند (کامیاب و سلمان ماهینی، ۱۳۹۷).

در ایران تاکنون به منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی رشد شهرهای مختلف و درکنار سایر اهداف، از مدل SLEUTH به تنهایی و یا در ترکیب با سایر مدل‌ها استفاده شده است. از آن جمله می‌توان به پیش‌بینی رشد شهر در حوزه گرگان و علی‌آباد با توجه به دو مورد از خدمات بوم‌سازگان شامل پالایش آب در مقابل رواناب سطحی و تولید و حفاظت خاک در برابر فرسایش، Salmanmahiny و Karimi (۲۰۱۱)، همچنین ارزیابی اثرات رشد شهری گرگان بر زمین‌های در دسترس و پارامترهای محیط زیستی

این مدل‌ها، مدل SLEUTH (حاصل تلفیق رویکرد مدل‌سازی سلول‌های خودکار با علوم آمار، کامپیوتر و GIS) احتمالاً مناسب‌ترین آنها باشد، زیرا دورگه‌ایی از دو گروه مدل CA است که توانایی مدل‌سازی توسعه شهری و تغییر کاربری اراضی را دارد (کامیاب و سلمان ماهینی، ۱۳۹۷). مدل SLEUTH دارای نقاط قوت زیادی است، به نحوی که انتخاب کاربران را از میان طیف وسیع مدل‌های رشد شهری آسان می‌کند، با این وجود نسخه اصلی این مدل با محدودیت‌هایی مانند تعداد داده‌ی تاریخی مورد نیاز، محدودیت حافظه، مشکل الگوریتم جستجوی جاده با افزایش زمان و صرف حافظه بیشتر، همراه است. همچنین این مدل به سمت رشد متأثر از لبه‌گرایش دارد، بنابراین نمی‌تواند سطح مناسبی از رشد پراکنده را ایجاد کند. این محدودیت‌ها در آخرین نسخه‌ی این مدل به نام SLEUTH-3R (SLEUTH3.0beta\_p01 Version R)، Jantz et al., 2014 and (2010). بنابراین در این مطالعه متناسب با هدف و اطلاعات موجود، از میان مدل‌های سلول‌های خودکار، از مدل SLEUTH به دلیل داشتن قابلیت‌های زیاد و همچنین از نسخه جدید این مدل (SLEUTH-3R) به دلیل کاهش بسیاری از محدودیت‌های نسخه اصلی از جمله اصلاح و بهینه‌سازی الگوریتم پردازش داده، افزایش دقت پیش‌بینی مدل، استفاده از سنجه‌های مناسب برآورد دقت مدل، افزایش سرعت پردازش اطلاعات و کاهش حافظه مورد نیاز استفاده شد.

مدل SLEUTH به منظور شبیه‌سازی فرآیند رشد شهری بر مبنای شبکه‌های خودکار ایجاد شد. نام مدل از شش لایه ورودی آن شامل شیب<sup>۵</sup>، پوشش زمین<sup>۶</sup>، مناطق مستثنی از توسعه<sup>۷</sup>، مناطق شهری<sup>۸</sup>، شبکه حمل و نقل<sup>۹</sup> و لایه سایه روشن<sup>۱۰</sup> گرفته شده است. این مدل الگوهای شهری را با کاربرد چهار نوع از تغییرات کاربری شهری شامل رشد خودبخود، رشد مرکز انتشار جدید، رشد حاشیه و رشد متأثر از جاده استخراج می‌کند. چهار نوع رشد

جدول ۱. انواع مدل‌های سلول‌های خودکار، ویژگی‌ها، نقاط ضعف و قوت

نام مدل	نوع مدل	عوامل مورد بررسی	نرم افزار مورد نیاز	قوت	ضعف
UrbanSim	CA	ساختار حمل و نقل، زون‌بندی محلی، طرح‌های شهری، کاربری اراضی	Java، نرم افزار اقتصادسنجی، مدل حمل و نقل	مدل‌سازی پویا بر اساس تصمیم‌گیری‌های واقعی صاحبان مسکن و کار در پاسخ به سیاست‌گذاری‌ها	نیاز به داده‌های صریح و مشخص، عدم دسترسی همیشگی به داده‌های ورودی، کالیبراسیون طولانی و پیچیده
SLEUTH	CA	ساختار حمل و نقل، زون‌بندی محلی، طرح‌های شهری، تغییر در مناطق شهری طی زمان	UNIX, gnu C compiler	سادگی استفاده در مناطق مختلف، اجرا در بیش از ۱۰۰۰ شهر، قابلیت استفاده از فرآیند مدل‌سازی پویا، عملکرد ساده و توانایی زیاد در نشان دادن تغییرات پیچیده شهری، نیاز به اطلاعات مکانی مختلف اما اندک و قابل دسترس، قابلیت استفاده در مقیاس‌های مختلف، نرم افزار رایگان و پشتیبانی توسط سایت رسمی Gigalopolis	مراحل کالیبراسیون نسبتا پیچیده، لزوم آشنایی با UNIX
DINAMICA	CA	ساختار حمل و نقل، زون‌بندی محلی، کاربری اراضی	GIS	امکان استفاده از عدم قطعیت	استفاده عموماً به صورت منطقه‌ای
Markov Chain	CA	کاربری اراضی	IDRISI	نتایج دقیق در مقیاس‌های بزرگ	پیش‌بینی فضایی تغییرات صرفاً بر اساس تغییرات کاربری اراضی

(منبع: کامیاب و سلمان ماهینی، ۱۳۹۷)

Sakieh و همکاران (۲۰۱۵)، مطالعه‌ی روند، الگوی فضایی رشد، عوامل اثرگذار بر رشد شهری و پیش‌بینی رشد آینده کلان شهر تبریز تا سال ۲۰۳۵، Dadashpoor و همکاران (۲۰۱۹)، برنامه‌ریزی کاربری اراضی در شهر گرگان با ترکیب مدل رشد شهری SLEUTH با روش ارزیابی چند معیاره و مدل ارزیابی اثرات بلند مدت هیدرولوژیکی، Mahiny و Clarke (۲۰۱۳) اشاره نمود. در جهان نیز مطالعات زیادی به کمک مدل SLEUTH به تنهایی و یا در ترکیب با سایر مدل‌ها انجام شده است، مانند بررسی تغییرات زمانی و مکانی رشد شهر پوشکار در هندوستان در یک دوره ۲۲ ساله و تا سال ۲۰۴۰ Saxena و Jat (۲۰۱۹)، شبیه‌سازی رشد شهر با ترکیب تناسب اراضی و مدل SLEUTH Saxena و Jat (۲۰۲۰)، بررسی نحوه

Mahini و Gholamalifard (۲۰۰۷)، مکان‌یابی ایستگاه‌های انتقال مواد زائد جامد با توجه به روند رشد شهر مشهد، رفیعی (۱۳۸۶)، پیش‌بینی رشد شهری تهران تا سال ۲۰۵۰، مومنی (۱۳۸۹)، تعیین ضرایب مؤثر بر رشد شهری برای شهرستان‌های علی‌آباد، رامیان و آزاد شهر، رسولی و همکاران (۱۳۹۵)، مدل‌سازی روند توسعه شهر به جهت مدیریت منابع آبی و توسعه پایدار در شهرستان آزادشهر، جعفرنژاد و ماهینی (۱۳۹۴)، بررسی روابط متقابل بین مفهوم پایداری و الگوهای سیمای سرزمین در شهر کرج، Sakieh و همکاران (۲۰۱۵)، پیش‌بینی توسعه آینده کلانشهر اصفهان تا سال ۲۰۵۰ Bihamta و همکاران (۲۰۱۵)، برنامه‌ریزی شهری غیرمتمرکز در شهر گرگان با استفاده از ترکیب ارزیابی چند معیاره و مدل رشد شهری،



غرب استان هرمزگان، در منتهی‌الیه غرب شهرستان بندرلنگه و در مسیر جاده اصلی بندرلنگه- بوشهر قرار گرفته است و بخشی از آن که در موقعیت ساحلی قرار دارد به عنوان محدوده مورد مطالعه (ناحیه ساحلی پارسیان) در این پژوهش در نظر گرفته شده است. مختصات جغرافیایی شهرستان پارسیان ۴۴ دقیقه و ۵۲ درجه و ۵۰ دقیقه و ۵۳ درجه طول شرقی و ۵۶ دقیقه و ۲۶ درجه و ۲۰ دقیقه و ۲۷ درجه عرض شمالی است. بر اساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن در سال ۱۳۹۵، شهرستان پارسیان با جمعیتی معادل ۵۰۵۹۶ نفر و مساحتی در حدود ۱۶۱۹/۵ کیلومتر مربع، دو بخش، دو شهر، چهار دهستان و ۴۲ پارچه آبادی (۴۱ آبادی دارای سکنه و یک آبادی بدون سکنه) حدود ۲/۷ درصد از کل جمعیت و ۲/۲ درصد از کل مساحت خاکی استان هرمزگان را تشکیل می‌دهد. پارسیان دارای یک ایستگاه هواشناسی سینوپتیک تکمیلی با ارتفاع ۵۹ متر از سطح دریا است که در سال ۱۳۸۵ تاسیس شده است. با توجه به آمار این ایستگاه از بدو تاسیس تا سال ۱۳۹۷ در این شهرستان، میانگین بارندگی سالانه ۱۶۷/۵ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۲۹/۶ سلسیوس ثبت شده است (سالنامه آماری استان هرمزگان، ۱۳۹۷). ناحیه ساحلی پارسیان شامل بخش‌های وسیعی از چهار دهستان شهرستان پارسیان (کوشکنار، بهدشت، بوچیر و مهرگان) در دو بخش کوشکنار و مرکزی است. این ناحیه با مساحتی معادل ۱۰۲۱ کیلومتر مربع در حدود ۶۳ درصد از سطح شهرستان را به خود اختصاص می‌دهد. در شکل ۱ موقعیت ناحیه ساحلی پارسیان در استان، شهرستان و دهستان نمایش داده شده است.

### روش تحقیق

برای اجرای مدل SLEUTH به عنوان محصول تکاملی پروژه Gigalopolis (کامیاب و سلمان ماهینی، ۱۳۹۷)، همانطور که پیش‌تر نیز اشاره شد، حداقل به چهار نقشه مناطق شهری مربوط به چهار زمان، حداقل دو نقشه شبکه حمل و نقل و دو نقشه کاربری زمین در دو زمان، یک نقشه

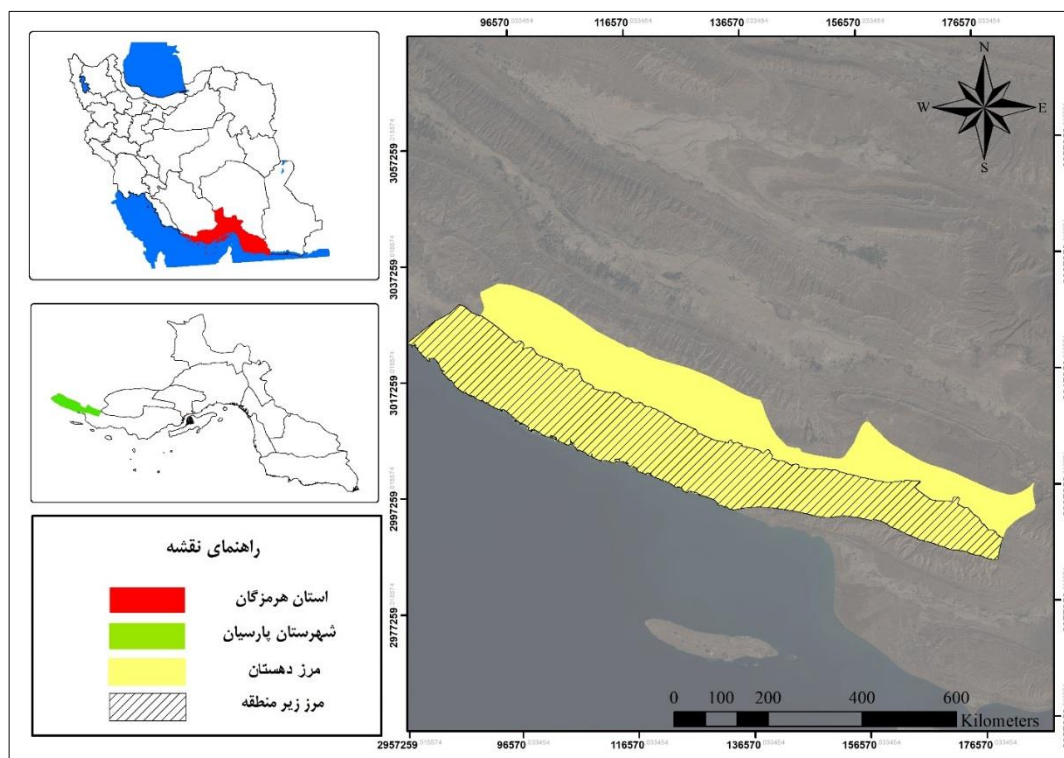
تکامل ساختار فضایی شهرهای جنوب صحرای آفریقا، Agyemang و همکاران (۲۰۱۹)، توسعه و رشد شهر چانگزو در چین، Li و همکاران (۲۰۱۸)، رشد و توسعه شهری در ایتالیا تا سال ۲۰۳۰ Martellozzo و همکاران (۲۰۱۸). جمع‌بندی مطالعات انجام شده در ایران نشان می‌دهد که در هیچ یک از آنها، از نسخه SLEUTH-3R استفاده نشده و تاکنون مدل‌سازی و پیش‌بینی رشد شهری در مناطق ساحلی ایران انجام نشده است. همچنین در مطالعات جهانی که با نسخه جدید انجام شده‌اند، مناطق ساحلی مورد بررسی قرار نگرفته‌اند.

هرمزگان یکی از چهار استان جنوبی کشور است که دارای بیشترین مرز دریایی است. اهمیت این استان از نظر استراتژیک (وجود تنگه هرمز)، داشتن میادین نفت و گاز، مجاورت با منطقه پارس جنوبی، همسایگی با یکی از مهمترین مناطق ویژه بندری جهان (جبل علی) و کشورهای نظیر امارات متحده عربی، قطر، عمان و غیره دوچندان شده است. وجود مناطق زیستی حساس مانند مناطق حفاظت شده حرای جاسک، تالاب‌های بین‌المللی، منطقه حفاظت شده گنو و ... از دیگر موضوعات مورد توجه در استان به شمار می‌آیند (مطالعات یکپارچه مناطق ساحلی، ۱۳۹۴). از این رو با توجه به اهمیت استراتژیک و محیط زیستی هرمزگان و به دلیل اینکه تاکنون مطالعه‌ای در جهت بررسی و پیش‌بینی الگوهای رشد شهرهای ساحلی و تغییرات کاربری اراضی در این منطقه انجام نشده است، این مطالعه با هدف شناسایی الگوهای تاریخی رشد شهری و پیش‌بینی میزان و نحوه توسعه آینده شهری و تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل SLEUTH-3R برای اولین بار در ایران انجام شد. در این پژوهش ابتدا منطقه مورد مطالعه معرفی شده، سپس روش انجام آن شرح داده شده و در آخر نیز نتایج، بحث و نتیجه‌گیری بیان شده‌اند.

### مواد و روش بررسی

#### محدوده مورد مطالعه

شهرستان پارسیان به مرکزیت شهر پارسیان در جنوب



شکل ۱. موقعیت ناحیه ساحلی پارسیان

✓ نقشه مناطق مستثنی از توسعه  
 ✓ نقشه سایه و روشن پستی و بلندی‌ها  
 در این مطالعه ابتدا تصاویر ماهواره‌ای موجود در سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده<sup>۱۱</sup> (USGS) در سال‌های ۱۹۸۴، ۱۹۹۳ و ۲۰۰۲ از سنجنده (TM<sup>۱۲</sup>) و ۲۰۱۳ و ۲۰۱۹ از سنجنده (OLI<sup>۱۳</sup>) دریافت شدند. سپس با استفاده از نرم‌افزار ENVI5.3 مراحل پیش پردازش و پردازش تصاویر ماهواره‌ای انجام شد. در مرحله پیش پردازش، ابتدا صحت هندسی تصاویر با استفاده از نقاط کنترل زمینی برداشت شده توسط دستگاه موقعیت‌یاب جهانی<sup>۱۴</sup> (GPS)، طی بازبازدیدهای میدانی و مدل رقومی ارتفاع ۱۰۰ متر (تهیه شده در مرکز کارتوگرافیک ایران) بررسی شد. سپس تمام تصاویر با استفاده از تصحیح رادیومتریک، به تصویر رادیانس تبدیل شده و توسط الگوریتم QUAC<sup>۱۵</sup> تصحیح اتمسفری بر روی تصاویر رادیانس انجام شد (علوی‌پناه، ۱۳۸۴). در مرحله پردازش تصاویر ماهواره‌ای، به منظور استخراج لکه‌های شهری و سکونت‌گاهی، تصاویر پیش پردازش شده با استفاده از نقاط آموزشی و توسط الگوریتم

شیب منطقه، یک نقشه مناطق مستثنی از توسعه و یک نقشه از تصویر سایه روشن پستی و بلندی‌های منطقه نیاز است. این نقشه‌ها باید در فرمت GreyScale.gif و هشت بیتی بوده و سیستم تصویر، اندازه و وضوح یکسان داشته باشند. گام‌های راه اندازی مدل SLEUTH عبارتند از:

- تهیه پایگاه داده مدل و اعتبارسنجی آن
- تست مدل
- کالیبراسیون مدل
- اعتبارسنجی پیش‌بینی
- پیش‌بینی مدل
- تهیه پایگاه داده مدل SLEUTH
- به منظور مدل‌سازی از توسعه شهرهای محدوده مورد مطالعه توسط مدل SLEUTH، نقشه‌های زیر باید تهیه شوند:
- ✓ نقشه‌های تاریخی شهری و اعتبارسنجی آنها
- ✓ نقشه‌های تاریخی کاربری اراضی
- ✓ نقشه‌های تاریخی شبکه حمل و نقل
- ✓ نقشه شیب

و سپس به منظور افزایش دقت، با انطباق نقشه شبکه حمل و نقل تهیه شده و تصویر سال مربوطه، اصلاحات لازم انجام شد.

### تهیه نقشه‌های مناطق مستثنی از توسعه

به این منظور، با توجه به اهداف پژوهش از نقشه‌های دریاچه‌ها و سدها، مناطق حفاظت شده، پارک‌های ملی، پناهگاه حیات وحش، اثر طبیعی ملی و مناطق شکار ممنوع استان هرمزگان استفاده شد. بنابراین در این منطقه پارک ملی نایبند به عنوان منطقه مستثنی از توسعه در نظر گرفته شد.

### تهیه نقشه شیب و نقشه سایه و روشن پستی و

#### بلندی‌ها

با استفاده از مدل رقومی ارتفاع منطقه، نقشه شیب و نقشه سایه روشن پستی و بلندی‌ها تهیه شدند (Mahini and Clarke, 2012). در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ به ترتیب نقشه‌های تاریخی شهری، کاربری اراضی، شبکه حمل و نقل، مناطق مستثنی از توسعه، شیب و سایه روشن پستی و بلندی‌ها نشان داده شده‌اند.

#### تست مدل

به منظور بررسی درستی نصب، اطمینان از تنظیمات لایه‌ها و اجرای مدل، فایل سناریو تست تعریف شده و سپس این آزمون انجام شد.

### کالیبراسیون مدل

ضرایب پنجگانه مدل SLEUTH در مرحله کالیبراسیون و بر روی نقشه‌های تاریخی محاسبه می‌شوند. در واقع مدل در فرآیند کالیبراسیون، با توجه به سال‌های کنترل به شبیه‌سازی رشد شهر در تمام چرخه‌های رشد می‌پردازد. در مدل SLEUTH-3R، ضریب ضریب پنخس<sup>۳۳</sup> (DM)، یک عدد ثابت نیست و به کاربر این امکان داده شده است که مقدار این ضریب را به صورت تعاملی تغییر دهد. این

طبقه‌بندی نظارت شده حداکثر احتمال به کلاس‌های متفاوت طبقه‌بندی شده و پس از ارزیابی صحت طبقه‌بندی، طبقه شهر جدا شده و به عنوان نقشه تاریخی شهری در نظر گرفته شد (Dadashpoor et al., 2019).

### اعتبارسنجی نقشه‌های شهری

یکی از مراحل مهم پس از طبقه‌بندی تصاویر، ارزیابی و اعتبارسنجی آن است. تجزیه و تحلیل برخورد و خطا در جدول توافقی به منظور اعتبارسنجی عملکرد مدل‌ها و طبقه‌بندی‌ها استفاده می‌شود؛ به این منظور در این مطالعه، از دو آماره خطا، شامل صحت<sup>۱۷</sup> (Accuracy) و دقت<sup>۱۸</sup> (Precision)، استفاده شد. نحوه محاسبه این آماره‌ها با استفاده از رابطه‌های ۱ تا ۲ نشان داده شده است.

$$\text{رابطه ۱: Accuracy} = \frac{H+CN}{H+FA+M+CN}$$

$$\text{رابطه ۲: Precision} = \frac{H}{H+FA}$$

در این رابطه‌ها برخوردها یا مثبت‌های درست<sup>۱۹</sup>، هشدار نادرست یا مثبت‌های نادرست<sup>۲۰</sup>، خطاها یا منفی‌های نادرست<sup>۲۱</sup> و منفی‌های درست<sup>۲۲</sup> در جدول توافقی به ترتیب H, FA, M و CN هستند (Anand, 2017). این شاخص‌ها با استفاده از تجزیه و تحلیل برخورد و خطا از طریق یک جدول توافقی محاسبه می‌شوند. جدول توافقی یک ماتریس شامل احتمالات طبقه‌بندی‌های درست و نادرست داده‌ها است.

### تهیه نقشه‌های تاریخی کاربری اراضی

نقشه‌های کاربری اراضی در دو دوره زمانی ۱۹۸۴ و ۲۰۱۹ و در پنج کلاس، (۱) شهر، (۲) صنعت، (۳) اراضی بایر، (۴) پوشش گیاهی و (۵) پیکره‌های آبی تهیه شدند.

### تهیه نقشه‌های شبکه حمل و نقل

نقشه‌های شبکه حمل و نقل در دو دوره زمانی ۱۹۸۴ و ۲۰۱۹، از نقشه‌ی کاربری اراضی سال متناظر استخراج شده

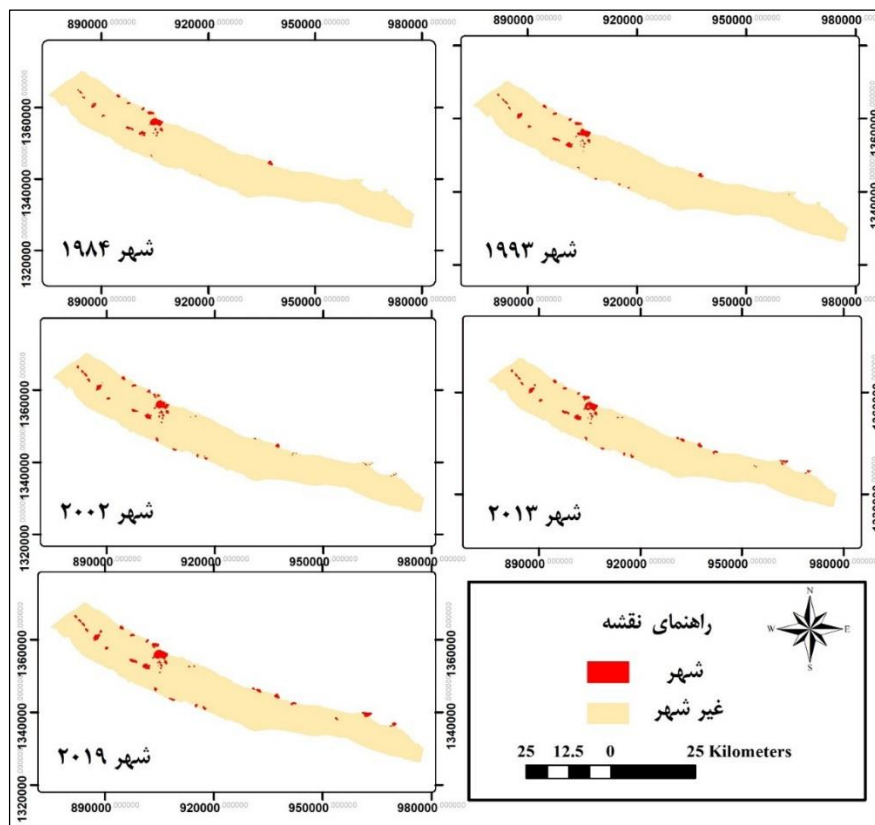
### اعتبار سنجی پیش‌بینی

در این فرآیند، ابتدا مدل با نقشه تاریخی شهر در سال ۲۰۱۳، به منظور بدست آوردن نقشه آینده شهر در سال ۲۰۱۹ اجرا شد. در این حالت، می‌توان دقت پیش‌بینی مدل را نسبت به نقشه شهری مشاهداتی در سال ۲۰۱۹ با روش‌های متفاوت ارزیابی نمود. در این مطالعه، میزان دقت مدل در پیش‌بینی، (۱) به صورت الگوی فضایی (مقایسه نقشه شهری پیش‌بینی شده در سال ۲۰۱۹ با نقشه شهری مشاهداتی در سال ۲۰۱۹)، (۲) مقایسه مقدار مساحت‌های این دو نقشه و (۳) برازش این دو نقشه با استفاده از ضریب کاپا، بررسی و محاسبه شد (Eslahi, 2017).

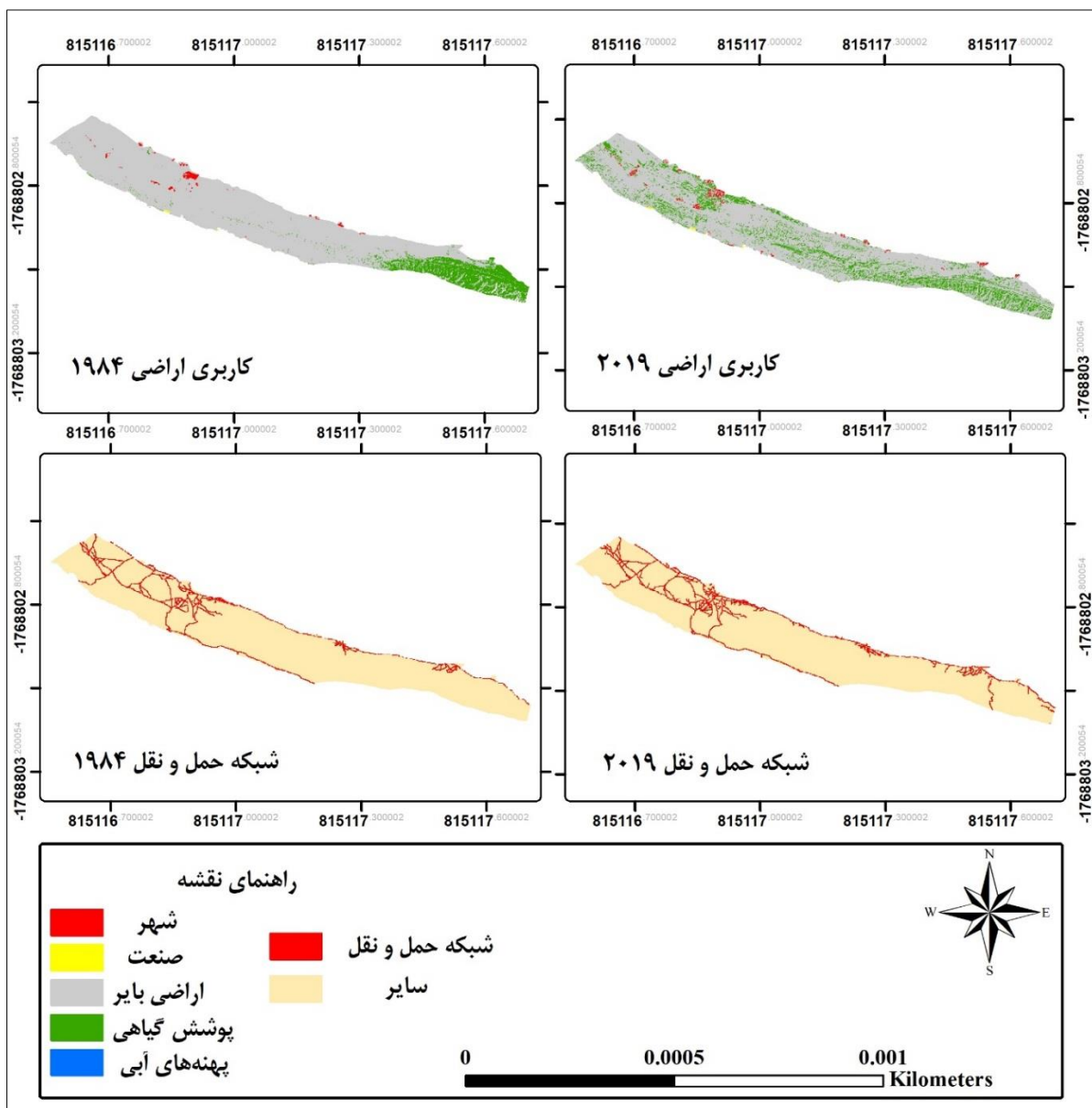
### پیش‌بینی

با اطمینان از دقت پیش‌بینی مدل در مرحله قبل، مدل با نقشه تاریخی شهری در سال ۲۰۱۹ به عنوان سال شروع پیش‌بینی، به منظور بدست آوردن نقشه شهری در سال ۲۰۵۰ اجرا شد.

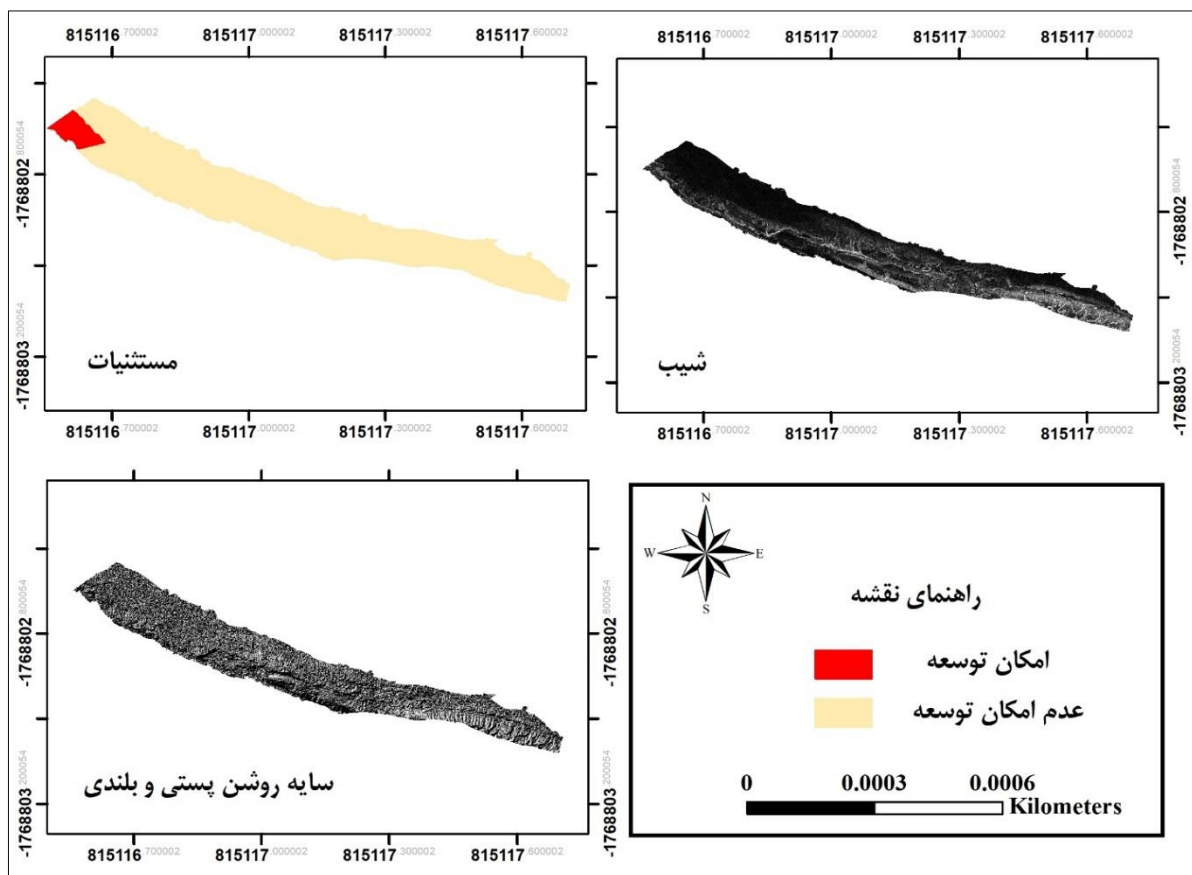
ضریب با استفاده از نقشه‌های ورودی مدل با اندازه سلول ۳۰ متر، در یک مرحله کالیبراسیون درشت بدست آمد. سپس، یک مرحله کالیبراسیون درشت دیگر با استفاده از روش Brute Force و به تعداد ۱۰ مونت کارلو در مدت زمان ۶۰ ساعت انجام شد. در این مرحله، مقادیر هر پنج ضریب، در فاز شروع عدد ۰ و در فاز پایان عدد ۱۰۰ با گام‌های بزرگ افزایشی ۲۵ تنظیم شدند. در نسخه SLEUTH-3R از دو سنجه اختلاف کسری خوشه‌ها<sup>۲۴</sup> (CFD) و اختلاف کسری پیکسل‌ها<sup>۲۵</sup> (AFD) برای یافتن مناسب‌ترین ضرایب استفاده می‌شود. در حقیقت دقت این سنجه‌ها تضمین می‌کند که مدل می‌تواند بر اساس داده‌های تاریخی، شکل رشد شهری را شبیه‌سازی کرده و مقدار کلی توسعه شبیه‌سازی شده با داده‌های تاریخی مطابقت دارد (Jantz et al., 2010). در گام آخر، اجرای دیگری با تنظیم ۱۰۰ مونت کارلو با عنوان مرحله میانگین‌گیری از ضرایب انجام شد (Jants et al., 2014). است. ضرایب بدست آمده در این مرحله، در فرآیند پیش‌بینی مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل ۲. نقشه‌های تاریخی شهری، ناحیه ساحلی پاریسیان



شکل ۳. نقشه‌های تاریخی کاربری اراضی و شبکه حمل و نقل، ناحیه ساحلی پاریسیان



شکل ۴. نقشه‌های مناطق مستثنی از توسعه، شیب و سایه روشن پستی و بلندی، ناحیه ساحلی پارسیان

### نتایج

#### نتایج اعتبارسنجی نقشه‌های شهری

جدول ۲. نتایج اعتبارسنجی نقشه‌های شهری، ناحیه ساحلی پارسیان

۲۰۱۹	۲۰۱۳	۲۰۰۲	۱۹۹۳	۱۹۸۴	آماره‌های خطا
%۹۹	%۹۸	%۹۹	%۹۹	%۹۹	Accuracy
۱	۱	۱	۱	۱	Precision

(منبع: یافته‌های پژوهش)

#### نتایج شبیه‌سازی رشد شهرها

در جدول ۳ مقدار (DM) بدست آمده برای ناحیه ساحلی پارسیان ارائه شده است. مقدار  $0/00079$  بدست آمده، کمترین مقدار ممکن برای این سنجه بوده که موجب شکل‌گیری الگوی رشد پراکنده مناسب در این منطقه شده است.

همانگونه که در جدول ۲ نشان داده شده است، صحت نقشه‌های شهری تولید شده در سال‌های ۱۹۸۴، ۱۹۹۳، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۹ برابر با ۹۹ درصد و در سال ۲۰۱۳ برابر با ۹۸ درصد است. همچنین میزان دقت این نقشه‌ها نیز در تمام سال‌ها برابر با یک است. بنابراین مقدار هر دو آماره نشان دهنده صحت و دقت بسیار زیاد نقشه‌های شهری تاریخی تولید شده است.

خوشه‌ها و مساحت شهری مدل‌سازی به مشاهداتی در کمترین مقدار است. همچنین در ضرایب پنجگانه مستخرج از این بخش، ضریب مقاومت به شیب برابر با ۷۵، زایش برابر با ۵۰ و پخش برابر با ۲۵ بوده و دو ضریب گسترش و جاذبه جاده دارای مقدار ۱ هستند که با اعمال مرحله میانگین‌گیری، در کنار تعدیل سایر ضرایب این دو ضریب نیز اصلاح شده‌اند (Jants et al., 2014).

جدول ۳. مقدار DM بدست آمده، ناحیه ساحلی پارسیان

DM	
Dispersion Coefficient Multiplier	۰/۰۰۰۷۹

(منبع: یافته‌های پژوهش)

در جداول ۴ و ۵ مناسب‌ترین ضرایب که از فرآیند کالیبراسیون و سپس میانگین‌گیری بدست آمده‌اند، ارائه شده است. با توجه به جدول ۴، مقدار AFD و CFD در حدود ۰/۱ به این معنی است که نسبت اختلاف کسری

جدول ۴. ضرایب منتخب در مرحله کالیبراسیون

CFD	AFD	جاذبه جاده	مقاومت به شیب	گسترش	زایش	پخش
-۰/۱۰۸	-۰/۱۹۶	۱	۷۵	۱	۵۰	۲۵

(منبع: یافته‌های پژوهش)

جدول ۵. مناسب‌ترین ضرایب حاصل از فرآیند کالیبراسیون (میانگین‌گیری)

ضرایب						
میانگین‌گیری	پخش	زایش	گسترش	مقاومت به شیب	جاذبه جاده	
	۲۵	۵۰	۲۵	۷۹	۵۰	

(منبع: یافته‌های پژوهش)

### نتایج اعتبار سنجی پیش‌بینی

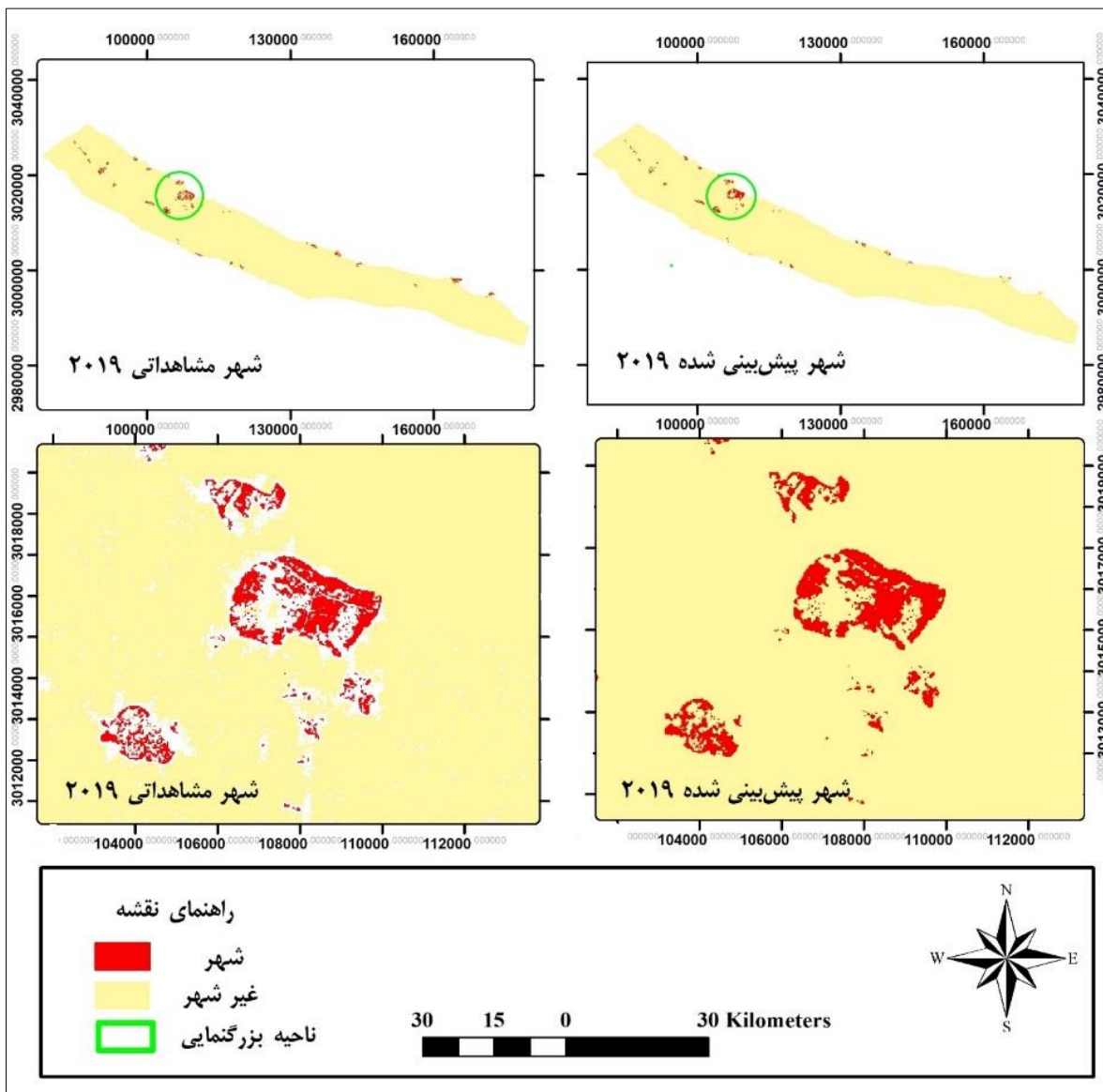
همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، نتایج حاصل از مقایسه الگوی فضایی (مقایسه نقشه شهری پیش‌بینی شده با نقشه شهری مشاهداتی در سال ۲۰۱۹)، نشان‌دهنده دقت مناسب مدل در پیش‌بینی است. همچنین مقایسه مساحت‌های این دو نقشه (مساحت شهر مشاهداتی در سال ۲۰۱۹ در حدود ۱۲۰۰ هکتار و مساحت شهر پیش‌بینی شده در سال ۲۰۱۹ در حدود ۱۰۴۰ هکتار) نشان داد که مدل به خوبی می‌تواند رشد شهری را در آینده پیش‌بینی کند. از سوی دیگر، بر اساس جدول ۶، متفاوت آماره کاپا، حاصل برازش این دو نقشه، نشان می‌دهد که فرآیند پیش‌بینی رشد شهری با دقت و صحت بسیار زیاد (۰/۹۹) انجام شده است (Eslahi, 2017).

در جدول ۵ مقادیر نهایی و مناسب‌ترین ضرایب بدست آمده از مرحله کالیبراسیون که نحوه رشد تاریخی شهری را نشان داده و در مرحله پیش‌بینی توسعه آینده شهری منطقه مطالعاتی مورد استفاده قرار گرفتند، ارائه شده است. ضریب پخش ۲۵ در این منطقه نشان دهنده احتمال کم شکل‌گیری خوشه‌های پراکنده شهر در خارج از کانون‌های اصلی شهری است، با توجه به مقدار ۵۰ ضریب زایش، در حدود نیمی از رشد شهر از طریق ایجاد کانون‌های توسعه درون شهری خواهد بود، مقدار ۲۵ ضریب گسترش به این معنی است که احتمال رشد شهر از طریق حاشیه‌های آن اندک است. همچنین با توجه به ضریب جاذبه جاده برابر با ۵۰، رابطه رشد شهر با شبکه حمل و نقل یک رابطه خطی بوده و ضریب مقاومت به شیب برابر با ۷۹ نشان می‌دهد که اثر شیب و پستی و بلندی‌های منطقه بر رشد شهرها زیاد است (Sakieh et al., 2015).

جدول ۶. نتایج برآورد دقت پیش‌بینی مدل SLEUTH-3R

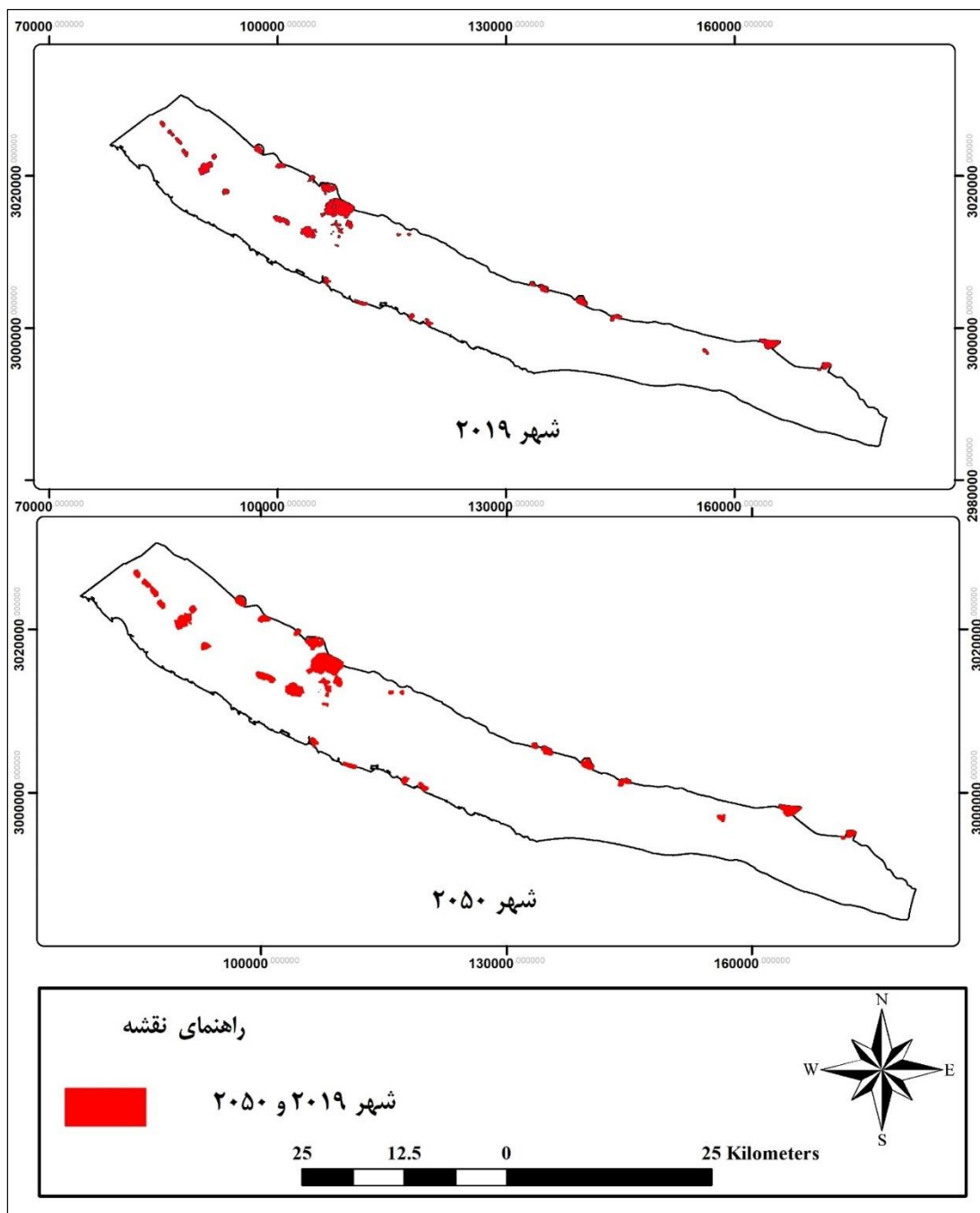
مقادیر آماره Kappa			
Kno	Klocation	KlocationStrata	Kstandard
۰/۹۹	۰/۶	۰/۶	۰/۵۶

(منبع: یافته‌های پژوهش)



شکل ۵. مقایسه الگوی فضایی نقشه شهری پیش‌بینی شده با نقشه شهری مشاهداتی در سال ۲۰۱۹، ناحیه ساحلی پارسیان





شکل ۶. نتایج پیش‌بینی رشد شهری در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۵۰، ناحیه ساحلی پارسیان

نتایج پیش‌بینی رشد آینده شهری در سال ۲۰۵۰

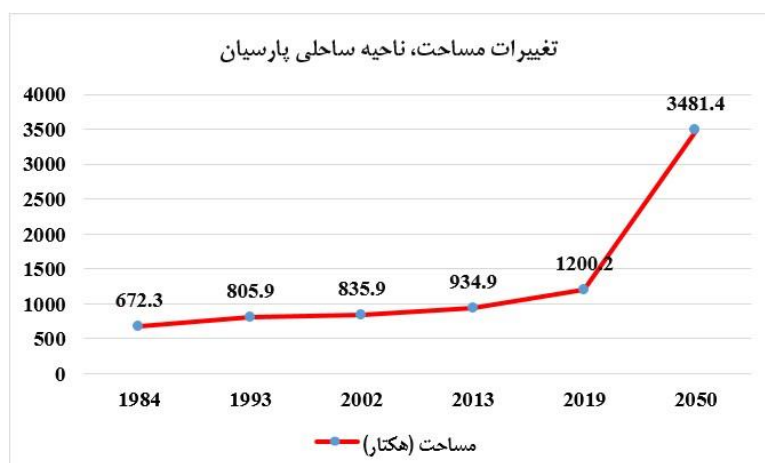
جدول ۷. نتایج پیش‌بینی رشد آینده شهری در سال ۲۰۵۰

نتایج رشد شهر در سال ۲۰۵۰			
مساحت شهر در سال ۲۰۱۹ (Ha)	نرخ رشد شهر	مساحت افزایش یافته شهری (Ha)	مساحت شهر در سال ۲۰۵۰ (Ha)
۱۲۰۰/۲	۷۳/۵۸	۲۲۸۱/۲	۳۴۸۱/۴

(منبع: یافته‌های پژوهش)

۲۲۸۱/۲ هکتار بوده و به حدود ۳۴۸۱/۴ هکتار خواهند رسید که نشان‌دهنده توسعه سریع و وسیع لکه‌های سکونت‌گاهی در این منطقه است. در شکل ۶ نتایج پیش‌بینی رشد شهری در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۵۰ ارائه شده است.

همانگونه که در جدول ۷ نشان داده شده است، در ناحیه ساحلی پارسیان از سال ۲۰۱۹ تا سال ۲۰۵۰، نرخ رشد شهری بسیار زیاد و برابر با ۷۳/۵۸ است. در طی این ۳۱ سال مساحت مناطق شهری دارای افزایشی در حدود



شکل ۷. نمودار تغییرات مساحت در دوره شبیه‌سازی و پیش‌بینی، ناحیه ساحلی پارسیان

جدول ۸ احتمال تبدیل سایر کاربری‌های موجود در منطقه را به کاربری شهری ارائه می‌دهد. بر این اساس، در دوره زمانی ۳۱ ساله، پتانسیل تبدیل کاربری‌ها در این منطقه به گونه‌ای است که در حدود ۴۷/۱۴ درصد از مساحت اراضی بایر به کاربری شهری تبدیل خواهد شد. این نتیجه با ضریب ۵۰ زایش (رشد شهر از طریق لکه‌های اراضی بایر درون شهری) و ضریب ۵۰ جاذبه جاده که منجر به تبدیل اراضی بایر حاشیه جاده‌ها به مناطق مسکونی می‌شود، مطابقت دارد. همچنین ۴/۹۶ درصد از مساحت پوشش گیاهی به اراضی شهری تبدیل خواهد شد که نشان‌دهنده تبدیل پوشش گیاهی درون شهری به اماکن مسکونی است.

در شکل ۷ نمودار تغییرات مساحت لکه‌های سکونت‌گاهی طی ۶۶ سال، نشان می‌دهد که مساحت شهری در سال ۱۹۸۴ (۶۷۲ هکتار)، در سال ۱۹۹۳ (۸۰۶ هکتار)، در سال ۲۰۰۲ (۸۳۶ هکتار)، در سال ۲۰۱۳ (۹۳۵ هکتار) و در سال ۲۰۱۹ (۱۲۰۰ هکتار) بوده و سرانجام در سال ۲۰۵۰ به ۳۴۸۱ هکتار خواهد رسید. روند این تغییرات، گویای این نکته است که رشد شهری از سال ۱۹۸۴ تا سال ۲۰۱۹، با شیب ملایم افزایش یافته، در حالیکه از سال ۲۰۱۹ تا سال ۲۰۵۰، به دلیل تغییرات زیاد جمعیت و در پی آن توسعه سریع سکونت‌گاه‌های انسانی، شیب توسعه شهری بسیار تند شده و با افزایش ناگهانی مواجه خواهد شد.

جدول ۸. احتمال انتقال کاربری‌ها، ناحیه ساحلی پارسیان

آب	پوشش گیاهی	بایر	صنعت	شهر	بدون طبقه	طبقات
.	۰/۱۶	۰/۰۴	.	.	۹۹/۸	بدون طبقه
.	۴/۹۶	۴۷/۱۴	.	۴۷/۹۱	.	شهر
.	.	.	۱۰۰	.	.	صنعت
۰/۰۱	۱۴/۹۱	۸۴/۱۵	۰/۰۷	۰/۸۵	۰/۰۲	بایر
۰/۰۱	۴۴/۰۵	۵۵/۶۸	.	۰/۲۵	۰/۰۱	پوشش گیاهی
.	.	.	.	.	.	آب

(منبع: یافته‌های پژوهش)

Agyemang و همکاران (۲۰۱۹)، Li و همکاران (۲۰۱۸)، Martellozzo و همکاران (۲۰۱۸) یکسان است. همچنین این پژوهش در یکی از نواحی ساحلی کشور انجام شده است و با مناطق مطالعاتی مورد بررسی در مطالعات Salmanmahiny و Karimi (۲۰۱۱)، Mahini و Gholamalifard (۲۰۰۷)، مومنی (۱۳۸۹)، رفیعی (۱۳۸۶)، رسولی و همکاران (۱۳۹۵)، جعفرنژاد و ماهینی (۱۳۹۴)، Sakieh و همکاران (۲۰۱۵)، Bihamta و همکاران (۲۰۱۵)، Mahiny و Clarke (۲۰۱۳) و Dadashpoor و همکاران (۲۰۱۹) متفاوت است.

کالیبراسیون مدل نشان می‌دهد که مهمترین نیروی محرکه رشد شهری در منطقه مورد مطالعه ضرایب مقاومت به شیب، جاذبه جاده و زایش هستند. به نحوی که رشد شهری بیشتر از طریق توسعه اراضی رها شده‌ی درون شهری و همچنین در حاشیه‌ها، تحت تاثیر شبکه حمل و نقل صورت می‌گیرد، اما این توسعه تا حد زیادی متأثر از ویژگی‌های توپوگرافی منطقه کنترل می‌شود. ضرایب دیگر شامل ضریب پخش و گسترش، نقش کمتری در روند کلی رشد شهری دارند، به این معنی که توسعه خوشه‌های جدید شهری در مناطقی که زیرساخت‌های شهرسازی وجود ندارد، با احتمال کمتری رخ خواهد داد و رشد شهر توسط عوامل طبیعی مانند شیب، ارتفاع و عوامل انسان ساخت همچون جاده‌ها تنظیم می‌شود. با در نظر گرفتن سایر کاربردهای مدل SLEUTH در ایران (مشهد، گرگان، علی‌آباد، اصفهان، تبریز و کرج) می‌توان گفت که ضرایب تعیین کننده انواع الگوهای رشد شهری در این مطالعات دارای مقادیر متفاوتی هستند که این امر به علت قابلیت زیاد مدل‌سازی SLEUTH در مناطق مختلف بوده و موجب شده است که مقادیر این ضرایب، منعکس کننده خصوصیات محلی منطقه مورد مطالعه باشند. اما بطور مشخص، میزان و درجه اهمیت ضرایب بدست آمده در این مطالعه، نتایج مطالعات رفیعی (۱۳۸۶)، رسولی و همکاران (۱۳۹۵) و Sakieh و همکاران (۲۰۱۵) را تایید می‌کنند. در

## بحث و نتیجه‌گیری

گسترش شهری به عنوان یکی از مهمترین چالش‌های جهانی، پدیده‌ای پیچیده است که عمدتاً به دلیل افزایش جمعیت و در نتیجه نیاز به ساخت و ساز بیشتر رخ می‌دهد. این فرآیند، همواره با تغییرات گسترده محیطی همراه بوده و در اثر آن اراضی وسیع و ارزشمندی از اکوسیستم‌های جنگلی و مرتعی به سطوح شهری و غیر قابل نفوذ تبدیل خواهند شد (Sakieh et al., 2015). با توجه به اصول ۱۱ و ۱۲ توسعه پایدار در راستای ساختن شهرها و سکونت‌گاه‌های فراگیر، ایمن، تاب آور و پایدار و تضمین الگوی مصرف و تولید پایدار، که توسط سازمان ملل متحد ارائه شده است، برنامه‌ریزی سرزمین پیش از اجرا و مدیریت و پایش این تغییرات در زمان اجرا، امری ضروری و اجتناب ناپذیر است. از این رو مطالعه حاضر با هدف شناخت الگوهای رشد تاریخی و پیش‌بینی بلند مدت توسعه شهری و تغییرات کاربری اراضی در ناحیه ساحلی پارسیان، به عنوان بخش وسیعی از شهرستان پارسیان انجام شد. اهمیت سرزمین‌های ساحلی، وجود بخشی از پارک ملی نایبند با گونه‌ها و زیستگاه‌های ویژه در بخش کوشکنار این منطقه، که متأسفانه امروزه در معرض انواع توسعه صنعتی- انسانی، مهاجرت مردم و در نتیجه تخریب بیشتر قرار گرفته است (زارعی و موذنی، ۱۳۹۰)، ضرورت این شناخت را دو چندان می‌کند. بنابراین، شناسایی و پیش‌بینی این تغییرات کمک شایانی به طراحان و برنامه‌ریزان سرزمین در جهت استفاده مناسب از منابع طبیعی، کاهش آسیب‌های محیط زیستی و دستیابی به توسعه پایدار خواهد نمود.

این مطالعه با استفاده از مدل SLEUTH-3R که نسخه بهبود یافته مدل SLEUTH (یکی از انواع مدل‌های سلول‌های خودکار) است، انجام شد. بنابراین این پژوهش از نظر شیوه اجرا و نوع مدل مورد استفاده، با تمام مطالعات انجام شده در کشور متفاوت بوده اما با مطالعات انجام شده در خارج از کشور، توسط Saxena و jat (۲۰۱۹)، (۲۰۲۰)،

رسولی و همکاران (۱۳۹۵)، Sakieh و همکاران (۲۰۱۵)، Agyemang و همکاران (۲۰۱۹) و Li و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت داشته و با نتایج مطالعات Mahini و Gholamalifard (۲۰۰۷)، جعفرنژاد و ماهینی (۱۳۹۴)، Bihamta و همکاران (۲۰۱۵)، Dadashpoor و همکاران (۲۰۱۹)، Mahini و Clarke (۲۰۱۳) و Saxena و Jat (۲۰۱۹)، (۲۰۲۰)، (۲۰۲۰)، مغایرت دارد. همچنین مقدار ضریب پخش موید این نکته است که توسعه خوشه‌های پراکنده شهری در این منطقه با احتمال کمتری رخ داده و این امر نیاز به برنامه‌ریزی‌های جدید شهری را کمتر می‌کند. این موضوع با یافته‌های پژوهش‌های Mahini و Gholamalifard (۲۰۰۷)، رفیعی (۱۳۸۶)، رسولی و همکاران (۱۳۹۵)، جعفرنژاد و ماهینی (۱۳۹۴)، Sakieh و همکاران (۲۰۱۵)، Bihamta و همکاران (۲۰۱۵)، Dadashpoor و همکاران (۲۰۱۹)، Saxena و Jat (۲۰۱۹)، (۲۰۲۰) و Li و همکاران (۲۰۱۸)، سازگار بوده و نشان می‌دهد الگوی رشد خودبخودی با ضریب اهمیت کمتر در ایجاد شهرها نقش داشته و عمدتاً توسعه شهری متأثر از عواملی چون شبکه حمل و نقل، رودخانه، ارتفاع و شیب صورت می‌گیرد.

از سوی دیگر مقدار ضریب گسترش در این منطقه به این معنی است که رشد شهری از طریق توسعه حاشیه‌های آن با احتمال کم و برابر با رشد خودبخودی صورت می‌گیرد. این مورد نیز نیاز به ایجاد زیر ساخت‌های شهری را کمتر نموده و موجب حفاظت از اراضی و منابع بیشتری درحاشیه‌های شهرها خواهد شد. مطالعات Mahini و Gholamalifard (۲۰۰۷)، رسولی و همکاران (۱۳۹۵)، جعفرنژاد و ماهینی (۱۳۹۴) و Saxena و Jat (۲۰۱۹) و (۲۰۲۰) این نتیجه را تایید می‌کنند.

به عنوان نتیجه‌گیری کلی، توسعه شهری در این منطقه بیشتر از اراضی بدون استفاده درونی شهرها که به صورت لکه‌ای باقی مانده‌اند صورت خواهد گرفت. ایجاد لکه‌های پراکنده شهری و رشد ناشی از حاشیه‌های شهر با نسبت

این منطقه ویژگی‌های توپوگرافی و اقلیمی (اقلیم گرم و خشک)، موجب شده است که شهرها به منظور تامین آب مورد نیاز، عمدتاً در کوهپایه‌ها توسعه یافته و در نتیجه مهمترین عوامل کنترل‌کننده توسعه شهری به‌ویژه در بخش‌های شمالی منطقه، شیب و ارتفاع هستند. در این خصوص، یافته‌های این مطالعه با پژوهش‌های رسولی و همکاران (۱۳۹۵)، جعفرنژاد و ماهینی (۱۳۹۴)، Sakieh و همکاران (۲۰۱۵)، Bihamta و همکاران (۲۰۱۵) و Saxena و Jat (۲۰۱۹)، (۲۰۲۰)، مطابقت دارد. اما با یافته‌های مطالعات Mahini و Gholamalifard (۲۰۰۷)، رفیعی (۱۳۸۶)، Sakieh و همکاران (۲۰۱۵)، Dadashpoor و همکاران (۲۰۱۹)، Mahini و Clarke (۲۰۱۳) و Agyemang و همکاران (۲۰۱۹) و Li و همکاران (۲۰۱۸) مغایرت دارد. از سوی دیگر رشد شهری در این منطقه با توسعه جاده‌ها و راه‌ها دارای رابطه‌ای خطی بوده و بخشی از توسعه شهری در حاشیه شبکه حمل و نقل صورت می‌گیرد. بنابراین ساخت شبکه‌های حمل و نقل و امکانات زیرساختی در این منطقه در ایجاد شهرک‌های جدید موثر خواهد بود. این نتیجه نیز با مطالعات Mahini و Gholamalifard (۲۰۰۷)، رفیعی (۱۳۸۶)، رسولی و همکاران (۱۳۹۵) و Sakieh و همکاران (۲۰۱۵) سازگار بوده و به طور مشخص از نظر خطی بودن رابطه رشد شهری با شبکه راه‌ها با مطالعات Dadashpoor و همکاران (۲۰۱۹)، Mahini و Clarke (۲۰۱۳) و Bihamta و همکاران (۲۰۱۵)، Saxena و Jat (۲۰۱۹)، (۲۰۲۰) و Agyemang و همکاران (۲۰۱۹) منطبق است که نشان‌دهنده اثر زیاد شبکه حمل و نقل بر توسعه شهرها است. در میان الگوهای رشد، با توجه به مقدار ضریب زایش، رشد سکونتگاه‌های این منطقه بیشتر از طریق توسعه لکه‌های رها شدهی درون شهری رخ می‌دهد. این مساله نیاز به استفاده از اراضی ارزشمند حاشیهی شهرها و ایجاد زیرساخت‌های شهری را کمتر نموده و موجب حفاظت از منابع طبیعی خواهد شد. این یافته با مطالعات انجام شده توسط رفیعی (۱۳۸۶)،

دقت زمانی در پیش‌بینی رشد شهری تا حد زیادی به دامنه تاریخ پیش‌بینی بستگی دارد. در این مطالعه دوره زمانی پیش‌بینی ۵۰ ساله، عمدتاً به دلایل زیر در نظر گرفته شد:

- عملکرد مناسب قوانین و ضرایب رشد مدل SLEUTH در تشخیص زمین‌های مناسب اما نامشخص برای شهرنشینی که رهنمودهای جامعی را در ارتباط با جهت‌گیری‌های پایدار آینده یک شهر فراهم می‌کنند (Mahini and Clarke, 2012, 2013).

- انجام مطالعات با دوره زمانی مشابه با این مطالعه، مانند Bihanta و همکاران (۲۰۱۵) و Salmanmahiny و Karimi (۲۰۱۱) با استفاده از مدل SLEUTH و قوانین رشد بدست آمده، نشان می‌دهد که این مدل قادر است، در مناطق شهری مختلف و با تغییرات زیاد، به درستی عمل کند (Sakieh et al., 2015).

با توجه به این که مدل SLEUTH، از عوامل فیزیکی دنیای واقعی که دارای تغییرات اندکی هستند، مانند ویژگی‌های توپوگرافی زمین و زیرساخت‌های مهم اقتصادی-اجتماعی همچون شبکه حمل و نقل به عنوان داده‌های ورودی استفاده می‌کند، توصیه می‌شود در مناطقی که اطلاعات اقتصادی-اجتماعی به طور گسترده در دسترس نبوده و به نتایج دقیق از پیش‌بینی نیاز است، از این مدل استفاده شود. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد این مدل در مقایسه با سایر مدل‌های رشد شهری به داده‌های ورودی کمتری نیاز دارد، با این وجود، امکان ایجاد و بررسی سناریوهای متنوع و منعطف رشد را فراهم می‌کند. این ویژگی‌های موجب شده است که مدل SLEUTH به عنوان پرکاربردترین روش شبیه‌سازی کاربری اراضی در مقیاس‌های منطقه‌ای، ملی و حتی فرا ملی شناخته شود. (Maithani 2010; Chaudhuri and Clarke 2012; Norman et al. 2009, 2012; Sakieh et al., 2015). با توجه به اینکه توسعه شهری فرآیندی پیچیده بوده و به عوامل متعدد و مختلفی وابسته است، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده به منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی دقیق‌تر از

کمتر در شکل‌گیری سکونت‌گاه‌های این منطقه نقش خواهند داشت. همچنین دو عامل تنظیم‌کننده رشد شهری منطقه، توپوگرافی و شبکه حمل و نقل هستند. با حفظ روند رشد تاریخی، مساحت مناطق شهری از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۵۰، از ۱۲۰۰ هکتار به ۳۴۸۱ هکتار افزایش خواهد یافت که معادل نرخ رشد ۷۳/۵۸ و برابر با ۲۲۸۱ هکتار خواهد بود. بررسی روند تغییرات مساحت لکه‌های سکونت‌گاهی طی ۶۶ سال نیز حاکی از این توسعه شتاب‌گونه از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۵۰ به علت افزایش جمعیت است. احتمال تبدیل سایر کاربری‌ها به شهر نیز موید همین الگوی رشد است، به گونه‌ایی که در حدود ۴۷ درصد از مساحت اراضی بایر به کاربری شهری تبدیل خواهد شد. این جهش سریع از یک سو نشان‌دهنده افزایش قدرت توسعه انسانی است و از سوی دیگر برای مدیران و برنامه‌ریزان سرزمین به عنوان سند و چشم‌اندازی است، که با استفاده از آن میزان و جهت رشد شهری منطقه را در آینده بلند مدت، متناسب با ظرفیت‌های محیط زیستی و نیازهای جمعیتی آن تعدیل کنند، چرا که این رشد شتاب‌گونه قطعاً با تخریب و آسیب بسیار به سرزمین همراه خواهد بود. بنابراین با توجه به اینکه در ناحیه ساحلی پارسیان، لکه‌های سکونت‌گاهی در قالب شهر و روستا، کوچک و پراکنده هستند، و با در نظر گرفتن اقلیم گرم و خشک منطقه که تامین منابع مورد نیاز را دشوارتر می‌کند، توصیه می‌شود در برنامه‌های آتی، از ایجاد خوشه‌های شهری جدید و پراکنده که موجب تبدیل اراضی و مصرف منابع بیشتر خواهند شد، ممانعت شود. توصیه می‌شود، توسعه شهرهای این منطقه در مرحله اول، مطابق الگوی رشد تاریخی بدست آمده، از اراضی بدون استفاده درون شهری که مجهز به زیرساخت شهری هستند، صورت گرفته و در صورت لزوم، در کنار شبکه راه‌ها و یا از حاشیه‌های شهرها انجام شود. این جهت‌گیری در کنار تامین پایدار نیاز ساکنین شهرها، موجب تعدیل آثار سوء توسعه بر اکوسیستم‌های منطقه در افق ۲۰۵۰ خواهد شد. با توجه به مطالعات Chaudhuri و Clarke (۲۰۱۳)،

## یادداشت‌ها

1. Geographic Information System
2. Cellular Automata
3. Agents
4. Fractal
5. Slope
6. Land Cover
7. Exclusion
8. Urban Area
9. Transportation
10. Hillshade
11. United States Geological Survey
12. Thematic Mapper
13. The Operational Land Imager
14. Global Positioning System
15. Quick Atmospheric Correction
16. Graphics Interchange Format
17. Accuracy
18. Precision
19. Hits or True Positive
20. False Alarms/False Positive
21. Misses/False Negative
22. Correct Negative/True Negative
23. Dispersion Coefficient Multiplier
24. Cluster Fractional Differences
25. Area Fractional Differences

رشد شهری در ناحیه ساحلی پارسیان و در نظر گرفتن عوامل متعدد در مدل‌سازی، سناریوهای مختلف محیط زیستی، اقتصادی و اجتماعی تنظیم و آزمون شوند. همچنین در آخر توصیه می‌شود در مطالعات آینده، به منظور حصول نتایج دقیق‌تر و درست‌تر از مکانیسم رشد تاریخی و نیز سناریوهای پیش‌بینی رشد شهری در دنیای واقعی، به استفاده از قوانین خوداصلاحی مدل SLEUTH بیشتر توجه شود.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوریان کشور به منظور تامین منابع مالی این پژوهش و تمام متخصصین و داورانی که با ارائه نظرات ارزشمند خود، موجب بهبود و ارتقا کیفیت آن شده‌اند، کمال تشکر را دارند.

## فهرست منابع

- جعفرنژاد، ج؛ عبدالرسول، س. م. (۱۳۹۴). مدل‌سازی روند توسعه شهری با استفاده از مدل SLEUTH، جهت مدیریت منابع آبی و توسعه پایدار در منطقه (مورد مطالعاتی شهرستان آزادشهر). همایش ملی آب، انسان و زمین.
- رسولی، م؛ سلمان‌ماهینی، ع؛ کامیاب، ح. ر. (۱۳۹۵). تعیین ضرایب مؤثر بر رشد شهری در مدل SLEUTH برای شهرستان‌های علی‌آباد، رامیان و آزادشهر. *آمایش جغرافیایی فضا*، ۲۱(۶)، ۱-۱۲.
- رفیعی، ر. (۱۳۸۶). مکان‌یابی ایستگاه‌های انتقال پسماند جامد شهری با توجه به روند رشد شهر (مطالعه موردی: شهر مشهد). دانشگاه تهران
- زارعی، ر؛ آل‌شیخ، ع. ا. (۱۳۹۱). مدل‌سازی توسعه شهری با استفاده از اتوماسیون سلولی و الگوریتم ژنتیک (منطقه مورد مطالعه: شهر شیراز). *پژوهش و برنامه‌ریزی شهری*، ۳(۱۱)، ۱-۱۶.
- زارعی، م؛ مودنی، م. (۱۳۹۰). بررسی عوامل مخرب برپارک ملی دریایی نایبند تحت تاثیر فشارناشی از توسعه منطقه. همایش منطقه‌ای جنگل‌ها و محیط زیست ضامن توسعه پایدار.
- سالنامه آماری استان هرمزگان، (۱۳۹۷). سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان هرمزگان.
- ساکیه، ی. (۱۳۹۴). تعیین محورهای توسعه پایدار شهر کرج بر اساس شبیه‌سازی توسعه شهر و توان محیط زیست، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- علوی پناه، س، ک. (۱۳۸۴). کاربرد سنجش از دور در علوم زمین، انتشارات دانشگاه تهران.

- کامیاب، ح؛ سلمان ماهینی، ع؛ حسینی، س؛ غلامعلی فرد، م. (۱۳۹۰). کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در مدل‌سازی توسعه شهری (مطالعه موردی: شهر گرگان). *پژوهش‌های جغرافیای انسانی (پژوهش‌های جغرافیایی)*، ۴۳(۷۶)، ۹۹-۱۱۳.
- کامیاب، ح؛ سلمان ماهینی، ع. (۱۳۹۷). *مقدمه‌ایی بر مدل‌سازی توسعه شهری و کاربردهای آن* (چاپ اول). دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- کریمی، م. (۱۳۹۱). درس‌نامه سامانه‌های پشتیبان برنامه‌ریزی مکانی، دانشکده نقشه برداری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.
- مبرفعی، ن. (۱۳۸۹). لزوم تحقق مدیریت یکپارچه محیط زیست شهری
- مزیدی، ا؛ نارنگی فرد، م. (۱۳۹۵). ارزیابی پیامد تغییرات کیفیت پوشش گیاهی بر دامنه‌های دمایی در منطقه یک شهر شیراز. *فضای جغرافیایی*، ۱۶(۵۶)، ۲۰۱-۲۲۰.
- مطالعات یکپارچه مناطق ساحلی، (۱۳۹۴). طرح تدقیق مطالعات مدیریت یکپارچه‌ی مناطق ساحلی استان هرمزگان.
- مومنی، ا. (۱۳۸۹). مدل‌سازی رشد شهری شهر تهران تا سال ۲۰۵۰ با استفاده از مدل SLEUTH. مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران.
- Agyemang, F. S. K., Silva, E., Poku-Boansi, M., kamuzu, F., Silva, E., & Poku-Boansi, M. (2019). Understanding the urban spatial structure of Sub-Saharan African cities using the case of urban development patterns of a Ghanaian city-region. *Habitat International*, Volume 85, Pages 21-33.
- Anand, A.(2017), Unit 14 Accuracy Assessment, 31 publications, world bank.
- 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.
- 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 : IJGIS*, 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.
- Chaudhuri, G., & Clarke, K. C. (2013). Temporal accuracy in urban growth forecasting: A study using the SLEUTH model. *Transactions in GIS*, 2, 302-320.
- Dadashpoor, H., Azizi, P., & Moghadasi, M. (2019). Analyzing spatial patterns, driving forces and predicting future growth scenarios for supporting sustainable urban growth: Evidence from Tabriz metropolitan area, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 47, 101502.
- Eslahi, M.(2017). *Urban growth simulations in order to represent the impacts of constructions and environmental constraints on urban sprawl*. Ph.D Thesis, Geographic Information Sciences and Technologies, University of PARIS-EST.
- Jantz, C. A., Goetz, S. J., Donato, D. I., & Claggett, P. R. (2010). Designing and implementing a regional urban modeling system using the SLEUTH cellular urban model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(1), 1-16.
- Jantz, C., Drzyzga, S., & Maret, M. (2014). Calibrating and Validating a Simulation Model to Identify Drivers of Urban Land Cover Change in the Baltimore, MD Metropolitan Region. In *Land* (Vol. 3, Issue 3).
- 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.

- Mahini, A. S., Gholamalifard, M. (2007). Dynamic spatial modeling of urban growth through cellular automata in a GIS environment. *International Journal of Environmental Research(IJER)*, 1(3), 272–279.
- Mahini, A. S., & Clarke, K. C. (2012). Guiding SLEUTH land-use/land-cover change modeling using multicriteria evaluation: Towards dynamic sustainable land-use planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 39, 925–944.
- Mahini, A. S., & Clarke, K. C. (2013). Simulating hydrologic impacts of urban growth using SLEUTH, multi criteria evaluation and runoff modeling. *Environmental Informatics*, 22, 27–38.
- Martellozzo, F., Amato, F., Murgante, B., & Clarke, K. (2018). Modelling the impact of urban growth on agriculture and natural land in Italy to 2030. *Applied Geography*, 91, 156–167.
- Maithani, S. (2010). Application of cellular automata and GIS techniques in urban growth modelling: A new perspective. *India Journal*, 7, 36–49.
- Norman, L. M., Feller, M., & Phillip, G. D. (2009). Forecasting urban growth across the United States- Mexico border. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33, 150–159.
- Norman, L. M., Feller, M., & Villarreal, M. L. (2012). Developing spatially explicit footprints of plausible land-use scenarios in the Santa Cruz Watershed, Arizona and Sonora. *Landscape and Urban Planning*, 107, 225–235.
- 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. <http://www.jstor.org/stable/43907352>.
- Sakieh, Y., Salman Mahiny, A., Jafarnezhad, J., Mehri, A., Kamyab, H., & Galdavi, S. (2015). Evaluating the strategy of decentralized urban land-use planning in a developing region. *Land Use Policy*, 48, 534–551.
- Salmanmahiny, A. & Karimi, S. (2011). Linking Urban Sprawl to Surface Runoff Potential for Soil Erosion through SLEUTH, L-THIA and RUSLE models-The Case of Gorgan Township in North East of Iran.
- Saxena, A., & Jat, M. K. (2019). Capturing heterogeneous urban growth using SLEUTH model. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 13, 426–434.
- Saxena, A., & Jat, M. K. (2020). Land suitability and urban growth modeling: Development of SLEUTH-Suitability. *Computers, Environment and Urban Systems*, 81, 101475.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). *World Population Prospects 2019*, Online Edition. Rev. 1.
- Project Gigalopolis. (2021).
- Wolfram, S. (1984). Cellular automata as models of complexity. *Nature*, 311(5985), 419–424.