



## Spatio-Temporal Analysis of Urban Expansion in Birjand and Its Relationship with Geomorphological Factors Using SVM and the UEII Index

Hamid Amoonia<sup>1</sup>✉, Mohammadreza Yousefiroshan<sup>2</sup>, Amirali Safarnezhad<sup>3</sup>, Mohammadmehdi Piran<sup>4</sup>

1. (Corresponding Author) Department of Geography Education, Farhangian University, P.O. Box 14665-889, Tehran, Iran.

Email: [h.amoonia@cfu.ac.ir](mailto:h.amoonia@cfu.ac.ir)

2 Department of Geography Education, Farhangian University, P.O. Box 14665-889, Tehran, Iran.

Email: [mr.yousefiroshan@cfu.ac.ir](mailto:mr.yousefiroshan@cfu.ac.ir)

3. Department of Geography Education, Farhangian University, P.O. Box 14665-889, Tehran, Iran.

Email: [mr.yousefiroshan@cfu.ac.ir](mailto:mr.yousefiroshan@cfu.ac.ir)

4. Department of Geography Education, Farhangian University, P.O. Box 14665-889, Tehran, Iran.

Email: [m\\_piran@cfu.ac.ir](mailto:m_piran@cfu.ac.ir)

### Article Info

**Article Type:**  
Research Article

### Article History:

**Received:**

28 December 2025

**Received in revised form:**

27 February 2025

**Accepted:**

25 April 2025

**pp.** 159-172

### Keywords:

Urban expansion,  
UEII,  
Geomorphological factors,  
Remote sensing,  
Birjand.

### ABSTRACT

The physical expansion of cities, particularly in arid and semi-arid regions, has important environmental and planning implications, making it necessary to understand the role of natural factors in shaping the direction and intensity of urban growth. This study analyzes the influence of selected geomorphological variables on the urban expansion of Birjand City during five time periods (2000, 2010, 2015, 2020, and 2024). Landsat imagery was processed using object-based classification with a Support Vector Machine (SVM) to extract built-up areas, after which the city was divided into eight direction-oriented sectors and the Urban Expansion Intensity Index (UEII) was calculated for each sector. UEII values and natural variables including elevation, slope, aspect, curvature, Topographic Position Index (TPI), distance to rivers, distance to faults, and geological formations were extracted from sampling points and their relationships were examined using Pearson correlation analysis. Comparison with similar studies indicates methodological consistency and suggests a relative transferability of natural-urban patterns under comparable climatic conditions. The results indicate that elevation shows the strongest and most stable positive correlation with UEII, whereas distance to faults and geological formations exhibit notable negative correlations, and that urban development is mainly concentrated in the southern and southeastern sectors. The temporal trend of mean absolute correlation coefficients intensified until approximately 2015–2020 and declined thereafter, implying an increasing influence of human and policy-related factors on recent urban expansion.

**Cite this article:** Amoonia, H. Yousefiroshan, M. Safarnezhad, A. and Piran, M. (2026). Spatio-Temporal Analysis of Urban Expansion in Birjand and Its Relationship with Geomorphological Factors Using SVM and the UEII Index. *Quantitative Geomorphological Research*, 14(4). 159-172.

**Doi:** [10.22034/gmpj.2026.568644.1595](https://doi.org/10.22034/gmpj.2026.568644.1595)

## Extended Abstract

### Introduction

Urban expansion is a major spatial outcome of socio-economic change and a critical challenge for sustainable urban development, particularly in arid and semi-arid regions. In such environments, physical urban growth is strongly influenced by natural constraints, and geomorphological factors play a decisive role in shaping the direction, intensity, and spatial pattern of expansion. Variables such as elevation, slope, geological formations, drainage conditions, and tectonic structures may either facilitate or restrict urban development. Ignoring these constraints can increase environmental vulnerability and exposure to natural hazards. Consequently, understanding the interaction between urban expansion and geomorphological factors is essential for risk-aware urban planning. In Iran, rapid urban growth over recent decades has been driven by population increase, administrative restructuring, and service concentration. While many studies have focused on metropolitan areas, medium-sized cities located in dry and environmentally constrained settings have received comparatively less attention. Birjand, the capital of South Khorasan Province in eastern Iran, represents a typical medium-sized city that has experienced notable physical expansion during the past two decades. At the same time, the city is situated in a geomorphologically sensitive environment characterized by variable topography, heterogeneous geological formations, active fault systems, limited water resources, and seasonal drainage networks. These conditions make Birjand a suitable case for examining the influence of geomorphological factors on urban expansion. This study aims to analyze the spatio-temporal pattern of urban expansion in Birjand from 2000 to 2024 and to quantitatively assess its relationship with selected geomorphological variables.

### Methodology

This study adopts a quantitative and applied approach integrating remote sensing,

geographic information systems, and statistical analysis. Multi-temporal Landsat images acquired by the TM and OLI sensors for the years 2000, 2010, 2015, 2020, and 2024 were obtained from the United States Geological Survey. Standard radiometric, atmospheric, and geometric corrections were applied to ensure comparability across time periods. Urban built-up areas were extracted using an object-based image analysis approach combined with the Support Vector Machine classification algorithm. Classification accuracy was evaluated using stratified random sampling and an error matrix, and the results indicated acceptable overall accuracy and Kappa coefficients for all periods. Urban expansion intensity was quantified using the Urban Expansion Intensity Index, which measures the proportion of newly developed built-up land relative to the total study area within each time interval. To analyze directional growth patterns, the study area was divided into eight equal directional sectors based on the city center, and UEII values were calculated for each sector and each time period. Geomorphological variables, including elevation, slope, aspect, curvature, topographic position index, distance from faults, distance from rivers, and geological formations, were derived from a digital elevation model and thematic spatial datasets. Pearson correlation analysis was applied to examine the relationships between urban expansion intensity and geomorphological factors across different time periods.

### Results and discussion

The results indicate a continuous increase in built-up areas in Birjand during the 2000–2024 period, with the most pronounced expansion occurring between 2015 and 2020. Urban growth did not follow a uniform spatial pattern but instead exhibited a clear directional tendency. Among the eight directional sectors, the southwestern sector showed the highest cumulative urban expansion intensity, followed by the northeastern and northern sectors, indicating a persistent spatial preference in urban

development. Correlation analysis revealed that geomorphological factors significantly influenced the spatial pattern of urban expansion. Elevation showed a strong and stable positive correlation with urban expansion intensity across all periods, indicating concentration of development within specific elevation ranges. Geological formations also exhibited notable relationships with expansion intensity, suggesting preferential development on lithological units with higher construction suitability. In addition, distance from faults displayed a negative correlation, indicating that a considerable portion of urban expansion has occurred near fault zones, which may increase seismic risk. Slope showed a weak negative correlation with urban expansion, confirming the preference for low-slope terrains, while distance from rivers exhibited a weak positive relationship, suggesting relative avoidance of flood-prone areas. Other variables, including curvature, aspect, and topographic position index, showed negligible correlations and did not play a significant role in directing urban growth. Temporal analysis of correlation coefficients indicates that the influence of geomorphological factors intensified up to the 2015–2020 period and declined thereafter, reflecting a gradual shift toward a development pattern increasingly shaped by human and managerial factors.

### Conclusion

This study demonstrates that urban expansion in Birjand over the past two decades has been strongly influenced by geomorphological constraints, particularly elevation, geological formations, and proximity to fault systems. Urban growth followed a persistent directional pattern, with expansion concentrated mainly toward the southwest, northeast, and north. While natural factors played a dominant role in earlier stages of development, their relative influence has decreased in recent years, indicating a transition from a nature-controlled expansion pattern toward a combined natural–managerial model. The findings highlight the importance of incorporating geomorphological considerations into urban planning and land-

use policies, especially in environmentally sensitive and tectonically active regions. The analytical framework applied in this study can be used in other medium-sized cities in arid and semi-arid environments to support more sustainable and risk-aware urban development.

### Funding

There is no funding support.

### Authors' Contribution

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 declaration of competing interest none.

### Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

### Acknowledgments

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

## تحلیل فضایی-زمانی توسعه شهری بیرجند و ارتباط آن با عوامل ژئومورفولوژیک با استفاده از SVM و شاخص UEII

حمید عمونیا<sup>۱</sup>✉، محمدرضا یوسفی روشن<sup>۲</sup>، امیرعلی صفرنژاد، محمدمهدی پیران<sup>۳</sup>

۱- نویسنده مسئول، گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، صندوق پستی ۸۸۹-۱۴۶۶۵، تهران، ایران. رایانامه: [h.amoonia@cfu.ac.ir](mailto:h.amoonia@cfu.ac.ir)

۲- گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، صندوق پستی ۸۸۹-۱۴۶۶۵، تهران، ایران. رایانامه: [mr.yousefiroshan@cfu.ac.ir](mailto:mr.yousefiroshan@cfu.ac.ir)

۳- گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، صندوق پستی ۸۸۹-۱۴۶۶۵، تهران، ایران. رایانامه: [safarnezhad\\_amirali@cfu.ac.ir](mailto:safarnezhad_amirali@cfu.ac.ir)

۴- گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، صندوق پستی ۸۸۹-۱۴۶۶۵، تهران، ایران. رایانامه: [m\\_piran@cfu.ac.ir](mailto:m_piran@cfu.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

#### نوع مقاله:

#### مقاله پژوهشی

#### تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۱۰/۰۷

#### تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۱۲/۰۸

#### تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۲/۰۵

صص. ۱۷۲-۱۵۹

#### واژگان کلیدی:

#### گسترش شهری،

#### UEII،

#### عوامل ژئومورفولوژیک،

#### سنجش از دور،

#### بیرجند.

گسترش فیزیکی شهرها به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک پیامدهای محیطی و برنامه‌ریزی مهمی دارد؛ شناخت نقش عوامل طبیعی در جهت و شدت این گسترش برای برنامه‌ریزی پایدار ضروری است. پژوهش حاضر تأثیر مجموعه‌ای از متغیرهای ژئومورفولوژیک بر گسترش شهری بیرجند را در بازه‌های زمانی پنج‌گانه ۲۰۱۰، ۲۰۱۵، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۴ بررسی می‌کند. روش اجرا شامل پردازش تصاویر لندست با طبقه‌بندی مبتنی بر شیء (SVM) برای استخراج لایه انسان‌ساخت، تقسیم‌بندی فضایی شهر به هشت قطاع جهت‌محور و محاسبه شاخص شدت گسترش شهری (UEII) برای هر قطاع بود. سپس مقادیر UEII و متغیرهای طبیعی نظیر ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحناء، TPI، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل و سازندهای زمین‌شناسی از نقاط نمونه‌برداری استخراج و روابط کمی با آزمون‌های همبستگی پیرسون مورد سنجش قرار گرفت. مقایسه نتایج با مطالعات مشابه نشان‌دهنده تناسب روش‌شناسی است و امکان تعمیم نسبی الگوهای طبیعی شهری را در شرایط اقلیمی مشابه فراهم می‌کند. یافته‌ها نشان داد که ارتفاع بیشترین همبستگی مثبت پایدار را با UEII داشته، فاصله از گسل و سازند زمین‌شناسی همبستگی‌های منفی و قابل توجهی نشان دادند، و در سطح قطاعی سهم مطلق توسعه عمدتاً در جهت‌های جنوب و جنوب‌شرقی متمرکز بود. روند زمانی میانگین قدرمطلق همبستگی‌ها تا حوالی ۲۰۱۵-۲۰۲۰ تقویت و پس از ۲۰۲۰ کاهش یافت که گویای ورود پررنگ‌تر عوامل انسانی و سیاستی در شکل‌دهی توسعه اخیر است. نتایج تحقیق حاضر این امکان را فراهم می‌سازد که مناطق ایمن و پرخطر شناسایی شوند و برنامه‌ریزی ساخت‌وساز با توجه به مخاطرات ژئومورفولوژیکی هدایت گردد.

استناد: عمونیا، حمید. یوسفی روشن، محمدرضا. صفرنژاد، امیرعلی و پیران، محمدمهدی. (۱۴۰۵). تحلیل فضایی-زمانی توسعه شهری بیرجند و ارتباط آن با عوامل ژئومورفولوژیک با استفاده از SVM و شاخص UEII. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۴(۴)، ۱۷۲-۱۵۹.

Doi: 10.22034/gmpj.2025.474854.1519

## مقدمه

گسترش شهری به عنوان افزایش فیزیکی محدوده‌های ساخته شده، یکی از مهم‌ترین تحولات فضایی معاصر به شمار می‌رود که پیامدهای زیست‌محیطی، اجتماعی و کالبدی گسترده‌ای به همراه دارد. (Store & Kangas, 2019) شواهد نشان می‌دهد که در بسیاری از مناطق جهان، نرخ گسترش کالبدی شهرها سریع‌تر از رشد جمعیت بوده است، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه که با فشارهای جمعیتی و اقتصادی فزاینده مواجه‌اند. (Mahtta et al., 2022) در صورت فقدان کنترل و برنامه‌ریزی مناسب، این روند می‌تواند به از دست رفتن اراضی کشاورزی، تشدید فشار بر منابع آب، تخریب زیست‌بوم‌ها و افزایش هزینه‌های زیرساختی منجر شود. (Hu et al., 2023) در دهه‌های اخیر، توجه فزاینده‌ای به تحلیل شدت و الگوی گسترش شهری و عوامل مؤثر بر آن معطوف شده است. در این راستا، شاخص‌ها و مدل‌های متعددی نظیر آنتروپی شانون، مدل هولدرن و شاخص شدت گسترش شهری (UEII) برای سنجش کمی توسعه کالبدی شهرها به کار گرفته شده‌اند (Norouzi, 2022). مطالعات جهانی نشان می‌دهد که تداوم گسترش اراضی شهری می‌تواند تا سال‌های آتی پیامدهای عمیقی برای پایداری محیطی و مدیریت زمین در پی داشته باشد (Seto et al., 2016؛ Bren d'Amour et al., 2017) در این میان، نقش عوامل طبیعی و ژئومورفولوژیکی به عنوان قیود مکانی مؤثر بر جهت، سرعت و شدت گسترش شهری، به‌طور گسترده مورد تأکید قرار گرفته است. از دیرباز، استقرار و توسعه سکونتگاه‌های انسانی تحت تأثیر ویژگی‌های طبیعی زمین بوده و عواملی نظیر توپوگرافی، ارتفاع، شیب، ساختار زمین‌شناسی و فرایندهای تکتونیکی، به عنوان عناصر بازدارنده یا تسهیل‌کننده توسعه شهری عمل کرده‌اند (گنجائیان، ۱۳۹۹؛ Pan et al., 2023). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که توسعه شهری عمدتاً در پهنه‌هایی با شیب ملایم و ارتفاعات مشخص متمرکز می‌شود و با افزایش ناهمواری، هزینه‌ها و مخاطرات توسعه افزایش می‌یابد. (Jing et al., 2022)

مطالعات متعددی به نقش سازندهای زمین‌شناسی و گسل‌ها در هدایت الگوی توسعه شهری پرداخته‌اند. اگرچه پهنه‌های گسلی با خطر بالقوه زمین‌لرزه همراه‌اند، اما در بسیاری از موارد، هم‌زمانی آن‌ها با دشت‌های آبرفتی، منابع آب زیرزمینی و مسیرهای ارتباطی، موجب تمرکز نسبی توسعه شهری در مجاورت این پهنه‌ها شده است؛ الگویی که می‌تواند سطح آسیب‌پذیری شهری را افزایش دهد (Obaid & Al-Shammmary, 2022. Awawdeh et al., 2024) همچنین، نزدیکی به شبکه‌های آبراهه‌ای، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل دسترسی به منابع آب و اراضی نسبتاً هموار، یکی از عوامل تاریخی و معاصر جذب توسعه‌های شهری گزارش شده است، هرچند این امر می‌تواند خطرپذیری در برابر سیلاب‌های ناگهانی را نیز تشدید کند. (Getu & Gangadhara Bhat, 2024) در ایران نیز پژوهش‌های متعددی به بررسی تعامل عوامل طبیعی و گسترش شهری پرداخته‌اند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که متغیرهایی مانند ارتفاع، شیب، گسل‌ها و واحدهای ژئومورفولوژیکی نقش تعیین‌کننده‌ای در جهت‌گیری توسعه کالبدی شهرها دارند (موحد و همکاران، ۱۴۰۱؛ قرقانی‌پور و همکاران، ۱۴۰۲). برای مثال، یوسفی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه شهر شیراز نشان دادند که شیب و گسل‌ها از عوامل کلیدی در توازن اکولوژیک توسعه شهری هستند. در شهر مریوان، نگین‌عالی و همکاران (۱۳۹۹) بیان کردند که مناطق دارای شیب مناسب و دوری از گسل‌ها، بیشترین پتانسیل توسعه شهری را دارند. در مقابل، پژوهش اسدی و همکاران (۱۳۹۹) در قائن نشان داد که توسعه شتابان و برنامه‌ریزی نشده در پهنه‌های گسلی و سازندهای نامناسب آسیب‌پذیری شهری را به‌طور معناداری افزایش داده است. مطالعات انجام‌شده در شهرهایی با شرایط اقلیمی مشابه، نظیر کرمان و زاهدان، نیز حاکی از آن است که در مناطق خشک، ترکیب فشارهای انسانی و محدودیت‌های ژئومورفولوژیکی منجر به الگوهای خاصی از گسترش شهری می‌شود (مهیمنی و همکاران، ۱۳۹۸؛ فیروزی و همکاران، ۲۰۲۴). با این حال،

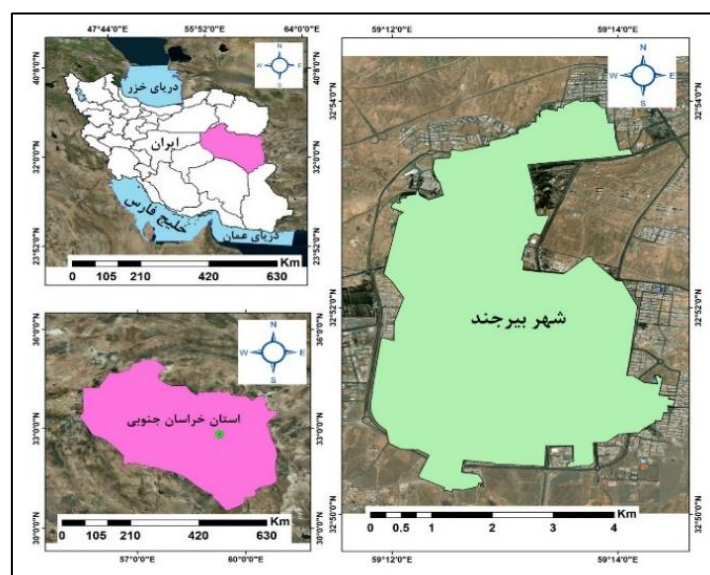
به نظر می‌رسد بخش قابل توجهی از مطالعات داخلی بر کلان‌شهرها متمرکز بوده و تحلیل‌های زمانی-فضایی بلندمدت که به‌طور هم‌زمان شدت گسترش شهری و مجموعه‌ای از عوامل ژئومورفولوژیکی را بررسی کنند، در شهرهای متوسط واقع در اقلیم‌های خشک کمتر گزارش شده است (پيله ور، ۲۰۲۱).

شهر بیرجند، به‌عنوان مرکز استان خراسان جنوبی، طی دهه‌های اخیر با رشد شتابان کالبدی مواجه بوده است. عواملی نظیر ارتقای جایگاه اداری-استانی، تمرکز خدمات، مهاجرت و تحولات اقتصادی - اجتماعی، موجب گسترش سریع فیزیکی شهر شده‌اند. این در حالی است که بیرجند در محیطی با ناهمگنی توپوگرافیک، کم‌آبی مزمن، وجود سازندهای متنوع زمین‌شناسی و گسل‌های فعال قرار گرفته و این شرایط، محدودیت‌های طبیعی قابل توجهی را بر توسعه شهری تحمیل می‌کند (صابری‌فر، ۱۳۹۱).

با وجود اهمیت این شرایط، تاکنون تحلیل جامعی که به‌طور هم‌زمان الگوی زمانی-فضایی گسترش شهری بیرجند و ارتباط آن را با مجموعه‌ای از عوامل ژئومورفولوژیکی نظیر ارتفاع، شیب، گسل‌ها، سازندهای زمین‌شناسی و فاصله از رودخانه‌ها بررسی کند، به‌صورت کمی و مبتنی بر شاخص‌های شدت گسترش گزارش نشده است. از این رو، پژوهش حاضر با هدف تحلیل الگوی زمانی-فضایی گسترش شهر بیرجند در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ و ارزیابی رابطه آن با عوامل ژئومورفولوژیکی، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، شاخص UEII، تقسیم‌بندی جهت‌محور و تحلیل‌های آماری طراحی شده است. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش بتواند به درک دقیق‌تر نقش قیود طبیعی در هدایت توسعه شهری و پشتیبانی از برنامه‌ریزی آگاهانه و کاهش مخاطرات ژئومورفولوژیکی در شهرهای واقع در اقلیم خشک کمک کند.

## مواد و روش‌ها

شهر بیرجند، مرکز استان خراسان جنوبی در شرق ایران، به لحاظ ویژگی‌های جغرافیایی، اقلیمی و کالبدی، نمونه‌ای قابل مطالعه برای تحلیل فرایندهای گسترش فیزیکی شهری در مناطق خشک و نیمه‌خشک فلات مرکزی ایران است. بیرجند در مختصات جغرافیایی تقریبی ۳۲ درجه و ۵۳ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۱۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۹ درجه و ۰ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۱۵ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). شهر بیرجند از شمال به شهرستان قاینات، از جنوب غربی به شهرستان سربیشه، از غرب به شهرستان سرایان، از شرق به شهرستان درمیان و از جنوب شرقی به شهرستان خوسف محدود می‌شود. تحول اصلی کالبدی این شهر پس از تبدیل شدن به مرکز استان خراسان جنوبی در سال ۱۳۸۳ شتاب گرفت. این امر، به همراه تمرکز امکانات و خدمات، مهاجرت از سایر نقاط استان به بیرجند را تشدید کرد. توپوگرافی منطقه پیرامون بیرجند عمدتاً شامل دشت‌های نسبتاً هموار در کنار ارتفاعاتی است که متعلق به رشته کوه‌های باقران در جنوب و رشته کوه مؤمن آباد در شمال غربی آن وجود دارد. هستند. این ویژگی‌های توپوگرافیک، مسیرهای اولیه توسعه فیزیکی شهر را به سمت دشت‌های قابل ساخت‌وساز و با شیب ملایم تعیین کرده‌اند.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی شهر بیرجند

پژوهش حاضر از نوع کاربردی و با رویکرد کمی - تحلیلی است که به بررسی الگوی زمانی-فضایی گسترش فیزیکی شهر بیرجند و ارتباط آن با عوامل ژئومورفولوژیکی می‌پردازد. چارچوب کلی تحقیق مبتنی بر تلفیق داده‌های سنجش از دور، تحلیل‌های مکانی در محیط GIS و آزمون‌های آماری است. تمرکز اصلی مطالعه بر استخراج و تحلیل تغییرات کاربری انسان‌ساخت طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ و سنجش رابطه آن با متغیرهای طبیعی مؤثر بر توسعه شهری است. برای انجام پژوهش، از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده لندست ۵ و ۸ در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۴ استفاده شد. داده‌های ماهواره‌ای از پایگاه مربوط به سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) دریافت گردید. در جدول (۱) مشخصات تصاویر ماهواره‌ای که در پژوهش حاضر به کار گرفته شده‌اند؛ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق

| ماهواره | سنجنده | تاریخ      | قدرت تفکیک مکانی (متر) | محل اخذ                  |
|---------|--------|------------|------------------------|--------------------------|
| لندست ۵ | TM     | ۲۰۰۰/۰۶/۲۱ | ۳۰                     | سازمان زمین‌شناسی آمریکا |
| لندست ۵ | TM     | ۲۰۱۰/۰۶/۱۷ | ۳۰                     | سازمان زمین‌شناسی آمریکا |
| لندست ۸ | OLI    | ۲۰۱۵/۰۶/۱۵ | ۳۰                     | سازمان زمین‌شناسی آمریکا |
| لندست ۸ | OLI    | ۲۰۲۰/۰۶/۱۲ | ۳۰                     | سازمان زمین‌شناسی آمریکا |
| لندست ۸ | OLI    | ۲۰۲۴/۰۶/۲۳ | ۳۰                     | سازمان زمین‌شناسی آمریکا |

برای تحلیل عوامل ژئومورفولوژیکی، از مدل رقومی ارتفاعی (DEM<sup>۲</sup>)، نقشه زمین‌شناسی، لایه گسل‌ها و رودخانه‌ها بهره گرفته شد. داده‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS پردازش شده و برای تحلیل آماری از نرم‌افزار Excel استفاده شد. پس از دریافت تصاویر ماهواره‌ای، تصحیحات رادیومتری، هندسی و اتمسفری به‌منظور کاهش خطاهای سیستماتیک و افزایش قابلیت مقایسه زمانی انجام شد (نیک‌پور و همکاران، ۱۴۰۰). سپس استخراج کاربری انسان‌ساخت با استفاده از روش طبقه‌بندی شیء‌گرا و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) در محیط نرم‌افزار ENVI انجام گرفت. انتخاب این روش به دلیل دقت بالاتر آن در تفکیک کلاس‌های کاربری شهری در محیط‌های ناهمگن صورت پذیرفت. در اجرای

<sup>۱</sup> USGS: United States Geological Survey

<sup>۲</sup> DEM: Digital Elevation Model

الگوریتم SVM، به منظور کنترل بیش‌برازش و افزایش دقت طبقه‌بندی، پارامترهای هسته به صورت سیستماتیک تنظیم شده است. با توجه به ماهیت غیرخطی جداسازی کلاس‌ها در داده‌های سنجش از دور، از هسته شعاعی (RBF) استفاده گردید و پارامترهای C (جریمه خطا) و  $\gamma$  (پهنای کرنل) از طریق جست‌وجوی شبکه‌ای و اعتبارسنجی متقاطع بخشی انتخاب شدند؛ بدین صورت که ترکیبی به عنوان پارامتر بهینه پذیرفته شد که بیشترین مقدار شاخص دقت مانند دقت کلی و کاپا را در داده‌های اعتبارسنجی ایجاد کند. همچنین برای کاهش اثر مقیاس متغیرها، پیش از آموزش مدل، داده‌ها استانداردسازی/نرمال‌سازی شدند.

#### ارزیابی دقت طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای

به منظور ارزیابی صحت نقشه‌های طبقه‌بندی شده، از روش نمونه‌برداری تصادفی-طبقه‌ای و ماتریس خطا استفاده شد. شاخص‌های دقت کلی و ضریب کاپا برای هر یک از مقاطع زمانی محاسبه گردید. نتایج نشان داد که تمامی نقشه‌ها دارای دقت کلی میانگین ۸۹.۵ درصد و ضریب کاپای بیش از ۰.۸۷ هستند (جدول ۲)، که بیانگر قابلیت اعتماد مناسب نتایج برای تحلیل‌های بعدی و محاسبه شاخص شدت گسترش شهری است.

جدول ۲: نتایج ارزیابی دقت طبقه‌بندی کاربری اراضی شهر بیرجند در دوره‌های زمانی مختلف

| سال     | تعداد نقاط نمونه | دقت کلی (درصد) | ضریب کاپا |
|---------|------------------|----------------|-----------|
| ۲۰۰۰    | ۱۵۰              | ۸۶/۴           | ۰/۸۲      |
| ۲۰۱۰    | ۱۵۰              | ۸۷/۹           | ۰/۸۴      |
| ۲۰۱۵    | ۱۵۰              | ۸۹/۶           | ۰/۸۷      |
| ۲۰۲۰    | ۱۵۰              | ۹۱/۲           | ۰/۸۹      |
| ۲۰۲۴    | ۱۵۰              | ۹۲/۴           | ۰/۹۱      |
| میانگین | .....            | ۸۹/۵           | ۰/۸۷      |

#### تحلیل شدت گسترش با شاخص UEII

برای سنجش کمی شدت توسعه فیزیکی شهر، از شاخص شدت گسترش شهری<sup>۱</sup> (UEII) استفاده شد. این شاخص، میزان تغییرات سطح کاربری انسان‌ساخت را نسبت به کل مساحت محدوده مورد مطالعه در بازه‌های زمانی مشخص بیان می‌کند و به عنوان ابزاری استاندارد در تحلیل‌های گسترش شهری به کار می‌رود (نوروزی و همکاران، ۲۰۲۳؛ Mansha et al., ۲۰۲۱). فرمول محاسبه UEII در رابطه (۱) ارائه شده است.

رابطه (۱)

$$UEII_{جهت} = 100 \times \frac{A_{u,i+1}^{جهت} - A_{u,i}^{جهت}}{\sum (A_{u,i+1}^{کل} - A_{u,i}^{کل})}$$

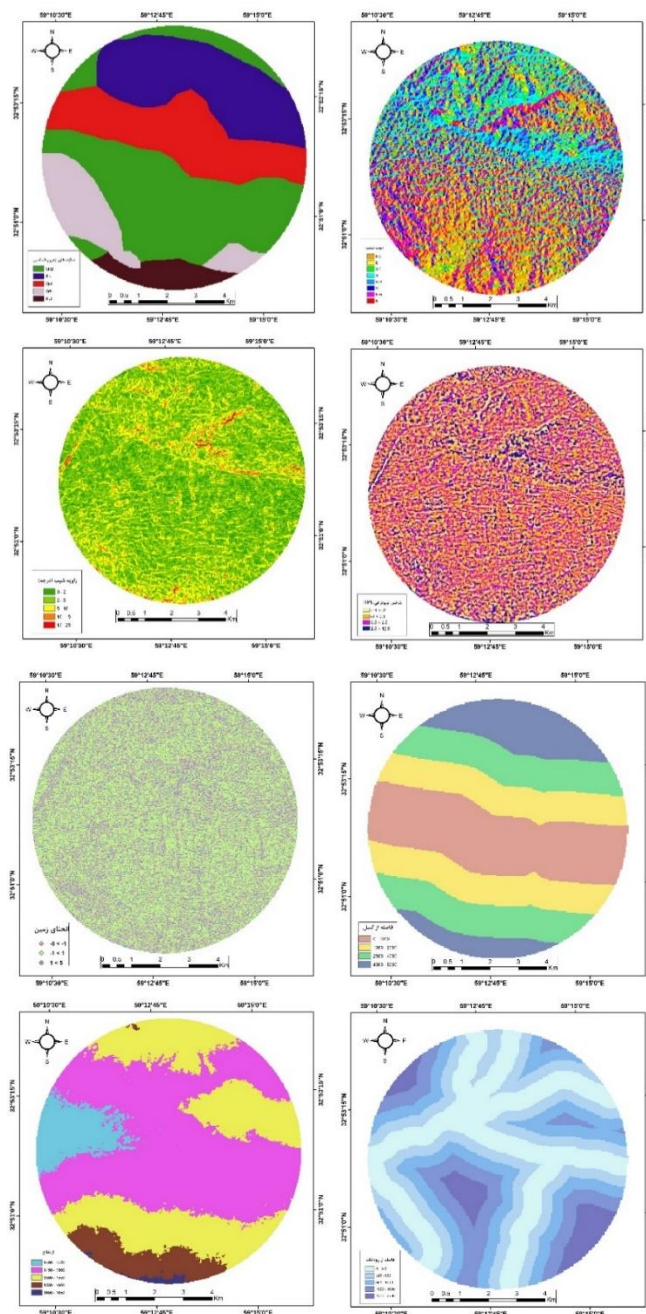
به منظور بررسی الگوی جهت‌گیری توسعه شهری، محدوده شهر از نقطه مرکزی به هشت قطاع مساوی ۴۵ درجه‌ای (N، NE، E، SE، S، SW، W، NW) تقسیم شد و شاخص UEII برای هر قطاع و هر دوره زمانی محاسبه گردید.

متغیرهای ژئومورفولوژیکی شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای زمین، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، فاصله از گسل‌ها، فاصله از رودخانه‌ها و نوع سازندهای زمین‌شناسی از داده‌های DEM و نقشه‌های موضوعی در محیط ArcGIS استخراج شدند (شکل ۲). برای تحلیل آماری، نقاط نمونه به صورت تصادفی در سطح محدوده مورد مطالعه ایجاد و مقادیر UEII و متغیرهای ژئومورفولوژیکی برای هر نقطه استخراج شد. داده‌های حاصل پس از انتقال به نرم‌افزار Excel، با استفاده

<sup>1</sup> Urban Expansion Intensity Index

از آزمون همبستگی پیرسون مورد تحلیل قرار گرفتند تا شدت و جهت رابطه بین گسترش شهری و عوامل طبیعی در دوره‌های زمانی مختلف ارزیابی شود.

مهم‌ترین محدودیت این پژوهش، عدم دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای مناسب برای برخی سال‌های میانی (مانند ۲۰۰۵) و احتمال بروز خطا در طبقه‌بندی کاربری‌هاست. افزون بر این، ناهنجاری‌های مکانی یا عدم قطعیت در برخی لایه‌های ژئومورفولوژیکی می‌تواند بر دقت نتایج اثرگذار باشد. با این حال، تلاش شد با ارزیابی دقت، صحت‌سنجی میدانی و استفاده از تحلیل‌های تلفیقی، اثر این محدودیت‌ها به حداقل برسد.



شکل ۲: متغیرهای ژئومورفولوژیک

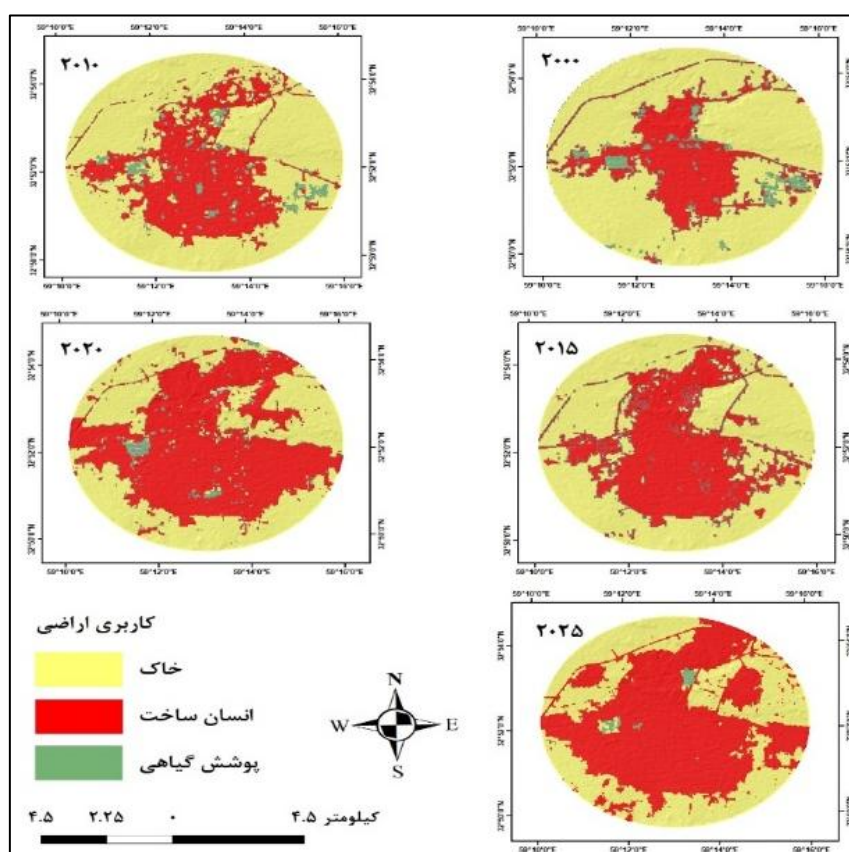
### محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌های داده‌ای و روشی

این مطالعه چند منبع عدم قطعیت دارد که می‌تواند بر برآورد شدت و الگوی فضایی گسترش شهری اثرگذار باشد. مورد اول دقت طبقه‌بندی SVM است. عملکرد SVM به کیفیت و نمایندگی نمونه‌های آموزشی، انتخاب کرنل و پارامترها، و میزان هم‌پوشانی طیفی کلاس‌ها وابسته است. در داده‌های با وضوح متوسط، پیکسل‌های مختلط در مرز شهر و اراضی بایر یا کشاورزی می‌تواند به خطای کمی و مکانی در نقشه‌های کاربری منجر شود؛ از این رو، تغییرات برآورد شده در برخی پهنه‌های حاشیه‌ای احتمالاً حساس‌تر به خطاست و باید با احتیاط تفسیر شود. مورد دوم وضوح و خطای DEM است. متغیرهای ژئومورفومتریک (مانند شیب) از DEM تهیه می‌شوند و دقت آن‌ها به تفکیک مکانی و خطاهای سیستماتیک یا تصادفی DEM وابسته است. در نتیجه، تحلیل‌های رابطه‌ی گسترش شهری با شیب یا توپوگرافی ممکن است در مقیاس‌های محلی دچار هموارشدگی یا جابه‌جایی مکانی شود و بیشتر برای استنباط‌های مقیاس میانی مناسب تلقی گردد. مورد سوم پوشش ابر و ناهمگنی زمانی تصاویر لندست می‌باشد. وجود ابر و سایه ابر، و همچنین تفاوت‌های زمانی یا فصلی بین تاریخ تصاویر، می‌تواند بازتابندگی را تغییر داده و موجب کاهش کیفیت استخراج عوارض شهری شود. در این پژوهش تلاش شد تصاویر با حداقل پوشش ابر و پیش‌پردازش‌های لازم اعمال شود؛ با این حال، بخشی از عدم قطعیت ناشی از شرایط جوئی و اختلاف زمان تصویربرداری اجتناب‌ناپذیر است. بر این اساس، نتایج گسترش شهری و شاخص‌های مبتنی بر آن از جمله UEI در چارچوب این محدودیت‌ها تفسیر شده‌اند و برای مطالعات آتی استفاده از تصاویر با وضوح مکانی بالاتر، آزمون حساسیت پارامترهای طبقه‌بندی، و به کارگیری DEM‌های دقیق‌تر می‌تواند به کاهش عدم قطعیت کمک کند.

### یافته‌ها و بحث

#### روند کلی تغییرات کاربری انسان‌ساخت در بیرجند (۲۰۰۰-۲۰۲۴)

نتایج استخراج کاربری انسان‌ساخت از تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد که سطح مناطق ساخته‌شده شهر بیرجند طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ به‌طور پیوسته افزایش یافته است. بررسی تغییرات زمانی بیانگر آن است که اگرچه گسترش شهری در تمام دوره‌ها مشاهده می‌شود، اما بیشترین نرخ رشد کالبدی در بازه ۲۰۱۵-۲۰۲۰ رخ داده است (شکل ۳). این الگو بیانگر تشدید فرآیند گسترش افقی شهر در دهه اخیر و افزایش فشار بر اراضی پیرامونی است؛ روندی که با تحولات جمعیتی، اداری و خدماتی شهر هم‌خوانی دارد.



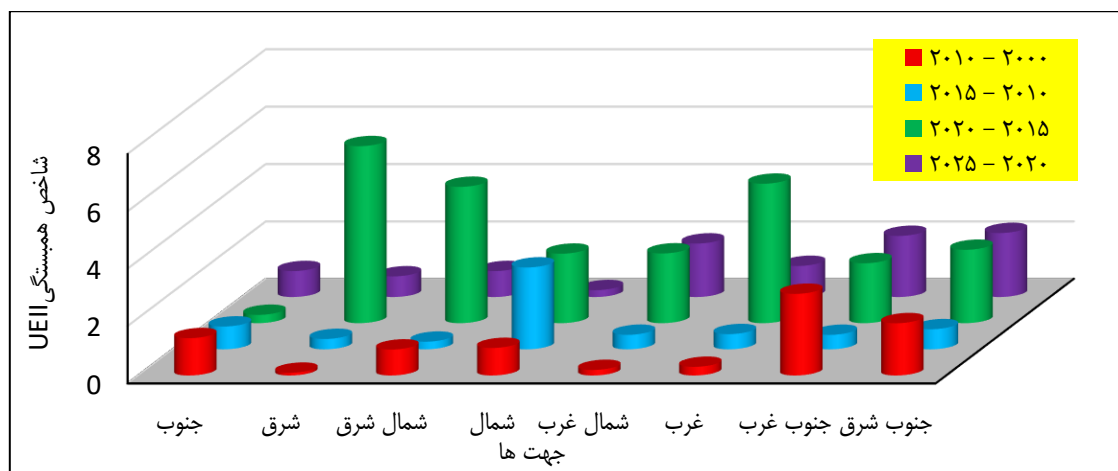
شکل ۳: طبقه‌بندی کاربری اراضی شهر بیرجند

### جهت‌گیری فضایی توسعه شهری

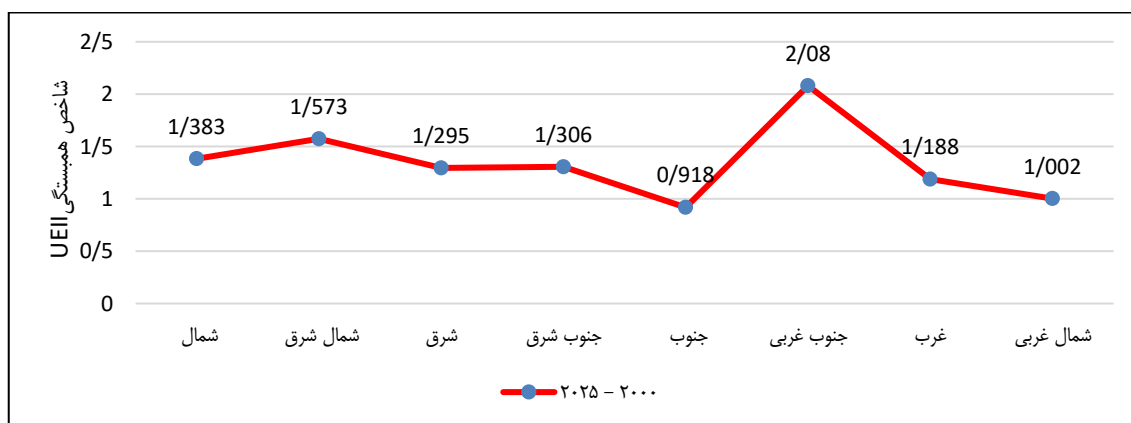
تحلیل شاخص شدت گسترش شهری (UEII) در هشت جهت جغرافیایی نشان می‌دهد که توسعه کالبدی شهر بیرجند از الگوی یکنواخت تبعیت نکرده و به‌طور مشخص جهت‌محور بوده است (جدول ۳). در مقیاس تجمعی، جهت جنوب‌غرب بیشترین شدت گسترش را در کل دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۴ به خود اختصاص داده و پس از آن، جهت‌های شمال‌شرق و شمال قرار دارند (شکل‌های ۴ و ۵). این الگوی فضایی بیانگر وجود یک تمایل پایدار در جهت توسعه شهر است که به‌احتمال زیاد تحت تأثیر ترکیب شرایط ژئومورفولوژیکی مناسب و دسترسی‌های کالبدی شکل گرفته است.

جدول ۳: نتایج شاخص UEII برای ۸ جهت جغرافیایی

| جهت جغرافیایی | ۲۰۰۰ - ۲۰۱۰ | ۲۰۱۰ - ۲۰۱۵ | ۲۰۱۵ - ۲۰۲۰ | ۲۰۲۰ - ۲۰۲۴ | ۲۰۰۰ - ۲۰۲۴ | رتبه |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
| جنوب غربی     | 2/845       | 0/504       | 2/088       | 2/130       | 2/080       | ۱    |
| شمال شرقی     | 0/904       | 0/265       | 4/752       | 0/904       | 1/573       | ۲    |
| شمال          | 0/959       | 2/853       | 2/422       | 0/239       | 1/383       | ۳    |
| جنوب شرقی     | 1/821       | 0/699       | 2/557       | 2/231       | 1/306       | ۴    |
| شرق           | 0/096       | 0/360       | 6/170       | 0/720       | 1/295       | ۵    |
| غرب           | 0/300       | 0/529       | 4/861       | 1/083       | 1/188       | ۶    |
| شمال غربی     | 0/192       | 0/505       | 2/430       | 1/865       | 1/002       | ۷    |
| جنوب          | 1/301       | 0/795       | 0/289       | 0/903       | 0/918       | ۸    |



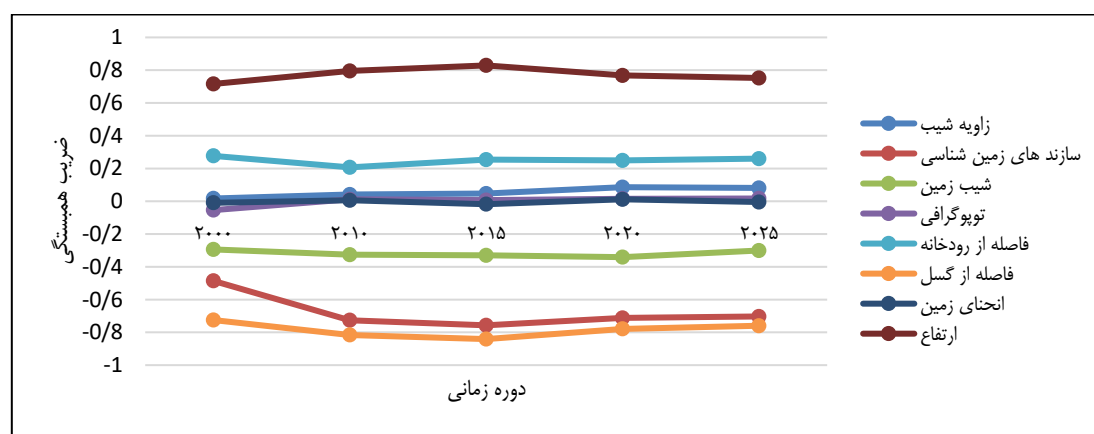
شکل ۴: نمودار مقایسه سهم جهت ها در سطوح انسان ساخت طی دوره های زمانی



شکل ۵: مقایسه کلی جهت ها از ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴

#### ارتباط گسترش شهری با عوامل ژئومورفولوژیکی

به منظور درک تأثیر عوامل ژئومورفولوژیکی بر الگوی گسترش شهری، همبستگی بین توسعه فیزیکی شهر و متغیرهایی چون شیب، جهت شیب، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، سازند زمین شناسی و شاخص های توپوگرافی محاسبه شد. بررسی همبستگی شاخص UEII با عوامل طبیعی در بازه های زمانی مختلف نشان داد که عوامل محیطی بر الگوی گسترش شهری بیرجند تأثیرگذار بوده است، اما شدت و جهت این تأثیرات در طول زمان دچار تغییراتی شده است. نمودار روند تغییر ضرایب همبستگی شکل (۶) بیانگر آن است که سه متغیر ارتفاع، سازندهای زمین شناسی و فاصله از گسل بیشترین نقش را در هدایت الگوی مکانی گسترش شهر داشته اند.



شکل ۶: همبستگی شاخص UEHII با عوامل طبیعی در طول زمان (۲۰۲۴-۲۰۰۰)

### ۳-۱. نقش ارتفاع

ارتفاع در تمامی دوره‌ها همبستگی مثبت و نسبتاً قوی با شاخص UEHII نشان داده است که بیانگر تمرکز توسعه شهری در محدوده‌های ارتفاعی مشخص است. پایداری این رابطه در طول دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد که ارتفاع به‌عنوان یک عامل ژئومورفولوژیکی پایدار، همواره نقش هدایت‌کننده‌ای در گسترش کالبدی شهر بیرجند ایفا کرده است.

### ۳-۲. نقش سازندهای زمین‌شناسی و فاصله از گسل

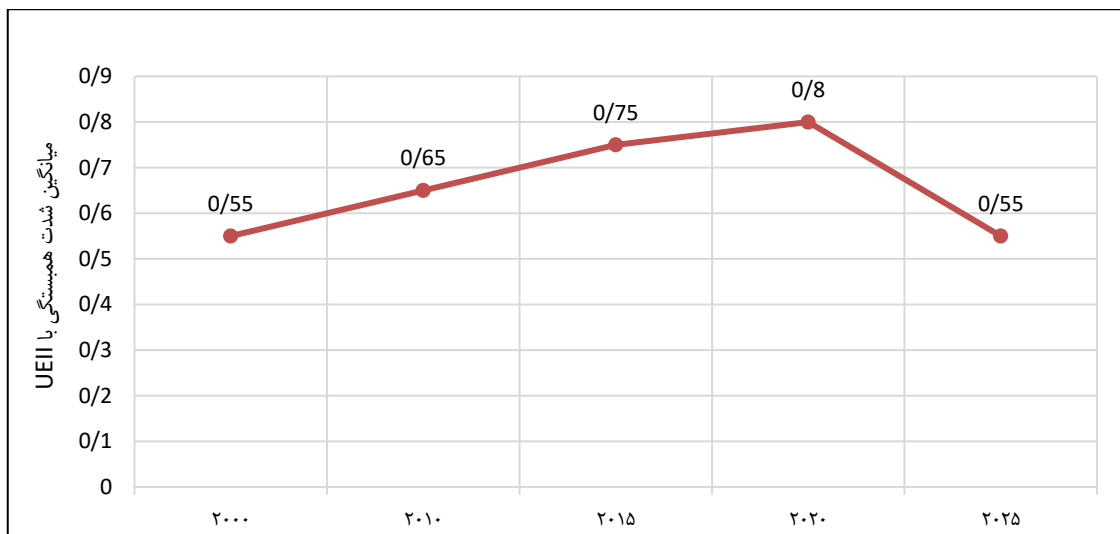
سازندهای زمین‌شناسی در اغلب دوره‌ها همبستگی منفی و قابل‌توجهی با UEHII داشته‌اند که نشان‌دهنده تمرکز توسعه شهری در واحدهای زمین‌شناسی مناسب‌تر برای ساخت‌وساز است. همچنین، همبستگی منفی فاصله از گسل‌ها بیانگر آن است که بخش قابل‌توجهی از توسعه کالبدی در مجاورت پهنه‌های گسلی رخ داده است؛ الگویی که اگرچه از منظر قابلیت توسعه قابل تبیین است، اما می‌تواند آسیب‌پذیری شهر در برابر مخاطرات لرزه‌ای را افزایش دهد.

### ۳-۳. نقش شیب، فاصله از رودخانه و سایر متغیرها

شیب زمین همبستگی منفی و عمدتاً ضعیفی با توسعه شهری نشان داد که بیانگر ترجیح توسعه در اراضی کم‌شیب است. فاصله از رودخانه‌ها نیز همبستگی مثبت و نسبتاً ضعیفی داشت که می‌تواند نشان‌دهنده پرهیز نسبی از پهنه‌های سیلابی باشد. در مقابل، متغیرهایی نظیر انحنای زمین، جهت شیب و شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) همبستگی‌های نزدیک به صفر نشان داده و نقش تعیین‌کننده‌ای در هدایت الگوی توسعه شهری ایفا نکرده‌اند.

### تغییرات زمانی نقش عوامل محیطی

تحلیل روند تغییر ضرایب همبستگی در پنج دوره زمانی نشان می‌دهد که نقش عوامل ژئومورفولوژیکی در هدایت گسترش شهری بیرجند ثابت نبوده است (شکل ۷). در دوره‌های ابتدایی (۲۰۰۰-۲۰۱۰)، توسعه شهری بیشتر تابع قیود طبیعی بوده و شهر عمدتاً در پهنه‌های مناسب از نظر توپوگرافی و زمین‌شناسی گسترش یافته است. این وابستگی در بازه ۲۰۱۵-۲۰۲۰ به اوج خود رسیده، اما پس از آن، به‌ویژه در دوره ۲۰۲۰-۲۰۲۴، شدت تأثیر عوامل طبیعی کاهش یافته است. این تغییر روند بیانگر گذار تدریجی شهر از یک الگوی توسعه طبیعت‌محور به یک الگوی ترکیبی است که در آن، تصمیمات مدیریتی و عوامل انسانی نقش پررنگ‌تری یافته‌اند.



شکل ۷: روند کلی تاثیر عوامل طبیعی بر گسترش شهر بیرجند (۲۰۲۴ - ۲۰۰۰)

#### مقایسه با مطالعات مشابه

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات داخلی و بین‌المللی نشان می‌دهد که الگوی جهت‌محور گسترش شهری و نقش برجسته عوامل ژئومورفولوژیکی، به‌ویژه ارتفاع و توپوگرافی، با یافته‌های پژوهش‌های پیشین هم‌خوانی دارد (جدول ۴). با این حال، تفاوت‌هایی در شدت و ترتیب اهمیت متغیرها مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از شرایط محلی، ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی خاص بیرجند و چارچوب روش‌شناختی مطالعه حاضر باشد. نوآوری اصلی این پژوهش در ترکیب تحلیل پنج مقطع زمانی، استفاده هم‌زمان از شاخص UEII، تحلیل همبستگی دوره‌ای و قطاع‌بندی هشت‌جهتی است که امکان تبیین دقیق‌تر تحول نقش عوامل طبیعی در فرآیند گسترش شهری را فراهم کرده است.

#### جدول ۴: مقایسه نتایج مطالعه بیرجند با مطالعات مشابه

| شهر / مطالعه            | دوره زمانی  | جهت گسترش | مهم‌ترین عامل               | شباهت                                     | تفاوت                                 |
|-------------------------|-------------|-----------|-----------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|
| بیرجند<br>(مطالعه حاضر) | 2000 – 2024 | جنوب غرب  | ارتفاع، گسل، سازندهای زمین  |                                           |                                       |
| بحیر، اتیوپی            | 1984 – 2019 | بیان نشده | شیب زمین، فاصله از منابع آب | تاکید بر نقش عوامل طبیعی                  | جهت‌بندی صورت نگرفته                  |
| شیراز، ایران            | 2010 – 2020 | بیان نشد  | ارتفاع، شیب، گسل            | اهمیت مشابه شیب و ارتفاع                  | عدم استفاده از شاخص UEII و قطاع‌بندی  |
| کرمان، ایران            | 2003 – 2018 | غرب       | بیان نشده                   | استفاده از شاخص های جهت‌محور              | عدم تمرکز بر عوامل طبیعی - جهت متفاوت |
| مریوان، ایران           | 1995 – 2020 | شرقی      | شیب، دوری از گسل            | استفاده هم‌زمان از جهت‌بندی و عوامل طبیعی | نتایج توصیفی و کیفی است و نه کمی      |

## نتیجه گیری

پژوهش حاضر با تحلیل الگوی زمانی- فضایی گسترش فیزیکی شهر بیرجند طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ نشان داد که توسعه کالبدی این شهر روندی افزایشی، نابرابر فضایی و به‌طور معناداری جهت‌محور داشته است. نتایج حاصل از شاخص شدت گسترش شهری (UEII) و تحلیل همبستگی پیرسون بیانگر آن است که عوامل ژئومورفولوژیکی، به‌ویژه ارتفاع، سازندهای زمین‌شناسی و فاصله از گسل‌ها، نقش غالبی در هدایت جهت و شدت گسترش شهری ایفا کرده‌اند؛ به‌گونه‌ای که توسعه عمدتاً در محدوده‌های ارتفاعی مشخص و در مجاورت پهنه‌های گسلی و واحدهای زمین‌شناسی مناسب متمرکز شده است. این یافته‌ها با نتایج مطالعات داخلی و بین‌المللی که بر نقش تعیین‌کننده ارتفاع، شیب و ساختارهای زمین‌شناسی در جهت‌دهی توسعه شهری تأکید دارند، هم‌راستا است (مهمی و همکاران، ۱۳۹۸؛ نگین‌عالی و همکاران، ۱۳۹۹؛ Getu & Gangadhar Bhat, ۲۰۲۴؛ Awawdeh et al., ۲۰۲۴). بیشترین شدت گسترش شهری در بازه ۲۰۱۵-۲۰۲۰ و عمدتاً در جهت‌های جنوب‌غرب، شمال‌شرق و شمال مشاهده شد که بیانگر وجود یک تمایل فضایی پایدار در توسعه شهر است. بررسی تغییرات زمانی ضرایب همبستگی نشان داد که در دوره‌های ابتدایی، گسترش بیرجند بیشتر تابع قیود طبیعی بوده، اما در سال‌های اخیر، به‌ویژه پس از ۲۰۲۰، از شدت تأثیر عوامل ژئومورفولوژیکی کاسته شده و نقش عوامل انسانی، مدیریتی و سیاست‌گذاری شهری پررنگ‌تر شده است؛ امری که حاکی از گذار شهر از یک الگوی توسعه طبیعت‌محور به یک الگوی ترکیبی است. با وجود تمرکز مطالعه حاضر بر متغیرهای ژئومورفولوژیکی، روشن است که عوامل اجتماعی و اقتصادی نظیر قیمت زمین، سیاست‌های مسکن و پویایی‌های جمعیتی نیز می‌توانند بر جهت‌گیری و شدت گسترش کالبدی شهر اثرگذار باشند و در برخی دوره‌ها نقش تعدیل‌کننده یا تشدیدکننده برای قیود طبیعی ایفا کنند. با این حال، با توجه به عنوان مقاله و هدف پژوهش، چارچوب تحلیلی این مطالعه به‌صورت هدفمند بر تبیین نقش عوامل ژئومورفولوژیکی استوار بوده و ورود تفصیلی به مؤلفه‌های اجتماعی- اقتصادی مستلزم داده‌ها، شاخص‌ها و مدل‌سازی متفاوتی است که در دامنه این مقاله تعریف نشده است. از این رو، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی با رویکردی تلفیقی، سهم نسبی و اثرات تعاملی عوامل طبیعی و انسانی به‌صورت نظام‌مند ارزیابی شود. بر این اساس، نتایج پژوهش تأکید می‌کند که برنامه‌ریزی توسعه آتی بیرجند باید با لحاظ‌کردن محدودیت‌های ژئومورفولوژیکی، از گسترش در پهنه‌های پرخطر نظیر نواحی گسلی و اراضی پرشیب پرهیز کرده و توسعه را به سمت دشت‌های کم‌شیب و پایدار هدایت کند تا پایداری کالبدی و ایمنی شهر در بلندمدت تضمین شود. از منظر برنامه‌ریزی شهری، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که لازم است لایه‌های ژئومورفولوژیکی به‌صورت معیارهای الزام‌آور در پهنه‌بندی و هدایت توسعه کالبدی وارد شوند؛ به‌ویژه، کنترل و محدودیت ساخت‌وساز در مجاورت پهنه‌های گسلی و اراضی پرشیب، همراه با اولویت‌دهی به توسعه در پهنه‌های کم‌ریسک و اعمال ضوابط مکان‌یابی و تراکم متناسب با توان محیطی، می‌تواند از گسترش نامناسب، افزایش آسیب‌پذیری و تشدید مخاطرات ژئومورفولوژیکی در آینده بکاهد. اما باید دقت شود که با توجه به محدودیت‌های دقت طبقه‌بندی، وضوح DEM و شرایط پوشش ابر در تصاویر، نتایج این پژوهش بیشتر برای تبیین الگوهای غالب در مقیاس میانی مناسب است و تعمیم‌های محلی نیازمند داده‌های دقیق‌تر است.

## منابع

- اجتماعی، ب.، خلیج، ع.، و مقتدری، ق. ۱۴۰۲. بررسی قابلیت‌ها و تنگناهای محیطی توسعه فیزیکی شهر اقلید با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. *جغرافیا و آمایش شهری منطقه‌ای*، ۱۳ (۴۹): ۱۶۵-۲۰۰.
- اسدی، ا.، اکبری، ا.، و شفیعی، ن. ۱۳۹۹. پیش‌بینی توسعه فیزیکی شهر قائن با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. *برنامه‌ریزی فضایی*، ۱۰ (۱): ۶۷-۸۴.
- عالی، ن.، رجبی، م.، حجازی، م.، و روستایی، ش. ۱۳۹۹. تحلیل ساختار ژئومورفولوژی در مکان‌یابی و توسعه نقاط شهری (مطالعه

- موردی: شهر مریوان). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۴(۷۱): ۲۲۱-۲۴۳.
- عامری، م. ۱۴۰۳. شناسایی و اولویت‌بندی معیارهای طبیعی جهت پهنه‌بندی مناطق مستعد توسعه فیزیکی شهر اهواز. *جغرافیا و روابط انسانی*، ۷(۱): ۷۸۲-۸۰۶.
- قرقانی‌پور، س.، شهریار، ع.، و شریفی‌پیچون، م. ۱۴۰۲. بررسی نقش عوامل ژئومورفولوژی بر توسعه فیزیکی شهر شهرضا. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۱۴(۵۲): ۹۷-۱۱۵.
- گنجائیان، ح. ۱۳۹۹. مخاطرات ژئومورفولوژیک مناطق شهری: روش‌های مطالعه و راهکارهای کنترل آن. تهران: نشر/انتخاب.
- مهمی، ا.، فدایی‌قطبی، م.، اسماعیلی، ع.، و غضنفرپور، ح. ۱۳۹۸. تحلیل پراکنده‌رویی شهر کرمان با استفاده از داده‌های سنجش از دور. *جغرافیای اجتماعی شهری*، ۶(۱): ۱۳۹-۱۵۶.
- موحد، ع.، حاتمی، د.، بهروج، ف.، پویش، ز.، و دولتشاهی، ز. ۱۴۰۱. بررسی و تحلیل نقش شاخص‌های ژئومورفولوژی در مکان‌گزینی و توسعه فیزیکی آتی شهر (مطالعه موردی: شهر زاهدان). *جغرافیا و روابط انسانی*، ۴(۴): ۶۱۹-۶۵۳.
- نیک‌پور، ع.، عمونیا، ح.، و نورپسندی، ا. ۱۴۰۰. پایش و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست به روش سلول‌های خودکار و زنجیره مارکوف (مطالعه موردی: منطقه عباس‌آباد، استان مازندران). *سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، ۱۲(۲): ۳۵-۵۳.
- یوسفی‌مقدم، ع.، نبی‌بیدهندی، غ.، و هویدی، ح. ۱۳۹۹. مدل‌سازی توان اکولوژیک توسعه شهری براساس سنجه‌های سیمای سرزمین (مطالعه موردی: شهر شیراز). *پژوهش‌های جغرافیای انسانی*، ۵۲(۴): ۱۴۰۹-۱۴۳۲.
- Zhang W., He Y., Wang L., Liu S., Meng X. (2023). Landslide Susceptibility mapping using random forest and extreme gradient boosting: A case study of Fengjie, Chongqing.
- Aljehani, L. (2024). Quantifying urban expansion in small cities: A case study of the Al-Qassim region, Saudi Arabia. *International Journal of Geoinformatics*, 20(6), 82-94.
- Awawdeh, M. M., Abuhadba, R. R., Jamhawi, M. M., et al. (2024). Urban expansion in Greater Irbid Municipality, Jordan: The spatial patterns and the driving factors. *GeoJournal*, 89, 43.
- Bren d'Amour, C., Reitsma, F., Baiocchi, G., Barthel, S., Güneralp, B., Erb, K., Haberl, H., Creutzig, F., Seto, K. C. (2017). Future urban land expansion and implications for global croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(34), 8939-8944.
- Cheng, L. L., Tian, C., Yin, T. T. (2022). Identifying driving factors of urban land expansion using Google Earth Engine and machine-learning approaches in Mentougou District, China. *Scientific Reports*, 12, 16248.
- Firozjaei, M. K., Mijani, N., Fatholouloumi, S., Arsanjani, J. J. (2024). Urban expansion and land-use change analysis: Case study of Kerman and Zahedan cities, Iran. *Remote Sensing*, 16(23), 4416.
- Getu, K., & Gangadhara Bhat, H. (2024). Application of geospatial techniques and binary logistic regression model for analyzing driving factors of urban growth in Bahir Dar City, Ethiopia. *Heliyon*, 10(3), e25137.
- Hu, S., Yang, Z., Torres, S. A. G., Wang, Z., Han, H., Wada, Y., Li, L. (2023). Converging trend of global urban land expansion sheds new light on sustainable development. *npj Urban Sustainability*, 3, 22.
- Jing, S., Yan, Y., Niu, F., Song, W. (2022). Urban expansion in China: Spatiotemporal dynamics and determinants. *Land*, 11(3), 356.
- Li, G., Fang, C., Li, Y., et al. (2022). Global impacts of future urban expansion on terrestrial vertebrate diversity. *Nature Communications*, 13, 1628.
- Li, M., Yongwang, C., Dai, J., Song, J., Mengyin, L. (2025). A comprehensive review of urban expansion and its driving factors. *Land*, 14(8), 1534.

- Mahtta, R., Fragkias, M., Güneralp, B. (2022). Urban land expansion: The role of population and economic growth for 300+ cities. *npj Urban Sustainability*, 2, 5.
- Norouzi, Y. (2022). Measuring land-use changes and quantifying urban expansion using remote sensing and GIS techniques: A case study of Qom. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4/W1, 609–615.
- Obaid, N. M., Al-Shammary, A. A. A. S. (2022). Urban geomorphology and its impact on determining the trends of urban expansion in the city of Kut using GIS. *Res Militaris*, 12(2).
- Pan, T., Kuang, W., Shao, H. (2023). Urban expansion and intra-urban land evolution as well as their natural environmental constraints in arid and semiarid regions of China (2000–2018). *Journal of Geographical Sciences*, 33, 1419–1441.
- Store, R., Kangas, J. (2019). Integrating spatial multi-criteria evaluation and expert knowledge for GIS-based habitat suitability modelling. *Landscape and Urban Planning*, 55, 79–93.
- Yang, J., Li, S., Lu, H. (2019). Quantitative influence of land-use changes and urban expansion intensity on landscape pattern in Qingdao, China. *Sustainability*, 11(21), 6174.