



Multitemporal Land Use and Land Cover Change Detection via Foundation Model Embeddings (AlphaEarth): A Pixel-Wise Similarity Framework in a Rapidly Urbanizing Semi-Arid Region (Alborz, Iran 2017–2024)

Abolghasem Goorabi¹✉^{ORCID}, Mostafa Karimi²^{ORCID}, Ariyan Allahveisi³^{ORCID}

1. (Corresponding Author) Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: Goorabi@ut.ac.ir

2. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: Mostafakarimi@ut.ac.ir

3. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: Ghaffar.veisi@ut.ac.ir

Article Info

Article Type:

Research Article

Article History:

Received:

24 Apr 2025

Received in revised form:

7 July 2025

Accepted:

18 November 2025

pp.124-149

Keywords:

AlphaEarth,
Foundation models,
Land use and land cover
change,
Latent embeddings,
Pixel-wise similarity analysis,
Multitemporal change
detection.

ABSTRACT

Land use and land cover change (LULCC) in arid and semi-arid regions of Iran, particularly in rapidly urbanizing areas, represents a major challenge for sustainable land management. Conventional methods, such as supervised classification and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), have serious limitations due to their dependence on local training data, error accumulation, and limited ability to distinguish vegetation dynamics from structural land-use transformations. This study presents a novel pixel-based and multitemporal framework based on similarity analysis of latent embeddings derived from the AlphaEarth foundation model to address these limitations. Annual 64-dimensional embeddings at 10 m spatial resolution were extracted for the period 2017–2024, and four similarity metrics, namely cosine similarity, Pearson correlation, dissimilarity, and SSIM, were computed on a pixel-by-pixel basis. The analyses included the identification of change clusters (Hotspots/Coldspots), multilevel stability classification, county-level aggregation, and temporal trend analysis. The results were compared with NDVI-based change detection and previous studies. The findings indicate that 77.78% of Alborz Province (4,030.40 km²) remained highly stable, whereas 2.36% of the province (122.30 km²) experienced intense changes; these changes were mainly concentrated in Nazarabad, Eshtehard, Fardis, and Charbagh counties. The provincial mean cosine similarity of 0.9569 falls within the upper range of values reported in similar studies and indicates the suitability of the proposed framework for representing stability and patterns consistent with structural–functional land-use transformations. Temporal trend analysis shows a decline in stability during 2020–2021 and a relative recovery in the following period. Unlike NDVI, which mainly reflects vegetation and biomass fluctuations, the proposed approach can provide complementary evidence of patterns consistent with structural–functional land-use transformations, particularly in urban, industrial, and sparsely vegetated areas. With no dependence on local training data and high scalability, this framework provides an effective tool for monitoring land-use changes in arid regions and can offer a scientific basis for spatial planning and environmental policy-making.

Cite this article: Goorabi, A., Karimi, M., & Allahveisi, A. (2026). Multitemporal land use and land cover change detection via foundation model embeddings (AlphaEarth): A pixel-wise similarity framework in a rapidly urbanizing semi-arid region (Alborz, Iran 2017–2024). *Quantitative Geomorphological Research*, 14(3), 124-149.

Doi: [10.22034/gmpj.2026.566714.1594](https://doi.org/10.22034/gmpj.2026.566714.1594)

Extended Abstract**Introduction**

Land use and land cover change (LULCC) in arid and semi-arid regions has emerged as a critical challenge for sustainable land management, particularly in areas experiencing rapid urbanization and socio-economic transformation. In Iran, accelerated population growth, industrial expansion, and infrastructure development have intensified land conversion processes, often in environmentally sensitive landscapes. Reliable detection of such changes is essential for spatial planning, environmental governance, and risk mitigation. However, conventional LULCC detection approaches, including supervised classification and spectral index-based methods such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), suffer from fundamental limitations. These methods typically depend on extensive local training data, are prone to cumulative classification errors, and primarily capture vegetation dynamics rather than structural or functional land-use transformations.

Recent advances in foundation models for Earth observation provide a new paradigm for land change analysis. Pre-trained on massive, globally representative datasets, these models encode high-level semantic and structural information in latent feature spaces, enabling transferable and scalable analyses. Among these, the AlphaEarth foundation model offers dense, pixel-wise latent embeddings that summarize multi-spectral, spatial, and contextual characteristics of the land surface. This study leverages AlphaEarth embeddings to propose a pixel-based, multitemporal similarity framework for analyzing patterns of land use and land cover change without reliance on local training samples. The rapidly urbanizing semi-arid province of Alborz, Iran, is selected as a representative case study for the period 2017–2024.

Methodology

The methodological framework is based on the extraction and analysis of 64-dimensional AlphaEarth latent embeddings at a native spatial resolution of 10 m for annual composites spanning 2017 to 2024. To ensure spatial consistency with auxiliary datasets, all outputs were resampled to 30 m resolution. Change analysis was conducted using a pixel-wise similarity approach rather than categorical classification, thereby reducing the risk of error propagation associated with multi-class labeling.

Four complementary similarity metrics were computed for each pair of temporal embeddings: cosine similarity, Pearson correlation coefficient, dissimilarity (1 – cosine similarity), and the Structural Similarity Index Measure (SSIM). Each metric captures a distinct aspect of change, including directional similarity in latent space, linear association, magnitude of divergence, and spatial-textural variation. This multi-metric strategy improves the interpretability and consistency of latent-space change analysis and supports the identification of both subtle and abrupt changes.

Spatial analyses included hotspot and coldspot identification based on statistically derived similarity thresholds, as well as three-class and five-class stability classifications to represent varying intensities of change. To support decision-making at administrative levels, similarity values were aggregated at the county scale, enabling comparative stability ranking across Alborz Province. Temporal trend analysis was conducted for seven consecutive annual intervals, from 2017–2018 to 2023–2024, using linear regression and the non-parametric Mann–Kendall test to identify long-term tendencies and anomalous periods. Finally, results were conceptually and operationally compared with NDVI-based change detection and with findings from previous studies employing traditional machine learning and deep learning approaches.

Results and discussion

The results reveal pronounced overall stability in land use and land cover across Alborz Province during the study period. Approximately 77.78% of the provincial area, equivalent to 4,030.40 km², exhibited high similarity values, indicating persistent land-use conditions. In contrast, only 2.36%, equivalent to 122.30 km², experienced intense changes, forming spatially concentrated hotspots rather than diffuse patterns. These hotspots were primarily located in the counties of Nazarabad, Eshtehard, Fardis, and parts of Charbagh, closely aligned with industrial corridors, transportation axes, and zones of suburban expansion.

The provincial mean cosine similarity of 0.9569 falls within the upper range of values reported in related change detection studies, suggesting that latent-space similarity analysis provides a scalable framework for representing broad patterns of land-use stability and potential structural transformation. Among the four metrics, cosine similarity and Pearson correlation showed strong spatial and statistical convergence, indicating the consistency of the detected patterns across vector-based similarity measures. SSIM exhibited higher variability, reflecting its sensitivity to local structural and textural changes, particularly in heterogeneous urban environments.

Temporal analysis identified a statistically significant increase in overall stability over the 2017–2024 period, interrupted by a distinct decline in 2020–2021. This decline represents an anomalous interval within the multiyear similarity pattern and indicates a temporary increase in land-use volatility. The subsequent recovery in similarity values during 2021–2022 suggests a return to relative stability, although identifying the specific drivers of this temporal fluctuation requires further investigation using ancillary environmental and socio-economic data.

Comparison with NDVI-based change maps revealed important conceptual differences. NDVI primarily captured vegetation and biomass fluctuations, particularly in mountainous and vegetated northern areas, which were identified as relatively stable by

the AlphaEarth-based framework. Conversely, several urban and industrial transformation zones exhibited limited NDVI change but appeared as hotspots in latent-space analysis. This contrast suggests that vegetation-based spectral indices and latent embeddings capture different but complementary dimensions of land-surface change. NDVI is more sensitive to vegetation phenology and biomass variability, whereas AlphaEarth embeddings can provide complementary evidence of patterns consistent with non-vegetative and structural–functional land-use transformations.

Conclusion

This study shows that multitemporal similarity analysis of foundation model embeddings can provide a scalable, training-free, and complementary framework for land use and land cover change analysis in semi-arid regions. By operating directly in latent feature space, the proposed approach reduces dependence on local training data and avoids the error propagation commonly associated with repeated categorical classification. Its main contribution lies in representing patterns of land-use stability and identifying areas potentially consistent with structural and functional land-use transformations beyond vegetation dynamics.

The application to Alborz Province reveals a land-use system characterized by broad stability, interrupted by localized and policy-relevant hotspots of transformation. These findings highlight the potential of foundation models such as AlphaEarth to support continuous land monitoring, early-warning applications, and evidence-based spatial planning, particularly in data-scarce environments. Nevertheless, because latent embeddings are not directly equivalent to ground-truth land-use classes, the results should be interpreted as complementary analytical evidence rather than definitive proof of land-use conversion. Future research should integrate socio-economic drivers, in situ validation, official land-use maps, predictive modeling, and explainable artificial intelligence approaches to further

enhance the interpretability, validation, and policy relevance of latent-space change detection.

Funding

The authors received no funding support.

Authors' Contribution

All authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All authors have approved the final version of the manuscript and agreed on all aspects of the work.



Conflict of Interest

The authors declare no competing interests.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants who contributed to this **paper**.

تشخیص چندزمانه تغییرات کاربری و پوشش زمین بر پایه بردارهای نهفته مدل بنیادین آلفارث: چارچوب شباهت پیکسل محور در منطقه‌ای نیمه‌خشک با شهرنشینی شتابان (۲۰۱۷-۲۰۲۴، البرز، ایران)

ابوالقاسم گورابی^۱ ✉، مصطفی کریمی احمدآباد^۲ , آرین الله ویسی^۳ 

۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Goorabi@ut.ac.ir

۲- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Mostafakarimi@ut.ac.ir

۳- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Ghaffar.veisi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۲/۰۴

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۴/۱۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۸/۲۷

صص. ۱۴۹-۱۲۴

واژگان کلیدی:

آلفارث،

مدل‌های بنیادین،

تغییرات کاربری و پوشش زمین،

بردارهای نهفته،

تحلیل شباهت پیکسل محور،

تشخیص تغییرات چندزمانه،

مناطق نیمه‌خشک

تغییرات کاربری و پوشش زمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، به‌ویژه نواحی با شهرنشینی سریع، چالش اصلی مدیریت پایدار سرزمین است. روش‌های سنتی مانند طبقه‌بندی نظارت‌شده و شاخص NDVI به دلیل وابستگی به داده‌های محلی، تجمع خطاها و ناتوانی در تمایز تغییرات گیاهی از تحولات ساختاری، محدودیت‌های جدی دارند. این پژوهش چارچوبی نوین پیکسل‌محور و چندزمانه بر پایه تحلیل شباهت بردارهای نهفته مدل AlphaEarth ارائه می‌دهد تا بر این کاستی‌ها غلبه کند. بردارهای ۶۴ بعدی با تفکیک ۱۰ متری برای ۲۰۱۷-۲۰۲۴ استخراج شد و چهار معیار شباهت (کسینوسی، همبستگی پیرسون، عدم شباهت و SSIM) پیکسل‌به‌پیکسل محاسبه گردید. تحلیل‌ها شامل شناسایی خوشه‌های تغییر (Hotspot/Coldspot)، طبقه‌بندی پایداری چندسطحی، تجمع شهرستانی و روند زمانی بود. نتایج با NDVI و مطالعات پیشین مقایسه شد. یافته‌ها حاکی از پایداری بالای ۷۷٫۷۸٪ مساحت استان البرز (۴۰۳۰٫۴۰ کیلومتر مربع) است، در حالی که ۲٫۳۶٪ از مساحت استان (۱۲۲٫۳۰ کیلومتر مربع) تغییرات شدید را تجربه کرده؛ این تغییرات عمدتاً در شهرستان‌های نظرآباد، اشتهارد، فردیس و چهارباغ متمرکز بوده‌اند. میانگین شباهت کسینوسی استانی ۰٫۹۵۶۹، در دامنه بالای مقادیر گزارش شده در مطالعات مشابه قرار می‌گیرد و نشان‌دهنده قابلیت مناسب چارچوب پیشنهادی در بازنمایی پایداری و الگوهای سازگار با تحولات ساختاری-کارکردی اراضی است. تحلیل روند زمانی، افت پایداری در دوره ۲۰۲۰-۲۰۲۱ و بازگشت نسبی پایداری در دوره بعدی را نشان می‌دهد. برخلاف NDVI که عمدتاً نوسانات پوشش گیاهی و زیست‌توده را بازتاب می‌دهد، این رویکرد می‌تواند شواهد مکملی از الگوهای سازگار با تحولات ساختاری-کارکردی کاربری اراضی، به‌ویژه در پهنه‌های شهری، صنعتی و کم‌پوشش گیاهی، فراهم سازد. این چارچوب بدون نیاز به داده‌های محلی و با مقیاس‌پذیری بالا، ابزاری کارآمد برای پایش تغییرات در مناطق خشک فراهم می‌آورد و می‌تواند مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی آمایش سرزمین و سیاست‌گذاری محیطی فراهم سازد.

استناد: گورابی، ابوالقاسم، کریمی احمدآباد، مصطفی، و الله‌ویسی، آرین. (۱۴۰۴). تشخیص چندزمانه تغییرات کاربری و پوشش زمین بر پایه

بردارهای نهفته مدل بنیادین آلفارث: چارچوب شباهت پیکسل محور در منطقه‌ای نیمه‌خشک با شهرنشینی شتابان (۲۰۱۷-۲۰۲۴، البرز، ایران).

پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، ۱۴(۳)، ۱۲۴-۱۴۹.

Doi: 10.22034/gmpj.2026.566714.1594

مقدمه

تغییرات کاربری و پوشش اراضی در مناطق خشک و نیمه‌خشک با سرعتی سه برابر میانگین جهانی در حال وقوع است و پیامدهای محیطی جدی از جمله بیابان‌زایی، فرسایش خاک، کاهش منابع آب و فرونشست زمین را به همراه دارد (UNCCD, 2017; Huang et al., 2020). در ایران نیز که بیش از ۸۰ درصد مساحت آن در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار دارد، رشد جمعیت و توسعه سریع شهری این روند را تسریع کرده و تغییرات کاربری اراضی را به یکی از چالش‌های اساسی محیط‌زیست تبدیل کرده است (قنبری و اسماعیل زاده، ۱۴۰۴؛ Rahimi et al., 2021). از این‌رو، شناسایی دقیق و به‌موقع این تغییرات برای برنامه‌ریزی آمایش سرزمین، مدیریت منابع آب، و جلوگیری از تخریب محیط زیست ضروری است.

روش‌های رایج تشخیص تغییرات کاربری اراضی با محدودیت‌های اساسی همراه‌اند. طبقه‌بندی نظارت‌شده تصاویر ماهواره‌ای به داده‌های آموزشی گسترده برای هر منطقه مطالعاتی و دوره زمانی جدید نیاز دارد که تهیه آن در مقیاس وسیع هزینه‌بر و زمان‌بر است (Phan et al., 2020; Khatami et al., 2016). طبقه‌بندی‌های چندزمانه می‌توانند خطاهای مستقل هر مرحله را تجمیع کرده و دقت نهایی را کاهش می‌دهند (Lu et al., 2004). شاخص‌های طیفی نظیر NDVI تنها تغییرات پوشش گیاهی را شناسایی می‌کنند و تغییرات ساختاری و کاربری‌های غیرگیاهی را نادیده می‌گیرند (Tassi & Vizzari, 2020). مهم‌تر اینکه، این روش‌ها در تشخیص تغییرات جزئی و تدریجی مانند تغییر تراکم شهری یا تبدیل تدریجی اراضی کشاورزی ضعیف عمل می‌کنند (Zhu, 2017; Woodcock et al., 2008). این محدودیت‌ها به‌ویژه در مناطق با پویایی بالای انسانی، نظیر نواحی پیرامون کلان‌شهرها، موجب می‌شود بخش قابل توجهی از تغییرات واقعی کاربری زمین یا به‌طور کامل شناسایی نشوند یا با تأخیر زمانی قابل توجه ثبت گردند.

مدل‌های بنیادین^۱ در حوزه دورسنجی رویکردی نوین برای غلبه بر این محدودیت‌ها ارائه می‌دهند. این مدل‌ها با آموزش خودنظارت‌شده^۲ بر روی میلیون‌ها تصویر ماهواره‌ای جهانی، قادرند بازنمایی‌های فشرده و معناداری از سطح زمین تولید کنند که به آن‌ها بردارهای نهفته^۳ گفته می‌شود (Rolf et al., 2021; Cong et al., 2022). برخلاف باندهای طیفی خام که فقط بازتاب نور را اندازه می‌گیرند، بردارهای نهفته ویژگی‌های یادگرفته‌شده از الگوهای پیچیده مکانی-طیفی را کدگذاری می‌کنند و می‌توانند اطلاعاتی درباره کاربری اراضی، پوشش گیاهی، بافت ساختاری و توپوگرافی را به طور همزمان در خود داشته باشند (Zhang et al., 2021; Brown et al., 2024). مدل آلفاآرث^۴ که توسط گوگل دیپ‌مایند توسعه یافته، برای هر موقعیت جغرافیایی روی زمین بردارهای نهفته ۶۴ بعدی با تفکیک مکانی ۱۰ متر تولید می‌کند (Brown et al., 2024). اهمیت این مدل‌ها در آن است که بدون نیاز مستقیم به برچسب‌گذاری نظارت‌شده محلی، یا طبقه‌بندی‌های آموزش‌دیده منطقه‌ای، امکان تحلیل یکنواخت تغییرات کاربری را در مقیاس‌های محلی تا جهانی فراهم می‌کند؛ ویژگی‌ای که آن‌ها را از اغلب روش‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق متداول متمایز می‌سازد.

نوآوری کلیدی این پژوهش در استفاده از تحلیل شباهت چندزمانه این بردارها برای تشخیص تغییرات است: مناطقی که کاربری پایدار و ثابتی دارند، بردارهای نهفته بسیار مشابهی در دوره‌های زمانی مختلف نشان می‌دهند، در حالی که مناطق دگرگون‌شده با کاهش شباهت مشخص می‌شوند. این رویکرد چهار برتری اساسی دارد: (۱) عدم نیاز به داده‌های آموزشی، (۲) قابلیت شناسایی تغییرات جزئی، (۳) امکان تحلیل مقیاس بزرگ با هزینه محاسباتی پایین، و (۴) سنجش

1. Foundation Models

2. Self-Supervised Learning

3. Embeddings

4. AlphaEarth

کمی میزان تغییر. در مقایسه با رویکردهای مبتنی بر طبقه‌بندی، تحلیل شباهت مستقیم در فضای بردارهای نهفته، از جمعیت خطاهای مرحله‌ای جلوگیری کرده و امکان ارزیابی پیوسته شدت تغییرات را فراهم می‌آورد.

استان البرز با مساحت ۵۱۸۲ کیلومتر مربع در دامنه جنوبی کوه‌های البرز و مجاورت کلان‌شهر تهران، به عنوان یک منطقه حساس از چند منظر اهمیت دارد. نخست، با رشد جمعیتی تقریباً دوبرابر میانگین کشوری، تحت فشار شدید مهاجرپذیری، توسعه شهری و صنعتی قرار دارد (حسینی و دیگران، ۱۳۹۵؛ شریف‌کاظمی و موسوی، ۱۳۹۸؛ Shafizadeh, Moghadam et al., 2021؛ Taravat et al., 2017). دوم، این استان با بحران‌های زیست‌محیطی چندگانه مواجه است: فرونشست (اصغری سراسکانرود و دیگران، ۱۴۰۴؛ رنجبر باروق و فتح اله زاده، ۲۰۲۲؛ Motagh et al., 2017)، افت سطح آب زیرزمینی، و آلودگی هوای شدید در روزهای بحرانی (شاه بیگ و دیگران، ۱۴۰۱). پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که این بحران‌ها ارتباط مستقیمی با تغییرات کاربری اراضی و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی دارند (Haghighi & Motagh, 2019؛ Emadodin et al., 2016؛ Dehghani et al., 2025). سوم، البرز به عنوان یکی از منابع اصلی تأمین آب شرب و کشاورزی برای تهران و استان‌های مجاور، نقش استراتژیک در امنیت آب منطقه دارد (باقری و دیگران، ۱۴۰۱). این ویژگی‌ها سبب می‌شود استان البرز به عنوان یک نمونه‌ی نماینده‌ی مناسبی برای ارزیابی کارایی روش‌های نوین تشخیص تغییرات کاربری اراضی در شرایط فشار هم‌زمان انسانی و محیطی مطرح شود. از این‌رو، شناسایی دقیق تغییرات کاربری برای تبیین عوامل فرونشست، مدیریت منابع آب و کنترل آلودگی هوا در این منطقه ضرورت دارد.

با وجود پیشرفت‌های اخیر در استفاده از مدل‌های بنیادین در علوم زمین، هنوز چند ابهام اساسی در ادبیات وجود دارند. نخست، اغلب پژوهش‌های تشخیص تغییرات کاربری اراضی همچنان بر طبقه‌بندی‌های نظارت‌شده یا شاخص‌های طیفی متکی هستند و کمتر مطالعه‌ای از تحلیل مستقیم شباهت در فضای بردارهای نهفته برای آشکارسازی تغییرات استفاده کرده است. دوم، در مطالعات محدود مبتنی بر بردارهای نهفته، معمولاً تنها یک معیار شباهت به کار گرفته شده و رفتار تطبیقی معیارهای مختلف شباهت در تشخیص تغییرات ساختاری-کارکردی به صورت نظام‌مند بررسی نشده است. سوم، در مناطق نیمه‌خشک با فشار هم‌زمان توسعه شهری، محدودیت‌های ژئومورفولوژیک، و مخاطراتی نظیر فرونشست، هنوز مشخص نیست که بردارهای نهفته مدل‌های بنیادین تا چه اندازه قادر به تفکیک تغییرات واقعی کاربری از نوسانات پوششی و طیفی هستند. از این‌رو، پرسش اصلی این پژوهش آن است که آیا تحلیل چندزمانه شباهت بردارهای نهفته می‌تواند چارچوبی پایاتر، مقیاس‌پذیرتر و حساس‌تر برای آشکارسازی تغییرات ساختاری-کارکردی کاربری اراضی در چنین محیط‌هایی فراهم سازد یا خیر.

این پژوهش با هدف پر کردن شکاف پژوهشی موجود، به تحلیل جامع تغییرات کاربری اراضی استان البرز در دوره ۲۰۱۷-۲۰۲۴ بر اساس رویکرد شباهت چندزمانه بردارهای نهفته آلفارث می‌پردازد. اهداف اصلی عبارتند از: (۱) شناسایی الگوی مکانی تغییرات و تعیین نواحی با بیشترین تحولات در سطح شهرستان‌های استان، (۲) تحلیل پایداری کاربری‌ها، و (۳) بررسی روند زمانی تغییرات و شناسایی دوره‌های بحرانی. برای این منظور، چهار معیار مکمل شباهت شامل شباهت کسینوسی^۱، ضریب همبستگی پیرسون^۲، عدم شباهت^۳، و شاخص شباهت ساختاری^۴ محاسبه شد و هفت شهرستان بر اساس پایداری رتبه‌بندی شدند. نوآوری این پژوهش در سه محور است: (۱) بهره‌گیری از مدل بنیادین آلفارث برای تحلیل تغییرات کاربری اراضی، (۲) ارائه رویکرد چندمعیاره برای سنجش شباهت با هدف افزایش پایایی یافته‌ها، و (۳) فراهم‌سازی مبنایی کاربردی برای شناسایی مناطق حساس و پشتیبانی از برنامه‌ریزی کاربری زمین. بدین ترتیب، این مطالعه نه تنها

1. Cosine Similarity

2. Pearson correlation coefficient

3. Dissimilarity

4. Structural Similarity Index Measure (SSIM)

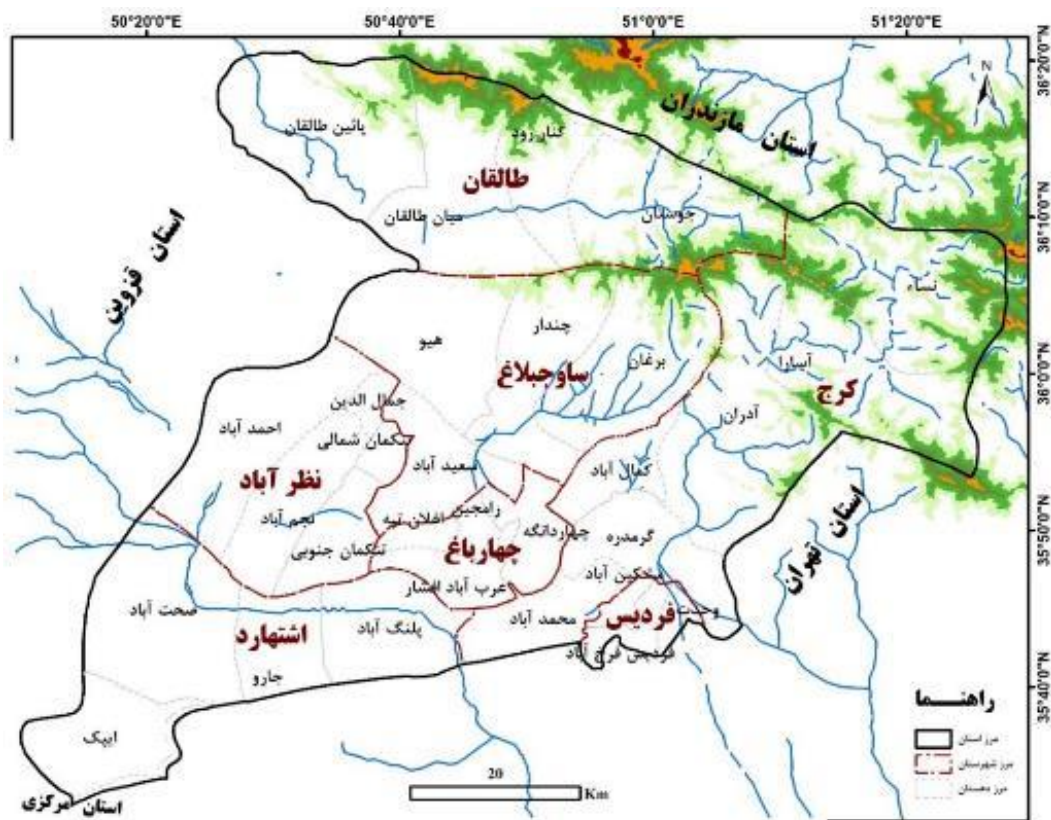
یک تحلیل موردی منطقه‌ای، بلکه الگویی روش‌شناختی ارائه می‌دهد که قابلیت تعمیم به سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک را داراست.

روش تحقیق

محدوده مورد مطالعه

استان البرز با مساحت ۵۱۸۲ کیلومتر مربع در مجاورت شهر تهران، بر روی دو واحد ژئومورفولوژیک متمایز - کوهستان‌های دامنه جنوبی البرز در شمال و رسوبات کواترنری مخروط‌افکنه‌ها-دشت‌های آبرفتی در جنوب - واقع شده است. دامنه ارتفاعی ۳۰۲۵ متری (از ۱۰۷۹ تا ۴۱۰۴ متر) و توزیع شیب شامل ۳۲,۴ درصد اراضی هموار (>۱۰٪)، ۴۱,۲ درصد دامنه‌های متوسط (۳۰٪-۱۰٪)، و ۲۶,۴ درصد دامنه‌های تند (<۳۰٪) است (قائمی و دیگران، ۱۳۹۵). اقلیم از نیمه‌خشک در دشت‌های جنوبی (بارندگی ۳۲۰ میلی‌متر، دمای ۱۶ درجه) تا نیمه‌مرطوب سرد در ارتفاعات (بارندگی ۷۵۰ میلی‌متر، دمای ۸ درجه) متغیر است (شکل ۱). این ناهمگنی شدید توپوگرافی و اقلیمی، استان البرز را به منطقه‌ای با تنوع بالای الگوهای کاربری و پوشش اراضی تبدیل کرده است که می‌تواند رفتارهای متفاوتی از پایداری یا تغییر کاربری را در مقیاس‌های مکانی مختلف نشان دهد؛ ویژگی‌ای که برای ارزیابی توان تفکیک روش‌های مبتنی بر بردارهای نهفته اهمیت ویژه‌ای دارد.

مطالعات پیشین در پهنه تهران-البرز و دشت هشتگرد نشان داده‌اند که ناهمگنی توپوگرافی و اقلیمی، رسوبات آبرفتی کواترنری، و فشار فزاینده توسعه شهری نقش مستقیمی در شکل‌گیری الگوهای متفاوت تغییر کاربری اراضی، افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین دارند (Haghshenas Haghghi & Motagh, 2019; Khoshlahjeh Azar et al., 2022). افزون بر این، پژوهش‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور و تحلیل تغییرات کاربری در استان البرز و پیرامون تهران حاکی از آن است که توسعه سریع شهری و تغییر کاربری در دشت‌های جنوبی استان، الگوهای فضایی ناهمگن و پویایی را ایجاد کرده است که بستر مناسبی برای ارزیابی چارچوب‌های مبتنی بر بردارهای نهفته فراهم می‌آورد (Wolf et al., 2023).



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

این استان با جمعیت تقریباً ۲,۹۴ میلیون نفر (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۲) و نرخ رشد جمعیت ۲,۴ درصد سالانه با بحران‌های زیست‌محیطی چندگانه مواجه است که ارزیابی دقیق زمانی-مکانی تغییرات کاربری اراضی را ضروری می‌سازد. نخست، فرونشست شدید زمین با نرخ بسیار بالا در برخی نواحی رخ می‌دهد که مستقیماً با تبدیل اراضی کشاورزی به شهری و برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی مرتبط است (Haghshenas Haghghi Motagh et al., 2019؛ صادقی و همکاران، ۱۳۹۹؛ محمداسماعیل، ۲۰۱۰). دوم، کاهش حاد منابع آب و افت سالانه ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری سطح آب زیرزمینی، در پی تغییر الگوی کاربری و افزایش مصرف شهری، از دیگر چالش‌های اصلی منطقه به‌شمار می‌رود (حسینی و همکاران، ۱۴۰۰).

دوم، کاهش حاد منابع آب با افت سالانه ۳۰-۶۰ سانتی‌متری سطح آب زیرزمینی در پی تغییر الگوی کاربری و افزایش مصرف شهری، از دیگر چالش‌های اصلی منطقه به‌شمار می‌رود (حسینی و همکاران، ۱۴۰۰). این مسائل در هم‌تنیده نشان می‌دهد که دستیابی به مدیریت پایدار منطقه مستلزم بهره‌گیری از روشی دقیق و کارآمد برای پایش زمانی-مکانی تغییرات کاربری اراضی و تحلیل ارتباط آن‌ها با این مخاطرات است.

از منظر روش‌شناختی، وجود گرادیان‌های شدید شیب، ارتفاع، اقلیم و شدت شهرنشینی در محدوده‌ای نسبتاً کوچک، این استان را به نمونه‌ای مناسب برای آزمون پایداری و حساسیت چارچوب‌های تشخیص تغییرات مبتنی بر شباهت بردارهای نهفته تبدیل می‌کند.

داده‌ها

داده‌های این پژوهش در دو دسته اصلی و کمکی تقسیم می‌شوند. داده‌های اصلی شامل بردارهای نهفته ۶۴ بعدی^۱ مدل بنیادین آلفا^۲ است که توسط گوگل دیپ‌ماینند توسعه یافته و از طریق پلتفرم گوگل ارث انجین برای هشت سال متوالی (۲۰۲۴-۲۰۱۷) با تفکیک مکانی ۱۰ متر استخراج شد (Brown et al., 2025; Gorelick et al., 2017). برخلاف باندهای طیفی خام که صرفاً بازتاب نور را اندازه می‌گیرند، هر بردار نهفته شامل ۶۴ مؤلفه عددی است که ویژگی‌های معنایی سطح‌بالای یک پیکسل - از جمله کاربری اراضی، پوشش گیاهی، و بافت مکانی - را به صورت فشرده نمایش می‌دهد. این بردارها از طریق یادگیری عمیق خودنظارتی^۳ بر روی بیش از ۱۰ میلیون تصویر ماهواره‌ای جهانی - چندطیفی لندست ۹/۸ (باندهای ۱-۷) و سنتینل-۲ (باندهای B2 تا B8A) - آموزش دیده‌اند و امکان مقایسه مستقیم بین دوره‌های زمانی و تشخیص تغییرات ظریف و چندوجهی (Zhu et al., 2022) را بدون نیاز به برچسب‌های آموزشی محلی برای طبقه‌بندی نظارت‌شده فراهم می‌آورند (Rolf et al., 2021).

برای هر سال، بردارهای میانگین سالانه^۴ با حذف پیکسل‌های ابری (درصد ابر $< 20\%$) محاسبه شدند. داده‌های کمکی شامل: (۱) مدل رقومی ارتفاع SRTM با تفکیک مکانی ۳۰ متر و دقت عمودی ± 16 متر برای استخراج ارتفاع و شیب توپوگرافی، (۲) مرزهای اداری استان البرز و هفت شهرستان آن، و (۳) تصاویر سنتینل-۲ سطح A۲ (بازتاب سطحی)^۵ برای محاسبه شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۲۴ به منظور مقایسه با روش پیشنهادی (Drusch et al., 2012).

داده‌ها به سیستم UTM زون ۳۹ شمالی تبدیل و بردارهای آلفا^۲ از تفکیک ۱۰ به ۳۰ متر بازنمونه‌گیری شدند (سازگار با SRTM؛ Phan et al., 2020). پیش‌پردازش شامل برش با مرز استان، حذف پیکسل‌های null و نقاط پرت (± 3)، و پالایش (۰,۲,۸) داده‌های معیوب بود (شکل ۲). این هم‌مقیاس‌سازی مکانی با هدف ایجاد سازگاری میان تمام لایه‌های مورد استفاده انجام شد و به گونه‌ای طراحی گردید که الگوهای نسبی و روندهای مکانی تغییرات حفظ شوند؛ بنابراین، تمرکز تحلیل بر مقایسه‌های نسبی چندزمانه است، نه بر مقادیر مطلق تک‌پیکسل‌ها. با این حال، این فرایند ممکن است بخشی از تغییرات بسیار ریزمقیاس، به‌ویژه در محیط‌های درون‌شهری ناهمگن، را تضعیف کند. از این‌رو، نتایج پژوهش حاضر بیشتر برای تحلیل روندهای منطقه‌ای و الگوهای ساختاری تغییرات کاربری اراضی در مقیاس استانی و شهرستانی مناسب است تا آشکارسازی تغییرات بسیار موضعی در مقیاس قطعه شهری. این مجموعه داده‌ای منسجم، بستر لازم را برای اجرای تحلیل شباهت پیکسل‌محور چندزمانه فراهم می‌کند و امکان بررسی هم‌زمان پایداری مکانی، تغییرات ساختاری و روندهای زمانی را در چارچوبی یکنواخت مهیا می‌سازد.

1. Dimensional Embeddings-64

2. Alphaearth Foundation Model

3. Self-Supervised Deep Learning

4. Annual Median Composites

5. Surface Reflectance

چارچوب تحلیل و آشکارسازی تغییرات مبتنی بر بردارهای نهفته

فرآیند کلی تحلیل در این پژوهش شامل چهار مرحله اصلی است که در (شکل ۲) نشان داده شده‌اند.

محاسبه شباهت پیکسل محور در فضای بردارهای نهفته (چندزمانه)

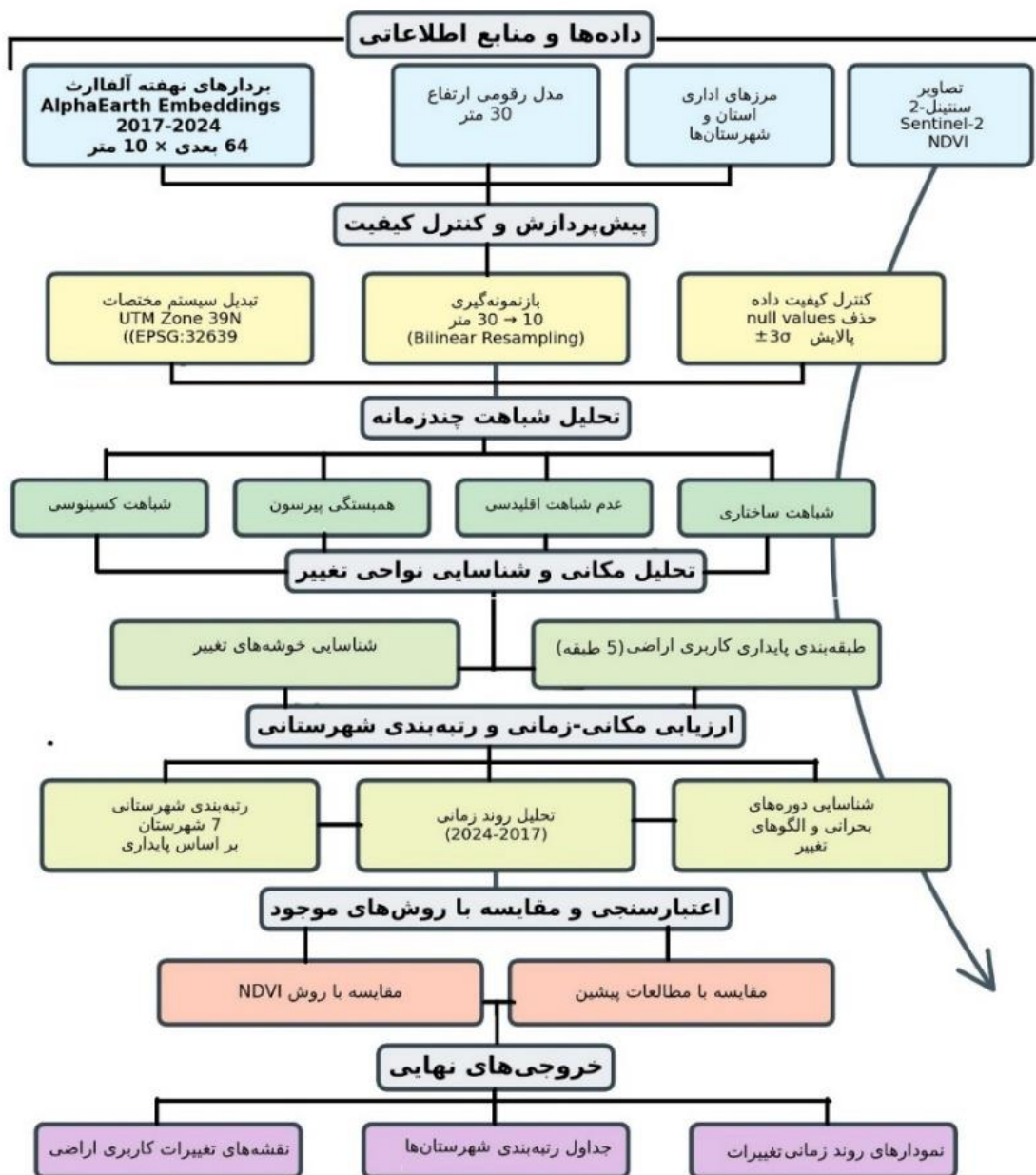
برای سنجش کمی تغییرات بین بردارهای نهفته، چهار معیار مکمل شباهت استفاده شد (جدول ۱) که هر کدام جنبه متفاوتی از تشابه را اندازه می‌گیرند: شباهت کسینوسی^۱ برای فاصله زاویه‌ای، ضریب همبستگی پیرسون^۲ برای رابطه خطی، عدم شباهت^۳ برای فاصله اقلیدسی، و شاخص شباهت ساختاری^۴ برای الگوهای مکانی (Wang et al., 2004). به کارگیری هم‌زمان این معیارها امکان توصیف تغییرات را در فضای بردارهای نهفته از منظرهای برداری، آماری و ساختاری فراهم می‌کند و از وابستگی تحلیل به یک تعریف منفرد از شباهت جلوگیری می‌نماید. انتخاب این معیارها بر اساس سه ملاک صورت گرفت: نخست، هر معیار یک ویژگی متفاوت را بسنجد (شباهت کسینوسی جهت بردارها، پیرسون همبستگی خطی، عدم شباهت به صورت نرمال شده فاصله اقلیدسی، و شاخص شباهت ساختاری بافت مکانی؛ دوم، این معیارها در مطالعات تشخیص تغییرات کاربری اراضی به کار رفته و کارایی آن‌ها تأیید شده باشند (Zhang et al., 2021)؛ و سوم، تا بتوانند هم تغییرات جزئی (مثلاً کاهش تدریجی NDVI) و هم تغییرات شدید (مانند تبدیل اراضی کشاورزی به کاربری شهری) را تفکیک کنند. این رویکرد چندمعیاره به‌طور خاص برای کاهش سوگیری‌های ناشی از تغییرات فصلی یا نوسانات طیفی کوتاه‌مدت طراحی شده است و امکان تفکیک تغییرات واقعی کاربری از تغییرات گذرای پوشش سطحی را افزایش می‌دهد.

¹ Cosine Similarity

² Pearson Correlation

³ Dissimilarity

⁴ Structural Similarity Index Measure (SSIM)



شکل ۲. فلوجارت روش شناسی پژوهش شامل مراحل استخراج و پیش‌پردازش داده‌های بردار نهفته آلفاارت، محاسبه معیارهای شباهت چندزمانه، تحلیل مکانی و زمانی، اعتبارسنجی، و تولید خروجی‌های نهایی.

جدول ۱. معیارهای شباهت چندزمانه برای مقایسه بردارهای نهفته

منبع	تفسیر	محدوده	فرمول	معیار
Salton & McGill (1983) Brown et al. (2025)	۱ = بیشترین شباهت ۰ = عدم شباهت	[0, 1]	$\frac{A \cdot B}{\ A\ \ B\ } = S_{\cos}(A, B)$	شباهت کسینوسی
Wang et al. (2004) Zhang et al. (2021)	+۱ = رابطه مستقیم کامل -۱ = رابطه معکوس کامل	[-1, +1]	$r = \frac{(\bar{B} - \bar{A})(A - A) \sum}{\sqrt{2(B - \bar{B}) \sum^2 (A - \bar{A}) \sum^2}} = r$	همبستگی پیرسون -رابطه خطی (تغییرات نسبی) را می‌سنجد
Zhang et al. (2021)	۰ = کاملاً مشابه ۱ = کاملاً متفاوت	[0, 1]	$S_{\cos}(A, B) - 1 = D$	عدم شباهت - فاصله اقلیدسی (معکوس شباهت) می‌سنجد
Wang et al. (2004)	۱ = ساختار کاملاً مشابه ۰ = ساختار کاملاً متفاوت	[0, 1]	$\frac{(2\sigma_{AB} + C)(12\mu_{AB} + C)}{(2\sigma_A^2 + \sigma_B^2 + C)(12\mu_A^2 + \mu_B^2 + C)} = SSIM$	شباهت ساختاری - بافت و ساختار مکانی (پنجره ۳×۳) می‌سنجد

شباهت کسینوسی فاصله زاویه‌ای در فضای ۶۴ بعدی با مقادیری در بازه [۰، ۱] را می‌سنجد و نسبت به بزرگی بردارها بی‌تفاوت است. همبستگی پیرسون رابطه خطی با مقادیری در بازه [-۱، +۱] را نشان می‌دهد و به تغییرات نسبی حساس است. عدم شباهت که مکمل شباهت کسینوسی است، فاصله را با مقادیر نزدیک صفر برای شباهت بالا اندازه می‌گیرد. شاخص شباهت ساختاری یک معیار برای سنجش شباهت بین دو تصویر است که به جای مقایسه ساده پیکسل به پیکسل، از طریق مقایسه روشنایی، کنتراست و ساختار در پنجره‌های پیکسلی ۳×۳، تغییرات بافت مکانی را با مقادیر [۰، ۱] ارزیابی می‌کند (Wang et al., 2004). افزودن شاخص شباهت ساختاری در کنار معیارهای مبتنی بر بردار، امکان شناسایی تغییرات ساختاری و الگوهای فضایی مرتبط با توسعه شهری و تغییرات بافتی را فراهم می‌کند که معمولاً توسط شاخص‌های صرفاً طیفی یا برداری نادیده گرفته می‌شوند. برای هر زوج سال متوالی (۲۰۱۷-۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳-۲۰۲۴) و دوره کامل (۲۰۱۷-۲۰۲۴)، چهار معیار به صورت پیکسل محور محاسبه شدند که در مجموع ۳۲ لایه شباهت (۴ معیار × ۷ زوج سال متوالی + ۴ معیار × ۱ دوره کامل ۲۰۱۷-۲۰۲۴) تولید شد. محاسبه هم‌زمان شباهت‌های کوتاه‌مدت (زوج سال‌های متوالی) و بلندمدت (کل دوره مطالعه) امکان بررسی پایداری یا ناپایداری تغییرات را در مقیاس‌های زمانی متفاوت فراهم می‌سازد. تمامی محاسبات شباهت به صورت پیکسل به پیکسل و با روش بازنمونه‌گیری دوخطی^۱ بر روی تصاویر ۳۰ متری انجام شد تا با داده‌های کمکی SRTM و Sentinel-2 هم‌تراز گردد. این بازنمونه‌گیری با هدف هم‌ترازسازی مکانی داده‌ها انجام شده و تمرکز تحلیل را بر مقایسه‌های نسبی چندزمانه حفظ می‌کند، نه بر مقادیر مطلق تک‌پیکسل‌ها. جزئیات ریاضی و دامنه عملی هر چهار معیار در (جدول ۱) ارائه شده است.

1. Resampling Bilinear

تحلیل الگوی فضایی تغییرات و شناسایی کانون‌های تغییر

برای تبدیل مقادیر پیوسته شباهت به طبقات تغییر قابل تفسیر، روش آستانه‌گذاری آماری بر اساس توزیع داده‌ها استفاده شد. این تبدیل با هدف پیوند دادن خروجی‌های پیوسته مبتنی بر شباهت به طبقات قابل تفسیر مدیریتی انجام شد، بدون آن‌که ساختار نسبی داده‌ها در طول زمان مخدوش شود. آستانه‌های طبقه‌بندی از ترکیب دو رویکرد تعیین شدند: نخست، تحلیل توزیع آماری مقادیر شباهت در کل استان که نشان داد میانگین (۰.۹۵۶) و انحراف معیار (۰.۳۴۲) است؛ دوم، مرور مطالعات پیشین که از بردارهای نهفته برای تشخیص تغییرات استفاده کرده‌اند (Brown et al., 2025; Zhang et al., 2021). این رویکرد ترکیبی باعث می‌شود آستانه‌ها نه صرفاً مبتنی بر ویژگی‌های خاص داده‌های منطقه‌ای، و نه صرفاً تقلید از ادبیات، بلکه حاصل تلاقی شواهد آماری و تجربیات پیشین باشند. بر این اساس، سه طبقه تعریف شد: مناطق پایدار یا Coldspot (شباهت $\leq 95\%$)، مناطق با تغییر متوسط یا Moderate (شباهت بین 85% تا 95%)، و مناطق با تغییر شدید یا Hotspot (شباهت $> 85\%$). در این چارچوب، طبقه Coldspot بیانگر پایداری بالای کاربری در طول دوره مطالعه، در حالی که Hotspot نمایانگر تغییرات معنادار و بالقوه برگشت‌ناپذیر کاربری اراضی است. این آستانه‌ها تقریباً با میانگین (μ)، میانگین منهای یک انحراف معیار ($\mu - \sigma$)، و میانگین منهای سه انحراف معیار ($\mu - 3\sigma$) مطابقت دارند و از لحاظ آماری معنادار هستند (سطح اطمینان 99.7%). انطباق آستانه‌ها با فواصل آماری کلاسیک، امکان تفسیر نتایج را در چارچوب احتمالاتی فراهم می‌کند و خطر انتخاب آستانه‌های دل‌خواهی را کاهش می‌دهد (جدول ۲).

جدول ۲. طبقه‌بندی نواحی تغییر بر اساس آستانه‌های شباهت

طبقه	نام فارسی	نام انگلیسی	محدوده شباهت (%)	معیار آماری	سطح تغییر	منبع
الف) طبقه‌بندی سه کلاسه (اصلی)						
۱	تغییر کم (مناطق پایدار)	Coldspot	≥ 95.0	μ	بدون تغییر تا تغییر ناچیز	Brown et al. (2025)
۲	تغییر متوسط	Moderate	85.0–95.0	$\mu - \sigma$ تا μ	تغییر تدریجی قابل توجه	Zhang et al. (2021)
۳	تغییر شدید	Hotspot	< 85.0	$< \mu - 3\sigma$	تبدیل کامل کاربری	Brown et al. (2025)
ب) طبقه‌بندی پنج کلاسه (تفصیلی)						
۱	خیلی پایدار	Very Stable	≥ 97.0	$\mu + 0.4\sigma$	خیلی زیاد (پایداری کامل)	Tassi & Vizzari (2020)
۲	پایدار	Stable	95.0–97.0	$\mu + 0.4\sigma$ تا μ	زیاد (تغییر بسیار جزئی)	"
۳	نیمه پایدار	Semi-stable	90.0–95.0	$\mu - 1.7\sigma$ تا μ	تغییر متوسط	"
۴	در حال تغییر	Changing	85.0–90.0	$\mu - 3\sigma$ تا $\mu - 1.7\sigma$	کم (تغییر قابل توجه)	"
۵	دگرگون شده	Transformed	< 85.0	$< \mu - 3\sigma$	خیلی کم (تغییر شدید)	"

علاوه بر طبقه‌بندی سه‌گانه، یک طبقه‌بندی پنج‌کلاسه تفصیلی نیز تهیه شد که شامل: خیلی پایدار ($\leq 97\%$)، پایدار ($97\% - 95\%$)، نیمه پایدار ($95\% - 90\%$)، در حال تغییر ($85\% - 90\%$)، و دگرگون شده ($> 85\%$) بود تا الگوهای دقیق‌تر تغییرات را آشکار کند (Tassi & Vizzari, 2020). این تفکیک تفصیلی به‌ویژه برای شناسایی نواحی گذار که ممکن است در آستانه

تغییر کاربری قرار داشته باشند اهمیت دارد و امکان تحلیل تدریجی بودن تغییرات را فراهم می‌سازد. برای هر طبقه، مساحت (کیلومتر مربع)، سهم از کل استان، و توزیع مکانی محاسبه و نقشه مرتبط تهیه شد. ترکیب اطلاعات کمی (مساحت و سهم نسبی) با الگوی فضایی تغییرات، مبنای تحلیل‌های شهرستانی و رتبه‌بندی مکانی ارائه‌شده در زیربخش بعدی را تشکیل می‌دهد. مشخصات کامل آستانه‌ها و شاخص‌های آماری در (جدول ۲) ارائه شده است.

ارزیابی پایداری مکانی-زمانی و شاخص‌سازی تغییر برای رتبه‌بندی شهرستان‌ها

برای درک الگوهای مکانی تغییرات در مقیاس مدیریتی، تحلیل آماری جداگانه‌ای برای هر یک از هفت شهرستان استان انجام شد. انتخاب سطح شهرستان به‌عنوان واحد تحلیل، امکان پیوند مستقیم نتایج پیکسلی با ساختارهای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی فضایی را فراهم می‌کند و از تجمیع بیش‌ازحد داده‌ها در مقیاس استانی جلوگیری می‌نماید. بدین منظور، مقادیر شباهت کسینوسی در محدوده هر شهرستان با استفاده از عملگر تجمیع آماری^۱ در گوگل ارث انجین استخراج و پنج آماره توصیفی شامل میانگین، انحراف معیار، حداقل، حداکثر، و میانه محاسبه شدند. شهرستان‌ها بر اساس میانگین شباهت به صورت نزولی (از پایدارترین به ناپایدارترین) رتبه‌بندی شدند تا مناطق اولویت‌دار برای مداخلات مدیریتی مشخص شوند. استفاده از میانگین شباهت به‌عنوان معیار اصلی رتبه‌بندی با هدف ارائه یک شاخص ساده، قابل مقایسه و قابل تفسیر مدیریتی انجام شد و از ترکیب دل‌خواهی چند شاخص در یک عدد واحد پرهیز گردید. علاوه بر این، برای هر شهرستان مساحت (کیلومتر مربع) و درصد کلاس‌های پنج‌گانه پایداری (خیلی پایدار، پایدار، متوسط، در حال تغییر، دگرگون شده) برای هر شهرستان محاسبه شد تا توزیع مکانی تغییرات در سطح مدیریتی مشخص گردد. (جدول ۳). این تحلیل مکمل رتبه‌بندی مبتنی بر میانگین است و مانع از آن می‌شود که شهرستان‌هایی با میانگین مشابه، اما الگوهای فضایی متفاوت تغییرات، به‌طور نادرست در یک سطح مدیریتی واحد تفسیر شوند.

جدول ۳. آمار توصیفی معیارهای شباهت در سطح هفت شهرستان استان البرز (۲۰۱۷-۲۰۲۴)

میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر	میانگین	معیار
٪۹۵۶۹	٪۰۳۷۱	٪۳۱۳۱	٪۹۹۸۱	٪۹۶۶۹	Cosine Similarity
٪۹۵۷۰	٪۰۳۷۳	٪۳۲۵۰	٪۹۹۸۰	٪۹۶۶۹	Pearson Correlation
٪۰۴۳۱	٪۰۳۷۱	٪۰۰۱۹	٪۶۸۶۹	٪۰۳۳۱	Dissimilarity
٪۹۰۴۷	٪۰۹۹۶	٪۴۲۷۴	۹۹۸۰۵	٪۹۴۱۵	SSIM

به منظور تحلیل روند زمانی تغییرات، شباهت برای هفت دوره سالانه متوالی (۲۰۱۷-۲۰۱۸، ۲۰۱۸-۲۰۱۹، ...، ۲۰۲۳-۲۰۲۴) محاسبه و روند کلی با رگرسیون خطی ساده و آزمون ناپارامتریک مان-کندال^۲ (سطح معناداری = $\alpha = 0.05$) بررسی شد. به‌کارگیری هم‌زمان رگرسیون خطی و آزمون ناپارامتریک مان-کندال با هدف افزایش پایداری نتایج در برابر نوسانات غیرنرمال و داده‌های پرت انجام شده است. برای هر دوره، میانگین و انحراف معیار شباهت در سطح استان محاسبه و تغییرات درصدی نسبت به دوره اول (۲۰۱۷-۲۰۱۸) تعیین گردید تا مشخص شود آیا روند تغییرات افزایشی، کاهش‌ی یا پایدار بوده است. انتخاب نخستین دوره به‌عنوان مبنای مقایسه، امکان ارزیابی نسبی تغییرات در طول زمان را فراهم می‌کند، بدون آن‌که تفسیر نتایج به مقادیر مطلق شباهت وابسته باشد. در نهایت، داده‌های روند زمانی در قالب نمودار خطی با باندهای نوسان (میانگین \pm انحراف معیار) ترسیم شدند تا نوسانات میان‌سالانه و دوره‌های بحرانی قابل شناسایی باشند.

1. ReduceRegion

2. Mann-Kendall

این نمایش گرافیکی به منظور تسهیل شناسایی الگوهای زمانی و دوره‌های گذار طراحی شده است و از استنباط علیت مستقیم میان تغییرات مشاهده شده و عوامل بیرونی بدون شواهد تکمیلی پرهیز می‌شود.

چارچوب اعتبارسنجی و مقایسه مفهومی-عملکردی با روش‌های مرسوم

در این پژوهش برای ارزیابی کارایی رویکرد بردارهای نهفته، دو استراتژی مقایسه‌ای اتخاذ شده‌اند. با توجه به ماهیت خروجی این پژوهش که بر مبنای مقادیر پیوسته شباهت تعریف می‌شود، اعتبارسنجی به صورت مفهومی-عملکردی طراحی شده است، نه صرفاً بر پایه معیارهای کلاسیک دقت طبقه‌بندی که مستلزم داده‌های مرجع گسترده‌اند. نخست، مقایسه مفهومی با روش شاخص پوشش گیاهی (NDVI) که یکی از متداول‌ترین روش‌های سنتی برای تشخیص تغییرات پوشش سطح زمین است. این مقایسه با هدف بررسی تفاوت نوع تغییرات قابل آشکارسازی توسط دو رویکرد انجام می‌شود، نه ارزیابی برتری عددی یک روش بر روش دیگر. بدین منظور، تصاویر سنتینل-۲ سطح A۲ (بازتاب سطحی؛ SR)^۱ برای دوره‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۲۴ با درصد ابر کمتر از ۲۰٪ استخراج و برای هر ماه، از روش میانه‌گیری برای ترکیب تصاویر متعدد و حذف اثر ابر و سایه استفاده شد. استفاده از ترکیب میانه‌گیری ماهانه با هدف کاهش اثر نوسانات فصلی و پدیدارشناسی پوشش گیاهی انجام شد تا تغییرات شناسایی شده بیشتر منعکس‌کننده تغییرات واقعی پوشش سطح زمین باشند. شاخص NDVI از نسبت باندهای مادون قرمز نزدیک (B8) و قرمز (B4) به صورت $NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4)$ محاسبه و تغییرات آن بین دو دوره با استفاده از آستانه تغییر مطلق $|\Delta NDVI| > 0.01$ شناسایی شد. این آستانه به عنوان یک معیار محافظه‌کارانه برای تفکیک تغییرات معنادار پوشش گیاهی از نویز طیفی انتخاب شده و در مطالعات پیشین نیز به طور گسترده به کار رفته است. سپس، ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر عدم شباهت آلفارث و تغییرات NDVI محاسبه شد تا میزان همبستگی بین دو روش سنجیده شود. انتظار می‌رود همبستگی متوسط یا ضعیف بین دو روش مشاهده شود، زیرا NDVI عمدتاً به تغییرات پوشش گیاهی حساس است، در حالی که بردارهای نهفته آلفارث قادر به بازنمایی تغییرات ساختاری و کاربری غیرگیاهی نیز هستند.

دوم، مقایسه با مطالعات پیشین که از روش‌های مختلف برای تحلیل تغییرات کاربری اراضی استفاده کرده‌اند. این مقایسه با هدف تفسیر مقایسه‌ای نتایج پژوهش حاضر در چارچوب ادبیات موجود انجام شده است، نه جایگزینی مستقیم یا هم‌ارز دانستن معیارهای گزارش شده در مطالعات دیگر. بدین منظور، میانگین شباهت به دست آمده در این مطالعه با معیارهای عملکرد (شباهت، دقت کلی، یا ضریب کاپا) گزارش شده در چهار مطالعه کلیدی مقایسه شد: مطالعه جهانی بردارهای نهفته آلفارث (Brown et al., 2025)، روش‌های طبقه‌بندی نظارت شده مبتنی بر لندست (Phan et al., 2020)، روش‌های مبتنی بر شاخص‌های طیفی سنتینل-۲ (Tassi & Vizzari, 2020)، و رویکردهای یادگیری عمیق (Zhang et al., 2021). با توجه به تفاوت ماهوی معیارهای گزارش شده در این مطالعات، مقایسه در سطح روند کلی عملکرد و دامنه مقادیر انجام شده و از تفسیر برتری عددی مطلق پرهیز شده است. برای تضمین قابلیت مقایسه، تمامی معیارها به مقیاس یکسان [۰، ۱] با استفاده از نرمال‌سازی حداقل-حداکثر تبدیل و ارائه شدند. این نرمال‌سازی صرفاً با هدف نمایش مقایسه‌ای و بصری انجام شده و به عنوان معادل‌سازی کامل معیارهای ناهم‌جنس تفسیر نمی‌شود.

یافته‌ها

1. Surface Reflectance

در این بخش، نتایج حاصل از تحلیل چندزمانه بردارهای نهفته آلفا رت برای دوره ۲۰۱۷-۲۰۲۴ ارائه می‌شود. ابتدا رفتار و همگرایی معیارهای چهارگانه شباهت در مقیاس پیکسلی بررسی می‌شود، سپس الگوهای فضایی تغییرات و خوشه‌های تغییر شناسایی و طبقه‌بندی پایداری کاربری و پوشش اراضی ارائه می‌گردد. در ادامه، نتایج در مقیاس مدیریتی با ارزیابی پایداری و رتبه‌بندی شهرستان‌ها و تحلیل روند زمانی تغییرات تکمیل می‌شود. در نهایت، نتایج به دست آمده به صورت مفهومی با روش سنتی مبتنی بر NDVI و مطالعات پیشین مقایسه می‌شوند تا دامنه کاربرد، قابلیت تفسیری و حدود عملکردی رویکرد پیشنهادی روشن گردد.

تحلیل خروجی‌های شباهت مبتنی بر بردارهای نهفته

نتایج محاسبه چهار معیار شباهت برای دوره کامل ۲۰۱۷-۲۰۲۴ نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از استان البرز از پایداری بالای کاربری و پوشش اراضی برخوردار است، با این حال الگوهای مکانی تغییرات بسته به نوع معیار مورد استفاده تفاوت‌هایی معنادار نشان می‌دهند (جدول ۲ و شکل ۳).

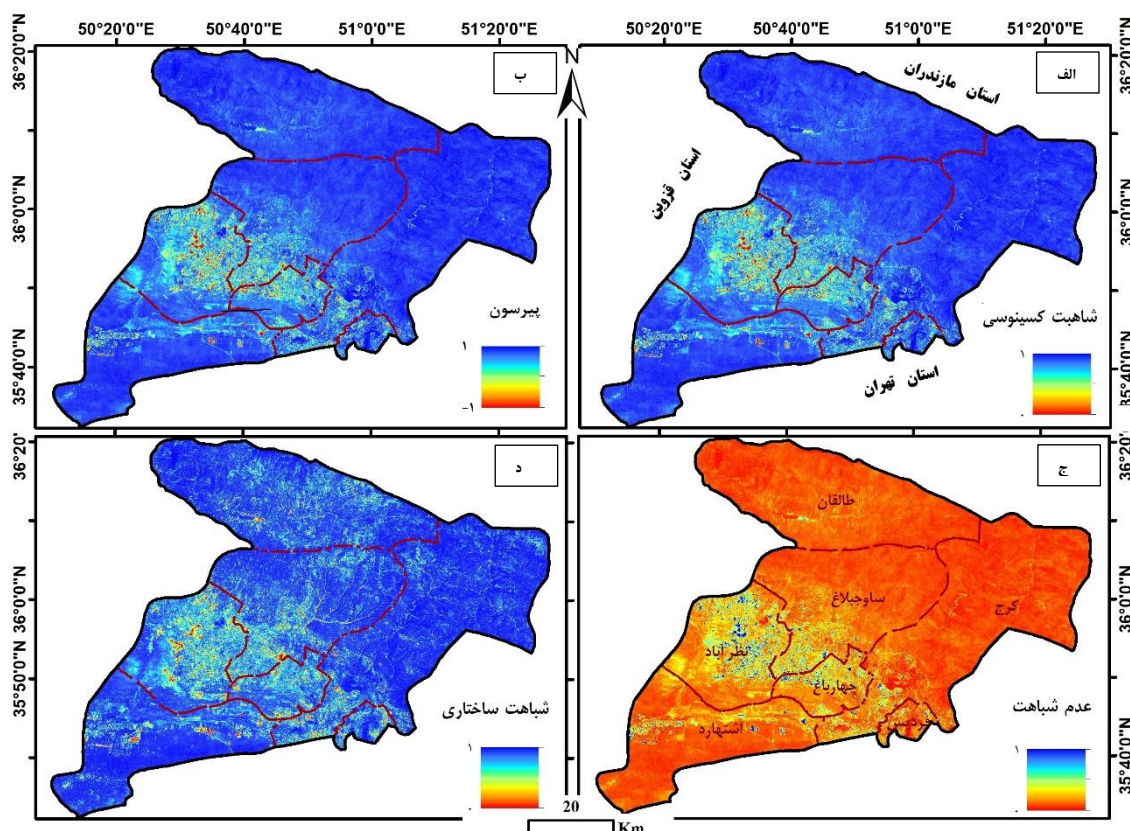
شباهت کسینوسی به عنوان معیار اصلی این پژوهش، مقادیر بالای شباهت را در سطح استان نشان می‌دهد (میانگین استانی ۰,۹۵۶۹ با انحراف معیار ۰,۰۳۷)، که بیانگر تشابه بالای بردارهای نهفته بین دو دوره زمانی است (شکل ۳-الف). با وجود این پایداری کلی، دامنه مقادیر شباهت کسینوسی از حدود ۰,۳۱ در نواحی با تغییرات شدید تا بیش از ۰,۹۹ در پایداری‌ترین مناطق متغیر است که نشان‌دهنده وجود کانون‌های محدود اما متمرکز تغییرات در سطح استان است.

الگوی به دست آمده از ضریب همبستگی پیرسون (میانگین ۰,۹۵۷۰ و انحراف معیار ۰,۰۳۶) شباهت بسیار نزدیکی با نتایج شباهت کسینوسی دارد (شکل ۳-ب). این همگرایی فضایی و آماری نشان می‌دهد که نتایج به دست آمده نسبت به انتخاب معیار برداری پایا بوده و تغییرات شناسایی شده صرفاً حاصل یک تعریف خاص از شباهت نیستند.

در مقابل، معیار عدم شباهت (1-Cosine) الگوی معکوسی از تغییرات را نشان می‌دهد (شکل ۳-ج)، به گونه‌ای که مقادیر نزدیک به صفر بیانگر پایداری بالا و مقادیر بزرگ‌تر نشان‌دهنده تغییرات شدید هستند. میانگین پایین عدم شباهت در سطح استان (۰,۰۴۳۱) بار دیگر بر غالب بودن پایداری فضایی-مکانی تأکید می‌کند، در حالی که دامنه نسبتاً گسترده این معیار (تا حدود ۰,۶۹) بر وجود تغییرات شدید در نواحی خاص دلالت دارد.

شاخص شباهت ساختاری (SSIM) رفتاری متمایز نسبت به سه معیار دیگر نشان می‌دهد (شکل ۳-د). اگرچه میانگین SSIM همچنان مقادیر بالای شباهت را منعکس می‌کند (۰,۹۵۴۷)، اما انحراف معیار بزرگ‌تر آن (۰,۰۹۹۶) بیانگر حساسیت بیشتر این شاخص به تغییرات بافتی و ساختاری است. این ویژگی موجب می‌شود SSIM بتواند تغییرات محلی و ساختاری، به ویژه در نواحی شهری و در حال گذار، را آشکار کند که ممکن است توسط معیارهای صرفاً برداری کمتر قابل تشخیص باشند.

مقایسه هم‌زمان نقشه‌های چهار معیار نشان می‌دهد که الگوی کلی تغییرات مکانی در سطح استان بین معیارها سازگار است، اما SSIM جزئیات بیشتری از تغییرات محلی و ناهمگنی فضایی را نمایان می‌سازد. این نتایج تأیید می‌کند که استفاده ترکیبی از معیارهای برداری و ساختاری، تصویر جامع‌تری از پایداری و تغییرات کاربری اراضی ارائه می‌دهد.



شکل ۳. نقشه‌های معیارهای چهارگانه شبهت مبتنی بر بردارهای نهفته برای دوره ۲۰۱۷-۲۰۲۴ در استان البرز: (الف) شبهت کسینوسی، (ب) ضریب همبستگی پیرسون، (ج) عدم شبهت (Cosine-1)، توزیع پایداری و تغییرات کاربری و پوشش اراضی را به صورت پیکسل‌محور نشان می‌دهند؛ (د) شاخص شبهت ساختاری (SSIM) با حساسیت بیشتر به تغییرات بافتی و الگوهای مکانی، جزئیات بیشتری از تغییرات محلی و ساختاری را آشکار می‌سازد.

تحلیل الگوی فضایی تغییرات و شناسایی خوشه‌های تغییر

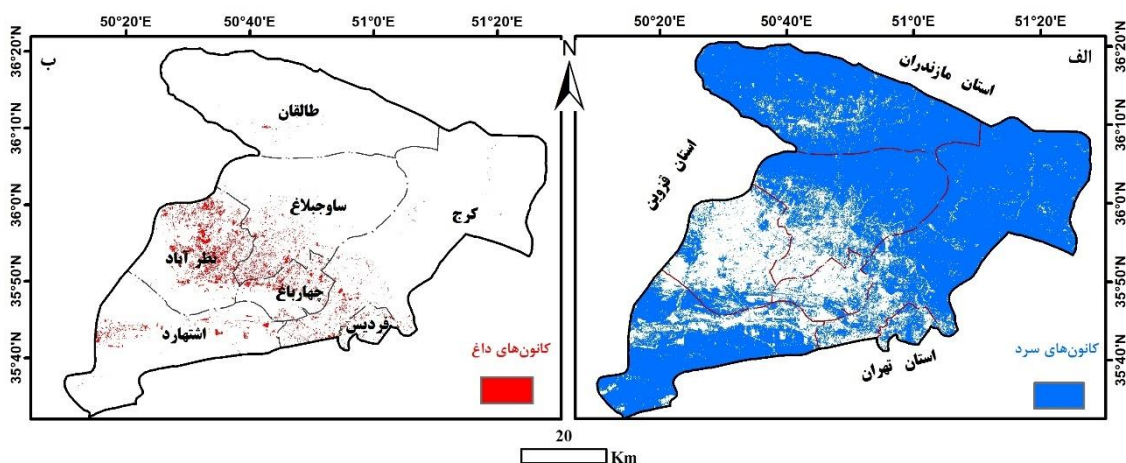
به منظور تفسیر فضایی خروجی پیوسته شبهت پیکسل‌محور و شناسایی الگوهای مکانی تغییرات، مقادیر شبهت کسینوسی برای دوره ۲۰۱۷-۲۰۲۴ بر اساس آستانه‌های آماری تعریف شده به سه طبقه «پایدار»، «نیمه پایدار» و «تغییر یافته» تفکیک شدند. این طبقه‌بندی امکان شناسایی نواحی با ثبات فضایی بالا (Coldspots)، نواحی گذار، و کانون‌های متمرکز تغییر (Hotspots) را در مقیاس استانی فراهم می‌کند.

نتایج نشان می‌دهد که بخش غالب استان البرز در دوره مطالعه در طبقه پایدار قرار دارد. این طبقه با مساحت ۴۰۳۰,۴۰ کیلومترمربع، معادل ۷۷,۷۸ درصد از سطح استان را شامل می‌شود (جدول ۴). الگوی فضایی این نواحی (شکل ۴-الف) نشان‌دهنده تمرکز گسترده پایداری در ارتفاعات شمالی استان، پهنه‌های کوهستانی و مرتعی، و بخش‌هایی از اراضی کشاورزی و شهری تثبیت شده است. در این نواحی، محدودیت‌های توپوگرافیک، غالب بودن پوشش‌های طبیعی، یا تثبیت کاربردی کاربری‌ها، مانع بروز تغییرات ساختاری عمده شده‌اند.

در مقابل، طبقه تغییر یافته یا کانون‌های داغ تغییر با مساحت ۱۲۲,۳۰ کیلومترمربع، تنها ۲,۳۶ درصد از سطح استان را دربر می‌گیرد (جدول ۴)، اما از نظر الگوی مکانی و پیامدهای مدیریتی اهمیت بالایی دارد. این نواحی به صورت لکه‌ها و

خوشه‌های متمرکز ظاهر شده‌اند و پراکنش یکنواختی در سطح استان ندارند (شکل ۴-ب). تمرکز اصلی این کانون‌ها در حاشیه‌های شهری کرج و فردیس، امتداد محور ارتباطی و توسعه‌ای کرج-قزوین به‌ویژه در شهرستان نظرآباد، بخش‌هایی از شهرستان اشتهارد، و لکه‌هایی پراکنده در اراضی کشاورزی حاشیه‌ای مشاهده می‌شود. این الگو بیانگر آن است که تغییرات کاربری در استان البرز ماهیتی خوشه‌ای و مسیرمحور دارد و عمدتاً در پهنه‌های تحت فشار توسعه شهری، صنعتی و زیرساختی رخ می‌دهد.

طبقه نیمه‌پایدار با مساحت ۱۰۲۹,۳۵ کیلومترمربع، معادل ۱۹,۸۶ درصد از سطح استان، پهنه‌های گذار بین پایداری کامل و تغییر شدید را نمایندگی می‌کند (جدول ۴). این نواحی عمدتاً در پیرامون شهرها، مرز بین اراضی شهری و کشاورزی، و مناطق با کاربری‌های مختلط مشاهده می‌شوند و از نظر برنامه‌ریزی سرزمینی به‌عنوان مناطق دارای پتانسیل تغییر در آینده قابل تفسیر هستند. لازم به ذکر است که این طبقه در (شکل ۴) نمایش داده نشده و تمرکز شکل صرفاً بر نمایش دو حد افراطی پایداری (کانون‌های سرد)^۱ و تغییر شدید (کانون‌های داغ)^۲ بوده است.



شکل ۴. کانون‌های سرد و کانون‌های داغ

جدول ۴. آمار مساحت و درصد سه طبقه تغییر پایدار، نیمه پایدار، تغییر یافته

طبقه	دامنه شباهت	مساحت (km ²)
پایدار	≥ ۹۵٪	۴۰۳۰,۴۰
نیمه پایدار	۸۵٪ - ۹۵٪	۱۰۲۹,۳۵
تغییر یافته	< ۸۵٪	۱۲۲,۳۰

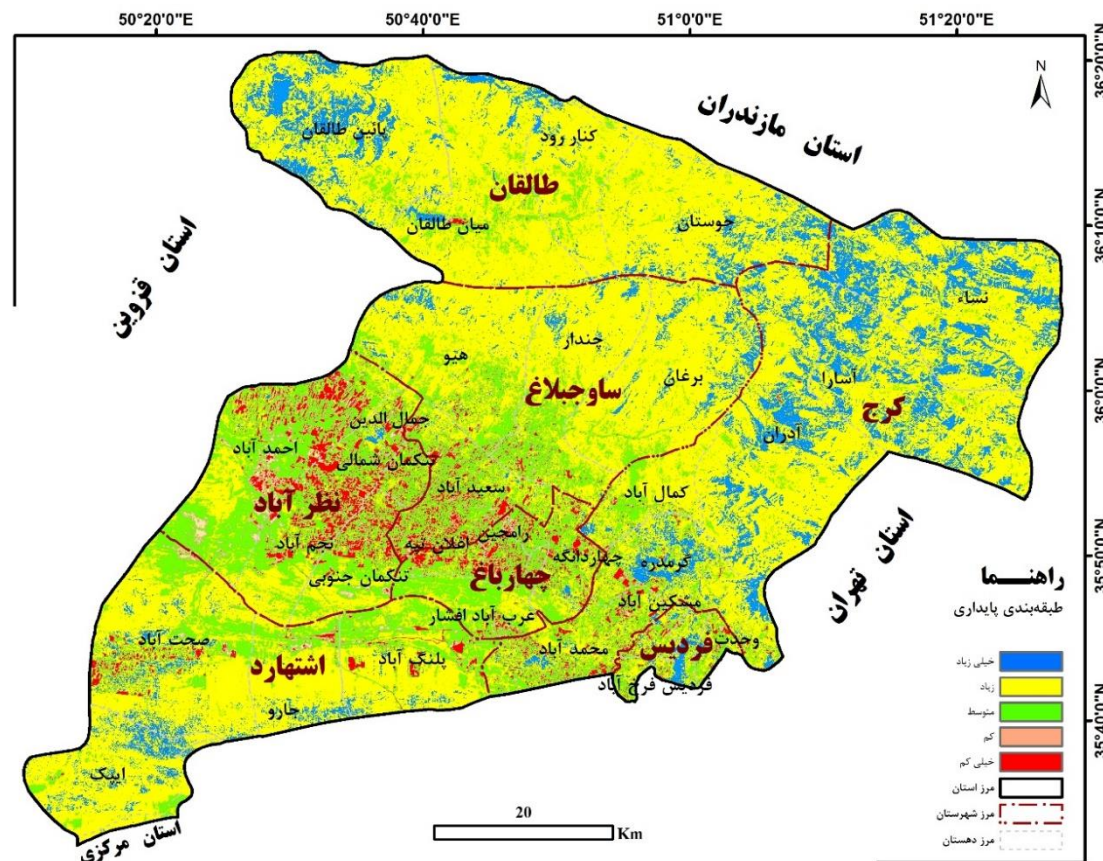
طبقه‌بندی پایداری کاربری و پوشش اراضی

برای ارائه تصویری تفصیلی از شدت و طیف تغییرات کاربری و پوشش اراضی، طبقه‌بندی پنج کلاسه بر اساس آستانه‌های دقیق و ریزتر شباهت اجرا شد که پیوستار پایداری تا دگرگونی را در سطح استان نشان می‌دهد (شکل ۵). کلاس «خیلی پایدار» (شباهت ۰,۹۷-۱,۰۰) با مساحت ۶۸۸,۵۳ km² (۱۳,۲۸٪) عمدتاً در شهرستان طالقان و بخش‌های شمالی ساوجبلاغ و کرج متمرکز است و نشان‌دهنده حداقل تغییرات ساختاری طی دوره ۲۰۱۷-۲۰۲۴ است. کلاس «پایدار» (۰,۹۵-۰,۹۷)

¹ Coldspot

² Hotspot

گسترده‌ترین طبقه فضایی را تشکیل می‌دهد و با مساحت $3341,87 \text{ km}^2$ (۶۴,۴۵٪) بخش‌های وسیعی از اراضی کشاورزی تثبیت‌شده، پهنه‌های مرتعی مدیریت‌شده و بافت‌های شهری تثبیت‌شده را دربر می‌گیرد.



شکل ۵. طبقه‌بندی پنج کلاسه پایداری کاربری و پوشش اراضی در استان البرز برای دوره ۲۰۱۷-۲۰۲۴. این نقشه پیوستار پایداری تا دگرگونی را از «خیلی پایدار» (آبی تیره) تا «خیلی متحول» (قرمز تیره) نشان می‌دهد و ناهمگنی فضایی تغییرات، تمرکز پایداری در نواحی کوهستانی شمال استان، و تجمع تغییرات شدید در پهنه‌های شهری، صنعتی و محورهای توسعه را آشکار می‌سازد.

کلاس «متوسط» (۰,۹۵-۰,۹۰) با مساحت $838,56 \text{ km}^2$ (۱۶,۱۷٪) عمدتاً در نواحی واسط شهری-روستایی، به‌ویژه در پیرامون کرج، فردیس و چهارباغ، مشاهده می‌شود و بازتاب‌دهنده تغییرات تدریجی نظیر توسعه زیرساخت و تغییر الگوی بهره‌برداری است. کلاس «در حال تغییر» (۰,۸۵-۰,۹۰) با مساحت $190,80 \text{ km}^2$ (۳,۶۸٪) به‌صورت خوشه‌های پراکنده در نظرآباد، اشتهارد و حاشیه جنوبی کرج ظاهر شده و نمایانگر پهنه‌های نزدیک به آستانه تحول ساختاری است. کلاس «خیلی متحول» و شدیداً تغییر یافته (شبهات $> 0,85$) با مساحت $122,30 \text{ km}^2$ (۲,۳۶٪) کمترین سهم سطحی را دارد اما از نظر مکانی با کانون‌های داغ شناسایی شده هم‌پوشانی کامل دارد و بیانگر تغییرات شدید و عمدتاً غیرقابل بازگشت است.

مقایسه طبقه‌بندی پنج کلاسه با رویکرد سه‌گانه (بخش ۳,۲) نشان می‌دهد که طبقه «پایدار» در مدل سه کلاسه در واقع ترکیبی از دو کلاس «خیلی پایدار» (۱۳,۲۸٪) و «پایدار» (۶۴,۴۵٪) است، در حالی که طبقه «نیمه‌پایدار» (۱۹,۸۵٪) به دو کلاس «متوسط» (۱۶,۱۷٪) و «در حال تغییر» (۳,۶۸٪) تفکیک می‌شود. این تفکیک چندسطحی امکان شناسایی دقیق‌تر گرایان پایداری و اولویت‌بندی هدفمند مداخلات مدیریتی را فراهم می‌سازد.

ارزیابی پایداری کاربری اراضی در مقیاس شهرستانی و رتبه‌بندی مدیریتی

به‌منظور تفسیر نتایج طبقه‌بندی پایداری در مقیاس مدیریتی، مقادیر شباهت کسینوسی به‌صورت تجمیع شده در سطح هفت شهرستان استان البرز تحلیل و شاخص‌های آماری توصیفی شامل میانگین، انحراف معیار، حداقل و حداکثر محاسبه شد. بر این اساس، شهرستان‌ها بر مبنای میانگین شباهت به‌عنوان شاخص کلی پایداری، به‌صورت نزولی رتبه‌بندی شدند (جدول ۵). نتایج نشان می‌دهد که شهرستان طالقان با میانگین شباهت ۰,۹۶۹۵ و انحراف معیار ۰,۰۱۱۵ پایدارترین شهرستان استان است. انحراف معیار بسیار پایین این شهرستان بیانگر یکنواختی فضایی بالای پایداری و فقدان خوشه‌های متمرکز تغییر است. این وضعیت را می‌توان به ترکیب عوامل طبیعی و انسانی نسبت داد، از جمله غالب بودن واحدهای کوهستانی با شیب‌های بالا، پوشش گسترده جنگلی-مرتی، و فشار جمعیتی پایین که در مجموع ظرفیت تغییر کاربری را به‌طور قابل توجهی محدود کرده‌اند.

جدول ۵. رتبه‌بندی شهرستان‌های استان البرز بر اساس میانگین شباهت (۲۰۱۷-۲۰۲۴)

رتبه	شهرستان	مساحت (km ²)	حداکثر	حداقل	انحراف معیار	میانگین
۱	طالقان	۱۱۰۳,۵۵	۰,۹۹۴۲	۰,۷۳۲۷	۰,۰۱۱۵	۰,۹۶۹۵
۲	کرج	۱۴۲۲,۸۶	۰,۹۹۷۲	۰,۴۹۴۷	۰,۰۲۳۸	۰,۹۶۸۸
۳	اشتهارد	۸۱۴,۷۶	۰,۹۹۴۶	۰,۳۱۳۱	۰,۰۳۴۵	۰,۹۵۹۰
۴	ساوجبلاغ	۹۲۷,۴۶	۰,۹۹۴۰	۰,۴۷۳۹	۰,۰۳۲۸	۰,۹۵۶۰
۵	فردیس	۸۷,۷۵	۰,۹۹۸۱	۰,۵۵۳۸	۰,۰۴۲۰	۰,۹۵۰۳
۶	چهارباغ	۲۲۷,۹۶	۰,۹۹۶۴	۰,۵۱۷۷	۰,۰۴۸۷	۰,۹۲۴۶
۷	نظرآباد	۵۹۷,۶۶	۰,۹۹۵۴	۰,۵۳۵۵	۰,۰۵۷۵	۰,۹۱۷۱

شهرستان کرج با میانگین شباهت ۰,۹۶۸۸ در رتبه دوم قرار دارد. اگرچه این شهرستان بیشترین جمعیت استان را در خود جای داده است، میانگین بالای شباهت نشان‌دهنده تثبیت نسبی ساختار کاربری در هسته مرکزی شهری است. با این حال، انحراف معیار بالاتر (۰,۰۲۳۸) نسبت به طالقان بیانگر ناهمگونی بیشتر و وجود نواحی موضعی تغییر، به‌ویژه در حاشیه‌های شهری، است.

شهرستان‌های اشتهارد (۰,۹۵۹۰)، ساوجبلاغ (۰,۹۵۶۰) و فردیس (۰,۹۵۰۳) در رده‌های میانی رتبه‌بندی قرار می‌گیرند. این شهرستان‌ها دارای ترکیبی از کاربری‌های شهری، کشاورزی و باغی هستند و مقادیر میانگین و انحراف معیار آن‌ها نشان‌دهنده تعادل نسبی میان پایداری کلی و بروز تغییرات موضعی است. در این گروه، افزایش تدریجی انحراف معیار از ساوجبلاغ به فردیس نشان می‌دهد که هرچه فشارهای توسعه‌ای و تراکم انسانی افزایش می‌یابد، ناهمگونی فضایی تغییرات نیز بیشتر می‌شود.

در مقابل، شهرستان‌های چهارباغ و نظرآباد کم‌پایدارترین واحدهای مدیریتی استان شناخته می‌شوند. چهارباغ با میانگین شباهت ۰,۹۲۴۶ و انحراف معیار ۰,۰۴۸۷ ناهمگونی فضایی قابل توجهی را نشان می‌دهد، در حالی که شهرستان نظرآباد با کمترین میانگین شباهت (۰,۹۱۷۱) و بیشترین انحراف معیار (۰,۰۵۷۵) در رتبه آخر قرار دارد. این الگو بیانگر تمرکز تغییرات شدید و خوشه‌ای در این شهرستان‌هاست که می‌تواند به موقعیت آن‌ها در امتداد محورهای ارتباطی و توسعه صنعتی-تجاری نسبت داده شود.

اختلاف میانگین شباهت بین پایدارترین (طالقان) و کم‌پایدارترین (نظرآباد) شهرستان برابر با ۰,۰۵۲۴ است که از نظر آماری معنادار بوده ($p < 0.001$) و نقش تعیین‌کننده شرایط محلی در شکل‌دهی الگوهای تغییر کاربری اراضی را برجسته

می‌سازد. افزون بر این، رابطه معکوس بسیار قوی بین میانگین شباهت و انحراف معیار در سطح شهرستان‌ها مشاهده شد ($R = -0.92$)، به طوری که شهرستان‌های پایدارتر دارای الگوهای فضایی یکنواخت‌تر و شهرستان‌های کم‌پایدارتر دارای ناهمگونی و تمرکز بیشتر تغییرات هستند.

تحلیل روندهای زمانی پایداری کاربری اراضی در مقیاس استانی (۲۰۱۷-۲۰۲۴)

تحلیل روند زمانی شباهت کسینوسی در هفت دوره سالانه متوالی از ۲۰۱۷-۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳-۲۰۲۴ نشان می‌دهد که استان البرز در مقیاس استانی یک روند افزایشی معنادار در پایداری کاربری اراضی را تجربه کرده است (جدول ۶). میانگین شباهت از ۰,۹۵۲۵ در ابتدای دوره به ۰,۹۶۸۴ در انتهای دوره افزایش یافته که معادل بهبود نسبی ۱,۶۷ درصدی در پایداری کلی الگوهای کاربری است.

جدول ۶. روند زمانی میانگین شباهت در هفت دوره سالانه

دوره زمانی	میانگین شباهت	انحراف معیار
۲۰۱۷-۲۰۱۸	۰,۹۵۲۵	۰,۰۳۷۰
۲۰۱۸-۲۰۱۹	۰,۹۵۴۴	۰,۰۲۶۹
۲۰۱۹-۲۰۲۰	۰,۹۶۰۹	۰,۰۲۳۲
۲۰۲۰-۲۰۲۱	۰,۹۴۱۸	۰,۰۲۸۳
۲۰۲۱-۲۰۲۲	۰,۹۷۴۸	۰,۰۱۹۵
۲۰۲۲-۲۰۲۳	۰,۹۶۰۷	۰,۰۲۴۶
۲۰۲۳-۲۰۲۴	۰,۹۶۸۴	۰,۰۲۵۴

نتایج آزمون ناپارامتریک Mann-Kendall با مقدار $Z = +2.24$ و $p\text{-value} = 0.025$ این روند افزایشی را در سطح اطمینان ۹۵٪ تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که تغییرات مشاهده شده حاصل نوسانات تصادفی نیست، بلکه بیانگر یک گرایش زمانی پایدار است. این یافته با فرض اولیه مبنی بر کاهش پایداری در اثر گسترش شهری همخوانی کامل ندارد و حاکی از آن است که سیستم کاربری اراضی استان در سال‌های اخیر به نوعی تعادل نسبی ساختاری دست یافته است.

در مجموع، تحلیل روند زمانی نشان می‌دهد که علی‌رغم فشارهای توسعه‌ای مداوم، پایداری کاربری اراضی در استان البرز طی دوره ۲۰۱۷-۲۰۲۴ به صورت کلی تقویت شده است؛ با این حال، افت ناگهانی در دوره ۲۰۲۰-۲۰۲۱ نشان می‌دهد که سیستم همچنان در برابر شوک‌های برون‌زا آسیب‌پذیر است. این یافته‌ها اهمیت شناسایی دوره‌های بحرانی و تحلیل هم‌زمان الگوهای مکانی تغییر را برجسته می‌کند که در زیربخش بعدی به طور تفصیلی بررسی می‌شود.

شناسایی دوره‌های بحرانی و الگوهای گذار زمانی-مکانی پایداری کاربری اراضی

ترکیب نتایج تحلیل روند زمانی و الگوهای مکانی تغییر، وجود سه الگوی غالب تحول کاربری اراضی در استان البرز طی دوره ۲۰۱۷-۲۰۲۴ را نشان می‌دهد که در این میان، دوره ۲۰۲۰-۲۰۲۱ به‌عنوان تنها دوره بحرانی معنادار قابل شناسایی است. این الگوها بازتاب‌دهنده تعامل هم‌زمان عوامل انسانی، ساختاری و ژئومورفولوژیکی در کنترل یا تشدید تغییرات کاربری هستند.

نخست، الگوی خوشه‌ای تغییرات شدید (Hotspot) که به‌طور عمده در محور ارتباطی کرج-قزوین شامل شهرستان‌های نظرآباد و اشتهارد و نیز در حاشیه غربی کلان‌شهر کرج (فردیس و چهارباغ) متمرکز است. تمرکز فضایی این خوشه‌ها با کانون‌های توسعه صنعتی-تجاری و گسترش افقی سکونتگاه‌های شهری همخوانی دارد و نقش غالب عوامل انسانی نظیر فشار مهاجرتی، دسترسی زیرساختی و مزیت‌های مکانی را در تشدید تغییر کاربری نشان می‌دهد. این الگو تأیید می‌کند که تغییرات در استان البرز ماهیتی پراکنده ندارند، بلکه در محورهای خاص توسعه‌ای متمرکز شده‌اند.

دوم، الگوی پایداری توپوگرافی-محور که عمدتاً نواحی شمالی استان شامل شهرستان طالقان و بخش‌های مرتعی ساوجبلاغ را در بر می‌گیرد. در این مناطق، ترکیب شیب‌های تند (<۳۰٪)، ارتفاعات بالا، جهت دامنه‌های کم‌مناسب برای توسعه سکونتگاهی و کشاورزی، محدودیت دسترسی، و غلبه سازندهای کوهستانی و سنگی، ظرفیت توسعه فیزیکی و تغییر کاربری را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده است. افزون بر این، پوشش جنگلی-مرتعی طبیعی و تراکم پایین سکونتگاه‌ها سبب شده است این پهنه‌ها پایداری ساختاری بیشتری نسبت به دشت‌های جنوبی استان داشته باشند. این الگو نشان می‌دهد که کنترل‌های ژئومورفولوژیکی و ویژگی‌های لندفرم، همچنان یکی از مؤثرترین عوامل بازدارنده تغییر کاربری در مقیاس منطقه‌ای هستند.

سوم، دوره بحرانی ۲۰۲۰-۲۰۲۱ که تنها مقطع زمانی با کاهش معنادار پایداری در کل دوره مطالعه محسوب می‌شود. افت میانگین شباهت کسینوسی به ۰,۹۴۱۸ (کاهش حدود ۱,۱ درصدی نسبت به دوره قبل) بیانگر یک اختلال کوتاه‌مدت اما سیستماتیک در الگوهای کاربری است. این افت احتمالاً با تغییرات بارشی یا پیامدهای غیرمستقیم همه‌گیری کووید-۱۹ مرتبط باشد؛ از جمله رهاشدگی موقت اراضی کشاورزی حاشیه‌ای، توقف یا تعلیق پروژه‌های عمرانی، و تغییر در الگوهای بهره‌برداری از منابع، به‌ویژه منابع آب زیرزمینی. بازگشت سریع شاخص پایداری به مقدار ۰,۹۷۴۸ در دوره ۲۰۲۱-۲۰۲۲ نشان‌دهنده ظرفیت بالای سیستم برای بازیابی و نقش احتمالی سیاست‌های کنترلی توسعه و تثبیت فعالیت‌های اقتصادی پس از بحران است.

مقایسه مفهومی توان آشکارسازی تغییرات پوششی در برابر تغییرات ساختاری-کارکردی: بردارهای نهفته در مقایسه با شاخص NDVI

به‌منظور تبیین تفاوت‌های مفهومی میان رویکرد پیشنهادی مبتنی بر بردارهای نهفته و روش‌های طیفی سنتی، نتایج حاصل از تحلیل تغییرات NDVI با الگوهای تغییر شناسایی‌شده از طریق بردارهای نهفته مقایسه شد (شکل ۶). در این راستا، شاخص NDVI برای دو مقطع زمانی ۲۰۱۷ و ۲۰۲۴ بر پایه تصاویر لندست سطح بازتابی سطح زمین محاسبه و تغییرات مطلق آن به‌عنوان نماینده تغییرات پوشش گیاهی در نظر گرفته شد.

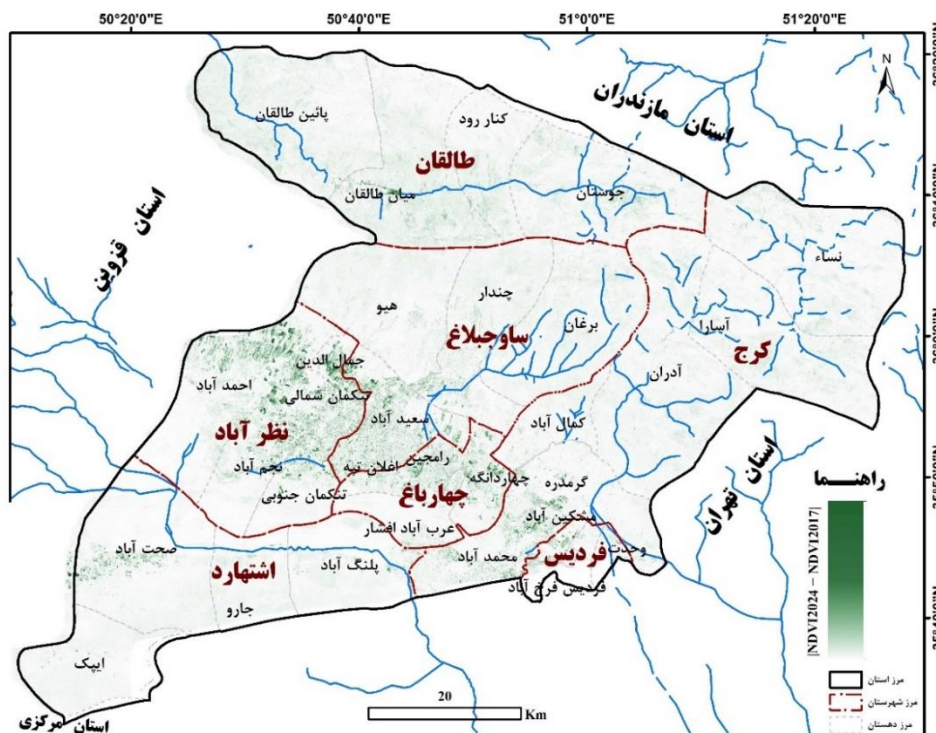
نقشه تغییرات NDVI نشان می‌دهد که بخش‌های وسیعی از استان البرز، به‌ویژه نواحی شمالی شامل شهرستان طالقان و بخش‌هایی از ساوجبلاغ، تغییرات قابل توجهی در مقدار NDVI را تجربه کرده‌اند که با مقادیر بالاتر تغییر NDVI (سبز تیره‌تر) مشخص می‌شوند (شکل ۶). این الگو عمدتاً با نواحی کوهستانی، مسیل‌ها، رودخانه‌ها و مرتعی همخوانی دارد که

تغییرات NDVI در آن‌ها می‌تواند ناشی از نوسانات طبیعی پوشش گیاهی، تفاوت‌های بین‌سالی در شرایط اقلیمی، یا تغییرات تراکم زیست‌توده باشد.

با این حال، مقایسه این نقشه با نتایج تحلیل مبتنی بر بردارهای نهفته (شکل ۴) نشان می‌دهد که بسیاری از این نواحی شمالی، علی‌رغم تغییرات قابل توجه NDVI، به‌عنوان مناطق پایدار یا کانون‌های سرد تغییر (Coldspot) شناسایی شده‌اند. این تفاوت به معنای نادرست بودن یکی از دو روش نیست، بلکه نشان‌دهنده آن است که NDVI و بردارهای نهفته به ابعاد متفاوتی از واقعیت سطح زمین حساس هستند. NDVI عمدتاً تغییرات پوشش گیاهی، زیست‌توده و نوسانات پدیدارشناختی را آشکار می‌کند؛ بنابراین، افزایش یا کاهش آن در نواحی کوهستانی و مرتعی شمال استان می‌تواند بازتاب تغییرات اقلیمی، رطوبتی یا فصلی باشد، بدون آن‌که الزاماً با تغییر کاربری یا تحول ساختاری زمین همراه باشد. در مقابل، بردارهای نهفته، با بازنمایی هم‌زمان ویژگی‌های طیفی، مکانی و بافتی، بیشتر به تغییرات ساختاری-کارکردی کاربری اراضی حساس‌اند. از این منظر، پایداری شهرستان طالقان در تحلیل بردارهای نهفته، در کنار تغییرات محسوس NDVI، بیانگر ثبات کاربری غالب منطقه همراه با نوسانات طبیعی پوشش گیاهی است.

در مقابل، برخی نواحی واقع در شهرستان‌های نظرآباد، اشتهارد و حاشیه‌های شهری-صنعتی جنوب و غرب استان، در نقشه NDVI تغییرات نسبتاً محدودی را نشان می‌دهند، اما در تحلیل بردارهای نهفته به‌عنوان کانون‌های داغ تغییر (Hotspot) مشخص شده‌اند. این تفاوت نیز از همین منطق مکمل پیروی می‌کند: تغییرات این نواحی عمدتاً از نوع غیرگیاهی، نظیر توسعه شهری، صنعتی و زیرساختی است و به همین دلیل ممکن است در شاخص‌های طیفی مبتنی بر پوشش گیاهی به‌صورت ضعیف یا محدود ظاهر شود. بنابراین، NDVI و بردارهای نهفته نباید به‌عنوان دو روش رقیب یا

متناقض تفسیر شوند، بلکه ترکیب آن‌ها می‌تواند تصویری چندبعدی‌تر از پویایی سرزمین ارائه دهد؛ تصویری که هم نوسانات پوشش گیاهی و هم تغییرات ساختاری-کارکردی کاربری اراضی را دربر می‌گیرد.



شکل ۶. نقشه تغییرات مطلق NDVI بین سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۲۴ بر پایه تصاویر لندست (بنجره فصلی مشترک). طیف رنگی از سبز روشن (تغییرات کم) تا سبز تیره (تغییرات زیاد) تغییرات پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. این نقشه عمدتاً به نوسانات زیست‌توده و تغییرات پوششی حساس است و لزوماً بازتاب‌دهنده تغییرات ساختاری یا کاربری اراضی نیست.

تفسیر مقایسه‌ای نتایج در چارچوب ادبیات علمی و مطالعات پیشین

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که رویکرد مبتنی بر بردارهای نهفته، از نظر پایداری مقادیر شباهت و توان بازنمایی تغییرات ساختاری، در دامنه بالای مقادیر گزارش شده در ادبیات قرار می‌گیرد (جدول ۷). میانگین شباهت کسینوسی استانی به‌دست‌آمده در این مطالعه (۰٫۹۵۶۹) در بازه بالایی از مقادیر گزارش شده برای چارچوب AlphaEarth در مقیاس جهانی قرار می‌گیرد (۰٫۹۰-۰٫۹۳؛ Brown et al., 2025)، با این حال، از آنجا که معیار شباهت کسینوسی از نظر مفهومی با شاخص‌هایی مانند دقت کلی، ضریب کاپا یا F1-score هم‌ارز نیست، مقایسه آن با مطالعات مبتنی بر طبقه‌بندی باید صرفاً در قالب تفسیر مقایسه‌ای و غیرمستقیم انجام شود.

جدول ۷. مقایسه مفهومی شاخص‌های گزارش شده در پژوهش حاضر و مطالعات پیشین (معیارها به مقیاس [۰، ۱] نرمال‌سازی شده‌اند).

مقاله	منطقه	روش	معیار	مقدار	مقیاس نرمال
این مطالعه	البرز، ایران	AlphaEarth embeddings	شباهت متوسط	۹۵٫۶۹٪	۰٫۹۵۷
Brown et al. (2025)	جهانی	AlphaEarth embeddings	شباهت متوسط	۰٫۹۰-۰٫۹۳ ≈	۰٫۹۴۰

۰,۸۷۳	۰,۸۸-۰,۸۲	دقت کلی	Random Forest	ویتنام	Phan et al. (2020)
۰,۸۲۵	۰,۸۵-۰,۸۰	دقت کلی	NDVI + Change Vector	ایتالیا	Tassi & Vizzari (2020)
۰,۹۱۰	۰,۸۹	ضریب کاپا	Deep Learning (U-Net)	چین	Zhang et al. (2021)

در مطالعه Phan و همکاران (۲۰۲۰) که از طبقه‌بندی نظارت‌شده مبتنی بر داده‌های لندست در ویتنام استفاده شده است، دقت کلی در بازه ۰,۸۲-۰,۸۸ گزارش شده است. این مقدار از نظر عددی پایین‌تر از میانگین شباهت نرمال شده در پژوهش حاضر است، اما به دلیل تفاوت ماهوی میان معیارهای دقت طبقه‌بندی و معیارهای شباهت در فضای بردارهای نهفته، نباید به‌عنوان مقایسه مستقیم عملکردی تفسیر شود.

همچنین، نتایج Tassi و Vizzari (۲۰۲۰) در ایتالیا که مبتنی بر شاخص‌های طیفی و روش‌های Change Vector Analysis بوده‌اند، دامنه‌ای متفاوت از معیارهای عملکرد را گزارش کرده‌اند که از نظر مفهومی با شاخص شباهت مورد استفاده در پژوهش حاضر هم‌ارز نیست.

در مطالعات مبتنی بر یادگیری عمیق، نظیر پژوهش Zhang و همکاران (۲۰۲۱) معیارهایی مانند F1-score یا ضریب کاپا گزارش شده‌اند که بیشتر بر صحت طبقه‌بندی موضوعی دلالت دارند، در حالی که شاخص مورد استفاده در پژوهش حاضر میزان شباهت چندزمانه در فضای بردارهای نهفته را می‌سنجد.

با این حال، باید تأکید کرد که مقایسه مستقیم بین معیارهای متفاوتی مانند شباهت، دقت کلی، ضریب کاپا و F1-score دارای محدودیت‌های مفهومی است، زیرا هر یک جنبه متفاوتی از عملکرد مدل را بازتاب می‌دهند. از این‌رو، مقایسه انجام‌شده در این بخش صرفاً با هدف تفسیر مقایسه‌ای و غیرمستقیم نتایج پژوهش حاضر در چارچوب ادبیات موجود ارائه شده و نباید به‌عنوان مقایسه عددی هم‌ارز یا ارزیابی مستقیم عملکرد تلقی شود.

بحث

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد الگوی تغییرات کاربری و پوشش اراضی در استان البرز طی دوره ۲۰۱۷-۲۰۲۴ از یک ساختار دوگانه اما منسجم تبعیت می‌کند: پایداری غالب در مقیاس استانی، در کنار خوشه‌های محدود اما متمرکز تغییرات شدید. میانگین شباهت بالای بردارهای نهفته و سهم بالای پهنه‌های پایدار بیانگر ثبات کلی سامانه کاربری اراضی است، اما تمرکز تغییرات شدید در کریدورهای خاص نشان می‌دهد این پایداری یکنواخت نبوده و حاصل برهم‌کنش عوامل مکانی، ژئومورفولوژیکی و توسعه‌ای است.

پایداری بسیار بالای نواحی شمالی استان، به‌ویژه شهرستان طالقان، عمدتاً با کنترل‌های ساختاری طبیعت توپوگرافیک منطقه توضیح داده می‌شود. شیب‌های بالا، محدودیت دسترسی و غلبه پوشش‌های طبیعی، ظرفیت تغییر کاربری را به‌صورت ذاتی کاهش داده‌اند؛ بنابراین بخش قابل‌توجهی از پایداری مشاهده‌شده، بیش از آن که حاصل مدیریت فعال باشد، نتیجه محدودیت‌های ژئومورفولوژیکی است. در مقابل، تمرکز Hotspotها در محور کرج-قزوین و حاشیه‌های غربی و جنوبی کلان‌شهر کرج نشان می‌دهد تغییرات کاربری در استان عمدتاً کریدورمحور و وابسته به مزیت مکانی رخ می‌دهند، نه به‌صورت پراکنده در سطح استان.

تحلیل سطح شهرستانی این الگو را تقویت می‌کند. رابطه معکوس قوی بین میانگین شباهت و ناهمگنی مکانی نشان می‌دهد که ناپایداری کاربری در البرز ماهیتی خوشه‌ای دارد و در شهرستان‌هایی بروز می‌کند که در مرحله رشد سریع شهری یا صنعتی قرار دارند. این یافته بیانگر آن است که اندازه جمعیت به‌تنهایی تعیین‌کننده شدت تغییرات نیست، بلکه مرحله تکامل شهری و جایگاه در شبکه دسترسی و توسعه نقش کلیدی ایفا می‌کند.

بعد زمانی تغییرات نیز از رفتار سیستماتیک مشابهی پیروی می‌کند. اگرچه روند کلی پایداری افزایشی و معنادار است، ولی وجود یک افت مشخص در دوره ۲۰۲۰-۲۰۲۱ نشان‌دهنده حساسیت سامانه کاربری اراضی به شوک‌های برون‌زا است. بازیابی سریع پایداری در دوره پس از آن، حاکی از ظرفیت تطبیق‌پذیری سیستم است، اما هم‌زمان نشان می‌دهد این تعادل می‌تواند موقتی و وابسته به شرایط بیرونی باشد.

مقایسه مفهومی با شاخص NDVI نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از تغییرات آشکار شده در بردارهای نهفته، ماهیتی ساختاری و کارکردی دارند و لزوماً با تغییرات پوشش گیاهی همراه نیستند. در حالی که NDVI عمدتاً به نوسانات زیست‌توده و شرایط اکولوژیک حساس است، بردارهای نهفته بیشتر به تغییرات ساختاری-کارکردی کاربری اراضی، از جمله توسعه شهری و صنعتی در اراضی کم‌پوشش، پاسخ می‌دهند؛ بنابراین، این دو رویکرد نه رقیب، بلکه مکمل یکدیگر در تفسیر چندبعدی پویایی سرزمین هستند.

در چارچوب ادبیات علمی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد رویکرد مبتنی بر بردارهای نهفته، بدون اتکا به برجسب‌گذاری نظارت‌شده محلی یا طبقه‌بندهای آموزش‌دیده منطقه‌ای و بدون تجمیع خطای طبقه‌بندی، می‌تواند تصویری پایدار و مقیاس‌پذیر از تغییرات کاربری ارائه دهد. با این حال، مقایسه نتایج با مطالعات پیشین باید به‌صورت تفسیر مقایسه‌ای و غیرمستقیم انجام شود، زیرا معیارهای به‌کاررفته در مطالعات مختلف جنبه‌های متفاوتی از دقت، شباهت و پایداری را بازتاب می‌دهند.

با وجود مزایای رویکرد مبتنی بر بردارهای نهفته در آشکارسازی تغییرات ساختاری-کارکردی، نتایج این پژوهش باید با در نظر گرفتن چند محدودیت روش شناختی تفسیر شوند. نخست، مدل آلفارث، همانند بسیاری از مدل‌های بنیادین مبتنی بر یادگیری عمیق، ماهیتی نسبتاً جعبه‌سیاه دارد و معنای فیزیکی یا موضوعی هر یک از مؤلفه‌های بردارهای نهفته ۶۴ بعدی به‌صورت مستقیم قابل تفسیر نیست. از این‌رو، تلفیق چارچوب پیشنهادی با «روش‌های هوش مصنوعی توضیح‌پذیر»^۱ در پژوهش‌های آینده می‌تواند به شناسایی سهم نسبی مؤلفه‌های طیفی، مکانی و بافتی در کاهش شباهت بردارهای نهفته کمک کند و شفافیت تفسیری مدل‌های بنیادین سنجش‌ازدور را افزایش دهد. در نتیجه، اگرچه کاهش شباهت در فضای بردارهای نهفته می‌تواند نواحی دارای تحول را آشکار سازد، نسبت‌دادن دقیق این تغییرات به فرایندهای مشخص انسانی یا محیطی، مانند توسعه شهری، تغییر الگوی کشت، رهاشدگی اراضی، یا نوسانات پوشش گیاهی، نیازمند استفاده از داده‌های کمکی و تحلیل‌های میدانی یا موضوعی است. همچنین، با توجه به ماهیت پیوسته و غیرطبقه‌بندی‌محور خروجی‌های مبتنی بر شباهت، اعتبارسنجی مستقیم آن‌ها با ماتریس خطا یا شاخص‌های کلاسیک دقت طبقه‌بندی امکان‌پذیر نیست و نیازمند طراحی چارچوب‌های ارزیابی اختصاصی برای تحلیل‌های مبتنی بر بردارهای نهفته است. دوم، با وجود استفاده از ترکیب‌های سالانه و حذف پیکسل‌های ابری، بخشی از تغییرات مشاهده‌شده ممکن است تحت تأثیر نوسانات فصلی، شرایط جوی، تغییرات رطوبتی، یا پدیدارشناسی پوشش گیاهی قرار گرفته باشد؛ موضوعی که به‌ویژه در نواحی کوهستانی و مرتعی شمال استان اهمیت بیشتری دارد. سوم، بردارهای نهفته مورد استفاده بر پایه آموزش جهانی مدل توسعه یافته‌اند و ممکن است برخی ویژگی‌های خاص محلی یا الگوهای منطقه‌ای تغییر کاربری را با حساسیت کمتری بازنمایی کنند.

1. Explainable AI/XAI

افزون بر این، بازنمونه‌گیری مکانی از ۱۰ به ۳۰ متر، اگرچه برای هم‌ترازسازی لایه‌های تحلیلی ضروری بود، احتمالاً بخشی از تغییرات بسیار ریزمقیاس، به‌ویژه در محیط‌های درون‌شهری، را تضعیف کرده است. از این رو، نتایج پژوهش حاضر بیش از آن که برای آشکارسازی تغییرات موضعی در مقیاس قطعه شهری مناسب باشند، برای تبیین روندهای ساختاری و الگوهای منطقه‌ای تغییرات کاربری اراضی در مقیاس شهرستانی و استانی کاربرد دارند. بنابراین، ارزش اصلی چارچوب پیشنهادی نه در جایگزینی کامل روش‌های متداول، بلکه در افزودن یک لایه تحلیلی مکمل برای شناسایی تغییرات ساختاری، تدریجی و چندوجهی کاربری اراضی است.

در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد تغییرات کاربری اراضی در استان البرز نه یک فرآیند تصادفی، بلکه نتیجه عملکرد یک سامانه مکانی-زمانی با کانون‌های فشار مشخص، کنترل‌های طبیعی قوی و حساسیت مقطعی به شوک‌های بیرونی است. این درک سیستمی زمینه را برای مداخلات هدفمند و پیشگیرانه در مقیاس مدیریتی فراهم می‌سازد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که تغییرات کاربری و پوشش اراضی در استان البرز طی دوره ۲۰۱۷-۲۰۲۴ با وجود پایداری کلی بالا، ماهیتی ناهمگن و خوشه‌ای دارد و تغییرات شدید عمده‌تاً در کریدورهای توسعه و نواحی در حال گذار شهری متمرکز شده‌اند. پایداری گسترده نواحی شمالی بیش از آن که حاصل مدیریت فعال باشد، بازتاب محدودیت‌های ژئومورفولوژیکی و ساختاری است، در حالی که ناپایداری‌ها به‌طور عمده از مزیت مکانی و فشارهای توسعه‌ای ناشی می‌شوند.

به‌کارگیری بردارهای نهفته مدل بنیادین AlphaEarth نشان داد که این رویکرد قادر است تغییرات ساختاری و کارکردی کاربری اراضی را مستقل از نوسانات پوشش گیاهی آشکار سازد؛ قابلیت که در شاخص‌های طیفی سنتی مانند NDVI به‌صورت ذاتی محدود است. چارچوب پیکسل‌محور مبتنی بر شباهت، بدون نیاز به برچسب‌گذاری نظارت‌شده کاربری اراضی یا طبقه‌بندهای آموزش‌دیده محلی و با قابلیت تکرارپذیری بالا، امکان پایش منسجم و مقیاس‌پذیر تغییرات کاربری را فراهم می‌کند.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رویکرد مبتنی بر بردارهای نهفته آلفاارت می‌تواند تغییرات سازگار با تحولات ساختاری-کارکردی کاربری اراضی را، مستقل از نوسانات صرف پوشش گیاهی، بازنمایی کند.

در نهایت، نتایج این مطالعه مبنایی علمی برای تمرکز مدیریت و پایش بر کانون‌های داغ تغییر، حفاظت از پهنه‌های پایدار، و مداخله پیشگیرانه در نواحی گذار فراهم می‌کند. افزون بر مدیریت کاربری اراضی، چارچوب پیشنهادی می‌تواند در سایر حوزه‌های علوم زمین و محیط‌زیست نیز کاربرد داشته باشد؛ از جمله پایش فرونشست زمین از طریق تلفیق با داده‌های InSAR، تحلیل فشار توسعه شهری بر منابع آب زیرزمینی، ارزیابی پایداری اکوسیستم‌های مرتعی، شناسایی گسترش سکونتگاه‌های پیرامونی، و پشتیبانی از برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای در مناطق خشک و نیمه‌خشک. از منظر پژوهشی، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، بردارهای نهفته آلفاارت با داده‌های میدانی، نقشه‌های رسمی کاربری اراضی، داده‌های اقلیمی، شاخص‌های اجتماعی-اقتصادی، و سری‌های زمانی فرونشست تلفیق شوند تا امکان تبیین علی‌تر تغییرات فراهم شود. همچنین، ارزیابی حساسیت زمانی و فصلی بردارهای نهفته، مقایسه نتایج در تفکیک مکانی ۱۰ و ۳۰ متر، و استفاده از روش‌های هوش مصنوعی توضیح‌پذیر برای روشن‌تر کردن معنای مؤلفه‌های بردارهای نهفته، می‌تواند به افزایش شفافیت، اعتبارسنجی و کاربردپذیری این چارچوب کمک کند.

منابع

- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان البرز معاونت آمار و اطلاعات (۱۴۰۳). سالنامه آماری استان البرز (جلد ۱). سازمان برنامه و بودجه کشور. (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان البرز، ۱۴۰۳)
- باقری، ش؛ حیاتی، ب.؛ یزدانی، س؛ و بکی حسکوئی، م. (۱۴۰۱). بررسی آثار تولیدی پروژه انتقال آب طالقان به استان تهران و البرز با مدل تعادل عمومی. تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران، ۵۳(۲)، ۳۲۵-۳۴۵.
- قائمی، ذ.؛ الهام، م؛ و برآیند، ش. م. ش. (۱۳۹۵). مطالعات برنامه آمایش استان البرز. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان البرز.
- قنبری، ی و اسماعیل‌زاده، ح. (۱۴۰۴). آشکار سازی تغییرات کاربری/پوشش اراضی در شهرها و ریسک‌های محیطی ناشی از آن (مطالعه موردی: منطقه ۱۸ کلان‌شهر تهران). جغرافیا و پایداری محیط، ۱۵(۲)، ۱۲۵-۱۴۱.
- محمداسماعیل، ز. (۲۰۱۰). پایش تغییرات کاربری اراضی کرج با استفاده از تکنیک سنجش از دور. پژوهش‌های خاک، ۲۴(۱)، ۸۱-۸۸.
- اصغری سراسکانرود، ص؛ اسفندیاری درآباد، ف؛ فعال نذیری، م و زینالی، ب. (۱۴۰۴). مقایسه تطبیقی عملکرد الگوریتم‌های CODAS و MABAC در پهنه بندی خطر فرونشست زمین با بهره گیری از شاخص های زیست محیطی (مطالعه موردی: محدوده حریم شهرهای استان البرز). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۳(۴)، ۵۸-۸۱.
- باقری، ش؛ حیاتی، ب.؛ یزدانی، س؛ و بکی حسکوئی، م. (۱۴۰۱). بررسی آثار تولیدی پروژه انتقال آب طالقان به استان تهران و البرز با مدل تعادل عمومی. تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران، ۵۳(۲)، ۳۲۵-۳۴۵.
- حسینی، ق؛ مشفق، م؛ و زارع مهرجردی، ر. (۲۰۱۷). توصیف و تحلیل مهاجرت‌های بین‌استانی در ایران و تعیین‌کننده‌های آن طی دوره ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰. برنامه ریزی فضایی، ۶(۴)، ۱۹-۴۴.
- رنجبر باروق، ز؛ و فتح اله زاده، م. (۱۴۰۱). بررسی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری و ارتباط آن با تغییرات تراز آبهای زیرزمینی (مطالعه موردی: کلان شهر کرج). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۰(۴)، ۱۳۸-۱۵۵.
- شاه بیگ،؛ پورمظاهری، ر؛ و طاهری، ا. (۱۴۰۱). بررسی روندهای زمانی و مکانی تغییرات آلاینده‌های هوا در کلانشهر کرج. محیط زیست و توسعه فرابخشی، ۷(۷۶)، ۲۷-۴۴.
- شریف کاظمی، ز؛ و موسوی، م. (۱۳۹۸). نقش شهرهای کوچک در تعادل بخشی به توسعه پایدار منطقه‌ای و تحولات نظام شهری (مطالعه موردی: استان البرز از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵). مجله علمی آمایش سرزمین، ۱۱(۱)، ۷۹-۱۰۴.
- قائمی، ذ.؛ الهام، م و برآیند، ش. م. ش. (۱۳۹۵). مطالعات برنامه آمایش استان البرز. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان البرز. محمداسماعیل، ز. (۱۳۸۹). پایش تغییرات کاربری اراضی کرج با استفاده از تکنیک سنجش از دور. پژوهش‌های خاک، ۲۴(۱)، ۸۱-۸۸.
- Brown, C., Buenrostro, C., Klemmer, K., Tetteh, T. A., Kerner, H., Gray, J., Birodkar, V., Ganesh, P., Murthy, V., Martinez, J. R., Rolf, E., Kumar, V., Ramos-Pollan, R., Dodhia, R., Ferres, J. L., Alemohammad, H., & Raghavan, M. (2025). AlphaEarth: Foundation models for Earth observation. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.22291>
- Dehghani, A., Soltani, A., & Nateghi, K. (2025). Balancing urban growth and environmental change: Land use patterns in Tehran and Sydney. Environmental and Sustainability Indicators, 26, 100691. doi: 10.1016/j.indic.2025.100691
- Emadodin, I., Taravat, A., & Rajaei, M. (2016). Effects of urban sprawl on local climate: A case study, north central Iran. Urban Climate, 17, 230–247. doi: 10.1016/j.uclim.2016.08.008
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. Reviews of Geophysics, 45(2), RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Gómez, C., White, J. C., & Wulder, M. A. (2016). Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 116, 55–72. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.008>

- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Haghighi, M. H., & Motagh, M. (2019). Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. *Remote Sensing of Environment*, 221, 534-550. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.003>
- Haghsheenas Haghighi, M., & Motagh, M. (2019). Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. *Remote Sensing of Environment*, 221, 534-550. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.003>
- Khoshlahjeh Azar, M., Shami, S., Nilfouroushan, F., Salimi, M., Ghayoor Bolorfroshan, M., & Reshadi, M. A. M. (2022). Integrated analysis of Hashtgerd plain deformation, using Sentinel-1 SAR, geological and hydrological data. *Scientific Reports*, 12, Article 21522. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25659-4>
- Phan, T. N., Kuch, V., & Lehnert, L. W. (2020). Land cover classification using Google Earth Engine and random forest classifier—The role of image composition. *Remote Sensing*, 12(11), 1735. <https://doi.org/10.3390/rs12111735>
- Shafizadeh-Moghadam, H., Minaei, M., Pontius, R. G., Jr., Asghari, A., & Dadashpoor, H. (2021). Integrating a Forward Feature Selection algorithm, Random Forest, and Cellular Automata to extrapolate urban growth in the Tehran-Karaj Region of Iran. *Computers, Environment and Urban Systems*, 87, 101595. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2021.101595
- Taravat, A., Rajaei, M., & Emadodin, I. (2017). Urbanization dynamics of Tehran city (1975–2015) using artificial neural networks. *Journal of Maps*, 13(1), 24–30. doi: 10.1080/17445647.2017.1305300
- Tassi, A., & Vizzari, M. (2020). Object-oriented LULC classification in Google Earth Engine combining SNIC, GLCM, and machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 12(22), 2261. <https://doi.org/10.3390/rs12222661>
- Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4), 600-612. <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>
- Wolf, I. D., Sobhani, P., & Esmailzadeh, H. (2023). Assessing changes in land use/land cover and ecological risk to conserve protected areas in urban–rural contexts. *Land*, 12(1), Article 231. <https://doi.org/10.3390/land12010231>
- Woodcock, C. E., Allen, R., Anderson, M., Belward, A., Bindschadler, R., Cohen, W. B., Gao, F., Goward, S. N., Helder, D., Helmer, E., Nemani, R., Oreopoulos, L., Schott, J., Thenkabail, P. S., Vermote, E. F., Vogelmann, J. E., Wulder, M. A., & Wynne, R. H. (2008). Free access to Landsat imagery. *Science*, 320(5879), 1011. <https://doi.org/10.1126/science.320.5879.1011a> (U.S. Geological Survey)
- Zhang, C., Sargent, I., Pan, X., Li, H., Gardiner, A., Hare, J., & Atkinson, P. M. (2021). Joint deep learning for land cover and land use classification. *Remote Sensing of Environment*, 221, 173-187. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.014>