

Assessing the Impact of Urban Agriculture on Enhancing Resilience in Densely Populated Urban Areas: A Comprehensive Approach Based on Carbon Storage and Sequestration

Bahman Veisi Nabikandi ¹ , Ahmad Hami ² , Khalil Valizadeh Kamran ³ , Farzin Emami Namin ⁴

1. Department of Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Email: bahmanveisi19@gmail.com

2. (Corresponding Author) Department of Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Email: hami@tabrizu.ac.ir

3. Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Email: valizadeh@tabrizu.ac.ir

4. Department of Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Email: namin8181@yahoo.com

Article Info

Article type:
[Research Article](#)

Article History:

Received:

2 June 2024

Received in revised form:

25 August 2024

Accepted:

28 September 2024

Available online:

6 November 2024

Keywords:

Carbon,
Ecosystem Services,
Google Earth Engine,
Urban Green
Infrastructure,
Urban Resilience.

ABSTRACT

The change in land use and land cover affected by the rapid expansion of urbanization and population growth in recent decades has created challenges such as carbon emissions in densely populated urban areas. Green infrastructures, such as urban agriculture, are significant with the challenges above and promoting urban ecological resilience. In this research, land use and land cover maps of Tabriz metropolis with an area of 660.66 square kilometres for 2016 and 2023 were prepared using Sentinel-2 satellite images in Google Earth Engine. Using the InVEST model, evaluation and modelling of carbon storage in the studied area for the mentioned years was done. The simultaneous disclosure of the role of different uses with an emphasis on urban agriculture using remote sensing data and new technologies is one of the innovations of the mentioned research. The results show that the developed area of Tabriz is facing an increase in the area of human constructions, barren lands and green spaces and a decrease in urban agriculture, pastures and water areas in the period of 2016-2023. The InVEST model predicts the amount of total carbon content stored throughout the studied area in 2015 and 2012 as 2.43 and 2.27 million tons, respectively, which indicates a decrease in carbon storage due to land use change. Urban agricultural use accounts for the largest amount of carbon storage every two years and the reduction of the area of this use is identified as the main cause of carbon emission. This research reveals the importance of urban agriculture in increasing ecological resilience and achieving the goals of sustainable urban development using remote sensing data and new technologies.

Cite this article: Veisi Nabikandi, B, Hami, A., Valizadeh Kamran, K., & Emami Namin, F. (2024). Assessing the Impact of Urban Agriculture on Enhancing Resilience in Densely Populated Urban Areas: A Comprehensive Approach Based on Carbon Storage and Sequestration. *Physical Geography Research Quarterly*, 56 (3), 19-33.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2024.366330.1007791>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Human activities exert significant anthropogenic environmental influences, significantly impacting ecosystem services (ESs) and capturing the interest of various scientific disciplines. Understanding the impact of land use/land cover (LULC) on the ecological environment is critical for the 21st century. Enhancing green infrastructure is one approach, as photosynthesis helps absorb CO₂ from the atmosphere. Consequently, diverse land-uses are crucial for carbon storage and reducing CO₂ emissions. The rapid expansion of urbanization and population growth in recent decades has led to challenges such as increased carbon emissions in densely populated urban areas. ESs provided by ecological spaces and green infrastructures, such as urban agriculture (UA), play a crucial role in addressing these challenges and enhancing the ecological resilience of urban areas. Tabriz City, where UA activities are integrated with urbanization, was selected as a case study to model and map carbon storage using remote sensing (RS) data. Firstly, we need to generate LULC maps for various periods. This study aims to indicate how much carbon is stored on different types of land using Sentinel-2 MSI data from Google Earth Engine (GEE) and the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) model. The significance of this study lies in its potential to contribute to urban planning strategies that prioritize carbon sequestration, aiding global efforts to mitigate the impact of human activities on the environment.

Methodology

This research was conducted based on a multidisciplinary approach. In the first step, LULC maps for the city of Tabriz for 2016 and 2023 were generated using Sentinel-2 satellite images on the GEE web platform. The InVEST model was employed in the second step to create a comprehensive carbon storage map using reservoir data from similar studies and the generated LULC. In the final step, the carbon storage and sequestration for different land-uses, with an emphasis on UA, were analyzed and

evaluated for the period 2016-2023. This research innovates by simultaneously revealing the role of different land-uses, particularly UA, through RS data (Sentinel) and new technologies (InVEST). Therefore, Sentinel-2 MSI, as a high-resolution satellite image, was initially used for LULC classification. A decisive reason for selecting Tabriz City in this study is to observe various land-uses and urbanization trends over the last decade across the study area. Regarding the GEE platform, six different land-uses were identified: built-up area, urban green space (UGS), UA, pasture, barren land, and water bodies. A spatiotemporal analysis was conducted using actual Google Earth images to validate the categorization's accuracy.

Results and discussion

The maps generated on the GEE platform were validated using the Kappa coefficient for 2016 and 2023. The validation process included analyzing 439 and 437 samples, respectively. According to the findings, the Kappa coefficient in 2016 was recorded at 0.87, with a total accuracy of 92.2%. In 2023, these values were 0.86 and 88.7%, respectively. According to LULC statistics, agricultural lands occupied the largest area in 2016, accounting for 34.9%. Built-up areas ranked next with 27.3%, while UA accounted for 17.6% of the total area. Pasture accounted for 12.9%, UGS for 5.9%, and water bodies for 1.4%. The highest variation in 2023 was observed in UA (-3.7%), followed by barren lands (+2.6%) and built-up areas (+1.5%). The InVEST model results indicated that the total carbon storage for the study area in 2016 and 2023 will be 2.43 million tons and 2.27 million tons, respectively. In 2016, the largest amount of carbon absorption was attributed to UA (1,071,198 tons), followed by pasture (585,477 tons), which accounted for 44% and 24% of the total carbon storage in the region, respectively. Due to their reduced size, these two land-uses will store less carbon in 2023 compared to 2016, making them significant factors influencing carbon emissions in the study area between 2016 and 2023. Despite its small area (5.9%), UGS stored about 532,258 tons of carbon in 2016, representing 22% of the total carbon

storage. In 2023, this land-use will save about 92,210 tons of carbon compared to 2016 due to its increased size. Barren lands and human constructions have the lowest carbon absorption values in the studied area. While UA and UGS account for the highest carbon storage compared to their small size, UA is identified as the main cause of carbon emissions in the study area due to its area reduction.

Conclusion

The current research aimed to determine the carbon storage content in Tabriz City (East Azerbaijan Province) across six land-uses; it also assessed the carbon storage content under various land-uses based on results from the InVEST model and data derived from Sentinel-2 MSI. This study highlights the importance of RS in monitoring carbon storage across different land-uses. Integrating RS data with the InVEST model facilitates the efficient and cost-effective prediction of carbon storage across the study area. Our findings, supported by the Kappa index, indicate accurate LULC classification for the entire study area in 2016 and 2023. This research identified the spread of destructive human activities in densely populated urban areas as a significant factor affecting carbon storage and emissions throughout the study area. Future research should examine the impact of ecological and human LULC changes on the provision of ESs. This would promote effective land-use planning and ecosystem management for social well-being at the local level and enable the evaluation of proposed scenarios.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Conceptualization: B. Veisi Nabikandi, A. Hami; **Data curation:** B. Veisi Nabikandi, A. Hami; **Formal analysis:** B. Veisi Nabikandi; **Investigation:** B. Veisi Nabikandi; **Methodology:** B. Veisi Nabikandi; **Project administration:** B. Veisi Nabikandi, A. Hami; **Software:** B. Veisi Nabikandi; **Supervision:** A. Hami, K. Valizadeh Kamran; F. Emami Namin; **Roles/Writing - original draft:** B. Veisi

Nabikandi; **Writing - review & editing:** B. Veisi Nabikandi.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

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

ارزیابی تأثیر کشاورزی شهری در افزایش تاب‌آوری مناطق پرجمعیت شهری: رویکردی جامع مبتنی بر ذخیره و ترسیب کربن

بهمن ویسی نبی‌کندی^۱، احمد حامی^۲، خلیل ولیزاده کامران^۳، فرزین امامی نمین^۴

۱- گروه مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: bahmanveisi19@gmail.com

۲- نویسنده مسئول، گروه مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: hami@tabrizu.ac.ir

۳- گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: valizadeh@tabrizu.ac.ir

۴- گروه مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: namin8181@yahoo.com

چکیده

اطلاعات مقاله

تغییر کاربری و پوشش اراضی متأثر از گسترش سریع شهرنشینی و رشد جمعیت در دهه‌های اخیر چالش‌های مانند انتشار کربن در مناطق پرجمعیت شهری به وجود آورده است. زیرساخت‌های سبز مانند کشاورزی شهری، نقش قابل توجهی جهت مقابله با چالش‌های مذکور و ارتقای تاب‌آوری اکولوژیکی شهری دارند. در این تحقیق نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی محدوده کلان‌شهر تبریز به مساحت ۶۶۰/۶۳ کیلومتر مربع برای سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۴۰۲ با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ در بستر سامانه تحت وب گوگل ارث انجین تهیه گردید. با استفاده از مدل InVEST ارزیابی و مدل‌سازی ذخیره کربن در محدوده مورد مطالعه برای سال‌های مذکور انجام گردید. آشکارسازی هم‌زمان نقش کاربری‌های مختلف با تأکید بر کشاورزی شهری با استفاده از داده‌های دورسنجی و فناوری‌های نوین از نوآوری‌های تحقیق مذکور می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که منطقه توسعه‌یافته تبریز با افزایش مساحت ساخت‌وسازهای انسانی، اراضی بایر و فضاهای سبز و کاهش کشاورزی شهری، مراتع و پهنه‌های آبی در دوره ۱۴۰۲-۱۳۹۵ مواجه است. مدل InVEST مقدار محتوای کل کربن ذخیره‌شده در سراسر محدوده مورد مطالعه را در سال ۱۳۹۵ و ۱۴۰۲ به ترتیب ۲/۴۳ و ۲/۲۷ میلیون تن پیش‌بینی می‌کند که نشان‌دهنده کاهش ذخیره کربن به دلیل تغییر کاربری می‌باشد. کاربری کشاورزی شهری در هر دو سال بیشترین میزان ذخیره کربن را به خود اختصاص داده و کاهش مساحت این کاربری عامل اصلی انتشار کربن شناسایی می‌شود. این پژوهش، اهمیت کشاورزی شهری را در افزایش تاب‌آوری اکولوژیکی و دستیابی به اهداف توسعه پایدار شهری با استفاده از داده‌های دورسنجی و فناوری‌های نوین آشکار می‌کند.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۳/۱۳

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۶/۰۴

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۷/۰۷

تاریخ چاپ:

۱۴۰۳/۰۸/۰۶

واژگان کلیدی:

تاب‌آوری شهری،

خدمات اکوسیستم،

زیرساخت‌های سبز شهری،

کربن،

گوگل ارث انجین.

استناد: ویسی نبی‌کندی، بهمن؛ حامی، احمد؛ ولیزاده کامران، خلیل و امامی نمین، فرزین. (۱۴۰۳). ارزیابی تأثیر کشاورزی شهری در افزایش تاب‌آوری مناطق پرجمعیت شهری: رویکردی جامع مبتنی بر ذخیره و ترسیب کربن. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۶ (۳)، ۳۳-۱۹.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2024.381297.1007835>

مقدمه

افزایش جمعیت و توسعه شهرنشینی در دهه‌های اخیر فشار فزاینده‌ای بر خدمات اکوسیستم^۱ در مناطق پر جمعیت شهری وارد کرده است (ویسی نبی‌کندی و همکاران، ۱۴۰۳). به دلیل عدم وجود زیرساخت‌های مناسب برای جمعیت رو به رشد شهری، این مناطق دستخوش تغییر شدید کاربری و پوشش اراضی^۲ می‌شوند (روکی و همکاران، ۱۴۰۲). این تغییرات کاربری اراضی اغلب منجر به تخریب یا از بین رفتن اکوسیستم‌های طبیعی و زیرساخت‌های سبز شهری می‌شود که به نوبه خود، ارائه خدمات اکوسیستم را تضعیف می‌کند و بر رفاه جمعیت شهری تأثیر می‌گذارد (Veisi Nabikandi et al., 2024a). تراکم بالای جمعیت و فعالیت‌های متنوع انسانی در مناطق شهری باعث ایجاد طیف وسیعی از اثرات زیست‌محیطی از جمله آلودگی هوا، آلودگی خاک، از دست دادن تنوع زیستی، افزایش انتشار کربن و مشکلات بهداشتی می‌شود (Abed et al., 2024).

شهرهایی که از فرم‌های مصنوعی تشکیل شده‌اند، شبیه هیچ چیز در جهان طبیعی نیستند، آن‌ها مناظر بسیار مدیریت شده هستند که اغلب اثرات منفی مشخصی بر اکوسیستم‌های اطراف دارند. با این حال، خود این مناطق اغلب در معرض تأثیرات منفی تغییر اقلیم مانند افزایش گرما هستند. دانشگاهیان و برنامه‌ریزان به طور یکسان شروع به بررسی راه‌حل‌های جدیدی کرده‌اند که محیط ساخته شده و طبیعی را به هم پیوند می‌دهد تا کیفیت هر دو را به طور هم‌زمان افزایش یابد. زیرا اکوسیستم‌های فعال و طبیعی نقش مهمی در برنامه‌ریزی شهرهای پایدار و تاب‌آور قرن بیست و یکم دارند (Lourdes et al., 2022). خدمات اکوسیستم شهری^۳ آن دسته از خدمات اکوسیستم در مناطق شهری و حومه شهری هستند که توسط زیرساخت‌های سبز و آبی مانند جنگل‌ها، تالاب‌ها، پارک‌ها، دریاچه‌ها، فضای سبز خیابان‌ها و بام‌های سبز ارائه می‌شوند. امروزه کشاورزی شهری^۴ به عنوان یکی از زیرساخت‌های سبز نوین شهری، توجه قابل ملاحظه‌ای را به خود جلب کرده است. کشاورزی شهری مقوله وسیعی است که ممکن است معانی مختلفی داشته باشد، اما اغلب اشکال فیزیکی مزارع شهری یا باغ‌های اجتماعی را به خود می‌گیرد (Rastkhadiv & Veisi Nabikandi, 2024). در گذشته پروژه‌های کشاورزی شهری اغلب برای تولید محصولات غذایی و حمایت از دسترسی به غذا انجام می‌شدند، اما اخیراً به دلیل ارزش دیگری که می‌توانند برای شهرها ارائه کنند، مورد توجه قرار گرفته‌اند. در واقع همچون سایر فضاهای سبز در شهرها، اکوسیستم‌های کشاورزی می‌توانند ماهیت چندمنظوره داشته باشند و مجموعه‌ای از خدمات زیست‌محیطی را بسیار فراتر از برداشت میوه‌ها و سبزیجات ارائه دهند. در حالی که این شیوه‌ها اغلب محبوب هستند و در بسیاری از اقدامات اقلیمی یا برنامه‌های بلندمدت نوشته شده‌اند، اما اطلاعات نسبتاً کمی در مورد مشارکت واقعی اکوسیستم کشاورزی در ارائه خدمات اکوسیستم و افزایش تاب‌آوری شهری وجود دارد.

تاب‌آوری شهری در زمینه انتشار کربن به توانایی شهرها برای انطباق، کاهش و بازیابی اثرات نامطلوب انتشار کربن اشاره دارد. با توجه این که امروزه بیش از نیمی از جمعیت جهان در مناطق شهری ساکن هستند، شهرها سهم قابل توجهی در انتشار جهانی کربن دارند. با این حال، زیرساخت‌های سبز شهری و فضاهای طبیعی نقش ویژه‌ای در مقابله با چالش‌های موجود از طریق شیوه‌های نوآورانه و پایدار دارند. ایجاد تاب‌آوری شهری مستلزم یکپارچه‌سازی استراتژی‌هایی است که توانایی سیستم‌های شهری را برای مقاومت در برابر چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از انتشار کربن افزایش می‌دهد (Zhang et al., 2024). مناطق شهری با خطرات فزاینده‌ای ناشی از رویدادهای شدید آب و هوایی، آلودگی هوا و امواج

1. Ecosystem Services
2. Land Use/Land cover
3. Urban Ecosystem Services
4. Urban Agriculture

گرما مواجه هستند که همگی توسط سطوح بالای انتشار کربن تشدید می‌شوند. برای مقابله با این چالش‌ها شهرها باید استراتژی‌های جامعی را اتخاذ کنند که شامل اقدامات فناوری، زیرساختی و سیاستی با هدف کاهش ردپای کربن و افزایش ظرفیت‌های انطباقی باشد (Shi et al., 2022). به‌طور کلی توسعه تاب‌آوری شهری در برابر انتشار کربن یک چالش چندوجهی است که نیازمند تلاش‌های هماهنگ در بخش‌های مختلف است.

در این تحقیق، از یک رویکرد تجربی برای ارزیابی و مدل‌سازی خدمت کلیدی اکوسیستم یعنی ذخیره و ترسیب کربن کاربری‌های مختلف با تأکید بر کشاورزی شهری به‌عنوان ابزاری برای افزایش تاب‌آوری شهری استفاده می‌شود. این تحقیق با استفاده از تلفیق داده‌های دورسنجی (RS)، سیستم اطلاعات جغرافیایی^۲ (GIS) و یکی از مدل‌های جغرافیایی توسعه‌یافته توسط پروژه سرمایه طبیعی (InVEST)^۳ خدمت اکوسیستمی ذخیره و ترسیب کربن (Carbon storage and sequestration model) منظر شهری تبریز را ارزیابی و مدل‌سازی می‌کند. سامانه تحت وب گوگل ارث انجین^۴ دسترسی سریع و آسان به طیف گسترده‌ای از داده‌های دورسنجی را فراهم می‌کند و باعث صرفه‌جویی قابل توجهی در زمان و هزینه می‌شود (افسری و همکاران، ۱۴۰۳). همچنین با استفاده از تکنیک‌ها و امکانات GIS می‌توان تأثیر خدمات اکوسیستمی تعیین‌شده کشاورزی شهری را با سایر کاربری‌های از جمله فضای سبز شهری و ساخت‌وسازهای انسانی مقایسه کرد و نقش این زیرساخت سبز شهری را در افزایش تاب‌آوری اکولوژیکی شهری نمایان ساخت. این تحقیق، محدوده شهر تبریز را که یکی از کلان‌شهرهای صنعتی و پرجمعیت ایران می‌باشد را به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب می‌کند. شهر تبریز در دهه‌های اخیر به دلیل توسعه شهرنشینی متأثر از گسترش صنعت، رشد جمعیت و مهاجرت با چالش‌های زیست‌محیطی گسترده‌ای مواجه بوده است (پناهی، ۱۳۹۵). کشاورزی شهری، که در گذشته بخش مهمی از زیرساخت‌های سبز این کلان‌شهر بوده است، به دلیل تغییر کاربری و گسترش شهرنشینی در دهه‌های اخیر تخریب شده است. این شرایط نشان‌دهنده نیاز مبرم به ارزیابی و مدل‌سازی تغییرات خدمات اکوسیستم ارائه‌شده توسط زیرساخت‌های سبز شهری مانند کشاورزی شهری است. استفاده از فناوری‌های نوین در این راستا می‌تواند به دستیابی به اهداف توسعه پایدار و افزایش تاب‌آوری شهری کمک کند.

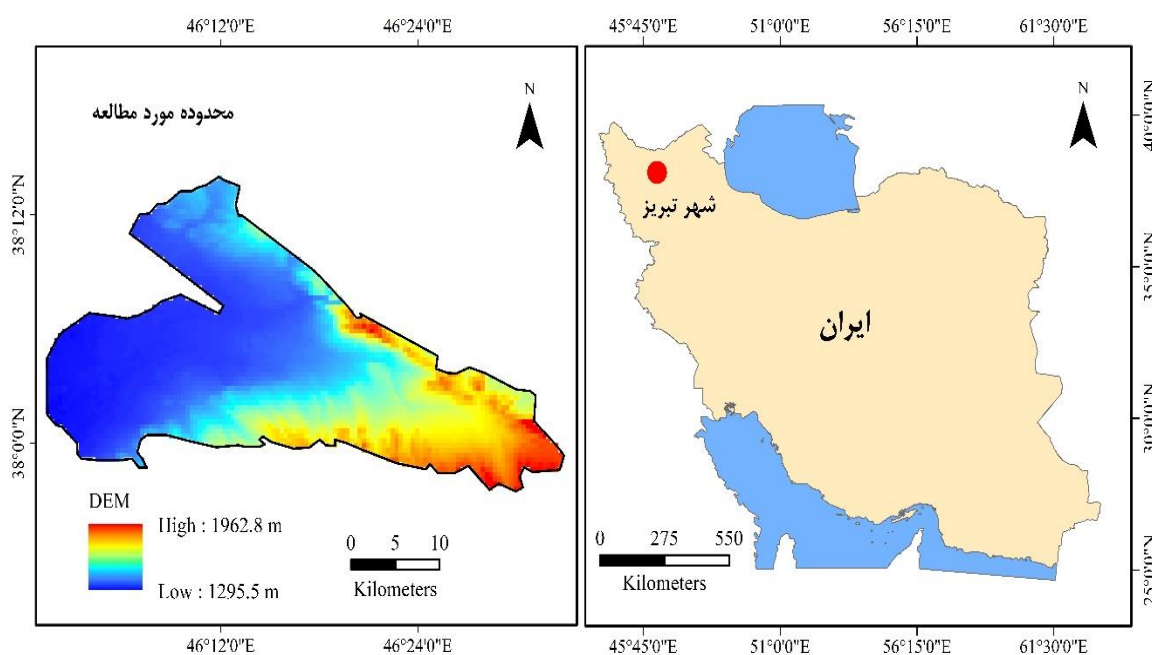
استفاده از فناوری‌های نوین مانند تلفیق داده‌های دورسنجی و مدل InVEST امروزه، به دلیل عدم نیاز به داده‌های زیاد بسیار پرکاربرد شده است. Hamel و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از مدل مذکور خدمات اکوسیستم زیرساخت‌های طبیعی از طریق سه مطالعه موردی در چین، فرانسه و ایالات متحده را مدل‌سازی کرده و اطلاعات صریح فضایی در مورد مزایای طبیعت، مدیریت شهری و اولویت‌بندی تغییر کاربری اراضی به دست آوردند. همچنین Fang و همکاران (۲۰۲۲) اثرات تغییر کاربری و پوشش اراضی بر خدمات اکوسیستم را در مناطق شکننده اکولوژیکی در شمال غربی چین با استفاده از مدل InVEST موردبررسی قرار داده و تأثیر متفاوت نوع کاربری بر خدمات اکوسیستم در مناطق پرجمعیت شهری را گزارش کرده‌اند. Khosravi و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیق خود نقش مثبت کشاورزی شهری بر توسعه پایدار شهری و همچنین کیفیت محیط‌زیست محیطی در کلان‌شهر تهران را گزارش کردند. Veisi Nabikandi و همکاران (۲۰۲۴b) با استفاده از مدل InVEST اثرات تغییرات کاربری اراضی متأثر از گسترش شهرنشینی بر خدمات اکوسیستم را در شهر کرج ارزیابی و مدل‌سازی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که تغییر کاربری و پوشش اراضی باعث انتشار ۰/۱۹ میلیون تن کربن در بازه زمانی ۲۰۲۳-۲۰۱۳ شده است. Abolmaali و همکاران (۲۰۲۴) در تحقیق خود سه مدل ذخیره‌سازی کربن، حفظ خاک

1. Remote Sensing
2. Geographic Information System
3. Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs
4. Google Earth Engine

و کیفیت زیستگاه را برای مرکز ایران با استفاده از مدل مذکور ارزیابی کرده و نقاط حساس از نظر ارائه خدمات اکوسیستم را شناسایی کردند. با این وجود، اطلاعات موجود در مورد تأثیر نوع کاربری اراضی بر ذخیره و ترسیب کربن در محیط‌زیست شهری تبریز ناکافی بوده و نیاز به بررسی و ارزیابی جامع‌تر دارد. از این رو وجه تمایز و نوآوری تحقیق حاضر ارزیابی و مدل‌سازی یکی از خدمات کلیدی اکوسیستم یعنی ذخیره و ترسیب کربن با تلفیق داده‌های دورسنجی و فناوری‌های نوین در کلان‌شهر تبریز می‌باشد. نتایج این تحقیق می‌تواند نقش زیرساخت‌های سبز شهری و فضاهای اکولوژیک با تأکید بر کشاورزی شهری را در افزایش تاب‌آوری شهری و بهبود کیفیت زندگی شهروندان از طریق ارائه خدمات اکوسیستم نمایان سازد.

محدوده مورد مطالعه

این تحقیق در محدوده شهر تبریز با وسعت تقریبی ۶۶۰/۶۳ کیلومتر مربع در مرکز استان آذربایجان شرقی انجام گرفته است. از نظر مختصات جغرافیایی، محدوده مورد مطالعه در طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱ دقیقه و ۲۰ ثانیه تا ۴۶ درجه و ۳۲ دقیقه و ۵۴ ثانیه شرقی و ۳۷ درجه و ۵۷ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۳۸ درجه و ۱۴ دقیقه و ۱۰ ثانیه شمالی واقع شده است (شکل ۱).

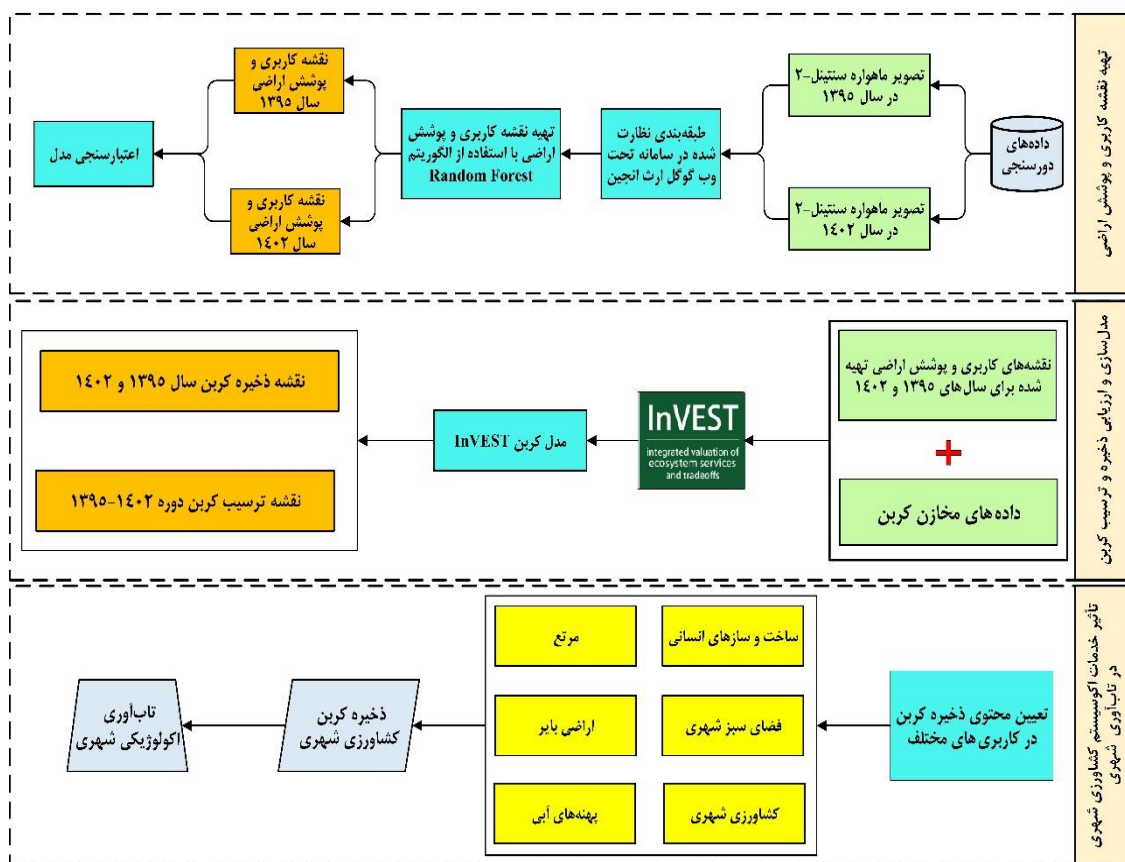


شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

روش پژوهش

مدل‌سازی محیطی بر کسب داده‌های در دسترس متکی است و تصاویر دورسنجی منبع اصلی برای مدل‌سازی اکولوژیکی در مناطق کم داده است. در این تحقیق، تصاویر ماهواره سنتینل-۲ برای سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۴۰۲ برای تولید نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی مورد استفاده قرار گرفتند. استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ به دلیل رایگان بودن و دسترسی به داده‌های با وضوح فضایی ۱۰ متری می‌باشد. همچنین انتخاب دو سال مذکور با توجه به رویکرد انتخابی در این تحقیق مبنی بر ارزیابی تأثیر نوع کاربری و پوشش اراضی مختلف بر خدمات اکوسیستم می‌باشد. با توجه به چالش پوشش ابری

در تصاویر ماهواره‌ای که ممکن است اطلاعات را مبهم کند، در این تحقیق از یک روش یکپارچه‌سازی تصویر سه‌ماهه تابستان در GEE برای کاهش این مشکل به کار گرفته شد که منجر به دریافت تصویر با پوشش ابری کمتر از ۵ درصد برای محدوده مورد مطالعه شد. شکل ۲ نمودار جریان‌ی پژوهش را نشان می‌دهد که مبتنی بر یک رویکرد چند رشته‌ای انجام گرفته است. در گام اول این تحقیق با استفاده از داده‌های دورسنجی نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی محدوده شهر تبریز برای سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۴۰۲ با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ در سامانه تحت وب گوگل ارث انجین تهیه شد. در گام دوم با به‌کارگیری مدل InVEST نقشه کل ذخیره کربن با استفاده از داده‌های مخازن مدل از تحقیقات مشابه و نقشه کاربری و پوشش اراضی تهیه‌شده مدل‌سازی شد. در گام نهایی ذخیره و ترسیب کربن کاربری‌های مختلف با تأکید بر کشاورزی شهری در دوره ۱۴۰۲-۱۳۹۵ تحلیل و ارزیابی شدند.



شکل ۲. نمودار جریان‌ی پژوهش

تهیه نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی

در این تحقیق تهیه نقشه کاربری و پوشش اراضی در شش کلاس ساخت‌وسازهای انسانی، فضای سبز شهری، کشاورزی شهری، مرتع، اراضی بایر و پهنه‌های آبی در سامانه تحت وب Google Earth Engine تهیه گردید. با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده نزدیک به ۱۲۰۰ نمونه بر روی تصاویر ماهواره سنتینل-۲ برای سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۴۰۲ برداشت شد. در این مرحله از الگوریتم جنگل تصادفی^۱ استفاده شد که به‌طور گسترده در مطالعات مشابه علوم زمین جهت طبقه‌بندی

1. Random Forest

تصاویر ماهواره‌ای پیشنهاد شده است (Zhao et al., 2024). ضریب کاپا^۱ پس از طبقه‌بندی فرآیند ارزیابی دقت جهت اعتبارسنجی یافته‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این فرآیند مستلزم تضاد داده‌های طبقه‌بندی شده با کلاس‌های واقعی است که در داده‌های حقیقی زمینی نشان داده شده است. این مقایسه یک ارزیابی دقیق از عملکرد طبقه‌بندی را با برجسته کردن مناطق درست و اشتباه بین دو مجموعه داده ارائه می‌کند. تعدادی از مراحل که در فرآیند ارزیابی دقت دخیل هستند شامل جمع‌آوری داده‌های حقیقت پایه، محاسبه دقت کلی، محاسبه دقت هر کاربری و محاسبه ضریب کاپا می‌باشند. هر یک از این مراحل برای ارزیابی دقت نتایج طبقه‌بندی کاربری‌های اراضی ضروری است و اطلاعات روشنی در مورد عملکرد الگوریتم طبقه‌بندی ارائه می‌دهد. در این تحقیق داده‌های واقعی تصاویر ماهواره‌ای در گوگل ارث برای ارزیابی دقت نتایج طبقه‌بندی و ضریب کاپا مورد استفاده قرار گرفت. Yilmaz & Demirhan (۲۰۲۳) گزارش کردند که کاپا شاخص خوبی برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای است. برای ارزیابی صحت در سال ۱۳۹۵ و ۱۴۰۲ به ترتیب ۴۳۷ و ۴۲۰ نمونه با توجه به مساحت هر کاربری به صورت تصادفی انتخاب شدند. از آنجایی که وسعت مساحت مربوط به کلاس‌ها با یکدیگر متفاوت است، تعداد نقاط انتخاب شده با توجه به مساحت هر کاربری متفاوت می‌باشد. به طور کلی، ماتریس درهم‌ریختگی^۲ شامل دقت کلی^۳ و ضریب کاپا به عنوان دو شاخص ارزیابی کلیدی شناخته می‌شوند. دقت کلی نسبت مجموع پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده به مجموع کل پیکسل‌ها در ماتریس درهم‌ریختگی است. ضریب کاپا نیز درصد پیکسل‌هایی است که به درستی طبقه‌بندی شده‌اند که از درصد واقعی مورد انتظار به طور تصادفی استخراج می‌شوند. روابط یک الی^۳ نحوه محاسبه هر سه معیار مذکور را نشان می‌دهد:

$$\text{Overall Accuracy} = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^r n_{ii} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$\text{Kappa Coefficient} = \frac{n \sum_{i=1}^r n_{ii} - \sum_{i=1}^r n_{i+} n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^r n_{i+} n_{+i}} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$\text{User Accuracy} = \frac{n_{ii}}{n_{i+}} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در روابط مذکور، N تعداد کل پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی شده در نقشه واقعی، r تعداد کلاس‌های کاربری اراضی و n_{ii} اعضای قطری ماتریس درهم‌ریختگی، n تعداد کل پیکسل‌های صحیح، n_{i+} مجموع عناصر سطر i ام و n_{+i} مجموع عناصر ستون i ام می‌باشد.

مدل ذخیره و ترسیب کربن (InVEST Carbon Storage and Sequestration)

مدل کربن InVEST بر اساس چهار مخزن زیست توده زنده بالای زمین^۴ (AGC)، زیست توده زنده زیر زمین^۵ (BGC)، کربن آلی خاک^۶ (SOC) و مواد آلی مرده^۷ (DOC) محتوای کربن ذخیره شده و ترسیم شده را مدل سازی می‌کند (Veisi Nabikandi & Shahbazi, 2024). AGC شامل تمام اجزای گیاه روی زمین است، در حالی که BGC شامل سیستم‌های ریشه زنده است که به گیاهان بالای زمینی متصل هستند. بزرگ‌ترین مخزن کربن روی زمین، SOC است که از مواد آلی موجود در خاک تشکیل شده است. DOC شامل بقایای موجودات زنده مانند گیاهان و حیوانات و همچنین مواد زائد آن‌ها در زمین است (Rachid et al., 2024). مدل کربن InVEST از نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی و میانگین محتوای

2. Kappa Coefficient

3. Confusion Matrix

4. Overall Accuracy

1. Above-Ground Carbon

2. Below-Ground Carbon

3. Soil Organic Carbon

4. Dead Organic Carbon

کربن چهار مخزن مذکور برای هر نوع کاربری جهت تخمین ذخیره‌سازی کربن استفاده می‌کند (Veisi Nabikandi et al., 2024a). روابط این مدل به شرح زیر است:

$$C = AGC + BGC + SOC + DOC \quad \text{رابطه ۴}$$

$$C_{total} = \sum_{k=1}^n A_k \times C_k, (k = 1, 2, \dots, n) \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن، C_k مقدار کل ذخیره کربن در واحد سطح هر نوع کاربری زمین، A_k مساحت هر نوع کاربری و C_{total} محتوای کل ذخیره کربن در هر کلاس از کاربری و پوشش اراضی است.

داده‌های ورودی کربن برای هر مخزن را می‌توان از مطالعات میدانی، استخراج‌شده از متاآنالیز بر روی انواع زیستگاه‌ها یا مناطق خاص و یا در منابع علمی منتشرشده یافت. برای پژوهش حاضر، داده‌های مخازن کربن از تحقیقات مشابه قبلی (Verma et al., 2024; Adelisardou et al., 2022; Rajbanshi & Das, 2021; Davies et al., 2011) با تمرکز بر پژوهش‌های صورت گرفته در ایران و جهان به دلیل اقلیم و عرض جغرافیایی مشابه و همچنین از راهنمای کاربر مدل کربن InVEST تهیه شد (جدول ۱). رویکرد فوق به این دلیل بود که هیچ ادبیات و اطلاعات داده‌ای در مورد محتوای مخازن کربن در کاربری‌های مختلف در محدوده مورد مطالعه این تحقیق وجود نداشت. Rachid و همکاران (۲۰۲۴) از روشی مشابه این تحقیق برای تعیین محتوای جدول ضرایب جذب کربن در مراکش استفاده کردند.

جدول ۱. چگالی کربن هر نوع پوشش کاربری مورد استفاده در مدل InVEST (بر حسب تن در هکتار)

نوع کاربری و پوشش اراضی	کربن بالای زمین (AGC)	کربن زیر زمین (BGC)	کربن آلی خاک (SOC)	کربن مرده (DOC)
ساخت‌وسازهای انسانی	۲	۱	۶/۲	۰/۰
فضای سبز شهری	۶۵	۴۰	۲۵	۶
کشاورزی شهری	۲۳	۳۵	۳۰	۴
مرتع	۱۵	۳۰	۲۰	۴
اراضی بایر	۰/۱	۱/۹	۰/۸	۰/۰
پهنه‌های آبی	۲	۱	۱۰	۰/۰

یافته‌ها

اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی نقشه‌های تهیه‌شده در سامانه تحت وب گوگل ارث انجین با استفاده از ضریب کاپا برای دو سال ۱۳۹۵ و ۱۴۰۲ به ترتیب ۴۳۹ و ۴۳۷ نمونه برداشته شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، در سال ۱۳۹۵ ضریب کاپا ۰/۸۷ و دقت کلی ۹۲/۲ درصد و در سال ۱۴۰۲ این مقادیر به ترتیب ۰/۸۶ و ۸۸/۷ درصد است. تحقیقات نشان می‌دهد که ضریب کاپا بین ۰/۰۰ و ۰/۲۰ نشان‌دهنده همبستگی ضعیف و بین ۰/۲۱ و ۰/۴۰ نشان‌دهنده همبستگی کم یا جزئی است. درحالی‌که ضریب کاپا بین ۰/۴۱ تا ۰/۶۰ نشان‌دهنده همبستگی متوسط و ۰/۶۱ تا ۸۰ نشان‌دهنده همبستگی و صحت قوی و اساسی است. همچنین ضریب کاپای بین ۰/۸۱ تا ۱ یک همبستگی تقریباً کامل را گزارش می‌کند. با توجه به نتایج صحت طبقه‌بندی، ضرایب کاپا به‌دست‌آمده نشان‌دهنده دقت طبقه‌بندی بالای است (Kafy et al., 2023). نتایج کامل‌تر با جزئیات در جدول ۲ نشان داده شده است.

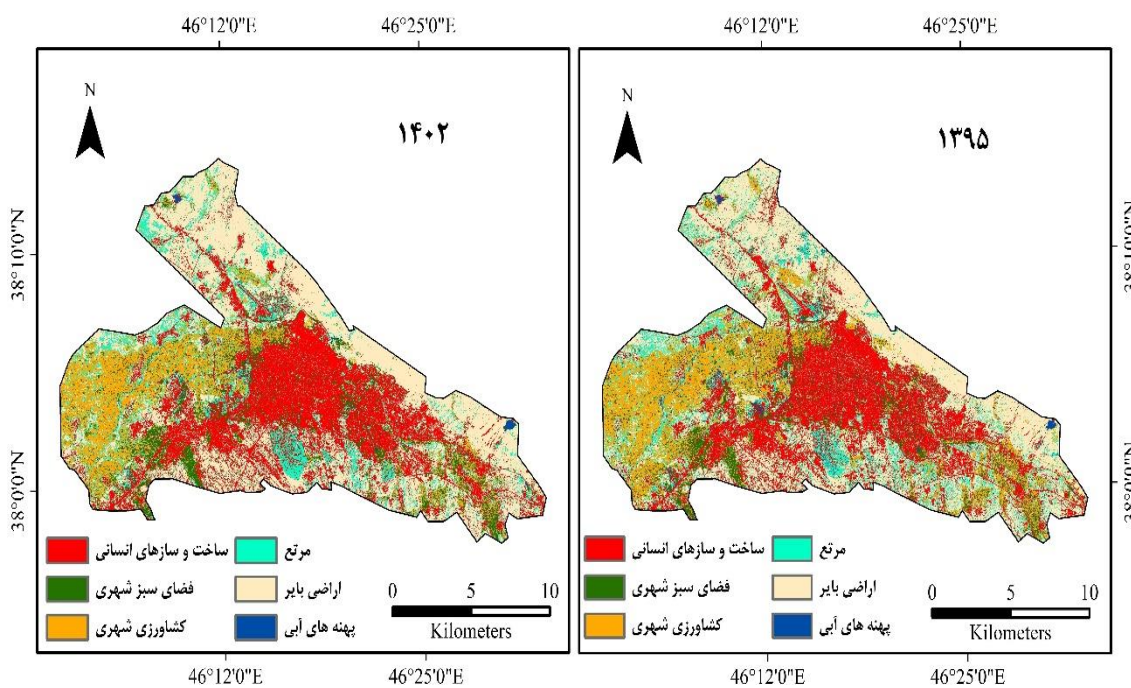
جدول ۲. دقت نقشه‌های طبقه‌بندی شده در سال ۱۳۹۵ و ۱۴۰۲

سال	کاربری و پوشش اراضی	نقاط اعتبارسنجی برای کلاس‌های مختلف					مجموع	صحت کاربری‌ها
		ساخت‌وسازهای انسانی	فضای سبز شهری	کشاورزی شهری	مرتع	اراضی بایر		
۱۳۹۵	ساخت‌وسازهای انسانی	۱۱۵	۱	۱	۱	۶	۱۲۵	۰/۹۲
	فضای سبز شهری	۵	۴۳	۳	۰	۰	۵۲	۰/۸۲
	کشاورزی شهری	۱	۵	۶۳	۱	۰	۷۰	۰/۹۰
	مرتع	۱	۰	۲	۶۰	۱	۶۴	۰/۹۳
	اراضی بایر	۱	۰	۱	۹	۸۱	۹۲	۰/۸۸
	پهنه‌های آبی	۰	۰	۲	۰	۰	۳۶	۰/۹۴
	مجموع	۱۲۳	۴۹	۷۲	۷۱	۸۸	۳۶	صحت کلی ۰/۸۷ %۹۰/۲۰
۱۴۰۲	ساخت‌وسازهای انسانی	۱۲۰	۱	۰	۲	۷	۱۳۰	۰/۹۲
	فضای سبز شهری	۴	۴۸	۳	۰	۰	۵۵	۰/۸۷
	کشاورزی شهری	۰	۶	۵۵	۰	۲	۶۳	۰/۸۷
	مرتع	۰	۰	۶	۵۸	۴	۶۸	۰/۸۵
	اراضی بایر	۵	۱	۰	۸	۷۸	۹۲	۰/۸۴
	پهنه‌های آبی	۰	۰	۰	۰	۰	۲۹	۱
	مجموع	۱۲۹	۵۶	۶۴	۶۸	۹۱	۲۹	صحت کلی ۰/۸۶ %۸۸/۷۸

تغییرات زمانی-مکانی نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی

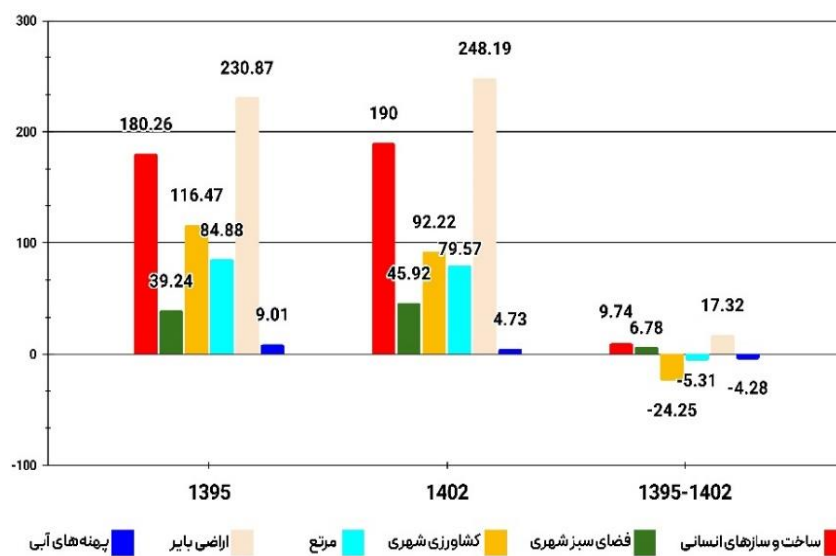
شکل ۳ نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی تهیه‌شده از سامانه گوگل ارث انجین را برای سال ۱۳۹۵ و ۱۴۰۲ در محدوده

مورد مطالعه نشان می‌دهد.



شکل ۳. نقشه کاربری و پوشش اراضی مورد مطالعه در سال ۱۳۹۵ و ۱۴۰۲

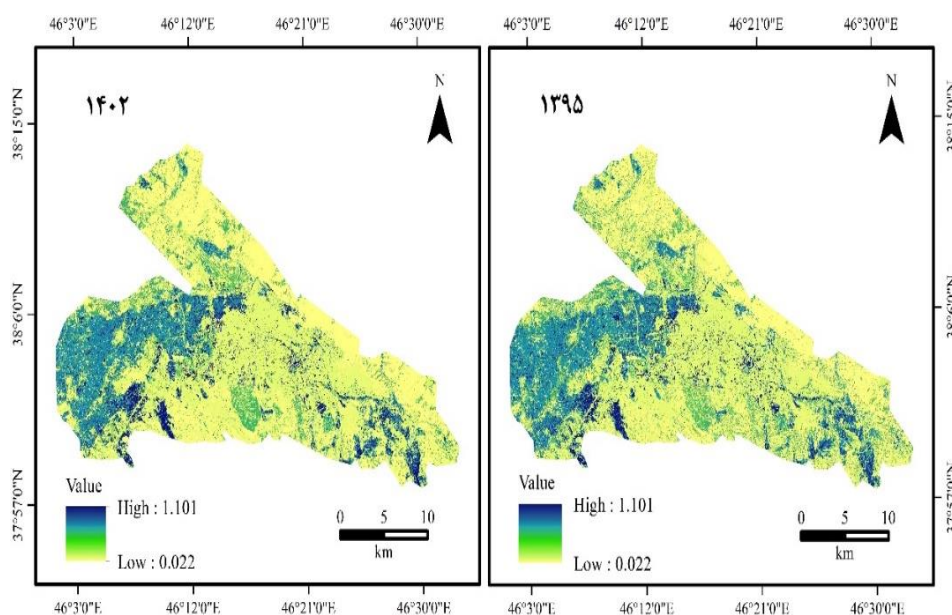
تفسیر و تحلیل نتایج حاصل از طبقه‌بندی بر اساس مساحت و درصد هر یک از کاربری‌ها در شکل ۴ قابل مشاهده است. نتایج نشان می‌دهد که در سال ۱۳۹۵ اراضی بایر (۳۴/۹٪) و ساخت‌وسازهای انسانی (۲۷/۳٪) کاربری غالب بین کلاس‌های موجود در محدوده مورد مطالعه می‌باشند. بعد از دو کاربری مذکور کشاورزی شهری با وسعت ۱۱۶/۴۷ کیلومترمربع نزدیک به ۱۷/۶ درصد از مساحت شهر تبریز را در سال ۱۳۹۵ به خود اختصاص داده است. درحالی‌که اراضی و فضاهای طبیعی یعنی مرتع (۱۲/۹٪)، فضای سبز شهری (۵/۹٪) و پهناهای آبی (۱/۴٪) روی هم نزدیک به ۲۰ درصد از مساحت شهر تبریز را شامل می‌شوند. تفسیر نتایج برای هر نقشه کاربری و پوشش اراضی در سال ۱۴۰۲ نشان می‌دهد که بیشترین تغییر مربوط به کاهش ۳/۷ درصدی کشاورزی شهری و افزایش ۲/۶ درصدی اراضی بایر نسبت به سال ۱۳۹۵ می‌باشد (شکل ۴). همچنین در سال ۱۴۰۲ ساخت‌وسازهای انسانی و فضای سبز شهری به ترتیب ۹/۷۴ کیلومترمربع و ۶/۷۸ کیلومترمربع افزایش را تجربه کردند. درحالی‌که در همین دوره وسعت مرتع و پهناهای آبی به ترتیب ۵/۳۱ کیلومترمربع و ۴/۲۸ کیلومترمربع کاهش گردید.



شکل ۴. اطلاعات آماری کاربری‌های مختلف محدوده مورد مطالعه در سال ۱۳۹۵ و ۱۴۰۲

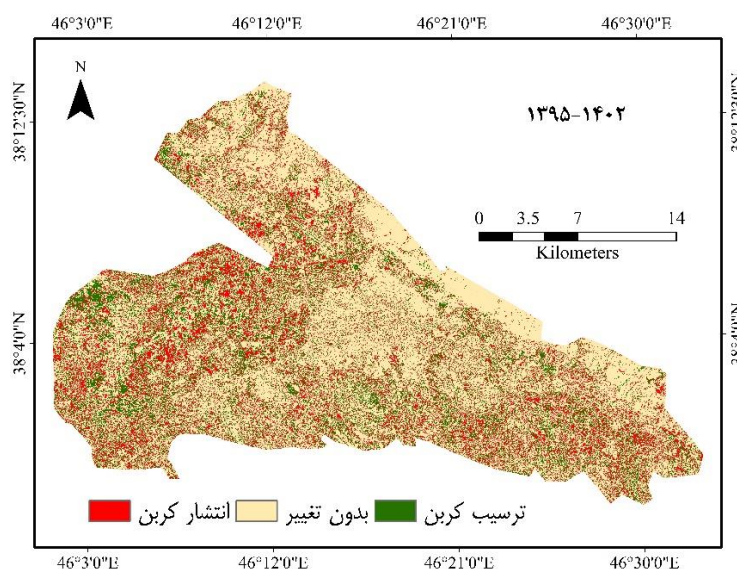
مدل ذخیره و ترسیب کربن

گام بعدی این تحقیق، مدل‌سازی و تعیین محتوای ذخیره کل کربن با استفاده از مدل کربن InVEST در سراسر منطقه مورد مطالعه برای سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۴۰۲ بود که پراکنش مکانی آن‌ها در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵. پراکنش مکانی محتوای ذخیره کربن برای سال ۱۳۹۵ و ۱۴۰۲ در محدوده مورد مطالعه

بر این اساس، همان طوری که انتظار می‌رفت قسمت‌های مرکزی منطقه مورد مطالعه که عمدتاً مشتمل بر مناطق شهری بوده و تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار دارد به همراه مناطق شمالی که بیشتر شامل اراضی بایر است دارای کمترین مقدار ذخیره کربن می‌باشد. به طور کلی کاربرد مدل مذکور، مقدار محتوای کل کربن ذخیره شده سراسر منطقه مورد مطالعه را در سال ۱۳۹۵ و ۱۴۰۲ به ترتیب ۲۴۳۱۱۵۶ و ۲۲۷۱۹۷۰ تن پیش‌بینی می‌کند که نشان‌دهنده کاهش ذخیره کربن در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. شکل ۶ نمایش بهتری از پراکنش مکانی کربن ترسیب شده و انتشار یافته را در طی دوره ۱۳۹۵-۱۴۰۲ نشان می‌دهد. نقشه‌ها برای سهولت در تفسیر به سه دسته ترسیب کربن، انتشار کربن و بدون تغییر طبقه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که در بازه زمانی مذکور بیشترین انتشار کربن (مناطق قرمز رنگ) در بخش غربی و شرقی منطقه مورد مطالعه رخ می‌دهد، زیرا این منطقه به دلیل تخریب کشاورزی شهری متأثر از گسترش شهرنشینی با کاهش ذخیره کربن مواجه می‌باشد.



شکل ۶. پراکنش مکانی ترسیب و انتشار کربن در دوره ۱۳۹۵-۱۴۰۲

در نهایت، جهت ارزیابی بهتر تأثیر انواع کاربری اراضی و آشکارسازی نقش کشاورزی شهری در ذخیره و ترسیب کربن در این تحقیق محتوای کربن به تفکیک هر یک از کاربری‌های موجود در محدوده مورد مطالعه تعیین گردید که نتایج آن در جدول ۳ خلاصه شده است. بر این اساس، در سال ۱۳۹۵ بیشترین مقدار جذب کربن مربوط به کاربری کشاورزی شهری (۱۰۷۱۱۹۸ تن) و سپس مرتع (۵۸۵۴۷۷ تن) می‌باشد که به ترتیب ۴۴ و ۲۴ درصد از کل ذخیره کربن در منطقه را شامل می‌شود. این دو کاربری در سال ۱۴۰۲ به دلیل کاهش وسعت خود کربن کمتری در مقایسه با سال ۱۳۹۵ ذخیره می‌کنند و از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار انتشار کربن در محدوده مورد مطالعه در دوره ۱۴۰۲-۱۳۹۵ می‌باشند. کاربری فضای سبز شهری با وجود مساحت ناچیز (۵/۹٪) در این سال حدود ۵۳۲۲۵۸ تن کربن ذخیره کرده است که ۲۲ درصد از کل ذخیره کربن می‌باشد. این کاربری در سال ۱۴۰۲ به دلیل افزایش وسعت در مقایسه با سال ۱۳۹۵ حدود ۹۲۲۱۰ تن کربن بیشتری ذخیره می‌کند. علاوه بر این، اراضی بایر و ساخت‌وسازهای انسانی دارای کمترین ارزش در جذب کربن در محدوده مورد مطالعه می‌باشند. این دو کاربری با وجود افزایش مساحت نسبتاً زیاد تأثیر ناچیزی در افزایش ذخیره کربن از خود نشان می‌دهند. پهنه‌های آبی در هر دو سال کمترین ارزش ذخیره کربن را در کلان‌شهر تبریز داشتند که با توجه به وسعت این کاربری در این منطقه خشک قابل پیش‌بینی بود. جزئیات بیشتر در جدول ۳ قابل تفسیر است.

جدول ۳. محتوای کربن ذخیره‌شده در کاربری‌های مختلف بر حسب تن

کاربری و پوشش اراضی	کربن ذخیره‌شده در سال ۱۳۹۵	کربن ذخیره‌شده در سال ۱۴۰۲	تغییرات ۱۴۰۲-۱۳۹۵
ساخت‌وسازهای انسانی	۱۶۴۸۹۱/۸	۱۷۳۷۹۴/۴	+۸۹۰۲/۶
فضای سبز شهری	۵۳۲۲۵۸/۱	۶۲۴۴۶۸/۹	+۹۲۲۱۰/۸
کشاورزی شهری	۱۰۷۱۱۹۸/۶	۸۴۸۱۱۴/۶	-۲۲۳۰۸۴/۰
مرتع	۵۸۵۴۷۷/۰	۵۴۸۸۸۲/۸	-۳۶۵۹۴/۲
اراضی بایر	۶۵۶۴۰/۰	۷۰۵۶۴/۴	+۴۹۲۴/۴
پهنه‌های آبی	۱۱۶۹۰/۷	۶۱۴۵/۱	-۵۵۴۵/۶
مجموع	۲۴۳۱۱۵۶/۲	۲۲۷۱۹۷۰/۲	-۱۵۹۱۸۶

بحث

تفسیر نتایج نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی در محدوده مورد مطالعه نشان‌دهنده توسعه یافته بودن این منطقه است. ساخت‌وسازهای انسانی و اراضی بایر در هر دو سال بخش زیادی از محدوده را به خود اختصاص داده‌اند. Dadashpoor و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیق خود افزایش فعالیت‌های انسانی و رشد شهرنشینی در این منطقه را گزارش کرده و این منطقه را به‌عنوان یک منطقه توسعه یافته و پرجمعیت شهری گزارش کرده‌اند. با توجه به نتایج سامانه گوگل ارث انجین برای دوره ۱۴۰۲-۱۳۹۵ محدوده کلان‌شهر تبریز با کاهش فضاهای اکولوژیک و زیرساخت‌های سبز شهری و افزایش ساخت‌وسازهای انسانی مواجه شده است. در تفسیر موضوع مذکور Mahmoudzadeh و همکاران (۲۰۲۲) با مدل‌سازی رشد شهری و تحلیل تغییر کاربری و پوشش اراضی در کلان‌شهر تبریز نتایج مشابهی را یافتند و افزایش مناطق شهری و روستایی (ساخت‌وسازهای انسانی) و کاهش کشاورزی و باغات (فضاهای اکولوژیک) را گزارش کردند. نتایج این تحقیق شواهدی را ارائه می‌دهد که توسعه شهری احتمالاً به این منطقه نسبت داده می‌شود.

با توجه به مدل InVEST اجرا شده در ارزیابی تأثیر تغییرات کاربری و پوشش اراضی بر ذخیره کربن در سراسر منطقه مورد مطالعه، کاهش ذخیره کربن به میزان ۷ درصد مشاهده شد. این یافته مربوط به تخریب زمین و گسترش فعالیت‌های انسانی در سال ۱۴۰۲ می‌باشد. روند کاهشی مشابهی به دلیل شهرنشینی در شانگهای، چین طی دوره ۲۰۱۵-۱۹۹۰

مشاهده شد (Zhang et al., 2020). با توجه به کاهش مساحت کشاورزی شهری می‌توان علت اصلی کاهش ذخیره کربن در محدوده مورد مطالعه را به این کاربری نسبت داد. Veisi Nabikandi و همکاران (۲۰۲۴a) در تحقیق خود در ارتباط با تأثیر شهرنشینی و کاهش زیرساخت‌های سبز همچون کشاورزی در آذرشهر، نقش به سزای کاربری‌های اکولوژیک را در کاهش انتشار کربن را گزارش کردند. همچنین Kafy و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر شیوه‌های مدیریت زمین به‌عنوان مثال، جنگل کاری، توسعه کشاورزی حفاظتی را بر میزان ذخیره کربن گزارش کرد. به‌طور کلی، این مطالعه اهمیت نقش کشاورزی شهری در سیاست و مداخلات مدیریت زمین را در افزایش ذخیره و ترسیب کربن برجسته می‌کند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر دیدگاه متفاوت و روشی از طبقه‌بندی نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی از محدوده کلان‌شهر تبریز در استان آذربایجان شرقی ارائه کرد. پویایی مکانی-زمانی تغییرات کاربری و پوشش اراضی در منطقه مورد مطالعه نشان‌دهنده روند قابل توجهی از افزایش فعالیت‌های انسانی و گسترش شهرنشینی می‌باشد. علاوه بر این، این تحقیق دانش و دید مناسبی از تلفیق داده‌های دورسنجی و فناوری‌های نوین در راستای مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی شهری در جهت نیل به اهداف توسعه پایدار را به‌طور مؤثری اطلاع‌رسانی می‌کند. این تحقیق ارزیابی ذخیره و ترسیب کربن به‌عنوان یکی از خدمات کلیدی اکوسیستم با مدل InVEST در مناطق پر جمعیت شهری را با موفقیت اجرا کرده است. مطالعات قبلی اغلب فاقد تجزیه و تحلیل تأثیر کاربری‌های مختلف بر خدمات اکوسیستم بوده‌اند. این تحقیق با پوشش شکاف موجود در مطالعات اخیر، ذخیره کربن کاربری‌های مختلف با تمرکز بر کشاورزی شهری در مناطق پر جمعیت شهری ارزیابی کرده و در راستای افزایش تاب‌آوری شهری بررسی کرده است. نتایج کلیدی حاصل از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

❖ کارایی تصاویر ماهواره سنتینل-۲ و الگوریتم Random Forest در تهیه نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی با استفاده از سامانه تحت وب گوگل ارث انجین در دوره ۱۴۰۲-۱۳۹۵ نشان داده شد. همچنین تلفیق داده‌های دورسنجی با فن‌آوری‌های نوین نظیر مدل InVEST در مناطقی که با کمبود داده مواجه می‌باشند جهت ارزیابی خدمات اکوسیستم را برجسته کرد.

❖ نتایج نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی تهیه‌شده، توسعه‌یافته بودن محدوده مورد مطالعه را نشان داد. اراضی بایر و ساخت‌وسازهای انسانی در هر دو سال بیشترین مساحت از محدوده مورد مطالعه را پوشش می‌دهند. تغییر کاربری اراضی در محدوده شهر تبریز از سال ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۲ نشان‌دهنده افزایش ساخت‌وسازهای انسانی، اراضی بایر و فضاهای سبز شهری می‌باشد. در حالی که کشاورزی شهری، مراتع و پهنه‌های آبی با کاهش مساحت در همین دوره مواجه گردیدند.

❖ انتشار ۱۵۹۱۸۶ تن کربن در طول دوره ۷ ساله به دلیل تغییر کاربری و کاهش زیرساخت‌های سبز مانند کشاورزی شهری تأثیر نوع کاربری و پوشش اراضی بر ذخیره و ترسیب کربن را گزارش می‌کند.

❖ خدمات اکوسیستم ارائه‌شده توسط کشاورزی شهری با کاهش فشار بر زیرساخت‌های شهری و افزایش ظرفیت تطبیقی جامعه شهری در برابر تغییرات اقلیمی و حوادث طبیعی، به پایداری و افزایش تاب‌آوری شهری کمک می‌کنند. بنابراین، حمایت و توسعه کشاورزی شهری و حفاظت از زیرساخت‌های سبز باید به‌عنوان یک استراتژی کلیدی در برنامه‌ریزی شهری مورد توجه قرار گیرد.

در این پژوهش گسترش فعالیت‌های مخرب انسانی در مناطق پر جمعیت شهری به‌عنوان یک عامل مهم و مؤثر بر ذخیره و انتشار کربن در سراسر محدوده مورد مطالعه شناسایی شد. تحقیقات آینده باید به بررسی تأثیر تغییرات کاربری و پوشش

اراضی بر ارائه خدمات اکوسیستم با هدف ارتقای برنامه‌ریزی مؤثر کاربری زمین و مدیریت اکوسیستم برای رفاه اجتماعی در سطح محلی و ارزیابی سناریوهای پیشنهادی پردازد.

حامی مالی

بر اساس اظهار نویسندگان این پژوهش حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان

در این پژوهش، سهم نویسندگان به صورت زیر مشخص می‌شود: ویسی نبی‌کندی، مسئولیت مفهوم‌سازی، طراحی مطالعه، جمع‌آوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل، نگارش پیش‌نویس اولیه و ویرایش نهایی مقاله را بر عهده داشته است. حامی به‌عنوان ناظر بر روش‌شناسی، در اصلاح نسخه نهایی ایفای نقش کرده، ولیزاده کامران و امامی نمین نیز مشاوره‌های ارزشمندی در زمینه روش‌شناسی ارائه داده‌اند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در ارتباط با نویسندگی یا انتشار مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از تمامی کسانی که در انجام پژوهش حاضر یاری رسانده بوده‌اند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقاله را عهده‌دار بوده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- افسری، رسول؛ برهانی، کاظم و جعفری، شاهین. (۱۴۰۳). ارزیابی تغییرات پهنه‌های آبی حوضه دجله و فرات مبتنی بر تحلیل سری زمانی عوامل محیطی مختلف. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۶(۲)، ۱۷-۳۲.
- پناهی، علی. (۱۳۹۵). بررسی الگوهای همدیدی بر اساس دوره‌های بحرانی آلودگی هوا در وارونگی دمایی شدید شهر تبریز. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۸(۴)، ۶۰۷-۶۲۵. <http://doi.org/10.22059/jphgr.2016.60831>
- روکی، زهره؛ محمدی، حسین و زندی، رحمان. (۱۴۰۲). نقش تغییرات کاربری اراضی بر شکل‌گیری دمای سطح زمین در شهرها مطالعه موردی: شهر اصفهان. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۵(۳)، ۱-۱۷.
- ویسی نبی‌کندی، بهمن و شهبازی، فرزین. (۱۴۰۳). تعیین محتوی ذخیره کربن در مخزن‌های مختلف تحت کاربری‌های متفاوت در منطقه میاندوآب با استفاده از دورسنجی و مدل InVEST. *نشریه محیط‌زیست طبیعی*، ۷۷(۲)، ۲۴۱-۲۵۳. <http://doi.org/10.22059/jne.2024.377051.2677>
- ویسی نبی‌کندی، بهمن؛ راست‌خدیو، آرمان و شجاع، فائزه. (۱۴۰۳). مدل‌سازی تأثیر تغییر کاربری اراضی/پوشش زمین بر تاب‌آوری اکولوژیک شهری در برابر سیلاب (مطالعه شهر رشت). *محیط زیست طبیعی*، ۷۷(۳)، ۳۸۵-۴۰۰. <http://doi.org/10.22059/jne.2024.382160.2710>

References

- Abed, S. A., Halder, B., & Yaseen, Z. M. (2024). Investigation of the decadal unplanned urban expansion influenced surface urban heat island study in the Mosul metropolis. *Urban Climate*, 54, 101845. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101845>
- Abolmaali, S. M. R., Tarkesh, M., Mousavi, S. A., Karimzadeh, H., Pourmanafi, S., & Fakheran, S. (2024). Identifying priority areas for conservation: using ecosystem services hotspot mapping for land-use/land-cover planning in central of Iran. *Environmental Management*, 73(5), 1016-1031. <https://doi.org/10.1007/s00267-024-01944-y>
- Adelisdardou, F., Zhao, W., Chow, R., Mederly, P., Minkina, T., & Schou, J. S. (2022). Spatiotemporal change detection of carbon storage and sequestration in an arid ecosystem by integrating Google Earth Engine and InVEST (the Jiroft plain, Iran). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03676-6>

- Afsari, R., Borhani, K., & Jafari, S. (2024). Evaluation of the changes in water areas of the Tigris and Euphrates basin based on time series analysis of various environmental factors. *Physical Geography Research*, 56(2), 17-32. <http://doi.org/10.22059/jphgr.2024.370358.1007804> [In Persian].
- Dadashpoor, H., Azizi, P., & Moghadasi, M. (2019). Land use change, urbanization, and change in landscape pattern in a metropolitan area. *Science of the Total Environment*, 655, 707-719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.267>
- Davies, Z. G., Edmondson, J. L., Heinemeyer, A., Leake, J. R., & Gaston, K. J. (2011). Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale. *Journal of applied ecology*, 48(5), 1125-1134. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02021.x>
- Fang, Z., Ding, T., Chen, J., Xue, S., Zhou, Q., Wang, Y., ... & Yang, S. (2022). Impacts of land use/land cover changes on ecosystem services in ecologically fragile regions. *Science of the Total Environment*, 831, 154967. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154967>
- Hamel, P., Guerry, A. D., Polasky, S., Han, B., Douglass, J. A., Hamann, M., ... & Daily, G. C. (2021). Mapping the benefits of nature in cities with the InVEST software. *Npj Urban Sustainability*, 1(1), 25. <https://doi.org/10.1038/s42949-021-00027-9>
- Kafy, A. A., Saha, M., Fattah, M. A., Rahman, M. T., Duti, B. M., Rahaman, Z. A., ... & Sattar, G. S. (2023). Integrating forest cover change and carbon storage dynamics: Leveraging Google Earth Engine and InVEST model to inform conservation in hilly regions. *Ecological Indicators*, 152, 110374. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110374>
- Khosravi, S., Lashgarara, F., Poursaeed, A., & Omidi Najafabadi, M. (2022). Modeling the relationship between urban agriculture and sustainable development: a case study in Tehran city. *Arabian Journal of Geosciences*, 15, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09396-y>
- Lourdes, K. T., Hamel, P., Gibbins, C. N., Sanusi, R., Azhar, B., & Lechner, A. M. (2022). Planning for green infrastructure using multiple urban ecosystem service models and multicriteria analysis. *Landscape and Urban Planning*, 226, 104500. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104500>
- Mahmoudzadeh, H., Abedini, A., & Aram, F. (2022). Urban growth modeling and land-use/land-cover change analysis in a metropolitan area (case study: Tabriz). *Land*, 11(12), 2162. <https://doi.org/10.3390/land11122162>
- Panahi, A. (2016). A survey on the synoptic patterns based on critical periods of air pollution in severe inversions of Tabriz, Iran. *Physical Geography Research*, 48(4), 607-625. <http://doi.org/10.22059/jphgr.2016.60831> [In Persian].
- Rachid, L., Elmostafa, A., Mehdi, M., & Hassan, R. (2024). Assessing Carbon Storage and Sequestration Benefits of Urban Greening in Nador City, Morocco, Utilizing GIS and the InVEST Model. *Sustainable Futures*, 100171. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2024.100171>
- Rajbanshi, J., & Das, S. (2021). Changes in carbon stocks and its economic valuation under a changing land use pattern—A multitemporal study in Konar catchment, India. *Land Degradation & Development*, 32(13), 3573-3587. <https://doi.org/10.1002/ldr.3959>
- Rastkhadiv, A., & Veisi Nabikandi, B. (2024). Assessing cultural ecosystem services of urban agriculture: Analysis of small-scale using Smart-PLS software. *Advanced Engineering Days*, 9, 161-164.
- Rooki, Z., Mohammadi, H., & Zandi, R. (2023). The Role of Land Use Changes in Shaping Surface Temperature in Cities: A Case Study of Isfahan. *Physical Geography Research*, 55(3), 1-17. [In Persian]. <http://doi.org/10.22059/jphgr.2023.361681.1007779>
- Shi, C., Guo, N., Gao, X., & Wu, F. (2022). How carbon emission reduction is going to affect urban resilience. *Journal of Cleaner Production*, 372, 133737. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133737>
- Veisi Nabikandi, B., & Shahbazi, F. (2024). Determining carbon storage content at different pools under various land uses in Miandoab region using remotely-sensed data and InVEST model. *Journal of Natural Environment*, 77(2), 241-253. <http://doi.org/10.22059/jne.2024.377051.2677> [In Persian].
- Veisi Nabikandi, B., Rastkhadiv, A., & Shoja, F. (2024). Modeling of land use/land cover change impact on urban ecological flood resilience: a case study of Rasht city. *Journal of Natural Environment*, 77(3), 385-400. <http://doi.org/10.22059/jne.2024.382160.2710> [In Persian].

- Veisi Nabikandi, B., Shahbazi, F & Hami, A. (2024b). Spatiotemporal dynamic simulation of carbon storage and sequestration in response to land use/land cover changes. *Advanced Engineering Days*, 9, 153-156.
- Veisi Nabikandi, B., Shahbazi, F., Hami, A., & Malone, B. (2024a). Exploring carbon storage and sequestration as affected by land use/land cover changes toward achieving sustainable development goals. *Soil Advances*, 2, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.soilad.2024.100017>
- Verma, P., Siddiqui, A. R., Mourya, N. K., & Devi, A. R. (2024). Forest carbon sequestration mapping and economic quantification infusing MLPnn-Markov Chain and InVEST carbon model in askot wildlife sanctuary, Western Himalaya. *Ecological Informatics*, 79, 102428. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102428>
- Yilmaz, A. E., & Demirhan, H. (2023). Weighted kappa measures for ordinal multi-class classification performance. *Applied Soft Computing*, 134, 110020. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110020>
- Zhang, F., Xu, N., Wang, C., Wu, F., & Chu, X. (2020). Effects of land use and land cover change on carbon sequestration and adaptive management in Shanghai, China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 120, 102948. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102948>
- Zhang, S., Ma, X., Cui, Q., & Liu, J. (2024). Does the low carbon transition impact urban resilience? Evidence from China's pilot cities for carbon emission trading. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-31903-3>
- Zhao, Z., Islam, F., Waseem, L. A., Tariq, A., Nawaz, M., Islam, I. U., ... & Hatamleh, W. A. (2024). Comparison of three machine learning algorithms using google earth engine for land use land cover classification. *Rangeland Ecology & Management*, 92, 129-137. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2023.10.007>