

## Urban development modeling using a fuzzy neuro-inference system with futures studies in Hajiabad City, Hormozgan Province

Mohammad Ebrahim Afifi <sup>1</sup> and Ebrahim Shiravani <sup>2</sup>

1- Department of Geography, Faculty of Humanities, Islamic Azad University, Larestan Branch, Larestan, Iran.

2- Department of Geography, Faculty of Humanities, Islamic Azad University, Larestan Branch, Larestan, Iran.

### ARTICLE INFO

#### Article type:

Research Article

#### Received:

2026/01/25

#### Accepted:

2026/05/17

#### pp:

121-143

#### Keywords:

Modeling,  
Neuro-fuzzy Inference  
System,  
Hajiabad,  
Urban Development.

### ABSTRACT

This study, with the aim of analyzing and predicting the physical changes of Hajiabad city, used the integration of the Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) with the Autonomous Cell-Markov (CA-Markov) model. The results of the evaluation of the ANFIS model, with a correlation coefficient of 0.9678 and an overall accuracy of 23.91 in 2025, confirmed the high efficiency of this intelligent approach in analyzing the nonlinear relationships between environmental factors and urban development. The 20-year trend analysis (2005-2025) showed that residential land increased by 9.4% from 3304.5 to 3617.7 hectares, while barren land decreased by 435 hectares and medium pastures decreased by 230 hectares, experiencing the greatest land use change. The model's predictions for the 2055 horizon indicate a significant jump in residential area to 4425.2 hectares, which means an increase of 22% compared to the current situation and the swallowing of about 653 units of barren land and 344 hectares of quality pastures in the region. The analysis of the drivers also revealed that "distance from roads" with a coefficient of 0.93 and "distance from built-up area" with a coefficient of 0.92 are the main drivers of the city's physical expansion in the coming decades. Finally, the stability of 0.992 in the residential transition matrix indicates the definitive and irreversible consolidation of natural lands into urban spaces, which doubles the necessity of smart land management. The role of futures research in this paper is to transform dead satellite data into a living roadmap for the management of Hajiabad city for the next 30 years to prevent excessive development and ecological destruction.



**Citation:** Afifi, M. E., & Shiravani, E. (2026). Urban development modeling using a fuzzy neuro-inference system with futures studies in Hajiabad City, Hormozgan Province. *Journal of Geography and Regional Future Studies*, 4(3), 121-143.



© Authors retain the copyright and full publishing rights. **Publisher:** Urmia University.

DOI: <https://doi.org/10.30466/grfs.2026.56976.1203>

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.2981118.1405.4.3.7.6>

<sup>1</sup> **Corresponding author:** Mohammad Ebrahim Afifi , **Email:** [afifi.ebrahim6353@iau.ac.ir](mailto:afifi.ebrahim6353@iau.ac.ir), **Tell:** +989171816353

## Extended Abstract

### Introduction

This research, with the aim of analyzing and predicting the physical changes of Hajiabad city, used a combination of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) with the autonomous cell-Markov (CA-Markov) model. The results of the evaluation of the ANFIS model, with a correlation coefficient of 0.9678 and an overall accuracy of 91.23 in 2025, confirmed the high efficiency of this intelligent approach in analyzing the nonlinear relationships between environmental factors and urban development. A 20-year trend analysis (2005-2025) showed that residential land grew by 9.4% from 3304.5 to 3617.7 hectares, while barren land decreased by 435 hectares and medium pastures decreased by 230 hectares, experiencing the greatest land use change. Model predictions for the 2055 horizon indicate a significant jump in residential area to 4,425.2 hectares, which means a 22% increase compared to the current situation and the swallowing of about 653 units of barren land and 344 hectares of quality pastures in the region. The analysis of the drivers also revealed that "distance from roads" with a coefficient of 0.93 and "distance from built-up area" with a coefficient of 0.92 are the main drivers of the city's physical expansion in the coming decades. Finally, the stability of 0.992 in the residential transition matrix indicates the definitive and irreversible consolidation of natural lands into urban spaces, which doubles the necessity of smart land management.

### Methodology

In this study, in order to prepare a land use change map, 1:25000 topographic maps of the Mapping Organization and images of Landsat 5, 8 and 9 satellites related to the years 2005, 2015 and 2025 were used; the specifications, sensor, row and pass of these images are given in Table (1). ENVI, ArcGIS and IDRISI software were used for processing, modelling, and simulation. The SVM support vector machine method is used to classify land uses, and the Markov-autonomous cell model is used to calculate, predict, and simulate changes in the years 2045 and 2055. The overall accuracy coefficients, kappa coefficient, producer accuracy, and user accuracy are usually used to check the accuracy

of the classification. The kappa coefficient, producer accuracy, and user accuracy are used to check the accuracy of classification. Overall accuracy is the simplest and most basic evaluation criterion. This criterion shows what proportion of the total pixels are classified correctly. In most cases, satellite images have distortions, which are caused by the sphericity of the Earth or sensor characteristics (Quintaño et al., 2012). Raw digital imagery typically contains geometric distortions that prevent its direct use as a map. To ensure spatial accuracy, the images must be corrected so that their features align with map coordinates (Rahnama et al., 2022). In this study, these corrections were carried out on an image-by-image basis within the ENVI software environment for the 2005 imagery.

### Results and discussion

In this study, land use maps for 2015 and 2025, as well as Markov chain methods and cellular automata (CA) models, were used to predict and simulate the trend of land use changes for 2045 and 2055. The Markov chain method analyzes land use zoning images and provides an output in the form of a probability matrix of changes and an output image of the probability matrix for the horizon year. The Markov chain generates a transition matrix, a transition region matrix, and a set of conditional probability images using qualitative analysis of two land use images at two different times. Tables 5 and 6 show the forecast of land use change trends in 2045 and 2055 using Markov chains. The transition matrix reflects the dynamics of land change; the sustainability coefficient of 0.985 for residential use confirms the definite growth and the failure of these lands to return to their natural state, while the lower sustainability coefficient of barren lands (0.882) explains the main reason for its reduction in area by 435 units and its conversion into built spaces. Moreover, the transfer of a portion of land with a coefficient of 0.082 from average pasture to poor pasture is the driving force behind the changes that have led to the loss of high-quality pastures and their replacement with degraded pastures. Finally, the relative stability of 0.948 in the agricultural sector indicates that despite the pressure of urban development, these lands

have shown greater resistance to land use change and have lost only a small portion of their 2,629 units of land over these two decades.

### Conclusion

The results show that the rapid development of urbanization has challenged traditional analyses and classical statistical models due to the nonlinear and ambiguous nature of environmental data. In this regard, the use of the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) as an intelligent tool has provided an optimal solution for analyzing uncertainties by combining the learning capabilities of neural networks and fuzzy reasoning. The findings of the present study, in line with global research, confirm the high accuracy of this model in zoning and predicting the physical expansion of cities; therefore, the correlation coefficient of 0.9678 and the coefficient of explanation ( $R^2$ ) of above 0.83 in the validation stage, indicate the unique ability of this model in extracting complex relationships between development driving factors (such as slope, distance from the road, and access). A 20-year period analysis within the city limits of Hajiabad shows strong

dynamics in land use changes: Residential development: Residential land has increased continuously from 3,304 hectares in 2005 to 3,617 hectares in 2025, indicating the addition of more than 313 hectares to the physical fabric of the city. Deterioration of wasteland and natural lands: Wasteland has seen the highest rate of transfer in favor of urban development, with a decrease of about 435 units. Moreover, the conversion of part of average pastures to poor pastures indicates the degradation of land quality and ecological pressures on the environment surrounding the city.

### Declarations

**Funding:** There is no funding support.

**Authors' Contribution:** The authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

**Conflict of Interest:** The authors declared no conflict of interest.

**Acknowledgments:** We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



## مدل سازی توسعه شهری با استفاده از سیستم استنتاج نرو فازی با رویکرد آینده پژوهی در شهر حاجی آباد استان هرمزگان

محمد ابراهیم عقیفی<sup>۱</sup> و ابراهیم شیروانی<sup>۲</sup> 

۱- گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لارستان، لارستان، ایران

۲- گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لارستان، لارستان، ایران

| چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | اطلاعات مقاله                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| این پژوهش با هدف واکاوی و پیش‌بینی تحولات کالبدی شهر حاجی آباد، از تلفیق سیستم استنتاج عصبی-فازی (ANFIS) با مدل سلول‌های خودکار-مارکوف (CA-Markov) بهره جسته است. نتایج ارزیابی مدل ANFIS با ضریب همبستگی ۰/۹۶۷۸ و دقت کلی ۹۱/۲۳ در سال ۲۰۲۵، کارایی بالای این رویکرد هوشمند را در تحلیل روابط غیرخطی میان عوامل محیطی و توسعه شهری تأیید کرد. بررسی روند ۲۰ ساله (۲۰۰۵-۲۰۲۵) نشان داد که اراضی مسکونی با رشد ۹/۴٪ از ۳۳۰۴/۵ به ۳۶۱۷/۷ هکتار رسیده، درحالی‌که اراضی بایر با کاهش ۴۳۵ هکتار و مراتع متوسط با افت ۲۳۰ هکتار، بیشترین تغییر کاربری را تجربه کرده‌اند. پیش‌بینی‌های مدل برای افق ۲۰۵۵ حاکی از جهش چشم‌گیر مساحت مسکونی به ۴۴۲۵/۲ هکتار است که به معنای افزایش ۲۲٪ نسبت به وضع موجود و بلعیده شدن حدود ۶۵۳ واحد از اراضی بایر و ۳۴۴ هکتار از مراتع کیفیت‌دار منطقه می‌باشد. تحلیل پیش‌ران‌ها نیز مشخص ساخت که "فاصله از جاده‌ها" با ضریب ۰/۹۳ و "فاصله از بافت ساخته‌شده" با ضریب ۰/۹۲، اصلی‌ترین محرک‌های گسترش فیزیکی شهر در دهه‌های آتی هستند. در نهایت، پایداری ۰/۹۹۲ در ماتریس انتقال مسکونی، بیانگر تثبیت قطعی و بازگشت‌ناپذیر اراضی طبیعی به فضاهای شهری است که ضرورت مدیریت هوشمند اراضی را دوچندان می‌کند. نقش آینده‌پژوهی در این مقاله، تبدیل داده‌های مرده ماهواره‌ای به یک نقشه راه زنده برای مدیریت ۳۰ سال آینده شهر حاجی آباد است تا از توسعه بی‌رویه و تخریب اکولوژیک پیش‌گیری شود. | <p><b>نوع مقاله:</b><br/>مقاله پژوهشی</p> <p><b>دریافت:</b><br/>۱۴۰۴/۱۱/۰۵</p> <p><b>پذیرش:</b><br/>۱۴۰۵/۰۲/۲۷</p> <p><b>صص:</b><br/>۱۴۳-۱۲۱</p> <p><b>واژگان کلیدی:</b><br/>مدل سازی،<br/>سیستم استنتاج نرو فازی،<br/>حاجی آباد،<br/>توسعه شهری.</p> |

**استناد:** ابراهیم عقیفی، محمد و شیروانی، ابراهیم. (۱۴۰۵). مدل سازی توسعه شهری با استفاده از سیستم استنتاج نرو فازی با رویکرد آینده پژوهی در شهر حاجی آباد استان هرمزگان. فصلنامه جغرافیا و آینده پژوهی منطقه‌ای، ۴(۳)، ۱۴۳-۱۲۱.

ناشر: دانشگاه ارومیه.

نویسندگان حق چاپ و حقوق نشر را حفظ می‌کنند.



DOI: <https://doi.org/10.30466/grfs.2026.56976.1203>

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.2981118.1405.4.3.7.6>



## مقدمه

توسعه شتابان شهرنشینی و پیچیدگی فزاینده سیستم‌های شهری، نیاز به ابزارهای پیشرفته برای پیش‌بینی و مدیریت الگوهای رشد را دوچندان کرده است. مدل‌سازی شهری به دلیل ماهیت غیرخطی و مبهم داده‌های محیطی، فراتر از توان مدل‌های آماری کلاسیک است (Das et al., 2022- Mousavi et al., 2025). در این میان، سیستم استنتاج عصبی-فازی (ANFIS) به‌عنوان یک ابزار هوشمند، با ترکیب قابلیت یادگیری شبکه‌های عصبی و استدلال فازی، راهکاری بهینه برای تحلیل عدم قطعیت‌ها فراهم کرده است (Ewing et al., 1994). تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از ANFIS در پهنه‌بندی و پیش‌بینی گسترش فیزیکی شهرها، دقت بسیار بالاتری نسبت به مدل‌های خطی دارد این سیستم با استخراج قوانین «اگر-آنگاه» از داده‌های مکانی، می‌تواند روابط پیچیده میان عوامل محرک توسعه را تبیین کند. (Foody et al., 2002). همچنین در حوزه تاب‌آوری شهری، از ترکیب ANFIS با سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای ارزیابی آسیب‌پذیری در برابر مخاطراتی نظیر سیل استفاده شده که منجر به بهبود چشم‌گیر دقت در شناسایی مناطق پرخطر شده است. علاوه بر این، در مدیریت اقتصاد شهری، مدل‌سازی قیمت مسکن در شهرهای هوشمند با استفاده از ساختار نرو-فازی، نتایجی به‌مراتب دقیق‌تر از روش‌های سنتی ارائه داده است. پدیده‌های زیست‌محیطی پیچیده مانند پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های هوا نیز با استفاده از این مدل‌ها به‌خوبی قابل پیش‌بینی هستند. (Esmailpour et al, 2009) درنهایت، توانایی این مدل در مدیریت داده‌های ناقص، آن را به یکی از ارکان اصلی در توسعه شهرهای پایدار تبدیل کرده است. رشد و گسترش فیزیکی شهرها در مناطق درحال توسعه همچون شهر حاجی‌آباد، طی سال‌های اخیر با سرعتی قابل‌توجه و عمدتاً بدون مدیریت علمی در حال وقوع است. این توسعه غالباً تحت تأثیر مجموعه‌ای از محرک‌های انسانی مانند رشد جمعیت، بهبود دسترسی‌ها، افزایش فعالیت‌های اقتصادی و تغییرات کاربری اراضی صورت می‌گیرد؛ با این حال، واقعیت این است که محیط طبیعی و شرایط ژئومورفولوژیک منطقه—از جمله شیب، ارتفاع، ناهمواری‌ها، جهت‌شیب، دشت‌های آبرفتی، حریم سیلاب‌دشت‌ها و پهنه‌های ناپایدار—نقش تعیین‌کننده‌ای در نحوه و جهت‌گیری توسعه شهری دارند. هنگامی که توسعه شهری بدون توجه به این محدودیت‌ها رخ دهد، پیامدهایی چون ساخت‌وساز در نواحی پرخطر، تخریب اراضی حاصلخیز، افزایش مخاطرات زیست‌محیطی و تحمیل هزینه‌های سنگین بر مدیریت شهری اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. (Soleimani et al, 2024) در شهر حاجی‌آباد، بررسی تصاویر ماهواره‌ای و شواهد میدانی نشان می‌دهد که توسعه کالبدی شهر در دهه‌های اخیر به‌صورت پراکنده، نامتوازن و عمدتاً تحت تأثیر عوامل دسترسی و کاربری زمین رخ داده است، در حالی که نقش عوامل ژئومورفولوژیک کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این موضوع سبب شده بخشی از توسعه شهری در حاشیه مسیل‌ها، اراضی سیلابی، دشت‌های آبرفتی حساس و دامنه‌های دارای شیب نسبتاً بالا صورت گیرد. استمرار این روند، در سال‌های آینده می‌تواند زمینه‌ساز افزایش خطرپذیری شهری، تخریب اراضی ارزشمند کشاورزی و بروز مشکلات خدمات‌رسانی شود. از سوی دیگر، تحلیل توسعه شهری در چنین محیط‌های پیچیده‌ای، نیازمند استفاده از مدل‌هایی است که توانایی شناسایی روابط غیرخطی و چندبعدی میان عوامل مؤثر را داشته باشند. روش‌های سنتی مبتنی بر تحلیل‌های خطی معمولاً قادر به آشکارسازی روابط چندلایه میان عوامل طبیعی و انسانی نیستند و نمی‌توانند الگوی توسعه آینده را با دقتی قابل قبول پیش‌بینی کنند. در این میان، سیستم استنتاج نروفازی (ANFIS) با ترکیب قدرت یادگیری شبکه‌های عصبی و قابلیت بیان عدم قطعیت منطق فازی، ابزاری کارآمد برای مدل‌سازی توسعه شهری است. این سیستم امکان تحلیل هم‌زمان متغیرهای متنوع ژئومورفولوژیک و شهری را فراهم می‌آورد و می‌تواند نقش هر عامل در احتمال توسعه را به‌طور دقیق استخراج کند. با توجه به اینکه شهر حاجی‌آباد در معرض فشارهای توسعه‌ای است و از سوی دیگر، دارای پهنه‌های پرخطر و اراضی ارزشمند طبیعی و کشاورزی می‌باشد، نبود یک مدل پیش‌بینی علمی برای هدایت توسعه آینده، از چالش‌های اصلی مدیریت شهری به شمار می‌رود. در حال حاضر، تصمیم‌گیری‌های توسعه‌ای بیشتر مبتنی بر نیازهای کوتاه‌مدت است و کمتر به تحلیل داده‌محور وابسته است؛ این در حالی است که برنامه‌ریزی فضایی نوین مستلزم اتکاء به مدل‌های هوشمند پیش‌بین است. از این‌رو مسئله اصلی پژوهش این است که: کدامیک از پارامترهای مؤثر در توسعه بیشترین اثر را بر توسعه شهری حاجی‌آباد داشته‌اند؟ چگونه می‌توان این عوامل را با استفاده از سیستم نروفازی به مدل تبدیل کرد؟ و الگوی توسعه آینده شهر با تکیه بر این مدل چگونه خواهد بود؟

در حقیقت، مسئله اصلی کمبود یک چارچوب علمی برای تشخیص مناسب‌ترین مسیرهای توسعه، جلوگیری از توسعه در پهنه‌های پرخطر و ارائه الگویی پایدار برای آینده شهری حاجی‌آباد است. این مطالعه تلاش می‌کند با ارائه یک مدل هوشمند مبتنی بر ANFIS و با بهره‌گیری از داده‌های مکانی دقیق، پاسخی علمی به این چالش ارائه دهد و مسیر توسعه آینده شهر را با دقت قابل اتکایی شبیه‌سازی کند. توجه به پدیده‌های ژئومورفولوژیک و عملکرد آن‌ها در برنامه‌ریزی نقش مهمی در مکان‌یابی، مکان‌گزینی و تکامل و گسترش فیزیکی و تعیین جهات گسترش شهر، مورفولوژی شهر و ساخت‌وسازهای شهری دارد. سرآغاز شناخت جغرافیایی شهر ارزیابی موقعیت شهر و محدوده‌ها

و مخاطرات آن است. موقعیت جغرافیایی شهر با مجموعه‌ای از داده‌های طبیعی، اقتصادی و انسانی موجود در فضای ناحیه‌ای که شهر در آن تکوین یافته مشخص می‌شود. با توجه به اینکه تمامی تحولات شهری در بستر طبیعی زمین شکل گرفته و به وقوع می‌پیوندند، توجه به عوامل جغرافیایی و محیطی از این جهت که بستر و جایگاه اصلی شهر را تشکیل داده و کلیه عناصر و اجزای طراحی شهری نظیر مکان، شکل، ساختار و بافت شهر را تحت تأثیر قرار می‌دهند از اهمیت بسزایی برخوردارند. در واقع عوارض و پدیده‌های طبیعی در مکان‌یابی پراکندگی حوزه نفوذ توسعه، فیزیکی، مورفولوژی شهر و امثال آن اثر قاطعی دارند، بدین معنی که گاه به‌عنوان یک عامل مثبت و زمانی به‌صورت یک عامل منفی و بازدارنده عمل می‌کنند. به‌طور معمول توجه صرف به عوامل فیزیکی بدون تأکید و شناخت پارامترهای طبیعی و بوم‌شناختی اتفاق می‌افتد، بنابراین لازم است علاوه بر سایر فاکتورهای اقتصادی اجتماعی و سیاسی به فاکتورهای طبیعی و خصوصیات زمین به‌عنوان پایه و عناصر اصلی توسعه فیزیکی شهر توجه کافی و لازم مبذول گردد؛ چرا که برنامه‌ریزی مقررات توسعه شهری نامناسب می‌تواند آسیب‌پذیری در مقابل بلایای طبیعی را تشدید نماید. به‌طور معمول توجه صرف به عوامل فیزیکی بدون تأکید و شناخت پارامترهای طبیعی و بوم‌شناختی اتفاق می‌افتد؛ بنابراین، لازم است علاوه بر سایر فاکتورهای اقتصادی، اجتماعی و سیاسی به فاکتورهای طبیعی و خصوصیات زمین به‌عنوان پایه و عناصر اصلی توسعه فیزیکی شهر توجه کافی و لازم مبذول گردد. چرا که برنامه‌ریزی مقررات توسعه شهری نامناسب می‌تواند آسیب‌پذیری در مقابل بلایای طبیعی را تشدید نماید. از آنجایی که ژئومورفولوژی علمی است که درباره تغییر اشکال زمین و برنامه‌ریزی ژئومورفولوژی بحث می‌کند، به ما کمک می‌کند که بهترین راه‌حل را برای استفاده از زمین پیدا کنیم و نقش قابل توجهی در مسائلی نظیر انتخاب مسیر توسعه آبی شهر، انتخاب محل کاربری‌های زمین و مورفولوژی شهری و غیره دارد. بنابراین شرایط طبیعی و محدودیت‌های فیزیکی مختلفی تعیین‌کننده تناسب یک ناحیه برای توسعه شهر است و نادیده گرفتن اثرات و عوامل و شرایطی همچون موقعیت دشت سیلابی و اراضی مرطوب، خاک‌های رسی، شیب‌های تند، بالا بودن سطح سفره‌های آب زیرزمینی، وجود سنگ‌بستر، اراضی کشاورزی مرغوب و ... در امر توسعه می‌تواند مسائل حادی را موجب شود. بر این اساس امروزه یکی از موارد بسیار مهم و پیچیده برای برنامه‌ریزان شهری، تصمیم‌گیری در مورد مکان‌های مناسب جهت گسترش آبی شهر و تعیین اراضی مناسب توسعه می‌باشد که این مهم تنها با نگاهی جامع نسبت به تمام عوامل تأثیرگذار در جهت‌یابی توسعه فیزیکی شهر، محقق خواهد شد. توسعه شهری امری اجتناب‌ناپذیر در راستای افزایش جمعیت و نیازهای بشر می‌باشد. با رشد جمعیت، شهرها نیازمند ظرفیت بیشتر و برنامه‌ریزی دقیق‌تر برای آینده خواهند شد که مستلزم مطالعات و بررسی‌های تخصصی در رشته‌های مختلف می‌باشد. حال اگر این گسترش شهری بدون حدود مرز و برنامه‌ریزی دقیق صورت بگیرد، موجب به وجود آمدن مشکلات متعددی خواهد شد.

### پیشینه و مبانی نظری پژوهش

آبه‌به<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۱)، به ترکیب مدل سلول‌های خودکار (CA) و ANFIS برای شبیه‌سازی دقیق رشد شهری در مناطق ساحلی پرداخته و نشان داده است که این ترکیب نسبت به مدل‌های رگرسیونی، خطای بسیار کمتری در پیش‌بینی کاربری اراضی دارد. آلبرت<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۴)، جهت پهنه‌بندی سیلاب، یک سیستم هوشمند نرو-فازی با الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری (الگوریتم ژنتیک و تبرید شبیه‌سازی شده) ترکیب کردند تا نقشه دقیق خطر سیل در مناطق متراکم شهری تولید شود. بلال<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، پژوهشی با هدف توسعه ابزار تصمیم‌گیری برای سرمایه‌گذاران، از مدل سازی نرو-فازی برای تخمین ارزش املاک بر اساس ویژگی‌های کالبدی و دسترسی‌های شهری انجام دادند. چاملینگ<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، در تحقیقی از ANFIS برای پیش‌بینی غلظت ذرات معلق (PM10 و PM2.5) استفاده کرده است. مدل پیشنهادی توانسته است روابط غیرخطی بین پارامترهای هواشناسی و غلظت آلاینده‌ها را با دقت بالایی مدل کند. در مطالعه‌ای با استفاده از ANFIS و تصاویر ماهواره‌ای، تأثیر تغییرات کاربری اراضی برافزایش دمای محیط‌های شهری را مدل سازی و برای سال‌های آتی پیش‌بینی کرده‌اند. مطالعه‌ای با رویکرد یکپارچه نرو-فازی برای رتبه‌بندی محلات شهری از نظر شاخص‌های پایداری و رضایت شهروندان انجام دادند و به مدل سازی تقاضای انرژی در ساختمان‌های شهری پرداختند. در پژوهش، از ANFIS برای پیش‌بینی بار مصرفی انرژی در مقیاس بلوک‌های شهری استفاده شد تا به مدیریت شبکه توزیع برق در ساعات اوج مصرف کمک کند. مکان‌یابی زیرساخت‌های حمل‌ونقل عمومی را ارزیابی کردند. در تحقیق با استفاده از سیستم نرو-فازی به اولویت‌بندی نقاط بهینه برای احداث ایستگاه‌های مترو و اتوبوس‌های

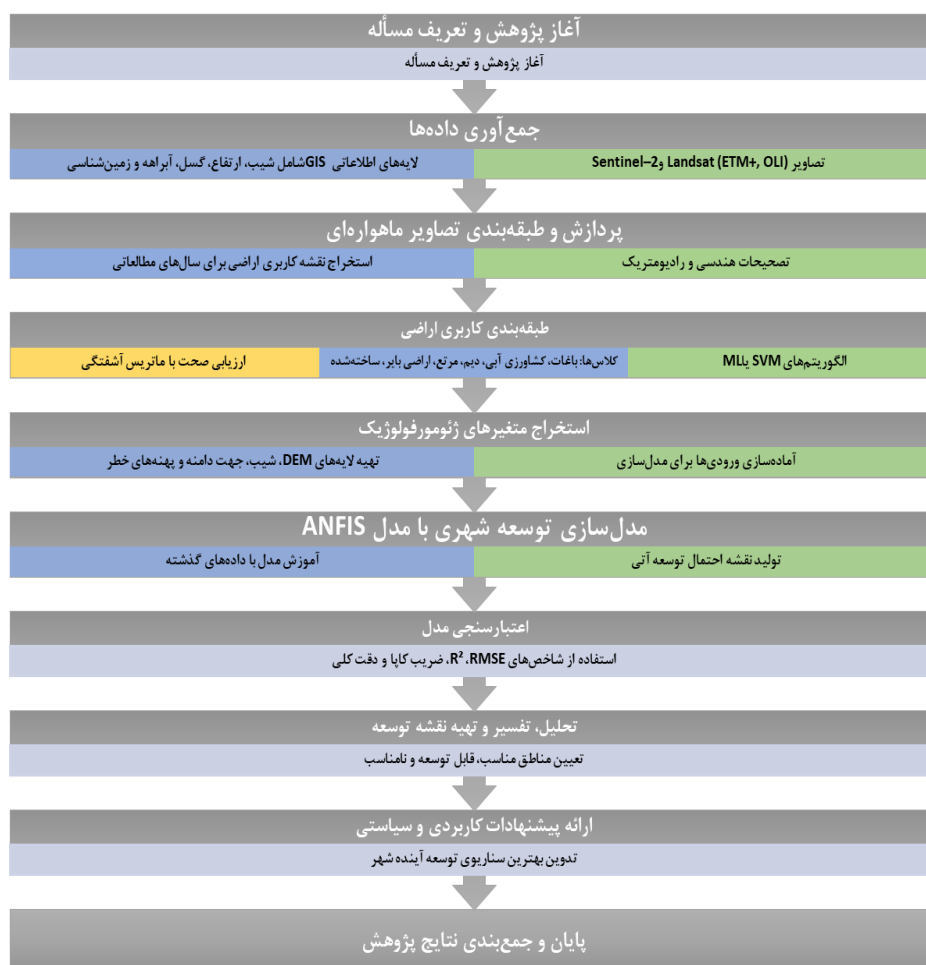
1 Abebe

2 Alberti

3 Belal

4 Chamling

تندرو بر اساس تراکم جمعیت و گره‌های ترافیکی پرداخته است. مدل‌سازی فرونشست زمین در نواحی شهری را انجام دادند. مطالعه با استفاده از داده‌های راداری (InSAR) و مدل ANFIS، نرخ فرونشست زمین ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی در زیرساخت‌های شهری را با دقت بالا تخمین زده است. به تخمین ترافیک و جریان وسایل نقلیه پرداختند. پژوهش از یک سیستم نرو-فازی هیبریدی برای پیش‌بینی جریان ترافیک در شبکه‌های پیچیده جاده‌ای استفاده کرده که در سیستم‌های کنترل هوشمند ترافیک (ITS) کاربرد فراوان دارد. (Hassan et al., 2016). با بررسی مطالعات اخیر، می‌توان نتیجه گرفت که سیستم‌های مدل‌سازی شهری از رویکردهای سنتی و قطعی به سمت مدل‌های هوشمند و منعطف حرکت کرده‌اند (Mohajane et al., 2018). تحلیل منابع نشان می‌دهد که مدل ANFIS به دلیل توانایی در ترکیب پایگاه قوانین فازی با قابلیت یادگیری شبکه‌های عصبی، در مقایسه با روش‌های کلاسیک، دقت بالاتری در مدیریت داده‌های مبهم شهری دارد. پژوهش‌ها در حوزه‌های متنوعی از جمله پیش‌بینی سیلاب‌های شهری، تحلیل قیمت مسکن و آلودگی هوا تأیید می‌کنند که این مدل نه تنها در پیش‌بینی دقیق است (Mostafa et al., 2021)، بلکه به دلیل ساختار استنتاجی، برای تصمیم‌گیران شهری تفسیرپذیرتر از مدل‌های سنتی است. با این وجود، علی‌رغم کارایی اثبات‌شده، هنوز خلأهایی در زمینه بهینه‌سازی توابع عضویت و ترکیب این مدل با داده‌های بلادرنگ در محیط‌های شهری پویا وجود دارد. بنابراین، ضرورت دارد که در این تحقیق با بهره‌گیری از قابلیت‌های سیستم نرو-فازی، مدلی طراحی شود که بتواند با دقت بالا روابط غیرخطی میان پارامترهای کالبدی و اقتصادی شهر را تبیین کند. این پژوهش قصد دارد با پر کردن شکاف‌های موجود در پیشینه‌های قبلی، گامی در جهت هوشمندسازی فرایندهای برنامه‌ریزی و کاهش خطاهای انسانی در تحلیل‌های شهری بردارد (Chen et al., 2013). درحالی‌که بسیاری از مطالعات قبلی فقط به یک جنبه (مثلاً فقط پیش‌بینی یا فقط پهنه‌بندی) پرداخته‌اند، این تحقیق با استفاده از مدل ترکیبی ANFIS + CA-Markov سعی کرده است شکاف موجود در پیش‌بینی‌های قبلی را پر کند و مدلی ارائه دهد که هم روابط غیرخطی را درک کند (ANFIS) و هم پویایی مکانی آینده را برای افق‌های دور (۲۰۵۵) شبیه‌سازی نماید که مدل مفهومی پژوهش در نمودار ۱ نشان داده شده است:



نمودار ۱- مدل مفهومی پژوهش

(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۴)

## مواد و روش پژوهش

در این تحقیق به منظور تهیه نقشه تغییرات کاربری اراضی از نقشه های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ رقومی سازمان نقشه برداری و تصاویر ماهواره های لندست ۵، ۸ و ۹ مربوط به سال های ۲۰۰۵، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۵ که مشخصات تاریخ، سنجنده، ردیف و گذر این تصاویر در جدول ۱ آورده شده است، استفاده گردید. برای پردازش داده ها، مدل سازی، شبیه سازی از نرم افزارهای ENVI و ArcGIS و IDRISI استفاده گردید. برای طبقه بندی کاربری ها از روش ماشین بردار پشتیبان SVM و برای محاسبه تغییرات، پیش بینی و شبیه سازی تغییرات در سال های ۲۰۴۵ و ۲۰۵۵ از مدل سلول خودکار-مارکوف استفاده شده است.

جدول ۱- تصاویر ماهواره ای مورد استفاده

| ماهواره | نوع سنجنده | تاریخ اخذ تصویر | شماره گذر و تصویر | قدرت تفکیک مکانی |
|---------|------------|-----------------|-------------------|------------------|
| لندست ۵ | TM         | ۲۰۰۵/۰۶/۱۳      | P160, R41         | ۳۰ متر           |
| لندست ۸ | OLI        | ۲۰۱۵/۰۷/۱۰      | P160, R41         | ۳۰ متر           |
| لندست ۹ | OLI        | ۲۰۲۵/۰۷/۱۸      | P160, R41         | ۳۰ متر           |

## پیش پردازش تصاویر ماهواره ای

در این مرحله برای آماده سازی تصاویر جهت پردازش عملیات تصحیح هندسی، تصحیح رادیو متریک و تصحیح اتمسفری بر روی تصاویر ماهواره ای انجام شد.

### • تصحیح هندسی

تصاویر رقومی دارای انحراف هایی هستند، به طوری که این گونه تصاویر نمی توانند به عنوان نقشه مورد استفاده قرار گیرند. به نحوی که شکل تصحیح شده قابلیت انطباق با نقشه را داشته باشد (Rahnama et al., 2022). این تصحیحات در محیط نرم افزار ENVI و به روش تصویر به تصویر انجام گردید که برای تصاویر سال های ۲۰۰۵ انجام شد.

### • تصحیح رادیو متریک

به طور کلی، تصحیح های رادیو متریک زمانی انجام می شود که داده های تصویری در روند ثبت مقادیر روشنایی مربوط به پیکسل ها دارای خطاهایی باشند که می تواند ناشی از عواملی نظیر عدم کارایی تجهیزات ثابت و تأثیرهای اتمسفری باشد. از طریق اصلاحات رادیو متریک، مقادیر روشنایی تصویر تغییر می یابد (Rwanga et al., 2017). تصحیح رادیو متریک در تصاویر لندست ۵ و ۸ از طریق تبدیل DN به Reflectance در باندهای انعکاسی از طریق روابط (۱) در محیط نرم افزار ENVI 5.3 انجام شد. رابطه ۱: (Seifolddini et al., 2011)

$$L_{\lambda} = \left( \frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{255} \right) * DN + L_{MIN}$$

$L_{\lambda}$ : رادیانس باندهای حرارتی،  $L_{MIN}$  و  $L_{MAX}$ : مقادیر کالیبره شده برای هر باند، DN: ارزش عددی هر باند

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi * L_{\lambda}}{ESUN_{\lambda} * \cos \theta * d_r}$$

رابطه ۲:

$\rho_{\lambda}$ : مقدار Reflectance هر باند

$L_{\lambda}$ : مقدار Radiance هر باند

$ESUN_{\lambda}$ : میانگین بازتابش اتمسفری هر باند

$\cos \theta$ : کسینوس زاویه برخورد تشعشع خورشیدی از نقطه نادیر

$d_r$ : معکوس مربع فاصله نسبی زمین از خورشید.

## طراحی و آموزش سیستم استنتاج نرو فازی تطبیقی (ANFIS)

ANFIS یک معماری ترکیبی است که همزمان از قدرت یادگیری شبکه عصبی و توانایی نمایش دانش در منطق فازی استفاده می کند (Shao et al, 2018). برای تشخیص طبقات کاربری اراضی در این پژوهش، از روش الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM - Support Vector Machine) استفاده شده است.

• **ورودی ها (Inputs):** مقادیر عوامل محرک توسعه (شیب، فاصله از جاده، ...) در نقاط نمونه برداری شده وارد مدل می شوند.

- **خروجی:** متغیر دوگانه (۰ یا ۱) که نشان‌دهنده پتانسیل توسعه یا احتمال تبدیل به کاربری شهری است.
- **ساختار نروفازی:**
  - **فازی‌سازی (Fuzzification):** توابع عضویت اولیه برای ورودی‌ها تعریف می‌شوند (مثلثی، گاوسی، small و large).
  - **قواعد فازی (Fuzzy Rules):** قوانین اگر-آنگاه<sup>۲</sup> در مدل ایجاد می‌شوند. مثلاً اگر شیب کم و فاصله از جاده کم باشد، آنگاه پتانسیل توسعه بالا است.
- **مرحله آموزش:** مدل با استفاده از الگوریتم پس‌انتشار<sup>۳</sup> یا روش‌های ترکیبی<sup>۴</sup> آموزش داده می‌شود. در این مرحله، پارامترهای توابع عضویت و پارامترهای نتیجه‌گیری<sup>۵</sup> تنظیم می‌شوند که خروجی مدل (احتمال توسعه) بیشترین شباهت را به داده‌های واقعی توسعه‌یافته داشته باشد. (UNICEF Annual Report et al, 2012).
- **تولید نقشه پتانسیل توسعه**

پس از آموزش و اطمینان از دقت مدل ANFIS، پارامترهای بهینه‌شده آن در محیط نرم‌افزاری MATLAB و GIS استفاده می‌شوند. این مدل بر روی همه پیکسل‌های محدوده مطالعه اعمال می‌شود تا یک نقشه رستری نهایی به نام نقشه پتانسیل توسعه<sup>۶</sup> تولید شود. مقادیر این نقشه، احتمال توسعه شهری هر پیکسل در آینده را نشان می‌دهد که ارزش‌های آن بین ۰ تا ۱ است. بنابراین در این پژوهش، باندهای تصویر پس از انجام پردازش‌های لازم، شاخص طیفی NDVI، عوامل شیب، ارتفاع و جهت و فاصله از جاده و رودخانه که از عوامل مؤثر در توسعه شهری است، داده‌های آموزش که برای یادگیری مدل ANFIS ضروری هستند و وظیفه آن‌ها، مشخص کردن خروجی مورد انتظار برای مجموعه خاصی از ورودی‌ها است در مدل ANFIS مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت از ترکیب متلب و GIS جهت پردازش و تهیه خروجی داده‌ها استفاده شد که در بخش نتایج ارائه می‌گردد (Zhu et al, 2017).

### ارزیابی صحت طبقه‌بندی

معمولاً از ضرایب صحت کلی،<sup>۷</sup> ضریب کاپا<sup>۸</sup> صحت تولیدکننده، صحت کاربر جهت بررسی صحت طبقه‌بندی استفاده می‌شود. دقت کلی ساده‌ترین و ابتدایی‌ترین معیار ارزیابی است. این معیار نشان می‌دهد که چه نسبتی از کل پیکسل‌ها به درستی طبقه‌بندی شده‌اند (Zortea et al., 2009):

$$OA = \frac{1}{N} \sum P_{ii}$$

رابطه ۴:

در این رابطه OA صحت کلی، N تعداد پیکسل‌های آزمایشی،  $\sum P_{ii}$  جمع عناصر قطر اصلی ماتریس خطا می‌باشد. ضریب کاپا یک معیار آماری قوی‌تر است که نه تنها توافق مشاهده‌شده بین طبقه‌بندی مدل و واقعیت را محاسبه می‌کند، بلکه احتمال توافق تصادفی (به دلیل شانس) را نیز در نظر می‌گیرد و آن را از توافق مشاهده‌شده کسر می‌کند. این ضریب به‌ویژه برای طبقه‌بندی چند کلاسه و داده‌های نامتوازن مفید است.

$$Kappa = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e}$$

رابطه ۵:

که در رابطه بالا  $P_0$ ، درستی مشاهده‌شده  $P_e$  توافق مورد انتظار است (Richards, 2013). در بخش مربوط به روش تحقیق و جداول نتایج، اعداد دقیق مربوط به ارزیابی صحت طبقه‌بندی با روش SVM به تفکیک برای سال‌های مختلف ذکر شده است:

برای سال ۲۰۲۵ (که بالاترین دقت را داشته است): دقت کلی برابر با ۹۱٫۲۳ و ضریب کاپا برابر با ۰٫۹۰ (معادل ۹۰ درصد). سال ۲۰۱۵: دقت کلی ۸۵٫۱۰ و ضریب کاپا ۸۲٫۳۹ و سال ۲۰۰۵: دقت کلی ۸۲٫۳۱ و ضریب کاپا ۸۲٫۳۱ می‌باشد.

1 Membership Functions  
2 If-Then Rules  
3 Backpropagation  
4 Hybrid Learning  
5 Consequent Parameters  
6 Development Potential Map  
7 Overall accuracy  
8 Kappa coefficient

### پیش بینی تغییرات کاربری اراضی

مدل ترکیبی اتوماتای سلولی-مارکوف (Cellular Automata - Markov)، که به اختصار CA-Markov نامیده می شود، یکی از مدل های پر کاربرد برای پیش بینی تغییرات کاربری اراضی (Land Use/Land Cover Change – LULCC) است. این مدل از ترکیب دو مفهوم قدرتمند تشکیل شده است:

**زنجیره مارکوف:** این بخش از مدل، میزان تغییر (مقدار) بین کلاس های کاربری اراضی را در یک دوره زمانی مشخص (بر اساس نقشه های کاربری اراضی تاریخی) محاسبه می کند و یک ماتریس احتمال گذار (Transition Probability Matrix) تولید می کند. این ماتریس نشان می دهد که احتمال تغییر هر کلاس کاربری اراضی به کلاس دیگر چقدر است. زنجیره مارکوف جنبه "غیر مکانی" تغییرات را مدیریت می کند. **اتوماتای سلولی:** این بخش از مدل، توزیع مکانی تغییرات را شبیه سازی می کند. CA یک سیستم دینامیکی گسسته است که از سلول ها (پیکسل ها در GIS) تشکیل شده است. وضعیت هر سلول در زمان آینده، بر اساس وضعیت خود سلول در زمان حال و وضعیت سلول های همسایه آن (با استفاده از یک فیلتر مکانی یا قوانین همسایگی) تعیین می شود. CA، جنبه "مکانی" تغییرات را به مدل اضافه می کند، زیرا تغییر یک پیکسل اغلب تحت تأثیر وضعیت همسایگانش است (مثلاً گسترش شهری در کنار مناطق شهری موجود). با استفاده از دو نقشه کاربری اراضی تاریخی (مثلاً LULCT1 و LULCT2)، ماتریس احتمال گذار محاسبه می شود. این ماتریس نشان می دهد که یک پیکسل از کلاس i در زمان T1 با چه احتمالی به کلاس j در زمان T2 تغییر کرده است. فرمول احتمالی برای هر عنصر ماتریس احتمال گذار ( $P_{ij}$ ) :

$$P_{ij} = N_{ij} / N_i$$

رابطه ۶:

که در آن:

$P_{ij}$ : احتمال تغییر از کلاس i به کلاس j.

$N_{ij}$ : تعداد پیکسل هایی که از کلاس i به کلاس j تغییر کرده اند.

$N_i$ : تعداد کل پیکسل هایی که در زمان T1 در کلاس i بوده اند.

رابطه سلول های خودکار CA نیز به صورت رابطه ۷، می باشد.

$$CA = f(LULCt(x,y), Neighborhood(x,y), Suitability(x,y), Transition Probabilities)$$

رابطه ۷:

$LULCt+1(x,y)$ : کلاس کاربری اراضی پیکسل  $(x,y)$  در زمان  $t+1$ .

$LULCt(x,y)$ : کلاس کاربری اراضی پیکسل  $(x,y)$  در زمان t.

$Neighborhood(x,y)$ : وضعیت پیکسل های همسایه پیکسل  $(x,y)$ ، مثلاً با یک فیلتر  $3 \times 3$  یا  $5 \times 5$  محاسبه می شود.

$Suitability(x,y)$ : ارزش پتانسیل پیکسل  $(x,y)$  برای تغییر به یک کلاس خاص (از نقشه های پتانسیل).

$Transition Probabilities$ : احتمالات گذار از ماتریس مارکوف.

### محدوده مورد مطالعه

شهر حاجی آباد، مرکز شهرستان حاجی آباد، در شمالی ترین نقطه از استان هرمزگان و در محدوده تقریبی مختصات جغرافیایی ۲۸ درجه و ۱۸ دقیقه شمالی و ۵۵ درجه و ۵۴ دقیقه شرقی واقع شده است. این شهر که در ارتفاعی حدود ۹۲۰ متر از سطح دریا قرار دارد، به دلیل استقرار در دامنه های جنوبی رشته کوه زاگرس، به عنوان گلوگاه ارتباطی و دروازه ورود به استان هرمزگان از سمت فلات مرکزی ایران (استان های کرمان و فارس) شناخته می شود. (ویکی پدیا) حاجی آباد به لحاظ اقلیمی، نقطه ای استراتژیک برای پیوند میان طبیعت کوهستانی و گرمسیری است و به واسطه برخورداری از منابع آب زیرزمینی و خاک حاصلخیز، به عنوان قطب اصلی تولید مرغوب ترین خرما (صادراتی جهان) (پیارم) در جغرافیای اقتصادی ایران نقشی کلیدی ایفا می کند. ویژگی های محدوده مورد مطالعه، یعنی شهر حاجی آباد، ارتباط تنگاتنگی با توسعه شهری و مدل سازی آن دارد، زیرا این ویژگی ها عوامل اصلی شکل دهنده الگوهای توسعه و همچنین چالش های پیش روی آن هستند. در این مقاله، این ارتباط به شکل زیرنمایان می شود:

### • ویژگی‌های جغرافیایی و محیطی (مانند شیب، ارتفاع، موقعیت کوهپایه‌ای)

تأثیر بر توسعه: موقعیت شهر حاجی‌آباد در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه زاگرس و ارتفاع آن، مستقیماً بر شیب زمین و ارتفاع تأثیر می‌گذارد. این عوامل از ورودی‌های کلیدی مدل ANFIS (همان‌طور که در جدول ۸ و شکل‌های مربوط به نقشه‌ها نشان داده شده) هستند. شیب زمین، توانایی ساخت‌وساز و سهولت توسعه را محدود می‌کند و جهت‌گیری گسترش شهر را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

نقش در مدل‌سازی: مدل‌سازی شهری باید این محدودیت‌های طبیعی را در نظر بگیرد. به‌عنوان مثال، مدل باید بتواند پیش‌بینی کند که توسعه به سمت مناطق با شیب بسیار تند کمتر اتفاق می‌افتد و بیشتر در مناطق هموارتر رخ خواهد داد.

### • موقعیت استراتژیک و دسترسی‌ها (مانند دروازه ورودی استان، فاصله از جاده‌ها)

تأثیر بر توسعه: توصیف حاجی‌آباد به‌عنوان "گلوگاه ارتباطی" و "دروازه ورود به استان هرمزگان"، به همراه وجود جاده‌های متعدد (که در تحقیق به‌عنوان "فاصله از جاده‌ها" مدل شده است)، نشان‌دهنده اهمیت دسترسی‌پذیری در توسعه شهری است. مقاله به‌صراحت "فاصله از جاده‌ها" را با ضریب ۰٫۹۳، به‌عنوان یکی از قوی‌ترین عوامل محرک توسعه معرفی می‌کند.

نقش در مدل‌سازی: مدل ANFIS با در نظر گرفتن فاصله از جاده‌ها، می‌تواند پیش‌بینی کند که مناطق نزدیک به مسیرهای ارتباطی، پتانسیل بیشتری برای تبدیل شدن به کاربری مسکونی یا تجاری خواهند داشت.

### • منابع طبیعی و اقتصادی (مانند خاک حاصلخیز، آب زیرزمینی، تولید خرما)

تأثیر بر توسعه: وجود خاک حاصلخیز و منابع آب زیرزمینی، شهر حاجی‌آباد را به قطب کشاورزی، به‌خصوص در زمینه تولید خرما تبدیل کرده است. این امر مستقیماً با کاربری اراضی کشاورزی که در مقاله موردبررسی قرار گرفته، در ارتباط است. مقاله اشاره می‌کند که اراضی زراعی علیرغم فشار توسعه، مقاومت نسبی نشان داده‌اند، اما بخشی از آن‌ها نیز در معرض خطر تبدیل به کاربری‌های دیگر قرار دارند.

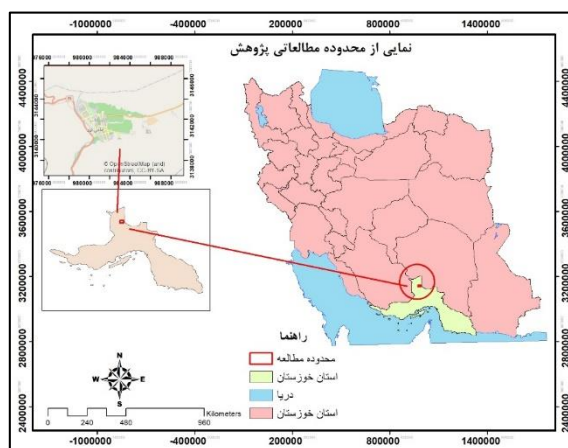
نقش در مدل‌سازی: مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی باید تعارض بین نیاز به توسعه شهری و حفظ اراضی کشاورزی ارزشمند را منعکس کند. پیش‌بینی آینده این اراضی برای برنامه‌ریزی منطقه‌ای و حفظ امنیت غذایی اهمیت دارد.

### • ماهیت توسعه شهری (مانند شتابان، نامتوازن، پیچیده)

تأثیر بر توسعه: این منطقه با توسعه شتابان شهرنشینی، توسعه پراکنده و نامتوازن و ماهیت غیرخطی و مبهم داده‌های محیطی مواجه است. این پیچیدگی‌ها باعث می‌شوند مدل‌های آماری سنتی نتوانند به‌خوبی تحولات را پیش‌بینی کنند.

نقش در مدل‌سازی: همین پیچیدگی‌ها ضرورت استفاده از مدل‌های هوشمند مانند ANFIS (که قابلیت ترکیب استدلال فازی و یادگیری عصبی را دارد) را ایجاد می‌کند. این مدل‌ها قادرند روابط غیرخطی و نامشخص بین عوامل مختلف محیطی و انسانی را بهتر تحلیل کرده و پیش‌بینی‌های دقیق‌تری ارائه دهند.

در واقع، ویژگی‌های خاص محدوده مورد مطالعه (حاجی‌آباد) نه تنها اطلاعات پس‌زمینه نیستند، بلکه محرک‌های اصلی و محدودیت‌های اساسی هستند که مدل‌سازی توسعه شهری را هدفمند و ضروری می‌سازند. بدون در نظر گرفتن این ویژگی‌ها، مدل‌سازی صرفاً انتزاعی و بی‌ارتباط با واقعیت‌های میدانی خواهد بود.



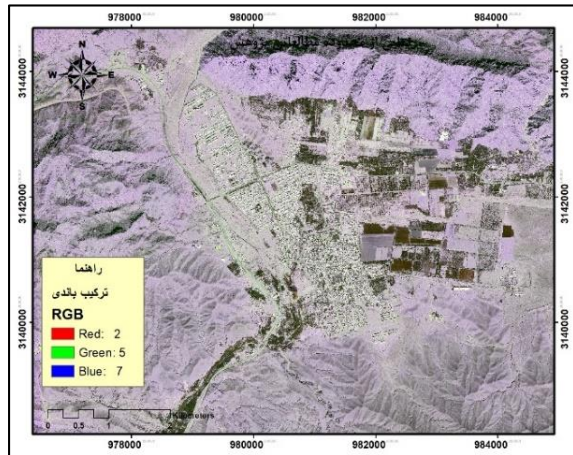
شکل ۱- محدوده مطالعاتی پژوهش

(ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۴)

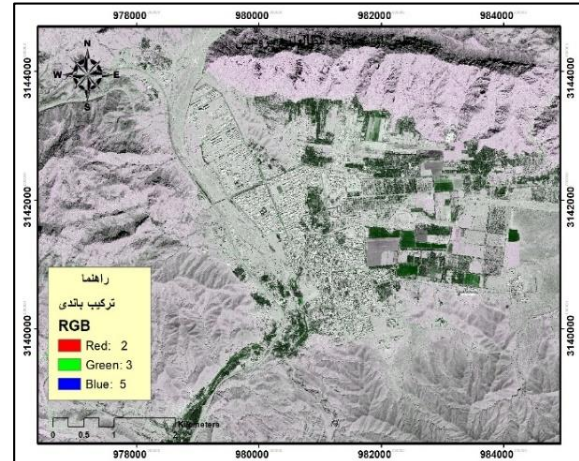
## بحث و ارائه یافته ها

### • پیش پردازش تصاویر

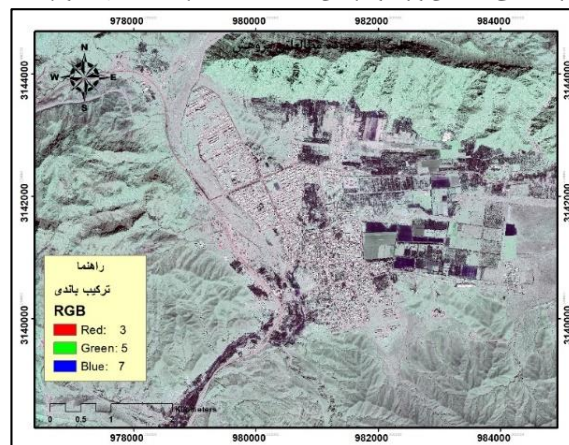
پس از تصحیح رادیومتریکی (به منظور حذف اثرات اتمسفری و سنسور) و تصحیح هندسی دقیق (با هدف تطابق پیکسلی بالا و حذف اعوجاجات) در تصویر سال ۲۰۰۵ نتایج خروجی های آن در شکل ۲ تا ۴ نشان داده شده است. این اقدامات تضمین می کند که داده های ورودی دارای بالاترین کیفیت و قابلیت مقایسه مکانی و زمانی باشند که در نهایت به افزایش دقت مدل و خروجی نهایی نقشه منجر شده است.



شکل ۳- ترکیب باندی تصویر سال ۲۰۱۵ پس از تصحیح رادیومتریکی حاجی آباد



شکل ۲- ترکیب باندی تصویر سال ۲۰۰۵ پس از تصحیح هندسی و رادیومتریکی



شکل ۴- ترکیب باندی تصویر سال ۲۰۲۵ حاجی آباد

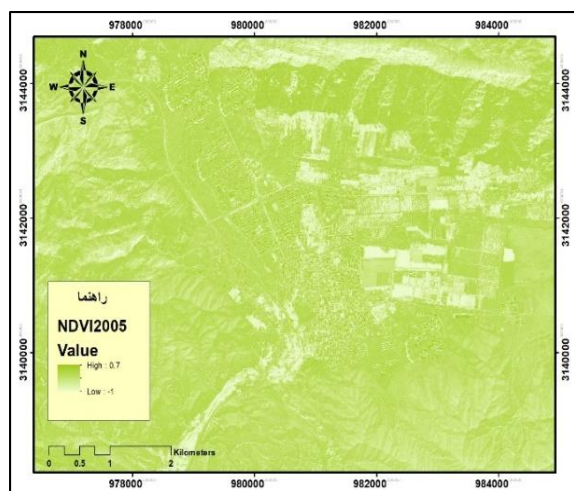
(منبع: یافته های پژوهش، ۱۴۰۴)

### • شاخص NDVI

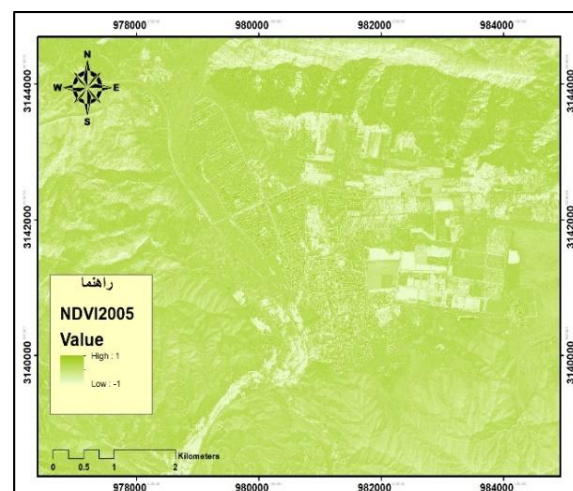
با استفاده از باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک و محاسبات مربوط به شاخص NDVI که به صورت زیر می باشد به دست آمد که در شکل ۵ الی ۷، نشان داده شده است. مناطق نزدیک به عدد ۱ نشان دهنده پوشش گیاهی و مناطق نزدیک به ۱- خاک لخت و سطوح سنگی است.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

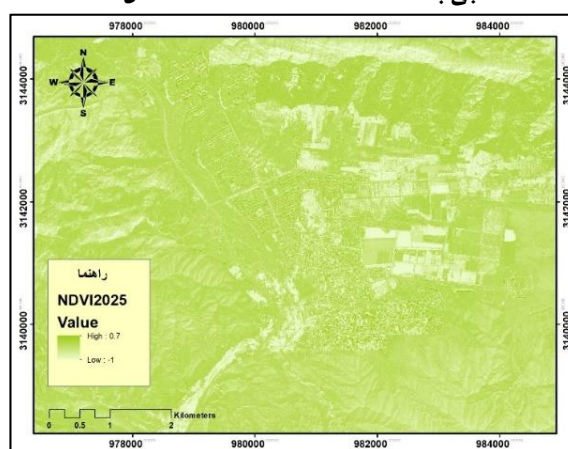
رابطه ۸:



شکل ۶- نقشه NDVI سال ۲۰۱۵ حاجی‌آباد



شکل ۵- نقشه NDVI سال ۲۰۰۵ حاجی‌آباد

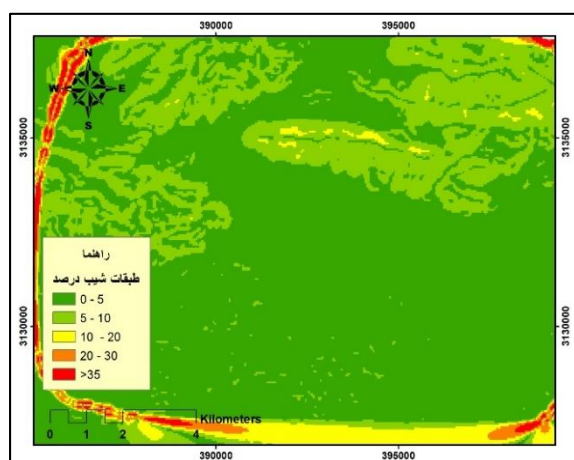


شکل ۷- نقشه NDVI سال ۲۰۲۵ حاجی‌آباد

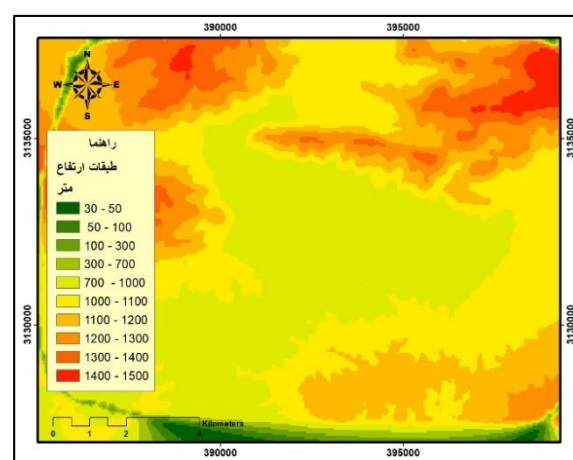
(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

### پارامترهای مؤثر در توسعه حاجی‌آباد

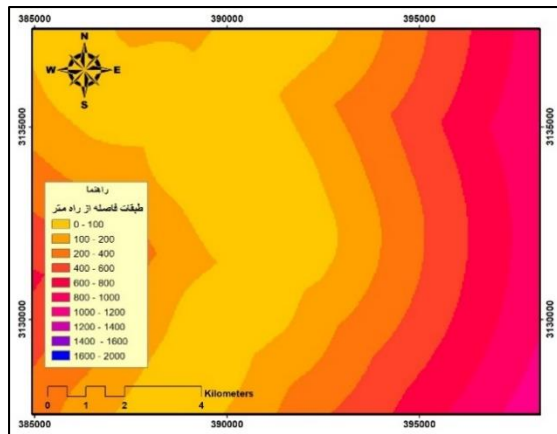
عوامل شیب، ارتفاع و جهت و فاصله از جاده و رودخانه به‌عنوان پارامترهای مؤثر در توسعه، در مدل ANFIS آماده‌سازی شد تا وارد متلب گردد. نقشه خروجی پارامترهای بیان‌شده در شکل ۸ تا ۱۲، نشان داده‌شده است.



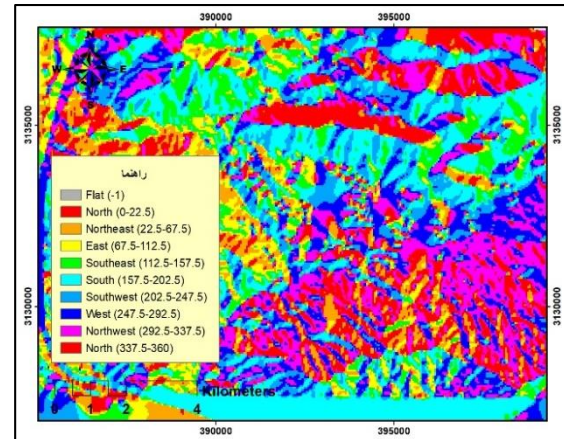
شکل ۹- نقشه طبقات شیب حاجی‌آباد



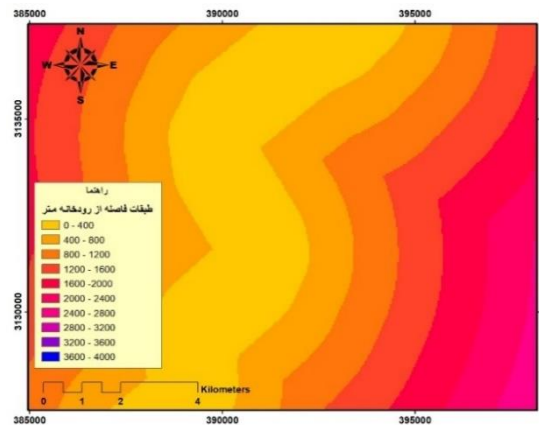
شکل ۸- نقشه طبقات ارتفاع حاجی‌آباد



شکل ۱۱- نقشه فاصله از راه های حاجی آباد



شکل ۱۰- نقشه طبقات جهت شیب حاجی آباد



شکل ۱۲- نقشه فاصله از رودخانه های حاجی آباد

(منبع: یافته های پژوهش، ۱۴۰۴)

### • نقشه کاربری اراضی سال های ۲۰۰۵، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۵ با استفاده از مدل ANFIS

داده های آماده شده به داده های آموزشی متصل و به صورت یک ماتریس واحد در متلب وارد شد. در متلب با استفاده از جعبه ابزار فازی Fuzzy Logic Toolbox و رابط گرافیکی GUI مدل ANFIS پیاده سازی شد. پس از بارگذاری داده ها و جداسازی داده های آموزشی و اعتبارسنجی، تنظیمات اولیه سیستم فازی استنتاجی (FIS) مانند تعداد توابع عضویت و روش پارتیشن بندی تعیین شد. تعداد تکرارها و روش بهینه سازی (Hybrid) مشخص شد و مدل آموزش داده شد. سپس ارزیابی عملکرد مدل آموزش دیده انجام پذیرفت؛ و در نهایت نتایج به کل داده ها تعمیم داده شد.

### جدول ۲- مشخصات سیستم استنتاج فازی عصبی

| سیستم استنتاج فازی سوگو | نوع سیستم استنتاج اولیه        |
|-------------------------|--------------------------------|
| ۶                       | تعداد ورودی ها                 |
| ۱ متغیر (توسعه شهری)    | تعداد خروجی ها                 |
| ۳ برای هر ورودی         | تعداد تابع عضویت برای هر متغیر |
| gbellmf (زنگوله ای)     | نوع توابع عضویت ورودی          |
| linear (خطی)            | نوع تابع عضویت خروجی           |
| ۷۲۹ قانون ( $6^3$ )     | تعداد قوانین فازی              |
| Sugeno                  | روش استنتاج                    |
| prod                    | عملگر AND                      |
| probor                  | عملگر OR                       |
| wtaver                  | روش defuzzification            |

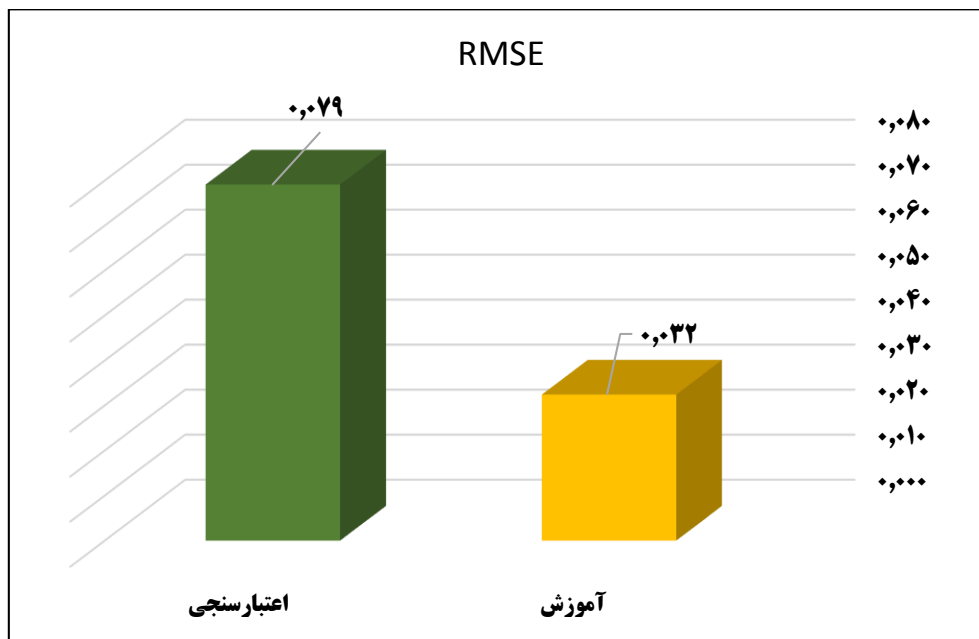
(منبع: یافته های پژوهش، ۱۴۰۴)

در نهایت خطای RMSE و پارامترهای اعتبارسنجی برای مدل ANFIS محاسبه گردید که مطابق جدول ۳ و شکل ۱۳ می‌باشد. ماتریس همبستگی در این مدل، ضریب همبستگی ۰٫۹۶۷۸ را نشان داد.

جدول ۳- نتایج ارزیابی مدل ANFIS

| معیار          | آموزش  | اعتبارسنجی |
|----------------|--------|------------|
| RMSE           | ۰٫۰۳۳۴ | ۰٫۰۷۹۱     |
| MAE            | ۰٫۰۲۵۸ | ۰٫۰۶۰۱     |
| R <sup>2</sup> | ۰٫۸۷۹۱ | ۰٫۸۳۵۴     |

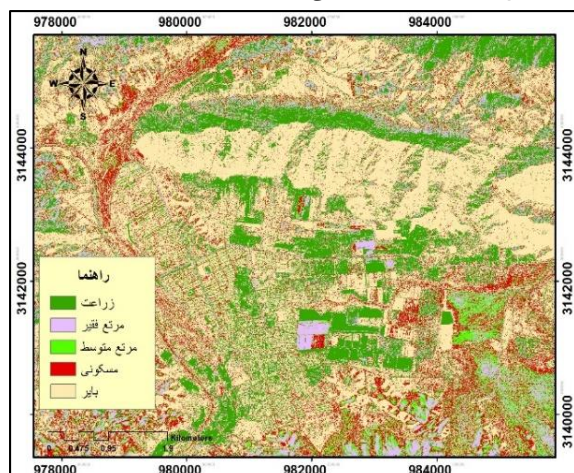
(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)



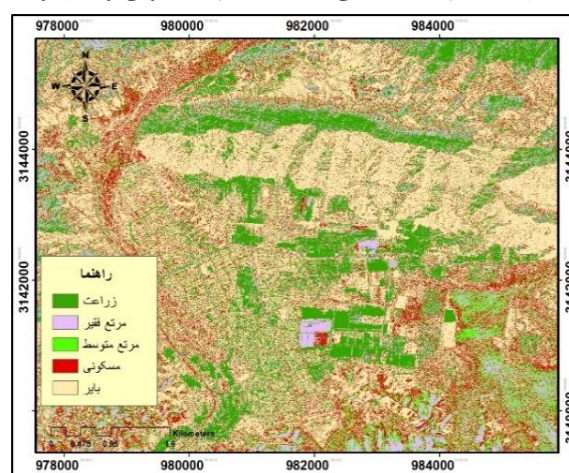
شکل ۱۳- نمودار نتایج ارزیابی مدل ANFIS

(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

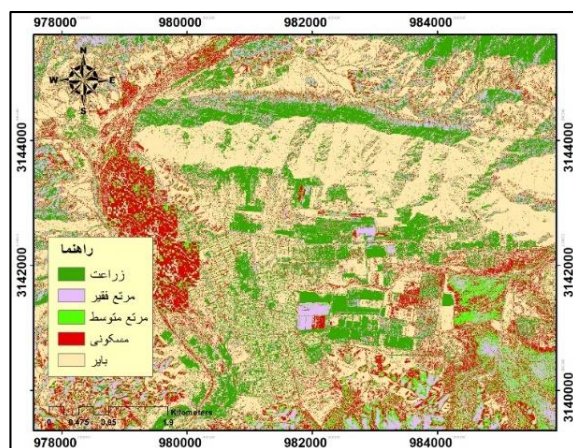
نقشه‌های کاربری اراضی با استفاده از مدل ANFIS، در بازه زمانی ۲۰ ساله طی سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۵ تهیه شد. در این رابطه شش کاربری شامل زراعت آبی، زراعت دیم، مسکونی و بایر بوده است که در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۵- نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۵ مدل ANFIS



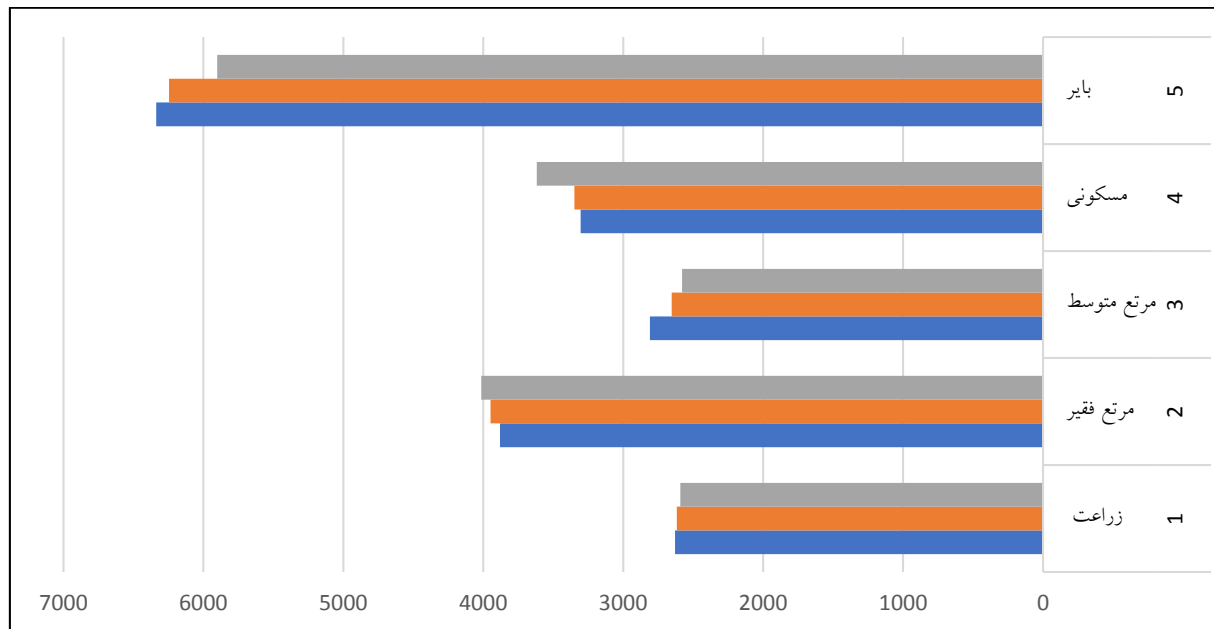
شکل ۱۴- نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۰۵ مدل ANFIS



شکل ۱۶- نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲۵ مدل ANFIS

(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

تحلیل دقیق تغییرات مساحت نشان می‌دهد که در بازه زمانی ۲۰ ساله، منطقه با تغییرات وزنی قابل توجهی روبرو شده است؛ به طوری که اراضی بایر با بیشترین میزان کاهش، از مساحت ۶۳۳۶٫۸۵ در سال ۲۰۰۵ به ۵۹۰۱٫۲۳ در سال ۲۰۲۵ رسیده است که نشان‌دهنده خروج حدود ۴۳۵ واحد از این کاربری است. در همین حال، اراضی مسکونی با یک روند صعودی مستمر، از مساحت ۳۳۰۴٫۵۴ هکتار به ۳۶۱۷٫۷۱ افزایش یافته که حاکی از الحاق بیش از ۳۱۳ واحد به بافت ساخت‌وساز شهری است. در بخش منابع طبیعی نیز، کاهش مساحت مراتع متوسط از ۲۸۰۹٫۴۱ به ۲۵۷۹٫۱۶ و افزایش اراضی مرتع فقیر از ۳۸۸۱٫۲۹ به ۴۰۱۵٫۰۶، به وضوح فرآیند تنزل کیفیت اراضی را به تصویر می‌کشد. همچنین، اراضی زراعی نیز با کاهشی تدریجی از مقدار ۲۶۲۹٫۹۳ به ۲۵۹۱٫۶۳ رسیده‌اند که نشان‌دهنده پایداری نسبی اما روبه‌زوال این کاربری در برابر توسعه مسکونی است.



شکل ۱۷- تغییرات کاربری‌ها از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵

(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

این هم‌پوشانی یا خطای طبقه‌بندی (Misclassification) که در آن مسیل‌ها و بستر رودخانه‌های فصلی به عنوان اراضی مسکونی شناسایی شده‌اند، معمولاً ناشی از دلایل زیر است:

- تشابه بازتاب طیفی
- مسئله پیکسل‌های مخلوط
- ضعف در آموزش مدل

### • نتایج ارزیابی صحت طبقه‌بندی‌های انجام‌شده

پس از طبقه‌بندی تصویر ارزیابی صحت طبقه‌بندی با استفاده از ۱۵۰ نقطه کنترل که ۷۵ نقطه در آموزش و ۷۵ نقطه در ارزیابی صحت طبقه‌بندی استفاده شد، انجام گرفت. نتایج ارزیابی صحت طبقه‌بندی در جدول ۴، نشان داده شده است. می‌توان با توجه به جدول ۴ بیان کرد بالاتر بود ضریب کاپا و دقت کلی در سال ۲۰۲۵ به دلیل وجود نقاط کنترل به‌روزتر می‌باشد.

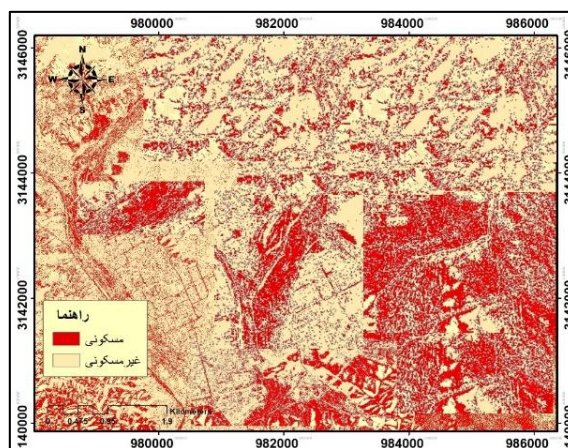
جدول ۴- ضریب کاپا و دقت کلی طبقه‌بندی منطقه مورد مطالعه

| پارامتر آماری | سال ۲۰۰۵ | سال ۲۰۱۵ | سال ۲۰۲۵ |
|---------------|----------|----------|----------|
| ضریب کاپا     | ۸۲,۳۱    | ۸۴,۴۹    | ۹۰,۷۷    |
| دقت کلی       | ۸۳,۴۱    | ۸۵,۱۰    | ۹۱,۲۳    |

(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

### • پیش‌بینی پتانسیل انتقال با ANFIS

در نهایت، پس از اعتبارسنجی مدل ANFIS به‌صورت یک تابع رگرسیونی، احتمال (پتانسیل) وقوع این انتقال را برای هر پیکسل در منطقه مورد مطالعه (با استفاده از مقادیر عوامل محرک آن پیکسل) پیش‌بینی نموده است و بدین ترتیب نقشه پتانسیل انتقال به دست آمد که در شکل ۱۸، نشان داده شده است.



شکل ۱۸- نقشه پتانسیل انتقال سال ۲۰۲۵ با ANFIS

(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

### • پیش‌بینی روند تغییرات کاربری اراضی با CA-MARCOVE

در این مطالعه با استفاده از نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۵ و ۲۰۲۵ و همچنین روش‌های زنجیره مارکوف و مدل اتومای سلولی (CA) به پیش‌بینی و شبیه‌سازی روند تغییرات کاربری برای سال ۲۰۴۵ و ۲۰۵۵ پرداخته شد. روش زنجیره مارکوف تصاویر پهنه‌بندی کاربری اراضی را تحلیل و یک خروجی به شکل ماتریس احتمالی تغییرات و یک تصویر خروجی از ماتریس احتمالی برای سال افق را ارائه می‌دهد. زنجیره مارکوف یک ماتریس انتقال و یک ماتریس مناطق انتقال و مجموعه‌ای از تصاویر احتمال شرطی با استفاده از آنالیز کیفی دو تصویر کاربری اراضی با دو زمان متفاوت ایجاد می‌نماید. جدول ۵ و ۶ پیش‌بینی روند تغییرات کاربری اراضی در سال‌های ۲۰۴۵ و ۲۰۵۵ را با استفاده از زنجیره‌های مارکوف نشان می‌دهد.

جدول ۵- ماتریس احتمال تبدیل برای بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۵

| کاربری از / به | مسکونی | بایر  | مرتج فقیر | مرتج متوسط | زراعت |
|----------------|--------|-------|-----------|------------|-------|
| مسکونی         | ۰.۹۸۵  | ۰.۰۰۲ | ۰.۰۰۵     | ۰.۰۰۳      | ۰.۰۰۵ |
| بایر           | ۰.۰۶۵  | ۰.۸۸۲ | ۰.۰۲۵     | ۰.۰۱۵      | ۰.۰۱۳ |
| مرتج فقیر      | ۰.۰۱۲  | ۰.۰۰۸ | ۰.۹۶۵     | ۰          | ۰.۰۱۵ |
| مرتج متوسط     | ۰.۰۲۵  | ۰.۰۱۵ | ۰.۰۸۲     | ۰.۸۶۸      | ۰.۰۰۱ |
| زراعت          | ۰.۰۲۲  | ۰.۰۱۲ | ۰.۰۱۸     | ۰          | ۰.۹۴۸ |

(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

ماتریس انتقال به خوبی پویایی تغییرات اراضی را نشان می دهد؛ به طوری که ضریب پایداری ۰,۹۸۵ برای کاربری مسکونی تأیید کننده رشد قطعی و عدم بازگشت این اراضی به حالت طبیعی است، در حالی که ضریب پایداری پایین تر اراضی بایر (۰,۸۸۲) علت اصلی کاهش مساحت ۴۳۵ واحدی آن و تبدیل شدن به فضاهای ساخته شده را تبیین می کند. همچنین، انتقال بخشی از اراضی با ضریب ۰,۰۸۲ از مرتع متوسط به مرتع فقیر، موتور محرک تغییراتی است که منجر به ریزش مساحت مراتع با کیفیت و جایگزینی آن ها با مراتع تنزل یافته شده است. در نهایت، ثبات نسبی ۰,۹۴۸ در بخش زراعت نشان می دهد که با وجود فشار توسعه شهری، این اراضی مقاومت بیشتری نسبت به تغییر کاربری نشان داده اند و تنها بخش کوچکی از مساحت ۲۶۲۹ واحدی خود را طی این دو دهه از دست داده اند.

جدول ۶- ماتریس احتمال تبدیل برای بازه زمانی ۲۰۲۵ تا ۲۰۵۵

| کاربری از / به | مسکونی | بایر  | مرتع فقیر | مرتع متوسط | زراعت |
|----------------|--------|-------|-----------|------------|-------|
| مسکونی         | ۰.۹۹۲  | ۰.۰۰۱ | ۰.۰۰۳     | ۰.۰۰۲      | ۰.۰۰۲ |
| بایر           | ۰.۰۵۵  | ۰.۹۱۵ | ۰.۰۱۵     | ۰.۰۰۸      | ۰.۰۰۷ |
| مرتع فقیر      | ۰.۰۰۸  | ۰.۰۰۵ | ۰.۹۷۸     | ۰          | ۰.۰۰۹ |
| مرتع متوسط     | ۰.۰۱۵  | ۰.۰۰۱ | ۰.۰۴۵     | ۰.۹۲۵      | ۰.۰۰۵ |
| زراعت          | ۰.۰۱۲  | ۰.۰۰۵ | ۰.۰۰۱     | ۰          | ۰.۹۷۳ |

(منبع: یافته های پژوهش، ۱۴۰۴)

مساحت کلاس ها و تغییرات کاربری های به دست آمده آن در بازه زمانی مورد مطالعه محاسبه شده که به صورت جدول شکل ۵، بود. با استفاده از Markov و CA\_Markov نقشه پیش بینی سال ۲۰۴۵ و ۲۰۵۵ تهیه شد. بر اساس عوامل دخیل در تغییرات کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه ورودی های مدل سلول های خودکار به صورت جدول (۷) انتخاب شده و پیش بینی صورت گرفته تابعی از ورودی های مدل می باشد. مساحت کلاس های نقشه پیش بینی سال ۲۰۴۵ و ۲۰۵۵ نیز در جدول ۷ و نقشه خروجی آن در شکل ۱۱ و ۱۲، نشان داده شده است.

جدول ۷- متغیرهای ورودی در مدل شبیه سازی سلول های خودکار

| ردیف | متغیر مؤثر در کاربری اراضی                  | شناسه    |
|------|---------------------------------------------|----------|
| ۱    | شیب                                         | Slope    |
| ۲    | فاصله از جاده های موجود                     | EU Road  |
| ۳    | فاصله از رودخانه                            | EU River |
| ۴    | فاصله از کاربری های ساخته شده دوره های قبلی | EU City  |

(منبع: یافته های پژوهش، ۱۴۰۴)

با محاسبه ضریب کرامر در مدل می توان، برآوردی از همبستگی هریک از متغیرها با طبقات موجود و به تبع توانایی آن در پیش بینی تغییرات به دست آورد. نتایج ضریب همبستگی کرامر نشان داد که همه متغیرهای مورد بررسی همبستگی مناسبی با طبقات موجود دارند و می توانند در مدل استفاده شوند. در جدول (۸) میزان همبستگی هر یک از متغیرهای تأثیرگذار را با تغییرات هر کلاس در سال های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۵ نشان داده شده است.

جدول ۸- میزان همبستگی (ضریب کرامر) بین متغیرهای ورودی به مدل و کلاس ها

| سال ۲۰۱۵ به ۲۰۴۵ | فاصله از مناطق ساخته شده | فاصله از رودخانه | فاصله از جاده ها | شیب زمین |
|------------------|--------------------------|------------------|------------------|----------|
| مسکونی           | ۰.۸۹                     | ۰.۴              | ۰.۹۳             | ۰.۵۸     |
| بایر             | ۰.۴۵                     | ۰.۳۲             | ۰.۵۲             | ۰.۳      |
| مرتع فقیر        | ۰.۲۲                     | ۰.۲۵             | ۰.۲              | ۰.۶۱     |
| مرتع متوسط       | ۰.۱۵                     | ۰.۲۷             | ۰.۱۲             | ۰.۷      |
| زراعت            | ۰.۳۸                     | ۰.۷۵             | ۰.۴۳             | ۰.۳۵     |
| Overall          | ۰.۶۵                     | ۰.۳۸             | ۰.۶              | ۰.۴۴     |
| سال ۲۰۲۵ به ۲۰۵۵ | فاصله از مناطق ساخته شده | فاصله از رودخانه | فاصله از جاده ها | شیب زمین |
| مسکونی           | ۰.۹۲                     | ۰.۳۸             | ۰.۹              | ۰.۶۴     |
| بایر             | ۰.۳۸                     | ۰.۳۵             | ۰.۴۸             | ۰.۳۲     |

| سال ۲۰۱۵ به ۲۰۴۵ | فاصله از مناطق ساخته شده | فاصله از رودخانه | فاصله از جاده‌ها | شیب زمین |
|------------------|--------------------------|------------------|------------------|----------|
| مرتفع فقیر       | ۰.۲۸                     | ۰.۲              | ۰.۲۵             | ۰.۵۸     |
| مرتفع متوسط      | ۰.۱                      | ۰.۳              | ۰.۱۵             | ۰.۷۴     |
| زراعت            | ۰.۴۲                     | ۰.۷۲             | ۰.۳۹             | ۰.۳۸     |

(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

مساحت کلاس‌ها و تغییرات کاربری‌های به دست آمده آن در بازه زمانی مورد مطالعه محاسبه شده که به صورت جدول شکل ۵، بود. با استفاده از Markov و CA\_Markov نقشه پیش‌بینی سال ۲۰۴۵ و ۲۰۵۵ تهیه شد. بر اساس عوامل دخیل در تغییرات کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه ورودی‌های مدل سلول‌های خودکار به صورت جدول (۹) انتخاب شده و پیش‌بینی صورت گرفته تابعی از ورودی‌های مدل می‌باشد. مساحت کلاس‌های نقشه پیش‌بینی سال ۲۰۴۵ و ۲۰۵۵ نیز در جدول ۹ و نقشه خروجی آن در شکل ۱۹ و ۲۰، نشان داده شده است. اصلی‌ترین عوامل محرک توسعه فیزیکی شهر حاجی‌آباد، فاصله از جاده‌ها (با ضریب ۰.۹۳)، و فاصله از مناطق ساخته شده (با ضریب ۰.۹۲) هستند. این بدان معناست که توسعه مسکونی بیشتر در جهاتی رخ می‌دهد که دسترسی به جاده‌ها آسان‌تر است و به مناطق شهری موجود نزدیک‌تر هستند. همچنین، شیب زمین به عنوان یک عامل محدودکننده طبیعی، بر گسترش شهر به سمت مناطق هموارتر تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین، جهت‌گیری توسعه مسکونی عمدتاً توسط دسترسی به زیرساخت‌ها و مناطق مسکونی فعلی تعیین می‌شود.

جدول ۹- مساحت طبقات (ha) نقشه پیش‌بینی سال ۲۰۴۵ و ۲۰۵۵ به روش CA\_Markov

| کاربری      | ۲۰۲۵      | پیش‌بینی ۲۰۴۵ | پیش‌بینی ۲۰۵۵ | روند کلی    |
|-------------|-----------|---------------|---------------|-------------|
| مسکونی      | ۳۶۱۷.۷۱۲  | ۴۱۵۶.۱۴       | ۴۴۲۵.۲۶       | صعودی شدید  |
| مرتفع فقیر  | ۴۰۱۵.۰۶۳۷ | ۴۱۴۸.۸۸       | ۴۲۱۵.۰۹       | صعودی ملایم |
| زراعت       | ۲۵۹۱.۶۳۴۳ | ۲۵۵۳.۹۴       | ۲۵۳۴.۳۰       | نزولی ملایم |
| مرتفع متوسط | ۲۵۷۹.۱۶۲۱ | ۲۳۴۹.۲۶       | ۲۲۳۴.۴۱       | نزولی شدید  |
| بایر        | ۵۹۰۱.۲۳۴۶ | ۵۴۶۵.۰۱       | ۵۲۴۷.۸۵       | نزولی       |

(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

مراعات متوسط بیشترین کاهش را تجربه کرده‌اند. این افت عمدتاً به دلیل تخریب کیفیت اراضی و فشارهای اکولوژیکی بر محیط اطراف شهر است. به طور خاص، اشاره شده است که انتقال بخشی از مراعات متوسط به مراعات فقیر، موتور محرک این تغییرات بوده و منجر به از دست رفتن مراعات باکیفیت و جایگزینی آن‌ها با مراعات تنزل یافته شده است. این فرآیند نشان‌دهنده کیفیت پایین‌تر اراضی و فشار زیست‌محیطی است که بر این مناطق وارد می‌شود. در واقع، مقاله نقش جاده‌ها را نه تنها عددی، بلکه تفسیری نیز بیان کرده است. همان‌طور که در پاسخ به سؤال اول ذکر شد، فاصله از جاده‌ها با ضریب ۰.۹۳، به عنوان قوی‌ترین عامل هدایت‌کننده رشد شهری در حاجی‌آباد معرفی شده است. این ضریب بالا به وضوح نشان می‌دهد که نزدیکی به جاده‌ها، عاملی کلیدی و تعیین‌کننده در گسترش مناطق مسکونی است. این یک تفسیر از نقش جاده‌هاست؛ یعنی دسترسی آسان‌تر به مناطق مختلف از طریق جاده‌ها، توسعه مسکونی را در آن جهت‌ها ترغیب می‌کند. همچنین، در بخش نتیجه‌گیری مقاله بیان شده است که فاصله از جاده‌های موجود یکی از قوی‌ترین عوامل هدایت‌کننده رشد شهری است. برای بسط تحلیل یافته‌ها و ارائه یک نگاه عمیق‌تر به خروجی‌های مدل ANFIS + CA-Markov، باید از لایه اعداد خام عبور کرده و به «تفسیر پویایی فضا» بپردازیم. در اینجا تحلیل یافته‌ها در سه سطح ساختاری، اکولوژیک و استراتژیک بسط داده می‌شود:

### تحلیل ساختار فضایی و جهت‌گیری توسعه

خروجی‌ها نشان می‌دهند که الگوی رشد شهر حاجی‌آباد از یک مدل «توسعه پراکنده» پیروی می‌کند.

- پیشران اصلی: ضریب بالای اهمیت «فاصله از جاده» نشان می‌دهد که توسعه فیزیکی به جای برنامه‌ریزی درونی، تحت تأثیر رانت دسترسی است؛ یعنی شهر به جای رشد فشرده، در لبه‌های مواصلاتی در حال «خزش» است.

- تفسیر خروجی: پیش‌بینی افزایش ۲۲ درصدی اراضی مسکونی تا سال ۲۰۵۵ (شکل‌های ۱۵ و ۱۶) نشان‌دهنده تبدیل شهر به یک ساختار خطی یا خوشه‌ای در امتداد محورهای ارتباطی است. این نوع رشد، هزینه‌های ارائه خدمات شهری (آب، برق، جمع‌آوری پسماند) را در آینده به شدت افزایش خواهد داد.

## تحلیل زوال اکولوژیک و تغییر کاربری

بسط یافته‌ها در این بخش نشان‌دهنده یک «فاجعه تدریجی» برای منابع طبیعی منطقه است:

- بلعیده شدن اراضی بایر و مراتع: کاهش چشمگیر مساحت اراضی بایر و تبدیل آن‌ها به مسکونی (۳۴۴ هکتار) تنها یک عدد نیست؛ این به معنای از دست رفتن نفوذپذیری خاک در بالادست شهر است.

- ثبات نخلستان‌ها (یک فرصت لرزان): تحلیل ماتریس مارکوف نشان می‌دهد نخلستان‌ها فعلاً کمترین نرخ تغییر را دارند. این ناشی از «ارزش اقتصادی بلندمدت» پیارم برای مالکین است؛ اما فشار توسعه شهری در سال ۲۰۵۵ به مرزهای این بافت‌های ارزشمند رسیده است. اگر پیش‌ران‌های توسعه (مثل جاده‌ها) مهار نشوند، جبهه بعدی تخریب، اعماق نخلستان‌ها خواهد بود.

## تحلیل پایداری وضعیت

بررسی ضریب پایداری ۰٫۹۹۲، برای طبقه مسکونی در خروجی مدل، یک تحلیل کلیدی را به دست می‌دهد:

این عدد به معنای «تثبیت قطعی بافت کالبدی» است. در واقع، یافته‌ها تأیید می‌کنند که در منطقه حاجی‌آباد، فرآیند «بازگشت‌پذیری» (مثلاً تبدیل زمین ساخته‌شده به فضای سبز یا زراعی) صفر است؛ بنابراین، هر پیکسلی که مدل برای سال ۲۰۵۵ به‌عنوان «مسکونی» پیش‌بینی کرده است، به معنای خروج همیشگی آن قطعه زمین از چرخه اکولوژیک منطقه است. این امر ضرورت «سخت‌گیرانه بودن» ضوابط تغییر کاربری را در همین لحظه (سال پایه) اثبات می‌کند.

## تحلیل ظرفیت برد و آینده‌نگری

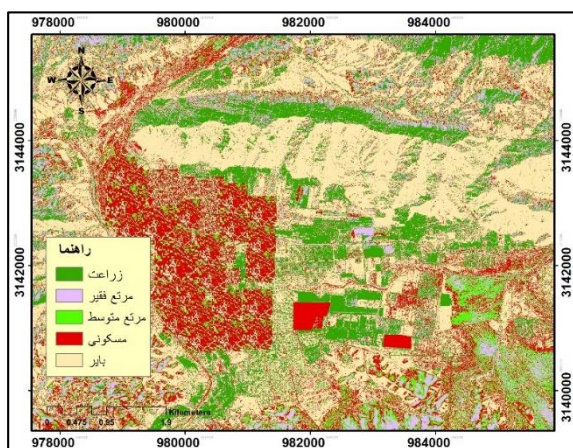
بسط یافته‌ها نشان می‌دهد که پتانسیل توسعه در جهت‌های فعلی (شمال و غرب) به اشیاع رسیده یا با موانع ژئومورفولوژیک (شیب و مسیل) روبروست. - خروجی‌های مربوط به سال ۲۰۵۵ نشان می‌دهند که شهر مجبور به تغییر جهت توسعه خواهد شد. مدل *ANFIS* به‌درستی مناطقی را با پتانسیل بالا شناسایی کرده که ممکن است اکنون بی‌ارزش به نظر برسند، اما در افق ۳۰ ساله، کانون‌های اصلی تنش زمین خواهند بود.

## نقد خروجی در انطباق با تغییرات اقلیمی

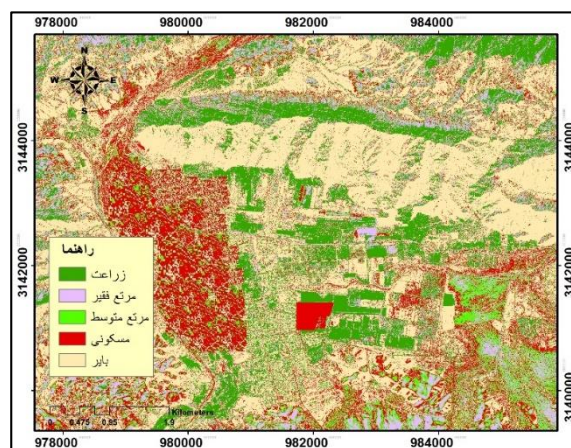
داده‌های پیش‌بینی‌شده در این مقاله باید با متغیر «تغییر اقلیم» نیز تحلیل شوند. افزایش سطح ساخته‌شده و از بین رفتن پوشش گیاهی (مراتع) در اطراف حاجی‌آباد که در نقشه‌های خروجی مشهود است، منجر به ایجاد «جزایر حرارتی شهری» در منطقه فین و حاجی‌آباد خواهد شد. این یعنی دمای خرد-اقلیم شهر در ۲۰۵۵ به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بالاتر از محیط پیرامون خواهد بود که فشار بر منابع انرژی را تشدید می‌کند.

## نتیجه‌گیری بسط یافته‌ها

پیش‌بینی‌های مدل نشان می‌دهند که حاجی‌آباد در مسیر یک «توسعه ناپایدار کالبدی» قرار دارد. نوآوری تحلیل در این است که نشان می‌دهد بدون مداخله حاکمیتی، «نیروهای بازار و دسترسی جاده‌ای» شهر را به سمت مناطق پرخطر (مسیل‌ها) و تخریب منابع پایدار (مراتع) سوق خواهند داد.



شکل ۲۰- نقشه پیش‌بینی طبقات موجود برای سال ۲۰۵۵



شکل ۱۹- نقشه پیش‌بینی طبقات موجود برای سال ۲۰۴۵

(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

## نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

مطالعات و نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که توسعه شتابان شهرنشینی، تحلیل‌های سنتی و مدل‌های آماری کلاسیک را به دلیل ماهیت غیرخطی و مبهم داده‌های محیطی با چالش مواجه کرده است. در این راستا، به‌کارگیری سیستم استنتاج عصبی-فازی (ANFIS) به‌عنوان یک ابزار هوشمند، با ترکیب قابلیت یادگیری شبکه‌های عصبی و استدلال فازی، راهکاری بهینه برای تحلیل عدم قطعیت‌ها فراهم آورده است. یافته‌های تحقیق حاضر همسو با پژوهش‌های جهانی، دقت بالای این مدل را در پهنه‌بندی و پیش‌بینی گسترش فیزیکی شهرها تأیید می‌کند؛ به‌طوری‌که ضریب همبستگی ۰٫۹۶۷۸ و ضریب تبیین ( $R^2$ ) بالای ۰٫۸۳ در مرحله اعتبارسنجی، گویای توانایی منحصربه‌فرد این مدل در استخراج روابط پیچیده میان عوامل محرک توسعه (نظیر شیب، فاصله از جاده و دسترسی‌ها) است.

تحلیل دوره‌ای ۲۰ ساله در محدوده شهر حاجی‌آباد نشان‌دهنده پویایی شدید در تغییرات کاربری اراضی است: توسعه مسکونی: اراضی مسکونی با روندی مستمر از ۳۳۰۴ هکتار در سال ۲۰۰۵ به ۳۶۱۷ هکتار در سال ۲۰۲۵ رسیده است که نشان‌دهنده الحاق بیش از ۳۱۳ هکتار به بافت کالبدی شهر است. زوال اراضی بایر و اراضی طبیعی: اراضی بایر با کاهش حدود ۴۳۵ واحدی، بیشترین میزان واگذاری را به نفع توسعه شهری داشته‌اند. همچنین، تبدیل بخشی از مراتع متوسط به مراتع فقیر، نشان‌دهنده تنزل کیفیت اراضی و فشارهای اکولوژیک بر محیط پیرامون شهر است. پایداری زراعت: اراضی زراعی علیرغم فشارهای توسعه، کمترین نرخ تغییر را داشته‌اند که نشان‌دهنده مقاومت نسبی این کاربری در برابر تغییرات سریع است. استفاده از مدل ترکیبی CA-Markov برای آینده‌پژوهی منطقه، تداوم الگوهای فعلی را با شدت بیشتر پیش‌بینی می‌کند. ماتریس احتمال انتقال نشان می‌دهد که کاربری مسکونی با ضریب پایداری بسیار بالای ۰٫۹۹۲، در افق ۲۰۵۵، به یک وضعیت بازگشت‌ناپذیر تبدیل شده است. طبق این پیش‌بینی، مساحت مناطق مسکونی تا سال ۲۰۵۵ به بیش از ۴۴۲۵ هکتار خواهد رسید که این امر ضرورت برنامه‌ریزی برای زیرساخت‌های شهری و مدیریت منابع آب را در این قطب اقتصادی هرمزگان دوچندان می‌کند. نتایج ضریب همبستگی کرامر مشخص ساخت که "فاصله از جاده‌های موجود" با ضریب ۰٫۹۳ و "فاصله از مناطق ساخته‌شده" با ضریب ۰٫۹۲، قوی‌ترین عوامل هدایت‌کننده رشد شهری در حاجی‌آباد هستند. در مقابل، "شیب زمین" به‌عنوان یک عامل محدودکننده طبیعی، نقش مهمی در جهت‌دهی به گسترش فیزیکی شهر در نواحی هموارتر ایفا می‌کند.

در نهایت، این پژوهش ثابت کرد که ترکیب مدل‌های هوشمند ANFIS و CA-Markov، با پر کردن شکاف‌های موجود در پیشینه‌های قبلی، ابزاری قدرتمند برای هوشمندسازی فرآیندهای برنامه‌ریزی شهری فراهم می‌کند. با توجه به روند کاهشی مراتع و افزایش اراضی ساخته‌شده، پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاران شهری حاجی‌آباد با بهره‌گیری از نقشه‌های پتانسیل انتقال، از توسعه بی‌رویه در مناطق حساس زیست‌محیطی جلوگیری کرده و به سمت مدل‌های توسعه پایدار و فشرده حرکت کنند تا از تخریب بیشتر منابع حیاتی نظیر نخلستان‌های پیارم و مراتع منطقه ممانعت به عمل آید.

**گذار از توصیف گذشته به شبیه‌سازی آینده:** بسیاری از پژوهش‌های جغرافیایی تنها به بررسی تغییرات گذشته (مثلاً ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۵) بسنده می‌کنند؛ اما در این مقاله، آینده‌پژوهی با استفاده از مدل ترکیبی CA-Markov، بازه‌های زمانی دوربرد (۲۰۴۵ و ۲۰۵۵) را هدف قرار داده است. این کار به برنامه‌ریزان اجازه می‌دهد تصویری از آینده داشته باشند و بدانند اگر روند فعلی ادامه یابد، با چه وضعیتی روبرو خواهند شد.

**شناسایی سناریوی تداوم روند:** اصلی آینده‌پژوهی در اینجا، ترسیم سناریوی محتمل بر اساس داده‌های تاریخی است. مقاله با ارائه اعداد دقیق پیش‌بینی می‌کند که در سال ۲۰۵۵: ۱- مساحت مسکونی ۲۲ درصد افزایش می‌یابد و ۲- ۳۴۴ هکتار از مراتع باکیفیت «بلعیده» می‌شوند که این نوع تحلیل، ماهیت هشداردهنده دارد که از ویژگی‌های بارز مطالعات آینده‌پژوهانه است.

**تحلیل پایداری و برگشت‌ناپذیری:** در آینده‌پژوهی، درک «ثبات» یک پدیده حیاتی است. مقاله با استخراج عدد ۰٫۹۹۲ برای پایداری اراضی مسکونی، نشان می‌دهد که وقتی زمینی شهری شد، بازگشت آن به طبیعت تقریباً غیرممکن است. این تحلیل به مدیران شهری می‌گوید که تصمیمات امروز آن‌ها برای تغییر کاربری، آثاری قطعی و همیشگی بر چهره زمین در دهه‌های آینده خواهد داشت.

تبدیل مدل ریاضی به ابزار تصمیم‌سازی: آینده‌پژوهی در این تحقیق، شکاف بین ریاضیات (ANFIS) و برنامه‌ریزی را پر می‌کند. با شناسایی محرک‌هایی مثل «فاصله از جاده» (با ضریب ۰٫۹۳)، مقاله به‌جای ارائه آمارهای خام، پیشران‌های تغییر را معرفی می‌کند. این یعنی آینده‌پژوهی به مسئولان می‌گوید که «توسعه جاده‌ها» موتور محرک اصلی گسترش فیزیکی در آینده خواهد بود و برای کنترل شهر، باید مدیریت دسترسی‌ها را جدی بگیرند.

**بومی سازی مدل ترکیبی ANFIS و CA-Markov در منطقه حاجی آباد:** درحالی که اکثر مطالعات قبلی در ایران از مدل های رگرسیونی ساده یا زنجیره مارکوف به تنهایی استفاده می کردند، این مقاله برای اولین بار در محدوده شمال هرمزگان (حاجی آباد)، قدرت یادگیری شبکه های عصبی را با منطق فازی در مدل ANFIS ترکیب کرده تا «عدم قطعیت» در تصمیم گیری های انسانی و محدودیت های طبیعی منطقه را مدل سازی کند.

**گذار از تحلیل های خطی به تحلیل های غیرخطی:** نوآوری متدولوژیک این تحقیق در استفاده از ANFIS برای استخراج وزن پارامترهاست. بر خلاف مدل های رایج مثل AHP که وزن دهی در آن ها بر اساس نظر شخصی کارشناس است، در این مقاله مدل خود را با داده های واقعی «آموزش» داده و روابط پیچیده و غیرخطی بین پارامترهایی مثل فاصله از جاده و شیب را به صورت خودکار استخراج کرده است (با ضریب همبستگی بالای ۰٫۹۶).

**شبیه سازی بلندمدت با افق ۳۰ ساله ۲۰۵۵:** بسیاری از پژوهش ها تنها به پیش بینی های کوتاه مدت ۱۰ ساله بسنده می کنند. نوآوری این مقاله در ارائه یک دیدگاه آینده پژوهانه دوربرد (افق ۲۰۵۵) است که «سناریوی تداوم روند» را با دقت پیکسلی ۳۰ متری به تصویر می کشد و پیامدهای ناشی از «بلعیده شدن» اراضی طبیعی را به شکلی ملموس هشدار می دهد.

شناسایی «پایداری انتقال» در کاربری مسکونی: استفاده از ماتریس احتمال انتقال برای اثبات برگشت ناپذیری توسعه شهری (با ضریب پایداری خیره کننده ۰٫۹۹۲) یک نوآوری در تفسیر داده ها است. این مطالعه نشان می دهد که توسعه در این منطقه نه یک تغییر موقت، بلکه یک «تثبیت قطعی» است که ضرورت مدیریت هوشمند زمین را دوچندان می کند.

**ترکیب عوامل انسانی (جاده و بافت ساختمانی) با محدودیت های ژئومورفولوژیک:** در این مقاله، صرفاً به توسعه کالبدی توجه نشده، بلکه نقش «شیب» به عنوان یک سد طبیعی در کنار «جاده» به عنوان یک محرک انسانی، به صورت هم زمان در یک سیستم فازی تحلیل شده است تا واقعی ترین الگوی توسعه فیزیکی شهر به دست آید. در ادامه بر اساس یافته های پژوهش، پیشنهادهایی ارائه شده است:

- اتخاذ الگوی توسعه فشرده: جلوگیری از پراکنده رویی شهر و تمرکز بر نوسازی بافت های موجود به جای الحاق اراضی جدید،
- حفاظت از نخلستان ها: صیانت ویژه از نخلستان های «پیارم» و اراضی زراعی در برابر تغییر کاربری، به دلیل مقاومت فعلی و اهمیت اقتصادی آن ها،
- کنترل حریم جاده ها: نظارت دقیق بر ساخت و سازهای حاشیه محورهای ارتباطی (به دلیل نقش جاده به عنوان محرک اصلی توسعه در مدل)،
- جلوگیری از توسعه در مناطق پرخطر: ممنوعیت صدور مجوز در نواحی با شیب بالا، حاشیه مسیل ها و دشت های آبرفتی حساس،
- هدایت توسعه به اراضی بایر: اولویت دهی به اراضی بایر شناسایی شده برای ساخت و ساز جهت جلوگیری از تخریب بیشتر مراتع با کیفیت،
- استفاده از نقشه های پتانسیل: به کارگیری نقشه های استخراج شده از مدل ANFIS به عنوان اسناد بالادستی در طرح های جامع و تفصیلی شهر،
- مدیریت منابع آب: برنامه ریزی برای تأمین زیرساخت های آبی متناسب با پیش بینی افزایش ۲۲ درصدی جمعیت و مساحت مسکونی تا سال ۲۰۵۵.

## References:

- Abebe, G., Getachew, D., & Ewunetu, A., (2021). Analysing land use/land cover changes and its dynamics using remote sensing and GIS in Gubalafito district, Northeastern Ethiopia, SN Applied Sciences, 4(1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04915-8>
- Alberti, M., Weeks, R., & Coe, S., (2004). Urban land-cover change analysis in central Puget Sound, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 70(9), 1043-1052. <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.70.9.1043>
- Belal, A. A., & Moghanm, F. S., (2011). Detecting urban growth using remote sensing and GIS techniques in Al Gharbiya governorate, Egypt, The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 14(2), 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2011.09.001>
- Chamling, M. & Bera, Biswajit., (2020). Spatio-temporal Patterns of Land Use/Land Cover Change in the Bhutan-Bengal Foothill Region Between 1987 and 2019: Study Towards Geospatial Applications and Policy Making, Earth Systems and Environment. 4. 10.1007/s41748-020-00150-0. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00150-0>
- Chen, Y. (2013). New approaches for calculating Moran's index of spatial autocorrelation, PloS one, 8(7), e68336. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068336>

- Cochran, W. G. (1977). Sampling Techniques, 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York. ISBN: 978-0-471-16240-7
- Congalton, R.G., 1991, A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data, Remote Sensing of Environment, 37, 35-46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-b](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-b)
- Das, S., & Angadi, D. P. (2022). Land use land cover change detection and monitoring of urban growth using remote sensing and GIS techniques: a micro-level study, GeoJournal, 87(3), 2101-2123. <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10359-1>
- Esmailpour, N., & Azizpour, F. (2009). Agricultural land use change and the relative increase in Yazd city temperature due to its rapid growth. Journal of Geography and Regional Development, (12), 37-54. <https://doi.org/10.22067/geography.v7i12.8927> [In Persian]
- Ewing, R. (1994). Causes, characteristics, and effects of sprawl: a literature review, Environmental and Urban Issues 21(2): pp. 1-15. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5\\_34](https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5_34)
- Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment, Remote sensing of environment, 80(1), 185-201. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(01)00295-4)
- Hassan, Z., Shabbir, R., Ahmad, S. S., Malik, A. H., Aziz, N., Butt, A., & Erum, S. (2016). Dynamics of land use and land cover change (LULCC) using geospatial techniques: a case study of Islamabad Pakistan, SpringerPlus, 5(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2414-z>
- Mohajane, M., Essahlaoui, A., Oudija, F., Hafyani, M. E., Hmadi, A. E., Ouali, A. E., ... & Teodoro, A. C. (2018). Land use/land cover (LULC) using landsat data series (MSS, TM, ETM+ and OLI) in Azrou Forest, in the Central Middle Atlas of Morocco, Environments, 5(12), 131. <https://doi.org/10.3390/environments5120131> [In Persian]
- Mostafa, E., Li, X., Sadek, M., & Dossou, J. F. (2021). Monitoring and Forecasting of Urban Expansion Using Machine Learning-Based Techniques and Remotely Sensed Data: A Case Study of Gharbia Governorate, Egypt, Remote Sensing, 13(22), 4498. <https://doi.org/10.3390/rs13224498>
- Mousavi, M., Jafarpour Ghalehtemouri, K. & Bayramzadeh, N. (2025). Assessing social infrastructure in border areas from a city prosperity perspective: a case study of border townships in West Azarbaijan Province, Iran. Discov Cities, 2(13). <https://doi.org/10.1007/s44327-025-00057-3>
- Quintano, C., Fernández-Manso, A., Shimabukuro, Y. E., & Pereira, G. (2012). Spectral unmixing, International Journal of Remote Sensing, 33(17), 5307-5340. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.661095>
- Rahnama, M. R., & bolori, Z., (2022). Analysis of the growth effects of Amol city on the surrounding environment using remote sensing and geographic information system, Political Organizing of Space, 4 (4) :288-302. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.26455145.2022.4.4.1.7> [In Persian]
- Rwanga, S. S., & Ndambuki, J. M. (2017). Accuracy assessment of land use/land cover classification using remote sensing and GIS, International Journal of Geosciences, 8(04), 611. <https://doi.org/10.4236/ijg.2017.84033>
- Seifolddini, F., Ziari, K., Pourahmad, A., & Nikpour, A. (2011). Explanation of Dispersion and Compactness of Urban Form in Amol City, Considering Sustainable Urban Form, Human Geography Research, 44(80), 155-176. <https://doi.org/10.22059/JHGR.2012.24606> [In Persian]
- Shao, Y., Lan, J., Zhang, Y., & Zou, J. (2018). Spectral unmixing of hyperspectral remote sensing imagery via preserving the intrinsic structure invariant, Sensors, 18(10), 3528. <https://doi.org/10.3390/s18103528>
- Soleimani Mehrnejani, M., Shahsavari, A., & Ebadi, N. (2024). Future Study of the Spatial Development of the Peri-Urban Areas (Case Study: Southern Range of the 19th District of Tehran Megalopolis). Journal of Geography and Regional Future Studies, 2(3), 1-23. <https://doi.org/10.30466/grfs.2024.55076.1038> [In Persian]
- UNICEF Annual Report. (2012). World Population Prospects The 2012 Revision, Volume II: Demographic Profiles, New York. <https://reliefweb.int/attachments/>
- Zhu, Z., (2017). Change detection using Landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 130, 370-384. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs>
- Zortea, M., & Plaza, A. (2009). Spatial preprocessing for endmember extraction, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(8), 2679-2693. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2014945>



#### COPYRIGHTS



© Authors retain the copyright and full publishing rights. This is an open access article under the CC BY-NC license:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

**Publisher:** Urmia University.