



University of
Sistan and Baluchestan



Association of Geography
and Planning
of Border Areas of Iran

Ecological Security Analysis by Supply and Demand Approach of Carbon Storage Ecosystem Service (Case Study: Central Part of Isfahan City)

Golnaz Darvishi¹, Romina Sayahnia^{2✉}, Naghmeh Mobarghaee³

1. MSc of Environmental Planning, Department of Environmental Planning and Design, Environmental Sciences Research Institute(ESRI), Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

E-mail: g.darvishi@mail.sbu.ac.ir

2. Assistant Professor, Department of Environmental Planning and Design, Environmental Sciences Research Institute(ESRI), Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

✉E-mail: r_sayahnia@sbu.ac.ir

3. Associate Professor, Department of Environmental Planning and Design, Environmental Sciences Research Institute(ESRI), Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

E-mail: n_mobarghaee@sbu.ac.ir



How to Cite: Darvishi, G; Sayahnia, R & Mobarghaee, N. (2023). Ecological Security Analysis by Supply and Demand Approach of Carbon Storage Ecosystem Service (Case Study: Central Part of Isfahan City). *Geography and Territorial Spatial Arrangement*, 13 (48), 87-92.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22111/GAII.2023.45952.3126>

Article type:

Research Article

Received:

19/06/2023

Received in revised form:

03/08/2023

Accepted:

26/08/2023

Publisher online:

10/09/2023

ABSTRACT

Urban development, especially in large cities, has transformed both the structure and function of natural ecosystems as well as the quality of urban lands. The disruption of the supply and demand for ecosystem services, which results in ecological insecurity, is highly related to these alterations. Isfahan City, one of the largest population concentrations in Iran, has experienced rapid growth, which has caused the eradication of various natural regions in the surrounding areas. A variety of conservation, restoration, and management initiatives are implemented to enhance urban ecological security; however, in this study, the supply and demand ratio for carbon storage service in the central part of Isfahan has been proposed as an indicator of ecological security. The supply and demand ratio of the carbon storage was determined by examining the supply status of the carbon storage as well as the demand for this service, which was considered as the amount of carbon dioxide gas emission. Accordingly, most areas of the case study have experienced an imbalance in the supply and demand ratio of the carbon storage service, with an increase in demand for carbon storage service as a result of increased carbon dioxide emissions. It is suggested to construct green corridors in this city, and due to the reduced area of agricultural lands, South Ghohab has also experienced the processes of desertification, which necessitate the implementation of sustainable agricultural practices. According to the findings, the increase in carbon emissions has had a greater impact on ecological security than the loss of green space. The quality of the urban ecosystem can only be improved by applying the knowledge of ecology, along with approaches such as maintaining ecosystem services and their supply, demand, and flow are crucial components of supporting sustainable development.

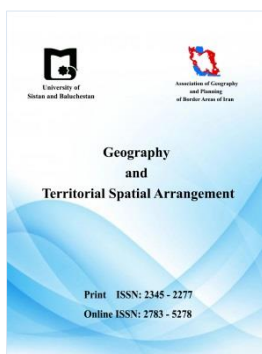
Keywords:

Ecological security,
Ecosystem service, Carbon
storage, Isfahan.



© the Author(s).

Publisher: University of Sistan and Baluchestan



Extended Abstract

Introduction

The rapid growth of urbanization, along with many changes in land cover and land use, has caused a decrease in ecological services and, as a result, has caused negative environmental consequences. This trend has brought about significant changes in landscape patterns and the structure and functioning of urban ecosystems, resulting in a shift from natural ecosystems to social-ecological systems. One of the main concerns of urban environmental planners is the operationalization of ecosystem-based knowledge, such as ecosystem services or increasing urban resilience. To achieve this goal, planners and professionals are always looking for a suitable way for urban planning with the aim of regulating the structure and sustainability of the urban's ecosystem because, in this way, an urban landscape can maintain the environmental balance against disturbances and damage and achieve the maintenance of existing feedback, processes, and structures. Ecological security is the structure of a landscape that provides sufficient ecosystem services to support the socio-economic system and maintain the balance between environment and development.

Study Area

The studied area is the central part of Isfahan City, which is located in the range of 51° 32' and 53° 12' east longitude and 31° 29' and 33° 01' north latitude. This region has an area of 155591 hectares and includes 8 town. The lowest point of this area is the Zayandeh Rood River with a height of 1550 meters above sea level, and the highest point of Isfahan City is Sofeh Mountain with an altitude of 2257 meters above sea level. The urban population rate in Isfahan province in 2010 was 85.4%, which reached 88% in 2015. Isfahan province has 6.5% of the country's total population, of which 43.8% live in Isfahan City with a population of 2,243,249 people, 2,112,767 of whom live in urban areas.

Material and Methods

In this research, with the aim of structural evaluation of the ecological security of the central part of Isfahan city, the supply and demand rate of carbon storage ecosystem service has been compared in 2000 and 2020. For preparing land use/ land cover maps, the images of Landsat 8 and 5 were used, and after calling the products by the relevant codes in the Google Earth Engine, instructional samples were selected for classifying the area in each year. To measure the carbon storage service supply rate, the carbon storage model of the InVEST software package was used based on land use/ land cover maps provided by users. Also, the demand was estimated by considering the emission of CO₂ per square meter produced in Isfahan in 2000 and 2020, and then a comparison was made between these two years in order to determine the difference in the demand for ecosystem services of carbon storage over 20 years. Finally, by determining the amount of supply and demand of ecosystem services and mapping them, the ecosystem services supply and demand ratio (ESDR) in the landscape was calculated and compared.

Result and Discussion

According to the output maps from the carbon storage model of InVEST in 2000 and 2020, the maximum carbon storage, which was 8.35 tons per hectare, occurred mostly in the gardens and parks, and then in agricultural lands, and also the lowest amount of carbon stored in built areas with a number of 0.9 tons per hectare. The maximum emission of carbon dioxide in the years 2000 and 2020 occurred within Isfahan City, and the minimum emission of this greenhouse gas was in bare lands and undeveloped areas, which showed the number zero. The range of changes in the supply and demand ratio of carbon storage in 2000 was from -1.97 to 0.02, and the lowest rate happened within Isfahan City. However, the highest rate, which is above zero, occurred in areas that had different types of vegetation. In 2020, the ESDR number varies from -1.98 to 0.01. According to ESDR maps and the ratio of supply to demand, the state of providing ecosystem services was facing a deficit, which could be caused by urban expansion in the region.

Conclusion

The results illustrated that the ecosystem services supply and demand ratio is a useful indicator to compare the status of ecosystem services in different regions. Therefore, the use of these indicators in the ecosystem service approach is a valuable and reliable point of view for the analysis of the dynamics of each land use and also reflects the characteristics of the state of different subsystems and the mechanism of ecological security. According to the findings, the increase in the area of regions with a negative ESDR rate in which the ratio of their demand was higher than the supply of carbon storage, has increased significantly over the past 20 years.

Key words: Ecological security, Ecosystem service, Carbon storage, Isfahan.

References

- Abdollahi, S., & Ildoromi, A. (2022). Ecosystem Services Valuation; Concepts and Methods. *Human & Environment*, 20(1), 1-18. (In Persian).
<https://www.sid.ir/paper/1043420/en>
- Abdollahi, S., Ildoromi, A., Salmanmahini, A., & Fakheran, S. (2020). Determination of homogenous areas for ecosystem services supply in the central part of Isfahan province. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 11(1), 29-47. doi: 10.30495/girs.2020.672371. (In Persian).
https://girs.bushehr.iau.ir/article_672371.html?lang=en
- Adelisardou, 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*, 19(7), 5929-5944.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-021-03676-6>
- Borhani, F., Shafiepour Motlagh, M., Ehsani, A. H., Rashidi, Y., Maddah, S., & Mousavi, S. M. (2023). On the predictability of short-lived particulate matter around a cement plant in Kerman, Iran: machine learning analysis. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(2), 1513-1526.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-022-04645-3>
- Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
<https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- Fan, F., Wen, X., Feng, Z., Gao, Y., & Li, W. (2022). Optimizing urban ecological space based on the scenario of ecological security patterns: The case of central Wuhan, China. *Applied Geography*, 138, 102619.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143622821002356>
- Farajollahi, A., Asgari, H. R., Ownagh, M., Mahboubi, M. R., & Salman Mahini, A. (2015). Monitoring and prediction of spatial and temporal changes of landuse/ cover (Case study: Marave Tappeh region, Golestan). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 6(4), 1-14. (In Persian).
https://girs.bushehr.iau.ir/article_518869.html?lang=en
- Ghayoumi, R., Charles, A., & Mousavi, S. M. (2023). A multi-level analysis of links between government institutions and community-based conservation: insights from Iran. *Ecology and Society*, 28(2).
<https://ecologyandsociety.org/vol28/iss2/art33/>
- Ghosh, S., Chatterjee, N. D., & Dinda, S. (2021). Urban ecological security assessment and forecasting using integrated DEMATEL-ANP and CA-Markov models: A case study on Kolkata Metropolitan Area, India. *Sustainable Cities and Society*, 68, 102773.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670721000652>
- Golkar, F., & Mousavi, S. M. (2022). Variation of XCO₂ anomaly patterns in the Middle East from OCO-2 satellite data. *International Journal of Digital Earth*, 15(1), 1219-1235.
<https://doi.org/10.1080/17538947.2022.2096936>
- Hassanpour, P., Sayyahnia, R., & Esmaeilzadeh, H. (2020). Ecological structure assessment of urban green space using the landscape approach (case study: Tehran's 22nd district). *Environmental Sciences*, 18(1), 187-202. (In Persian).
https://envs.sbu.ac.ir/article_98125.html?lang=en
- Keshtkar, M., & Sayahnia, R. (2021). Monitoring the Ecological Security of Esfahan with an Ecosystem Service Approach. *Geography and Environmental Sustainability*, 10(4), 91-107.
doi: 10.22126/ges.2021.5975.2329. (In Persian).

https://ges.razi.ac.ir/article_1740.html?lang=en

Li, J., Jiang, H., Bai, Y., Alatalo, J. M., Li, X., Jiang, H., ... & Xu, J. (2016). Indicators for spatial-temporal comparisons of ecosystem service status between regions: A case study of the Taihu River Basin, China. *Ecological Indicators*, 60, 1008-1016.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X15004860>

Mohaghegh, M. S., Dinan, N. M., Vafaeinejad, A., Sobhanardakani, S., & Monavari, S. M. (2022). Carbon sequestration potential as affected by air quality parameters and landscape metrics under urbanization. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(14), 1-14.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-022-10535-2>

Mousavi, S. M., Dinan, N. M., Ansarifard, S., & Sonnentag, O. (2022). Analyzing spatio-temporal patterns in atmospheric carbon dioxide concentration across Iran from 2003 to 2020. *Atmospheric Environment: X*, 14, 100163.

<https://doi.org/10.1016/j.aeaao.2022.100163>

Mousavi, S. M., Dinan, N. M., Ansarifard, S., Borhani, F., Ezimand, K., & Naghibi, A. (2023). Examining the Role of the Main Terrestrial Factors Won the Seasonal Distribution of Atmospheric Carbon Dioxide Concentration over Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 51(4), 865-875.

<https://doi.org/10.1007/s12524-022-01650-4>

Mousavi, S. M., Falahatkar, S., & Farajzadeh, M. (2017). Monitoring of monthly and seasonal methane amplitude in Iran using GOSAT data. *Physical Geography Research Quarterly*, 49(2), 327-340.

https://jphgr.ut.ac.ir/article_62848_0168c358354548e26a4560412665569c.pdf

Mousavi, S. M., Falahatkar, S., & Farajzadeh, M. (2018). Concentration in changes of CO₂ and CH₄ greenhouse gases relation to environmental variable in Iran. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 6(4), 65-79.

https://ijae.iut.ac.ir/browse.php?a_id=781&slc_lang=en&sid=1&printcase=1&hbnr=1&hmb=1

Mousavi, S. M., Falahatkar, S., & Farajzadeh, M. (2020). The Role of Wind Flow on Sources of Carbon Dioxide Concentration in the Provincial Scale. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(6), 147-160. (In Persian).

https://jest.srbiau.ac.ir/article_14447.html?lang=en

Mousavi, S. M., Falahatkar, S., & Farajzadeh, M. (2020). The role of wind flow on sources of carbon dioxide concentration in the provincial scale. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(6), 147-160.

https://jest.srbiau.ac.ir/article_14447.html?lang=en

Naroei, B., Barghjelveh, S., Esmaeilzadeh, H., & Zebardast, L. (2022). An Analysis of the Trend of Changes in the Regulatory Services Related to Carbon Sequestration in Tehran City affected by the Spatial Processes of Landscape Mosaic. *Town and Country Planning*, 14(1), 253-283. (In Persian).

https://jtcp.ut.ac.ir/article_86766_a4e6fc07b26df852352d65eda376568f.pdf?lang=en

Pan, Z., He, J., Liu, D., Wang, J., & Guo, X. (2021). Ecosystem health assessment based on ecological integrity and ecosystem services demand in the Middle Reaches of the Yangtze River Economic Belt, China. *Science of The Total Environment*, 774, 144837.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720383704>

Peng, J., Tian, L., Liu, Y., Zhao, M., & Wu, J. (2017). Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification. *Science of the Total Environment*, 607, 706-714.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896971731639X>

Qiu, M., Yang, Z., Zuo, Q., Wu, Q., Jiang, L., Zhang, Z., & Zhang, J. (2021). Evaluation on the relevance of regional urbanization and ecological security in the nine provinces along the Yellow River, China. *Ecological Indicators*, 132, 108346.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X21010116>

Ramyar, R., Saeedi, S., Bryant, M., Davatgar, A., & Hedjri, G. M. (2020). Ecosystem services mapping for green infrastructure planning—The case of Tehran. *Science of the Total Environment*, 703, 135466.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719354592>

Rezaei Sangdehi, S. M., Fallah, A., Latifi, H., & Nazariani, N. (2023). Modeling of Aboveground Carbon stock using Sentinel -1, 2 satellite Imagery and Parametric and Nonparametric Relationships (Case Study: District 3 of Sangdeh Forests). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 14(3), 21-24. doi: 10.30495/girs.2023.690665. (In Persian).

https://girs.bushehr.iau.ir/article_690665.html?lang=en

Sajjadi Ghaemmaghami, S. A., Sayahnia, R., Mobarghei Dinan, N., & Makhdom Farkhondeh, M. (2021). Evaluating the implications of urban growth on carbon fixation ecosystem services (Case study: Karaj Subcatchments). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 12(1), 20-37. doi: 10.30495/girs.2021.677995. (In Persian).

https://girs.bushehr.iau.ir/article_677995.html?lang=en

Sayahnia, R., Makhdom, M., & Faryadi, S. (2017). (Ecological indices in evaluation of urban development capability (case study: Tehran metropolitan area. *Environmental Sciences*, 15(1), 77-88. (In Persian).

https://envs.sbu.ac.ir/index.php/Careercounseling/search/article_97820.html?lang=en

Sebastiani, A., Marando, F., & Manes, F. (2021). Mismatch of regulating ecosystem services for sustainable urban planning: PM10 removal and urban heat island effect mitigation in the municipality of Rome (Italy). *Urban Forestry & Urban Greening*, 57, 126938.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S161886672030755X>

Sharp, R., Chaplin-Kramer, R., Wood, S., Guerry, A., Tallis, H., & Ricketts, T. H. (2014). InVEST user's guide: integrated valuation of environmental services and tradeoffs. The Natural Capital Project. In Stanford Woods Institute for the Environment. University of Minnesota's Institute on the Environment, the Nature Conservancy & WW Foundation Stanford.

<https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>

van Oorschot, J., Sprecher, B., van't Zelfde, M., van Bodegom, P. M., & van Oudenhoven, A. P. (2021). Assessing urban ecosystem services in support of spatial planning in the Hague, the Netherlands. *Landscape and Urban Planning*, 214, 104195.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204621001584>

Vignoli, F., de Luca, C., & Tondelli, S. (2021). A spatial ecosystem services assessment to support decision and policy making: The case of the city of Bologna. *Sustainability*, 13(5), 2787.

<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/5/2787>

Xu, C., Pu, L., Zhu, M., Li, J., Chen, X., Wang, X., & Xie, X. (2016). Ecological security and ecosystem services in response to land use change in the coastal area of Jiangsu, China. *Sustainability*, 8(8), 816.

<https://www.mdpi.com/2071-1050/8/8/816>

Yuan, Y., Bai, Z., Zhang, J., & Xu, C. (2022). Increasing urban ecological resilience based on ecological security pattern: A case study in a resource-based city. *Ecological Engineering*, 175, 106486.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857421003414>

Zhang, R., Pu, L., Li, J., Zhang, J., & Xu, Y. (2016). Landscape ecological security response to land use change in the tidal flat reclamation zone, China. *Environmental monitoring and assessment*, 188(1), 1-10.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-015-4999-z>

تحلیل امنیت اکولوژیکی با رویکرد عرضه و تقاضای خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن (نمونه موردی: بخش مرکزی شهرستان اصفهان)

گلناز درویشی^۱، رومینا سیاح‌نیا^{۲*}، نغمه مبرقعی^۳

مقاله پژوهشی

جغرافیا و آمایش شهری - منطقه‌ای
 پاییز ۱۴۰۲، سال ۱۳، شماره ۴۸
 تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۹
 تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۱۲
 تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۴
 صفحات: ۸۷-۱۱۲

چکیده

امروزه رشد شهرنشینی، باعث تغییر در ساختار و عملکرد اکوسیستم طبیعی و سیمای سرزمین شهری شده که با به هم خوردن تعادل عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستم همراه است و به ناامنی اکولوژیکی شهرها منجر می‌شود. شهرستان اصفهان، به عنوان یکی از بزرگ‌ترین مناطق تمرکز جمعیت در کشور، شاهد رشد سریعی بوده که به تخریب بسیاری از مناطق بکر محیط زیست پیرامون منتج شده است. در راستای افزایش امنیت اکولوژیکی شهری، اقدامات حفاظتی، بازسازی و مدیریتی مختلفی انجام می‌شود که این پژوهش با هدف تحلیل امنیت اکولوژیکی شهری با مقایسه عرضه و تقاضای خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن در بخش مرکزی شهرستان اصفهان به عنوان شاخص امنیت اکولوژیکی پرداخته است. با بررسی وضعیت عرضه خدمت ذخیره کربن و میزان تقاضا برای این خدمت که میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در نظر گرفته شده است، به تعیین وضعیت نرخ عرضه و تقاضای خدمت ذخیره کربن در دو دهه گذشته پرداخته شد. نتایج حاکی از آن است که در دو دهه گذشته منطقه مطالعاتی با تغییرات زیادی در کاربری و پوشش اراضی روبه‌رو بوده و از طرفی با افزایش تقاضا برای خدمت ذخیره کربن که از افزایش انتشار کربن دی‌اکسید نشأت گرفته است، مناطق بیشتری از بخش مرکزی اصفهان دچار عدم تعادل در عرضه و تقاضای خدمت ذخیره کربن شده است. پیشنهاد می‌شود در محدوده قانونی شهر اصفهان به طراحی کریدورهای سبز پرداخته و در دهستان قهاب جنوبی نیز که به دلیل کاهش مساحت کاربری کشاورزی با پدیده بیابان‌زایی روبه‌رو بوده است، به اعمال استراتژی‌های کشاورزی پایدار و جلوگیری از پیشرفت این معضل پرداخته شود. براساس یافته‌ها و نتایج، افزایش انتشار کربن تأثیر بیشتری بر کاهش امنیت اکولوژیکی داشته است و حفظ و ارتقای کیفیت اکوسیستم شهری ممکن نیست مگر با استفاده از دانش اکولوژیکی با رویکردی همچون حفظ عرضه، تقاضا و جریان خدمات اکوسیستم که از ارکان مهم توسعه پایدار است.



واژه‌های کلیدی:
 امنیت اکولوژیکی، خدمت اکوسیستم، ذخیره کربن، اصفهان

مقدمه

رشد سریع شهرنشینی به همراه تغییرات زیاد در پوشش و کاربری اراضی سبب کاهش خدمات اکولوژیکی و در نتیجه موجب بروز پیامدهای منفی محیط‌زیستی شده است (حسن‌پور و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۸۷؛ Ghayoumi et al., 2022: 2480). شهرنشینی به عنوان محرک اصلی تغییر کاربری و پوشش اراضی، الگوهای سیمای سرزمین و ساختار عملکرد اکوسیستم‌های شهری را تغییر داده است و باعث انتقال اکوسیستم‌های طبیعی به سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی شده است (Zhang et al., 2016: 3). در سال‌های اخیر، توسعه شهرها در ایران اغلب براساس موجودبودن زمین، نیازها و تقاضای جمعیتی صورت گرفته است (عبدالمی و همکاران، ۱۳۹۹: ۳۱). از آنجا که رشد و توسعه

۱- کارشناسی ارشد برنامه‌ریزی محیط‌زیست، گروه برنامه‌ریزی و طراحی محیط، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
 ۲- استادیار گروه برنامه‌ریزی و طراحی محیط، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران (نویسنده مسئول)
 ۳- دانشیار گروه برنامه‌ریزی و طراحی محیط، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

شهری امری اجتناب‌ناپذیر است، برای پیشگیری از عوارض، معضلات و تغییرات غیرقابل جبران در ساختار و عملکرد و فرایند اکولوژیکی بستر شهر و در راستای هماهنگ کردن محیط انسان‌ساخت با محیط طبیعی، لازم است اصول و معیار و سیاست‌هایی برای پایداری اکولوژیکی شهر مورد توجه قرار گیرد (سیاح‌نیا و همکاران، ۱۳۹۶: ۷۹). یکی از دغدغه‌های اصلی برنامه‌ریزان محیط‌زیست شهری، عملیاتی کردن دانش مبتنی بر اکوسیستم، مانند خدمات اکوسیستم یا افزایش تاب‌آوری شهری است (Ramyar et al., 2020: 2; Ghayoumi et al., 2023). برای نیل به این هدف، برنامه‌ریزان و متخصصان امر، همواره به دنبال راهی مناسب برای برنامه‌ریزی شهری با هدف تنظیم ساختار و پایداری عملکرد اکوسیستم شهر هستند. چون در این صورت است که یک سیمای سرزمین شهری می‌تواند در برابر اختلالات و آسیب‌های وارده، تعادل محیطی را حفظ کرده و به حفظ بازخوردها، فرایندها و ساختارهای موجود نائل آید (فرج‌الهی و همکاران، ۱۳۹۴: ۲). به‌طور کلی، شهرنشینی همچون یک شمشیر دولبه است، از طرفی زیربنای توسعه اقتصادی است و منجر به سبک زندگی راحت انسان می‌شود، از طرفی فشار محیط‌زیستی جدی که ایجاد می‌کند، تهدیدکننده ساختار و عملکرد اکوسیستم‌ها است. این فشار اکولوژیکی نه تنها شامل تکه‌تکه شدن چشم‌انداز و توزیع غیرمنطقی فضای اکولوژیکی است، بلکه باعث تخریب خدمات اکوسیستم نیز می‌شود (Fan et al., 2022: 2).

مفهوم امنیت اکولوژیکی برای محافظت از ساختار و فرایندهای اکوسیستم از تهدیدات خارجی عنوان می‌شود (Fan et al., 2022: 3). اصل امنیت اکولوژیکی که برای ارزیابی ساختار و عملکرد اساسی اکوسیستم، اندازه‌گیری سطح ایمنی اکوسیستم و تجزیه و تحلیل حساسیت محیطی عنوان شده است، تعریف می‌کند که امنیت اکولوژیکی، ساختار یک منظر است که خدمات اکوسیستمی کافی برای حمایت از سیستم اجتماعی-اقتصادی و حفظ تعادل بین محیط‌زیست و توسعه را تأمین می‌کند (Pan et al., 2021). مفهوم امنیت اکولوژیکی شهری، به درک تنش‌های مختلف شهرنشینی که به محیط‌های مجاور آن نیز با مکانیسم‌های مختلف، وارد می‌شود، کمک می‌کند؛ از جمله تجزیه و تحلیل تغییر کاربری زمین، تجاوز به منطقه طبیعی، از بین رفتن فضای سبز شهری، تکه‌تکه شدن چشم‌انداز، آلودگی و افزایش فشار جمعیت (Ghosh et al., 2021: 4; Mousavi et al., 2022; Borhani et al., 2023: 1515).

شناسایی منابع، اولین و اساسی‌ترین مرحله در ساخت یک الگوی امنیت اکولوژیکی در سطح سیمای سرزمین است که بر همه مراحل بعدی اثرگذار است. با وجود توسعه اخیر رویکردهای شناسایی منابع اکولوژیکی، بیشتر مطالعات همچنان بر بُعد اکولوژیکی لکه‌ها به‌عنوان تأمین‌کننده خدمات اکوسیستم متمرکز هستند و تعامل بین اکوسیستم و سیستم‌های اجتماعی-اقتصادی انسانی را نادیده می‌گیرند. برای دستیابی به توسعه پایدار انسانی و طبیعی، خدمات ارائه‌شده توسط اکوسیستم‌ها باید با تقاضای انسان مطابقت داشته باشد (Qiu et al., 2021: 5). براساس یک چارچوب ارزیابی چندسطحی، منابع احتمالی منطقه باید سه شرط را به‌طور همزمان برآورده کند؛ (۱) باید عرضه پایدار خدمات اکوسیستمی را تضمین کند. خدماتی که باید در نظر گرفته شوند. (۲) باید یکپارچگی فرایند اکولوژیکی را حفظ کند. یک لکه اکولوژیکی با اتصال بالا می‌تواند عملکردهای محیط‌زیستی خود را کارآمدتر انجام دهد. (۳) درنهایت، باید در برآوردن تقاضای انسان برای خدمات اکوسیستم مؤثر باشد.

خدمات اکوسیستم کمک‌های ساختار و عملکرد اکوسیستم (در ترکیب با سایر ورودی‌ها) به رفاه انسان است. این نشان می‌دهد که بشر به‌شدت به اکوسیستم‌هایی که به‌خوبی کار می‌کنند و سرمایه طبیعی که مبنای جریان دائمی خدمات اکوسیستم از طبیعت به جامعه هستند، وابسته است؛ بنابراین، خدمات اکوسیستم پتانسیل تبدیل شدن به یک ابزار اصلی برای سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری در مقیاس جهانی، ملی، منطقه‌ای و محلی را دارند. خدمات

اکوسیستم به‌عنوان یک شاخص کلیدی سلامت اکوسیستم عمل می‌کنند؛ بنابراین، تحقیق در مورد رابطه آن با شهرنشینی، یک رویکرد یکپارچه جدید برای کمی کردن اثرات اکولوژیکی شهرنشینی ارائه می‌دهد (Peng et al., 2017: 708). هدف اکثر پژوهش‌ها، تعیین کمی خدمات اکوسیستمی در مقیاس‌های منطقه‌ای یا ملی، با تمرکز بر مناظر طبیعی و روستایی است. کمتر از ۱۰ درصد از مطالعات با خدمات اکوسیستم شهری سروکار دارند که ضرورت این موضوع را یادآوری می‌کند؛ زیرا اهمیت مطالعه خدمات اکوسیستم برای رفاه انسان در شهرها بیشتر مشهود است (Van Oorschot et al., 2021: 2). درحالی‌که مفهوم خدمات اکوسیستم از دیدگاه پایداری نشأت گرفته است، چگونگی عملیاتی کردن خدمات اکوسیستم در کمک به افزایش امنیت اکولوژیکی و تاب‌آوری شهری، نیاز به مطالعه بیشتری دارد (Xu et al., 2016: 3). عرضه خدمات اکوسیستمی عبارت است از ظرفیت و توان یک منطقه برای تولید مجموعه‌ای از خدمات اکوسیستمی در طول یک دوره زمانی معین با توجه به تقاضای افراد. عرضه خدمات اکوسیستم تحت‌تأثیر ویژگی‌های اکوسیستم همچون نوع و شرایط آن قرار دارد و اکوسیستم‌های مختلف، خدمات اکوسیستمی متفاوتی ارائه می‌کنند. وسعت جغرافیایی یک اکوسیستم و ترکیب گونه‌ای آن نیز کیفیت و کمیت عرضه خدمات اکوسیستمی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. تقاضای انسان برای خدمات اکوسیستمی، شرط اولیه استفاده از سودمندی‌های یک اکوسیستم است. براین‌اساس، تقاضای خدمات اکوسیستمی از دو دیدگاه بررسی می‌شود. در دیدگاه اول، تقاضای خدمات اکوسیستمی یعنی میزان نیاز انسان به یک خدمت ویژه. به عبارت دیگر مجموع خدمات اکوسیستمی که در یک منطقه مشخص در بازه زمانی معین در حال استفاده یا مصرف است تقاضای خدمت اکوسیستمی خوانده می‌شود. در دیدگاه دوم، مطلوبیت‌ها، ترجیحات و ویژگی‌های اقتصادی-اجتماعی یک خدمت اکوسیستمی به‌عنوان تقاضای آن خدمت تعریف می‌شود (عبداللهی و ایلدرمی، ۱۴۰۱: ۳). ارائه الگوهای مطلوب در تعیین تعادل عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستمی ضروری است، چون می‌تواند به برقراری تعادل منابع و مصارف سرزمینی تأثیرگذار باشد.

مطالعات زیادی چه در خارج و چه در داخل ایران بر امنیت اکولوژیکی انجام شده است که در مطالعات مختلف، شاخص‌ها و معیارهای متعددی در جهت ارزیابی امنیت اکولوژیکی انتخاب و بررسی شده‌اند؛ برای مثال در پژوهش یوان (Yuan et al., 2022) معیار الگوی امنیت اکولوژیکی پایدار براساس سه مفهوم در سیمای سرزمین عنوان می‌شود. (۱) منابع اکولوژیکی (۲) کریدورهای اکولوژیکی و (۳) گره‌های اکولوژیکی. در این تحقیق، پایداری و ارتباط این سه فاکتور، نشان‌دهنده پایداری الگوی امنیت اکولوژیکی منطقه است. در مطالعه‌ای دیگر، کیو و همکاران (Qiu et al., 2021)، شاخص‌های مشخص تری را در جهت ارزیابی امنیت اکولوژیکی منطقه در نظر گرفته‌اند. آن‌ها این شاخص‌ها را براساس سه فاکتور کلی تقسیم کرده‌اند که شامل فشار اکولوژیکی^۱، مدیریت اکولوژیکی^۲ و موقعیت اکولوژیکی^۳ هستند. همچنین ژانگ (Zhang et al., 2016) با رویکردی متفاوت در تحقیق خود، شناسایی منابع اکولوژیکی را براساس توانایی عرضه پایدار و برآوردن تقاضای خدمات اکوسیستم در لکه‌های سیمای سرزمین انجام داد. در ایران هم، نارویی و همکاران (Naroei et al., 2022) در مقاله خود، با استفاده از مدلسازی خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن، سهی در شناخت فرایندهای فضایی تغییر الگوی موزایک سیمای سرزمین و چگونگی تأثیر آن بر عملکرد ترسیب کربن طی سه دهه پرداختند. محقق و همکارانش (Mohaghegh et al., 2022) در مقاله خود با

¹ Ecological Pressure

² Ecological Management

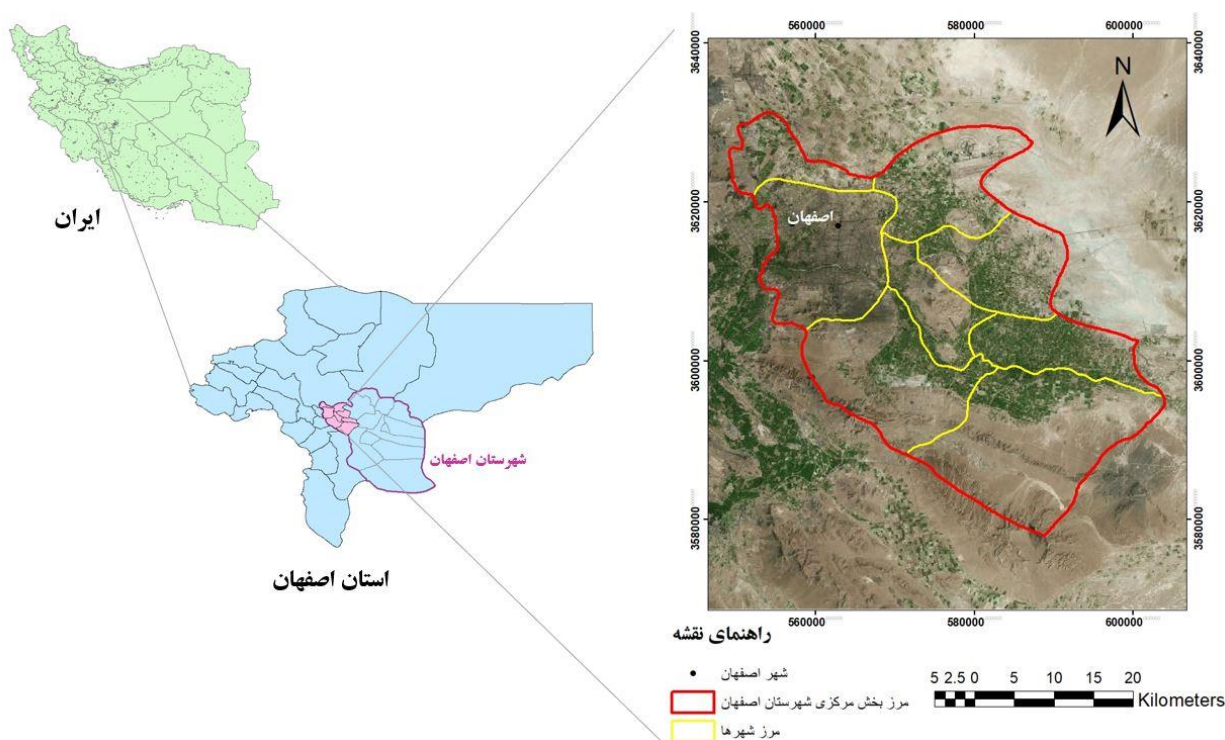
³ Ecological Condition

مطالعه تغییرات اکوسیستم در بازه ۳۰ ساله با استفاده از سنج‌های سیمای سرزمین و محاسبه ترسیب کربن، به این نتیجه رسیدند که ترسیب کربن در طی این دوره زمانی روند کاهشی داشته و این همزمان بوده با متراکم، ریزدانه و ساده شدن بافت شهر. از طرفی آن‌ها مهم‌ترین دلیل کاهش میزان ترسیب کربن طی این دوره را جایگزینی و تغییرات در کاربری اراضی زمین‌های زراعی و بایر به کاربری‌های انسان‌ساخت بیان کردند. عادل‌سردو و همکارانش (Adelisardou et al., 2022) در مقاله خود از نقشه‌هایی با مقیاس منطقه‌ای برای تعیین کمیت ذخیره‌سازی کربن و جداسازی از انواع کاربری‌های مختلف زمین برای ارزیابی اثرات سناریوهای استفاده از زمین در آینده استفاده کردند. سجادی و همکاران (۱۴۰۰)، با استفاده از نقشه‌سازی خدمات اکوسیستمی که آن را ابزاری کارآمد برای بهبود برنامه‌ریزی سرزمین عنوان کردند، به ارزش‌گذاری خدمت ذخیره کربن پرداخته و براساس نتایج پژوهش خود که نشان‌دهنده افزایش خدمت ذخیره کربن در کاربری کشاورزی بود، اذعان کردند که این رهیافت می‌تواند به‌عنوان یک حلقه واسط برای پیوند دادن بخش‌های انسان‌ساختی و بوم‌شناختی با هدف برنامه‌ریزی و مدیریت مورد استفاده قرار گیرد.

شهرستان اصفهان به‌عنوان یکی از بزرگترین مناطق تمرکز جمعیت در مرکز کشور، شاهد رشد سریعی بوده که به تخریب بسیاری از مناطق بکر محیط‌زیست پیرامون آن منتج شده و در صورت ادامه روند فعلی و بهره‌وری ساکنان، منجر به زوال شهرستان اصفهان خواهد شد (کشتکار و سیاح‌نیا، ۱۳۹۹). بخش مرکزی شهرستان اصفهان به‌عنوان یکی از پرجمعیت‌ترین و صنعتی‌ترین بخش‌های این شهرستان نیز از این تبعات محیط‌زیستی مستثنا نیست. از جمله مشکلات بارز در این منطقه می‌توان به تبدیل باغات به اراضی مسکونی و بایر و همچنین تخریب اراضی کشاورزی و پوشش گیاهی اشاره کرد. هدف از این پژوهش ارزیابی امنیت اکولوژیک شهری با مقایسه عرضه و تقاضای خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن در مناطق مختلف بخش مرکزی شهرستان اصفهان در طول یک دوره ۲۰ ساله است و براین اساس می‌توان نقش این خدمت اکوسیستمی را در حفظ امنیت اکولوژیکی شهری سنجید.

معرفی محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخش مرکزی شهرستان اصفهان است که در محدوده ۵۱ درجه و ۳۲ دقیقه و ۵۳ درجه و ۱۲ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۲۹ دقیقه و ۳۳ درجه و ۰۱ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. این منطقه دارای مساحتی معادل ۱۵۵۵۹۱ هکتار است. بخش مرکزی شهرستان اصفهان شامل ۸ دهستان (محدوده قانونی شهر اصفهان، جی، محمودآباد، قهاب شمالی، قهاب جنوبی، برآن شمالی، برآن جنوبی) و ۱۲۴ آبادی است که ۸۱ آبادی آن خالی از سکنه است (سالنامه آماری، ۱۳۹۹). پست‌ترین نقطه این محدوده، رودخانه زاینده‌رود با ارتفاع ۱۵۵۰ متر از سطح رودخانه و مرتفع‌ترین نقطه در شهر اصفهان، کوه صفا با ارتفاع ۲۲۵۷ متر از سطح دریا است. آب‌وهوای اصفهان به‌طور کلی معتدل و خشک است و حداکثر درجه حرارت در تابستان ۴۳ درجه سلسیوس است که تابستان‌های گرم و خشک را می‌سازد و در زمستان تا حداکثر ۱۹- درجه می‌رسد (سالنامه آماری اصفهان، ۱۳۹۹). مجموع میانگین بارندگی بارش سالانه شهر اصفهان ۱۲۷ میلی‌لیتر است و متوسط تبخیر سالانه در این شهر ۳۲۱۹ میلی‌لیتر است (سازمان هواشناسی، ۱۳۹۸). نرخ جمعیت شهرنشینی در استان اصفهان در سال ۱۳۹۰، برابر با ۸۵.۴ درصد بوده که در سال ۱۳۹۵ به ۸۸ درصد رسیده است. استان اصفهان ۶.۵ درصد کل جمعیت کشور را دارد که ۴۳.۸ درصد آن در شهرستان اصفهان ساکن‌اند با جمعیت ۲۲۴۳۲۴۹ نفر که ۲۱۱۲۷۶۷ نفر از آن‌ها در نقاط شهری ساکن‌اند. شکل ۱ یک موقعیت کلی از محدوده مطالعاتی پژوهش نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه
(تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)

داده‌ها و روش‌ها

در این پژوهش با هدف ارزیابی ساختاری امنیت اکولوژیکی بخش مرکزی شهرستان اصفهان، به مقایسه نرخ عرضه و تقاضای خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۰۰ پرداخته شده است.

در این مطالعه برای اخذ تصاویر ماهواره‌ای و طبقه‌بندی کاربری‌ها از سامانه گوگل ارث انجین^۱ استفاده شد و روند تغییرات کاربری اراضی به صورت سری زمانی مطالعه شد. در این مطالعه از تصاویر لندست سنجنده‌های ۸ و ۵ استفاده شد و پس از فراخوانی تصاویر مربوط به منطقه مورد مطالعه توسط کدهای مربوط، نمونه‌های تعلیمی در جهت آماده‌سازی تصویر هر سال برای طبقه‌بندی از منطقه انتخاب شد. پس از اینکه نمونه‌های تعلیمی هر طبقه تعریف شدند، با استفاده از کدهای دستوری که برای طبقه‌بندی در گوگل ارث انجین موجود هستند، تصویر آماده‌شده با استفاده از روش SVM (ماشین بردار پشتیبان) طبقه‌بندی شد.

در این مطالعه، برای اندازه‌گیری نرخ عرضه خدمت ذخیره کربن، از مدل ذخیره کربن بسته نرم‌افزاری InVEST نسخه 3.11.0 استفاده شد. مدل ذخیره و ترسیب کربن InVEST مقدار فعلی کربن ذخیره‌شده در یک منظر را تخمین می‌زند و مقدار کربن ترسیب‌شده را در طول زمان ارزش‌گذاری می‌کند. این مدل مقدار بیوفیزیکی کربن ذخیره‌شده در چهار منبع کربن (بیومس در سطح زمین، بیومس زیرزمینی، خاک و مواد آلی مرده) را براساس

^۱ Google Earth Engine

نقشه‌های کاربری زمین و پوشش زمین ارائه شده توسط کاربران جمع می‌کند (Sharp et al., 2014: 10). در این مدل، میزان ذخیره کربن خشکی از رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$C_{stored} = C_{pxt} + \sum_{j=1}^J A_j (C_{aj} + C_{bj} + C_{sj} + C_{oj}) \quad [1]$$

که در این رابطه، C_{xt} کربن ذخیره شده در پیکسل مورد بررسی در زمان t است که برابر با مجموع کربن ذخیره شده در منابع ذخیره کربن، یعنی بیومس زیرزمینی^۱ (C_{bj})، بیومس روزمینی^۲ (C_{aj})، ماده آلی مرده^۳ (C_{sj}) و خاک^۴ (C_{oj}) به تفکیک کاربری اراضی است. به طوری که J نشان دهنده انواع کاربری اراضی در پیکسل x در زمان t و A_j مساحت کاربری اراضی است. جدول زیر داده‌های لازم در جهت استفاده در مدل ذخیره کربن را نشان می‌دهد. در واقع C_{pxt} ذخیره کربن در مخزن انتخابی در مدل است و مرتبط با تولیدات ساخته شده با چوب از قبیل الوار، اسباب و اثاثیه، کاغذ، زغال چوب و... است که از اتمسفر دور نگه داشته می‌شوند و در این مطالعه در تخمین میزان کلی کربن ذخیره شده در نظر گرفته نمی‌شود (رضایی سنگدهی و همکاران، ۱۴۰۲: ۲۳). با توجه به اینکه مطالعات جامعی در مقیاس منطقه‌ای از میزان کربن موجود در چهار منبع ذخیره کربن به تفکیک هر کاربری اراضی وجود ندارد، داده‌های ورودی مورد نیاز مدل را از طریق جدول‌های مربوط به گزارش IPCC (۲۰۰۶) استخراج شده‌اند. گزارش IPCC که در سال ۲۰۰۶ میلادی تهیه شده است، یک منبع خوب و درعین حال کلی از داده‌های کربن است. این گزارش رویکردی را توسعه داده که ذخایر کربن در انواع کاربری‌های اراضی را براساس تحلیل متا از مطالعات میدانی مشخص می‌کند (Eggleston et al., 2006). براساس مرور منابع و سالنامه‌های آماری، مشخص شد که زون اکولوژیکی بخش مرکزی شهرستان اصفهان، یک زون نیمه گرمسیری نیمه خشک است چون بیش از ۸ ماه از سال دمای بالای ۱۰ درجه دارد و در بیش از ۳ ماه از سال روزهای یخبندان ثبت شده است.

عرضه خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن در منطقه مورد مطالعه، برابر است با محاسبه میزان ذخیره کربن در یک سال توسط منابع ذخیره کربن. این مقدار در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ محاسبه شده و سپس براساس آمار و نقشه‌ها به مقایسه و تجزیه و تحلیل آن‌ها پرداخته شده است.

به طور معمول، تقاضای اکولوژیکی به میزان خدمات اکوسیستمی مصرف شده، استفاده شده یا مورد نیاز انسان‌ها اشاره دارد. رایج‌ترین شاخص‌های مورد استفاده برای اندازه‌گیری تقاضای انسانی شامل استفاده یا مصرف واقعی خدمات اکوسیستمی، مزایای غیرپولی یا پولی ناشی از خدمات کاهش ریسک و ترجیحات و ارزش‌های خدمات فرهنگی است؛ بنابراین، ارزیابی اهمیت تقاضای اکولوژیکی انسان بر این اساس است که چگونه به راحتی و چه تعداد خدمات اکوسیستمی می‌تواند توسط لکه‌های اکولوژیکی به مردم ارائه شود؛ بنابراین، در این پژوهش تقاضا با در نظر گرفتن انتشار CO_2 در هر متر مربع تولید شده در اصفهان در سال ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ برآورد شد و سپس

1 Below-ground biomass
2 Above-ground biomass
3 Dead organism
4 Soil organism

مقایسه‌ای بین این دو سال انجام شد تا تفاوت تقاضای خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن طی ۲۰ سال مشخص شود (Vignoli et al., 2021: 8).

بسیاری از محققان بیان کرده‌اند که درک عرضه خدمت اکوسیستمی از یک سو و تقاضای جمعیت شهری از سوی دیگر برای بهبود چشم‌انداز و برنامه‌ریزی شهری بسیار مهم است. ارزیابی جامع این دو جزء می‌تواند به درک بهتر عدم تطابق خدمت اکوسیستمی کمک کند، که به‌عنوان تفاوت در کیفیت یا کمیت بین عرضه و تقاضای خدمت اکوسیستمی تعریف می‌شود (Sebastiani et al., 2021: 6). عرضه خدمات اکوسیستمی در دهه‌های اخیر موضوع مورد بحث و توجه برنامه‌ریزان و دانشمندان محیط‌زیستی قرار داشته است، اما مهم‌تر از آن، ارزیابی تعادل بین عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستمی در سرزمین است، چون در این صورت است که می‌توان چگونگی استفاده از سرزمین را در جهت توسعه پایدار بیان کرد. نسبت عرضه و تقاضای اکولوژیکی (ESDR)، که نخستین بار توسط لی و همکاران (Li et al., 2016) معرفی شد، نشان‌دهنده عرضه واقعی خدمات اکوسیستم و تقاضای انسانی آن است که بیانگر ماهیت مازاد یا کمبود خدمات مورد استفاده است. با تعیین میزان عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستمی و نقشه‌سازی آن‌ها، نسبت عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستمی در پهنه سرزمین محاسبه و نقشه‌سازی می‌شود. رابطه ۲، روش تعیین نرخ خدمات اکوسیستمی مورد استفاده را نشان می‌دهد:

$$ESDR = \frac{S - D}{(S_{max} + D_{max})/2} \quad [2]$$

در این فرمول، S و D عرضه و تقاضای واقعی یک خدمت اکوسیستمی را بیان می‌کنند، و Smax و Dmax نشان‌دهنده بیشینه عرضه و تقاضای انسانی یک خدمت اکوسیستمی هستند که از لایه‌های فضایی S و D مربوط استخراج می‌شوند. مخرج در رابطه ۲ برای دو دوره یکسان است. تعادل در سرزمین از لحاظ بهره‌برداری از خدمات اکوسیستمی، با مقدار ESDR صفر مشخص می‌شود، اما اگر این مقدار مثبت باشد، یعنی وجود مازاد خدمت اکوسیستمی که امکان بهره‌برداری بیشتر از آن وجود دارد و مقدار منفی این نرخ به معنی کمبود و کسری در خدمت اکوسیستمی است که بیانگر عدم توازن بهره‌برداری از خدمت اکوسیستمی مورد نظر در منطقه است. نرخ عرضه نشان‌دهنده نسبت خدمات بالقوه اکوسیستم تبدیل شده به خدمات اکوسیستم واقعی در یک منطقه خاص است.

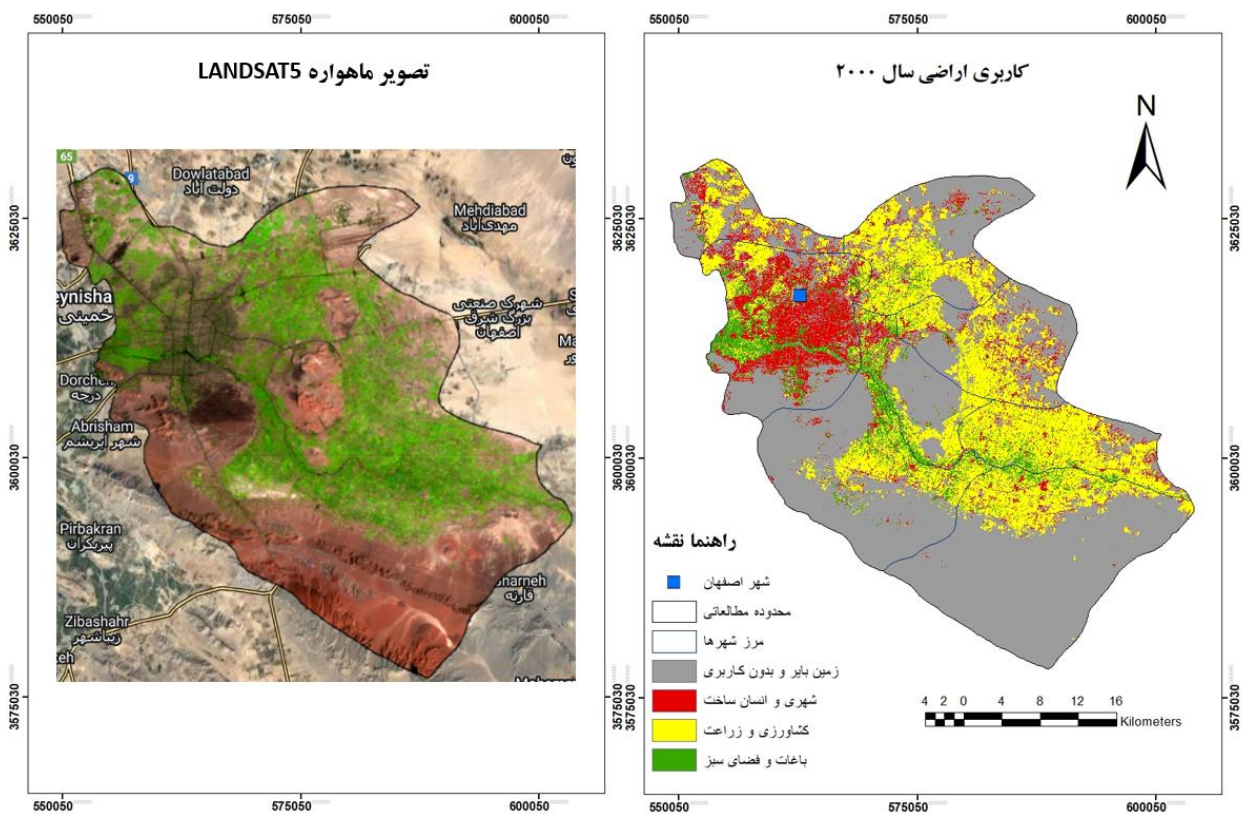
این پارامتر دو عملکرد اصلی دارد؛ اول اینکه امکان ارزیابی نسبت بین عرضه و تقاضا در مناطق انتخابی را فراهم می‌کند. اگر ESDR بزرگ‌تر از صفر باشد، مازاد خدمات اکوسیستم مشاهده می‌شود و تقاضا با عرضه فعلی مطابقت می‌یابد. در غیر این صورت، اگر ESDR منفی باشد، عرضه نمی‌تواند تقاضا را برآورده کند و کمبود در توزیع چنین خدماتی را برجسته می‌کند. دوم امکان مقایسه نواحی مختلف را از طریق ایجاد مقیاسی متشکل از مقادیر بدون بُعد قابل مقایسه فراهم می‌کند.

همان‌طور که در فصل قبل به تفصیل اشاره شد، براساس مرور منابع، شروط لازم برای داشتن یک منطقه مناسب از نظر الگوی امنیت اکولوژیکی سیمای سرزمین، داشتن سه شرط وابسته به عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستمی

است: (۱) تضمین عرضه پایدار خدمات اکوسیستمی (۲) حفظ یکپارچگی فرایندهای اکولوژیکی و (۳) مؤثر در برآوردن تقاضای انسان برای خدمات اکوسیستم.

نتایج و بحث

هر دو نقشه کاربری اراضی سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ (شکل ۲ و ۳) از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و ۵ با استفاده از سامانه گوگل ارث‌انجین و با قدرت تفکیک ۳۰ در ۳۰ متر تهیه شدند.



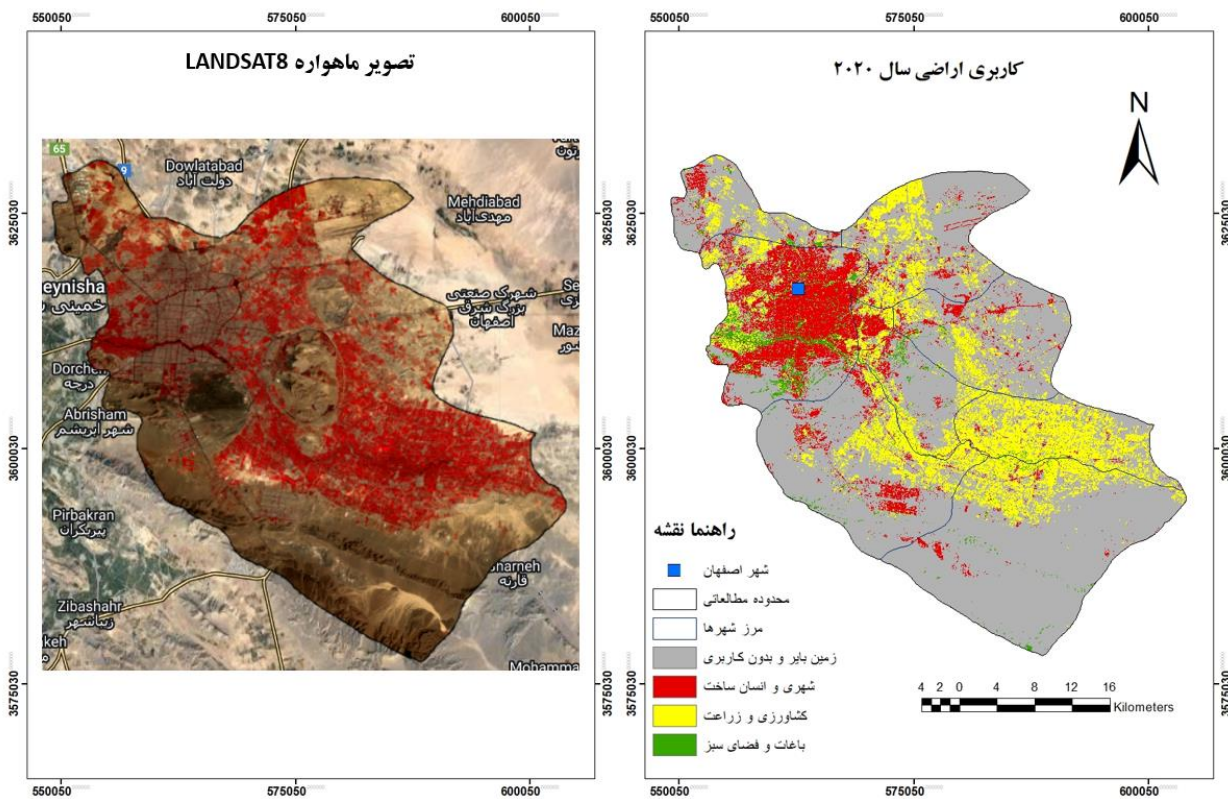
شکل ۲. کاربری اراضی و پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه سال ۲۰۰۰ (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)

جدول ۱. مساحت و درصد مساحت طبقات کاربری سال ۲۰۰۰

کاربری اراضی	مساحت (هکتار)	درصد مساحت
زمین بایر و بدون ساخت	۸۸۱۴۶.۴۵	۵۶.۶۵۲۴۳۳
شهری و انسان ساخت	۱۶۳۷۴.۳۳	۱۰.۵۲۳۹۱۳۸
کشاورزی و زراعت	۴۰۲۱۳.۴۴	۲۵.۸۴۵۵۰۱۷
باغات و فضای سبز	۱۰۸۵۷.۴۲	۶.۹۷۸۱۵۱۲۷
مساحت کل	۱۵۵۵۹۱.۶	۱۰۰

(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۱)

براساس شکل ۲ و جدول مساحت‌ها (جدول ۱)، بیشتر مساحت منطقه در سال ۲۰۰۰، از اراضی بایر و بدون ساخت پوشیده شده است، به طوری که بیش از نیمی از محدوده مطالعاتی در این طبقه قرار می‌گیرد و کمترین مساحت مربوط به طبقه باغات و پارک‌ها است که در نقشه با رنگ سبز مشخص شده است. پس از آن کاربری شهری با ۱۶۳۷۴ هکتار مساحت، ۱۰ درصد از مساحت منطقه را به خود اختصاص داده است. یک‌چهارم مساحت بخش مرکزی اصفهان در سال ۲۰۰۰ با کاربری کشاورزی پوشیده شده است که مساحتی بالغ بر ۴۰ هزار هکتار را شامل می‌شود.



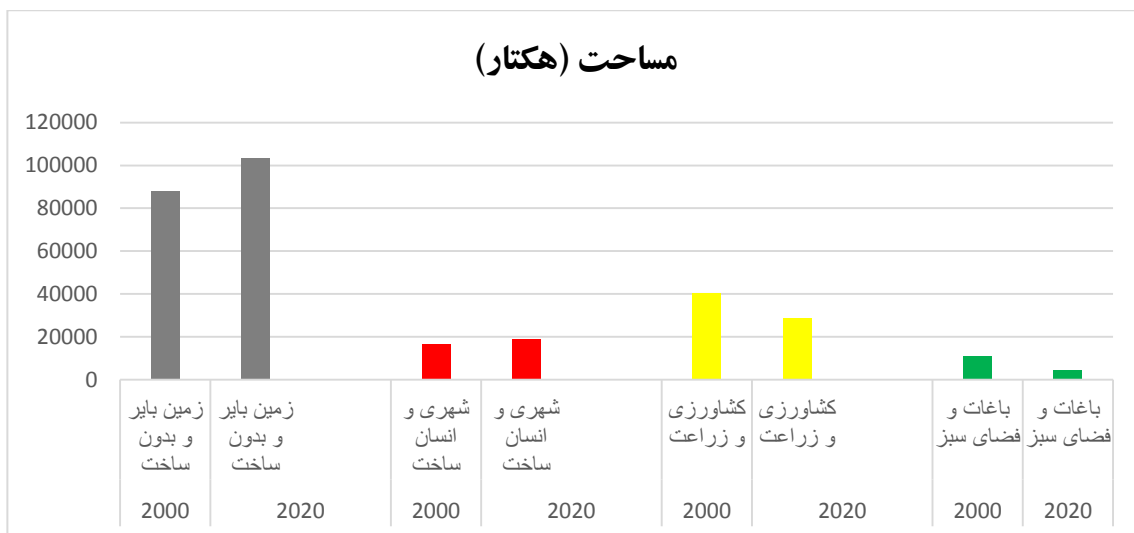
شکل ۳. نقشه کاربری اراضی و پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه سال ۲۰۲۰ (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)

جدول ۲. مساحت و درصد مساحت طبقات کاربری سال ۲۰۲۰

کاربری اراضی	مساحت (هکتار)	درصد مساحت
زمین بایر و بدون ساخت	۱۰۳۳۴۳	۶۶.۴۱۹۴۰۴
شهری و انسان ساخت	۱۹۰۴۰.۸۵	۱۲.۲۳۷۷۰۷۶
کشاورزی و زراعت	۲۸۵۸۱.۸۴	۱۸.۳۶۹۷۷۸۷
باغات و فضای سبز	۴۶۲۵.۹۱	۲.۹۷۳۱۰۹۶۱
مساحت کل	۱۵۵۵۹۱.۶	۱۰۰

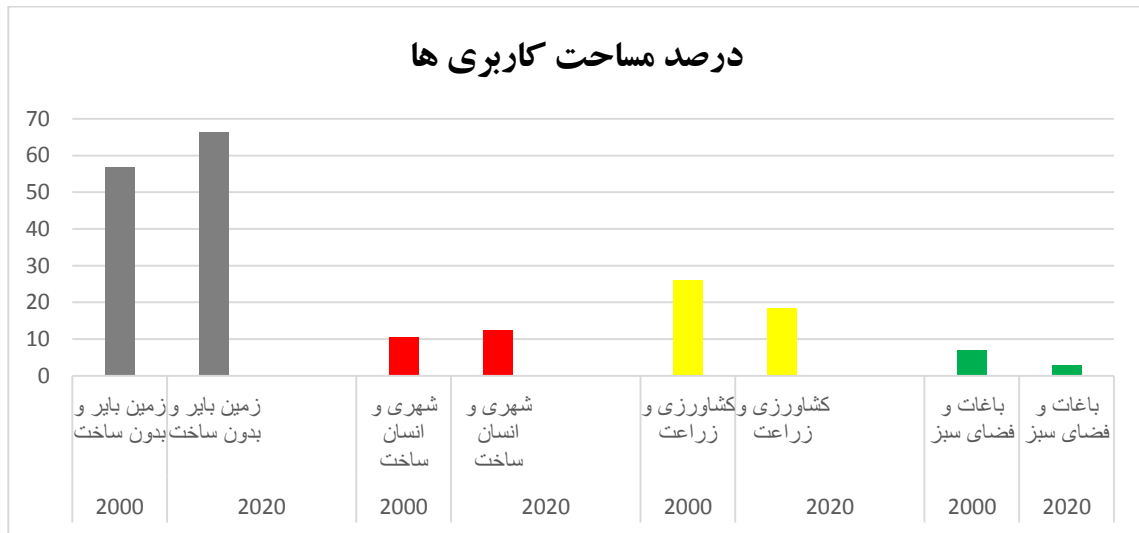
(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۱)

شکل ۳ نمایی از طبقات کاربری و پوشش اراضی در سال ۲۰۲۰ را نمایش می‌دهد. براین اساس ۶۶ درصد منطقه که مساحتی بالغ بر ۱۰۰ هزار هکتار را شامل می‌شود، اراضی بایر و بدون ساخت است. با توجه به جدول ۲ و مقایسه آن با جدول ۲، چنین برداشت می‌شود که باغات و فضای سبز شهری با کاهش ۴ درصدی در این محدوده مواجه شده‌اند و مساحت آن‌ها به حدود ۴ هزار هکتار تنزل یافته است. این کاهش در طبقه کشاورزی نیز دیده می‌شود و مساحت این طبقه نیز به ۲۸ هزار هکتار کاهش یافته است. درمقابل، کاربری شهری و انسان‌ساخت مانند کاربری زمین بایر و بدون ساخت، افزایش داشته است و ۱۲ درصد منطقه را در سال ۲۰۲۰ دربر گرفته است. شکل‌های ۴ و ۵، مساحت‌ها و درصد مساحت‌ها در بازه زمانی ۲۰ ساله را به صورت نمودار ستونی نمایش می‌دهند. براین اساس طبقات کشاورزی و باغات و فضای سبز با کاهش مساحت روبه‌رو بوده است و درمقابل، با گذشت دو دهه، کاربری شهری و اراضی بایر با افزایش مواجه بوده است.



شکل ۴. نمودار مقایسه مساحت کاربری‌های مختلف در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۰۰

(تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)



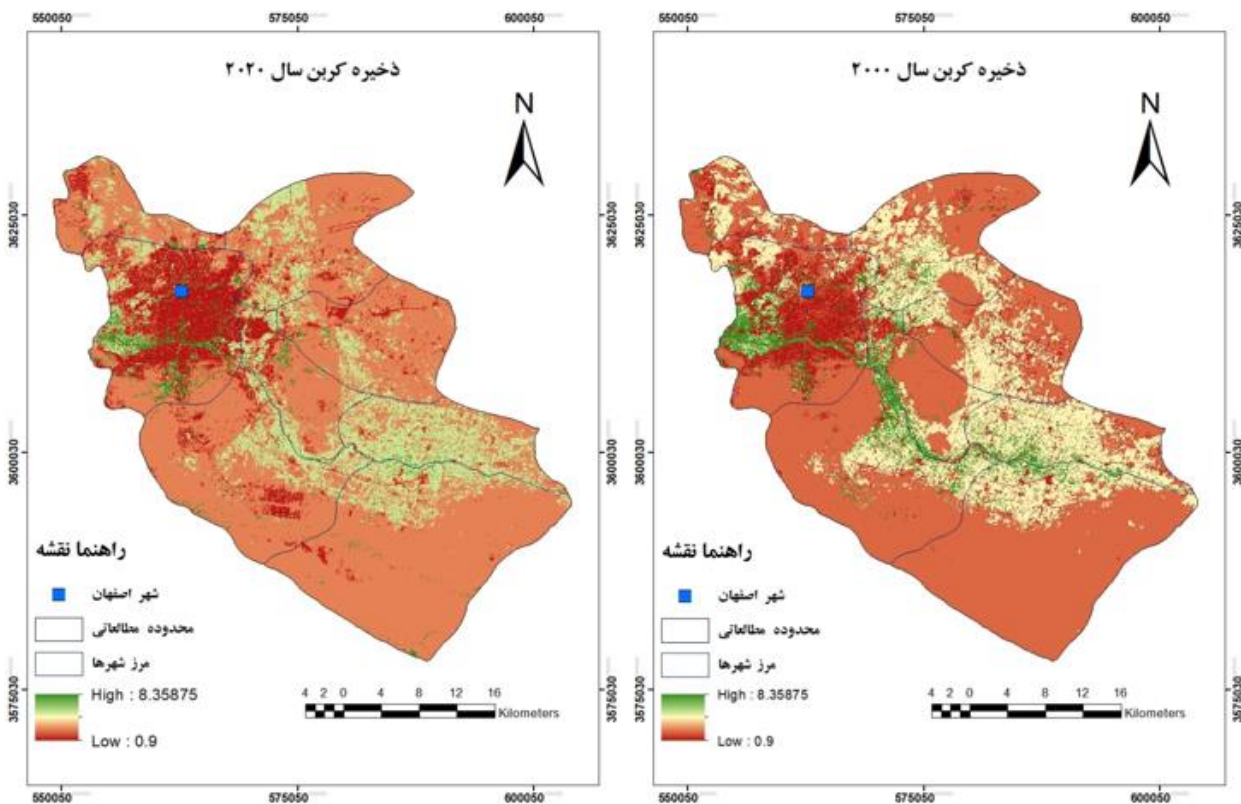
شکل ۵. مقایسه درصد مساحت کاربری‌های مختلف در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۰۰ (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)

همان‌طور که گفته شد، برای محاسبه و اندازه‌گیری خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن از مدل نرم‌افزاری InVEST استفاده شد. جدول زیر نشان‌دهنده میزان کربن ذخیره‌شده در هر منبع ذخیره کربن به تفکیک کاربری‌های اراضی متفاوت در بخش مرکزی شهرستان اصفهان است. برای این روش، با مراجعه به گزارش IPCC، میزان ذخیره کربن در منابع ذخیره کربن مختلف و براساس زون اکولوژیکی منطقه مورد مطالعه، برداشت شد و پس از محاسبه مقدار کربن ذخیره‌شده در هر هکتار، جدول ۳ که یکی از داده‌های ورودی مدل InVEST است، تهیه شد. این جدول به همراه نقشه‌های کاربری اراضی هر سال در مدل ذخیره کربن InVEST وارد شد و در نهایت نقشه‌های حاصل، نشان‌دهنده میزان ذخیره کربن در این سال‌ها توسط چهار منبع ذخیره کربن است.

جدول ۳. کربن ذخیره‌شده در هر منبع ذخیره کربن به تفکیک کاربری اراضی

کاربری اراضی	بیومس روزمینی	بیومس زیرزمینی	مواد آلی مرده	ارگانوسم‌های خاک
زمین بایر و بدون ساخت	۲.۹۱	۰.۷۹	۰	۱۹
شهری و انسان‌ساخت	۰	۰	۰	۱۰
کشاورزی	۳.۳۸	۰.۹۲	۱۵.۵	۲۴
پارک و باغات	۵۳	۱.۷۵	۱۴.۱۲۵	۲۴

(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۱)



شکل ۶. نقشه ذخیره کربن سال ۲۰۲۰ و ۲۰۰۰

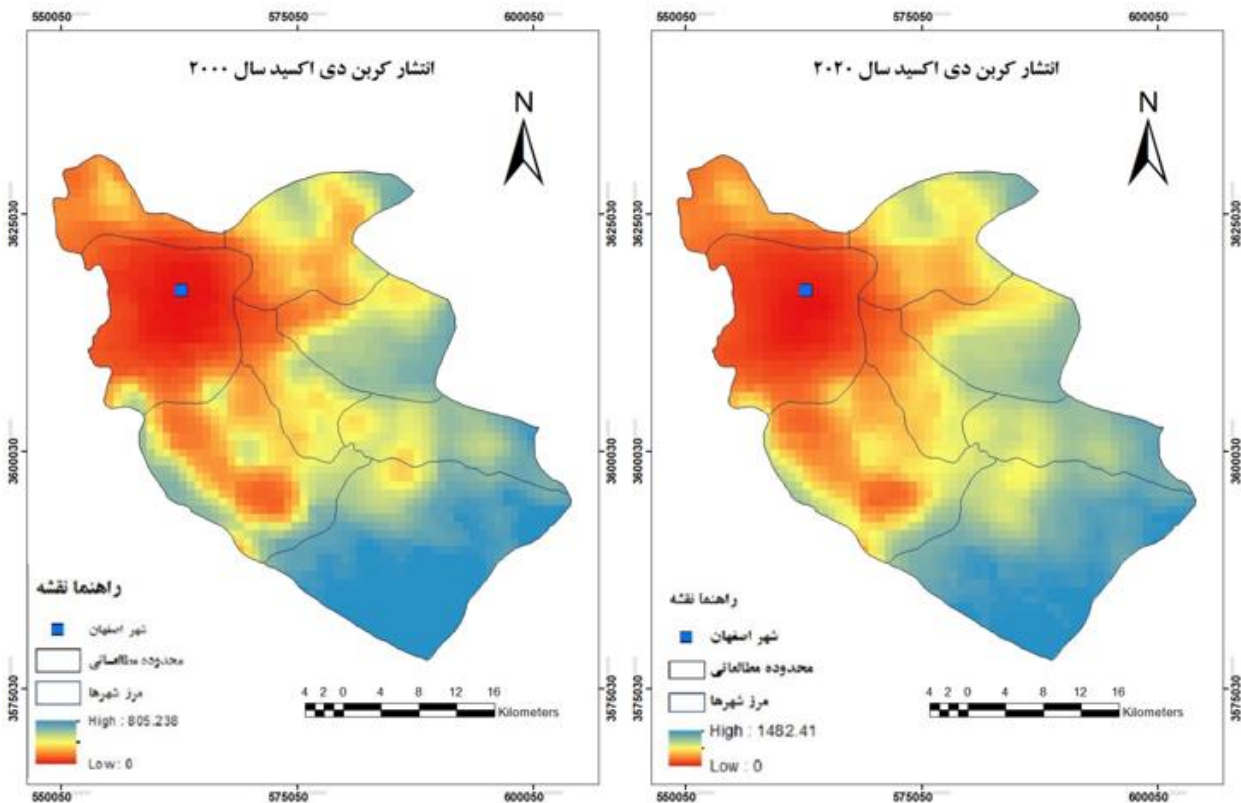
(تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)

با توجه به نقشه ذخیره کربن در سال ۲۰۰۰، بیشینه ذخیره کربن که ۸.۳۵ تن بر هکتار است، بیشتر در کاربری‌های باغات و پارک‌ها و پس از آن در زمین‌های کشاورزی اتفاق افتاده است و همچنین کمترین میزان ذخیره کربن در کاربری انسان‌ساخت و شهری رخ داده است که در نقشه عدد ۰.۹ را نشان می‌دهد. شکل ۶ بیان‌کننده میزان ذخیره کربن (عرضه خدمت ذخیره کربن) در سال ۲۰۲۰ است. نقاط کم‌رنگ‌تر در نقشه، کمینه ذخیره کربن را در کاربری شهری و انسان‌ساخت نشان می‌دهد و قسمت‌هایی از نقشه که با سبز پررنگ نمایش داده شده است، بیانگر مناطقی است که بیشترین ذخیره کربن در آن صورت گرفته است.

میزان تقاضای خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن در این پژوهش برابر با مقدار انتشار کربن در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ که در شکل ۷ دیده می‌شوند، در نظر گرفته شد (Vignoli et al., 2021: 8). بررسی ارتباط بین گازهای گلخانه‌ای موجود در جو با داده‌های انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید ناشی از انتشار فعالیت‌های انسانی ضروری است (Mousavi et al., 2023: 866)، داده‌های موجودی انتشار کربن‌دی‌اکسید ناشی از فعالیت‌های انسانی^۱ یک مجموعه داده با رزولوشن مکانی بالا برای انتشار کربن‌دی‌اکسید ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی است. این داده‌ها با استفاده از اطلاعات انتشار کربن‌دی‌اکسید ناشی از انتشار سوخت‌های فسیلی و مدل‌های پیچیده‌ای که توسط

^۱ Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO₂: ODIAIC

سازمان ملی هوا و فضای ناسا توسعه یافته، تهیه شده‌اند. داده‌های ODIAC به صورت نقشه‌های جهانی انتشار کربن دی‌اکسید با قدرت تفکیک مکانی ۱×۱ کیلومتر و دوره‌های زمانی ماهانه هستند. این اطلاعات در سال‌های اخیر به صورت گسترده‌ای در مطالعات چرخه کربن در مقیاس ملی و بین‌المللی مورد استفاده قرار گرفته است (موسوی و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۴۸؛ Mousavi et al., 2022؛ Golkar & Mousavi, 2022: 1220). در این مطالعه با توجه به هدف تحقیق از آخرین نسخه این اطلاعات (ODIAC2020) از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ استفاده شد. شکل ۷، میانگین داده‌های ۱۲ ماهه انتشار کربن دی‌اکسید در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ است.

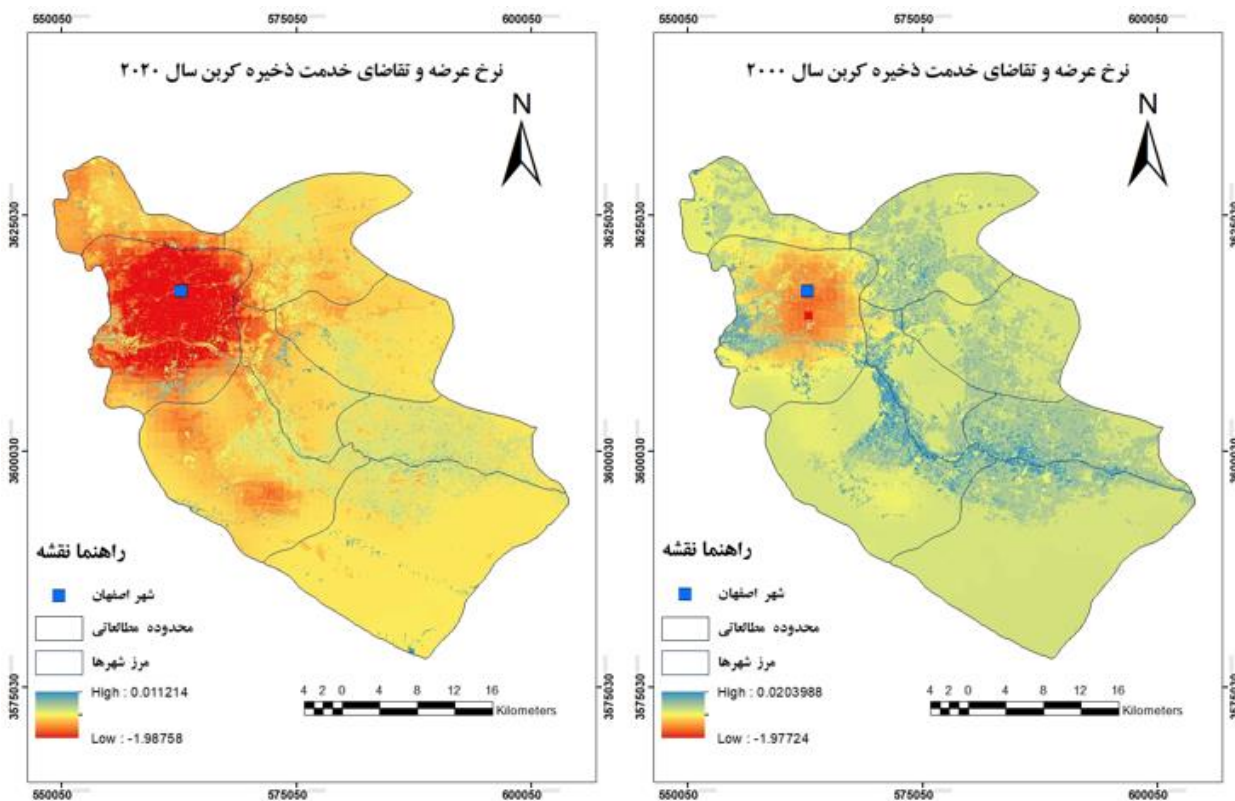


شکل ۷. نقشه‌های انتشار کربن سال ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰

(تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)

براساس شکل ۷ که میانگین انتشار کربن دی‌اکسید در سال ۲۰۰۰ را نشان می‌دهد، در محدوده قانونی شهر اصفهان که در شمال غربی منطقه مطالعاتی واقع شده است، شاهد بیشترین انتشار کربن دی‌اکسید است، به طوری که بیشینه انتشار این گاز گلخانه‌ای در سال ۲۰۰۰ به ۸۰۶.۲۳۵ تن در هر هکتار رسیده است و این در حالی است در مناطق بایر و بدون ساخت انتشار صفر گزارش شده است. آنچه از نقشه‌های انتشار کربن در سال ۲۰۲۰ برآورد می‌شود، بیشینه انتشار کربن دی‌اکسید همچون سال ۲۰۰۰، در محدوده قانونی شهر اصفهان با رقم ۱۴۸۲.۴۱ تن در هر

هکتار اتفاق افتاده است و همچون سال ۲۰۰۰، کمینه انتشار این گاز گلخانه‌ای در مناطق بایر و بدون ساخت است که عدد صفر را نشان می‌دهد. نقشه‌های نرخ عرضه و تقاضای خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن در نرم‌افزار ArcGIS با دستور raster calculator تهیه شد که با اعمال کردن معادله مربوط (رابطه ۲)، شکل ۸ به دست آمد.



شکل ۸: نرخ عرضه و تقاضای خدمت ذخیره کربن در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۰۰

(تهیه و ترسیم: نویسندگان، ۱۴۰۱)

با توجه به راهنمای شکل ۸، بازه تغییرات ESDR، در سال ۲۰۰۰ از -1.97 تا 0.02 است. به طوری که کمترین میزان نرخ در محدوده قانونی شهر اصفهان اتفاق افتاده است؛ اما با توجه به نقشه می‌توان متوجه شد که بیشترین نرخ که بالای صفر است، در مناطقی رخ داده که دارای کاربری‌های انواع پوشش گیاهی بوده‌اند. شکل ۸ بازتابی از نرخ عرضه و تقاضای خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن در سال ۲۰۲۰ نیز هست که براین اساس، عدد ESDR از -1.98 تا 0.01 متغیر است. در شمال غربی بخش مرکزی شهرستان اصفهان که محدوده قانونی شهر اصفهان واقع شده، کمترین عدد نرخ دیده می‌شود و تنها در مناطقی که به رنگ آبی دیده می‌شوند، عدد نرخ بالای صفر است.

با توجه به نسبت عرضه به تقاضا، وضعیت ارائه خدمات اکوسیستمی با کسری روبه‌رو بود و این کسری ناشی از گسترش شهری در منطقه می‌تواند باشد. افزایش مساحت شهری و انسان‌ساخت از حدود ۱۶۳ هزار هکتار در سال ۲۰۰۰ به بیش از ۱۹۰ هزار هکتار در سال ۲۰۲۰ رسید.

برای ارائه بهتر راهکارها و پیشنهادهای مدیریتی و برنامه‌ریزی‌های مکان‌دار، همه مراحل روش تحقیق، به‌طور مجزا برای هر ۸ دهستان بخش مرکزی شهرستان اصفهان انجام شد و نتایج آن در ادامه آورده شده‌است.

براساس یافته‌های پژوهش برای دهستان‌ها، از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰، محدوده قانونی شهر اصفهان، با رشد ۱۰ درصدی در طبقه کاربری انسان‌ساخت و شهری روبه‌رو بوده، اما کاربری‌های دیگر از جمله اراضی بایر، اراضی کشاورزی و باغات و پارک‌ها با کاهش مساحت روبه‌رو بوده‌است. همچنین، نقشه‌های ESDR نشان‌دهنده این هستند که علاوه بر اینکه بیشینه با کاهش روبه‌رو بوده و کمینه نیز افزایش داشته‌است، مساحت بسیار زیادی از محدوده شهر در قسمت کمبود عرضه خدمت ذخیره کربن قرار گرفته‌اند. این بدین معناست که عرصه‌های بیشتری در این دهستان با بیشتربودن تقاضای خدمت ذخیره کربن نسبت به عرضه آن روبه‌رو شده‌اند. نقشه‌های ESDR دهستان جی، کراچ، قهاب شمالی و جنوبی و برآن شمالی و جنوبی بیان‌کننده این موضوع هستند که بیشینه این نرخ کاهش داشته و کمینه آن، افزایش؛ یعنی علاوه بر اینکه مساحت مناطقی که عرضه خدمت ذخیره کربن بیشتر از تقاضای آن بوده، کمتر شده‌است، مقدار عددی نرخ ESDR نیز کاهش چشمگیری را در عرضه و افزایش در تقاضا را نشان می‌دهد. برخلاف همه دهستان‌ها، دهستان محمودآباد در طی ۲۰ سال با کاهش مساحت در کاربری انسان‌ساخت روبه‌رو بوده و همزمان، اراضی بایر با افزایش مساحت، بیش از ۷۰ درصد این دهستان را اشغال کرده‌است. نرخ عرضه و تقاضا نیز نشان‌دهنده کاهش عرضه و افزایش تقاضای خدمت ذخیره کربن است که این پدیده در مساحت‌های بیشتری در طی ۲۰ سال گسترش یافته‌است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای ارزیابی ساختاری امنیت اکولوژیکی بخش مرکزی شهرستان اصفهان، به محاسبه نرخ عرضه و تقاضای خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ پرداخته شد. در مقایسه با سایر مطالعات داخلی انجام‌شده، پژوهش حاضر با بررسی تغییر کاربری اراضی از طریق تصاویر ماهواره‌ای لندست و ساخت نقشه‌های کاربری اراضی با به‌کارگیری سامانه گوگل‌ارث‌انجین در یک دوره زمانی بیست‌ساله از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ و اجرای نرم‌افزار InVEST برای مدلسازی ذخیره کربن، این امکان را فراهم ساخته‌است که بتوان تغییرات ذخیره کربن را به شکل مکانی در مقیاس منطقه‌ای تجسم کرد و به بررسی نقش زیرساخت‌های سبز که مهم‌ترین نقش را در تأمین و عرضه خدمات اکوسیستمی و درنهایت حفظ امنیت اکولوژیکی شهری دارند، پرداخت.

اولاً نتایج نشان داد که ماتریس خدمات اکوسیستم می‌تواند تجسم توزیع فضایی پتانسیل خدمات اکوسیستم را برای عرضه، جریان و تقاضا تسهیل کند؛ بنابراین نرخ عرضه خدمات اکوسیستم و نسبت عرضه به تقاضا شاخص‌های

مفیدی برای مقایسه مکانی و زمانی وضعیت خدمات اکوسیستم در مناطق مختلف هستند. همان طور که کشتکار و سیاح‌نیا (۱۳۹۹) در پژوهش خود بیان کردند، حفظ ساختار یک اکوسیستم که منتج به حفظ پیوند کاربری‌های زمین و عملکردهای آن می‌شود، یک راه اساسی برای کاهش تعارض است که در نهایت به توسعه پایدار و حفظ امنیت اکولوژیکی خواهد شد (کشتکار و سیاح‌نیا، ۱۳۹۹: ۵).

ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2016: 5) نیز در تحقیق خود، شناسایی منابع اکولوژیکی که شاخصی برای پایداری الگوی امنیت اکولوژیکی است را براساس توانایی عرضه پایدار و برآورد تقاضای خدمات اکوسیستم در لکه‌های سیمای سرزمین دانستند. براساس یافته‌های این پژوهش، افزایش مساحت مناطقی که نرخ ESDR منفی داشته و نسبت تقاضای آن‌ها از عرضه خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن منطقه بیشتر است، به خصوص در مرکز شهر اصفهان و حومه آن، در طی ۲۰ سال افزایش چشمگیری داشته است که براساس عوامل تأثیرگذار معرفی شده در این پژوهش، می‌تواند دو دلیل اصلی داشته باشد: (۱) افزایش انتشار گاز گلخانه‌ای کربن‌دی‌اکسید بر اثر افزایش جمعیت، استفاده از سوخت‌های فسیلی بیشتر و حتی در مواردی نامطلوب و (۲) کاهش و تخریب پوشش گیاهی و سیر قهقرایی اکوسیستم‌های طبیعی. با توجه به آمار و اطلاعات به دست آمده و مطالعه روند عوامل مؤثر بر کاهش نرخ عرضه نسبت به تقاضا در بخش مرکزی شهرستان اصفهان و با توجه به جدول ۴ که نشان‌دهنده افزایش ۸۴ درصدی انتشار CO₂ در طی ۲۰ سال و کاهش ۳۴ درصدی پوشش گیاهی است، به این نتیجه می‌رسیم که افزایش انتشار کربن‌دی‌اکسید، تأثیر بیشتری بر ارائه خدمت ذخیره کربن نسبت به تخریب و کاهش پوشش گیاهی و لکه‌های سبز داشته است.

جدول ۴. مقایسه تغییرات انتشار کربن و پوشش گیاهی در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۰۰

عوامل مؤثر	۲۰۰۰	۲۰۲۰	تغییرات	درصد تغییرات
پوشش گیاهی (هکتار)	۵۱۰۷۰۰۸۶	۳۳۲۰۷۰۷۵	-۱۷۸۶۳۰۱	-۳۴.۹۷۷
انتشار CO ₂ (تن بر هکتار)	۸۰۵.۲۳۸	۱۴۸۲.۴۱	۶۷۷.۱۷۲	۸۴.۰۹۵۸۸

(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۱)

عرضه پایدار خدمت ذخیره کربن با گسترش شهری و تخریب پوشش گیاهی باید مورد توجه قرار گیرد؛ زیرا برای دستیابی به توسعه پایدار انسانی و طبیعی، خدمات ارائه شده توسط اکوسیستم‌ها باید با تقاضای روزافزون انسان مطابقت داشته باشد. در این صورت است که می‌توان یک الگوی امنیت اکولوژیکی پایدار برای سیمای سرزمین ایجاد کرد. همچنین، همان طور که در دیدگاه جهانی تاب‌آوری هم مطرح شده است، دو استراتژی کلی برای افزایش تاب‌آوری و حفظ عملکرد پایدار وجود دارد: کاهش و سازگاری. به طور خلاصه نتایج این پژوهش نیز در تأیید این دو استراتژی اذعان می‌کند که با کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای مثل CO₂ یا افزایش جذب آن‌ها و همچنین انطباق سیستم‌های انسانی و طبیعی در مواجهه با اثرات کنونی و پیش‌بینی شده تغییرات اقلیمی، می‌توان امنیت یک

اکوسیستم شهری را در برابر اختلالات خارجی غیرقابل پیش‌بینی یا عدم قطعیت پارامترهای داخلی، افزایش داد و به اصطلاح، اکوسیستم را مستحکم‌تر کرد (Mousavi et al., 2018: 68; Mousavi et al., 2017: 328). در نتیجه می‌توان این‌طور بیان کرد که تعیین حد آستانه تاب‌آوری سیمای سرزمین می‌تواند وضعیت امنیت اکولوژیکی آن را مشخص کند. از طرفی بهبود الگوی امنیت اکولوژیکی منجر به بهبود وضعیت تاب‌آوری منطقه نیز می‌شود. نکته قابل توجه در ارائه راهکارها براساس نتایج به دست آمده از این پژوهش این است که کارشناسان و متخصصان باید دنبال راهکارها و استراتژی‌هایی باشند که درصدد افزایش عرضه خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن یا کاهش تقاضای آن برآیند. به عبارتی دیگر یا باید مانع افزایش بیشتر گازهای گلخانه‌ای مثل کربن‌دی‌اکسید شد، یا باید ذخیره و جذب کربن را افزایش داد. در علوم محیط‌زیست این استراتژی‌ها به مدیریت منبع تولید و منبع ذخیره برمی‌گردد.

پیشنهادها

دو پیشنهاد کلی برای اقدام متقابل برای کمک به کاهش کمبودها و عدم تطابق نرخ عرضه و تقاضای خدمت ذخیره کربن در آینده وجود دارد: اول، بهینه‌سازی الگوی فضایی فضای سبز و دوم کنترل انتشار کربن‌دی‌اکسید. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، علاوه بر خدمت ذخیره کربن، خدمات اکوسیستمی دیگر را برای سنجش امنیت اکولوژیکی در جنبه‌های مختلف ارزیابی کرده و تأثیرات تغییرات هر خدمت بر سطح امنیت اکولوژیکی و حتی خدمات دیگر نیز مطالعه شود.

منابع

حسن پور، پرستو؛ سیاح‌نیا، رومینا؛ اسماعیل‌زاده، حسن. (۱۳۹۹). ارزیابی ساختار اکولوژیکی فضای سبز شهری با رویکرد سیمای سرزمین مطالعه موردی: منطقه ۲۲ تهران. فصلنامه علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی؛ پژوهشکده علوم محیطی، دوره هجدهم و شماره ۱، صص ۱۸۷-۲۰۲.

<https://doi.org/10.29252/envs.18.1.187>

رضایی سنگدهی، سید مهدی؛ فلاح، اصغر؛ لطیفی، هومن؛ نظریانی، نسترن. (۱۴۰۲). مدل‌سازی ذخیره کربن روی زمینی با استفاده از تصاویر ماهواره‌های Sentinel ۱, ۲ و روابط پارامتریک و ناپارامتریک (مطالعه موردی: جنگل‌های سری سه سنگده). سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بوشهر، دوره چهاردهم، شماره ۳، صص ۲۱-۲۴.

https://girs.bushehr.iau.ir/article_690665.html?lang=fa

سجادی قائم‌مقامی، ساره السادات؛ سیاح‌نیا، رومینا؛ مبرقی دینان، نغمه؛ مخدوم فرخنده، مجید. (۱۴۰۰). ارزشیابی پیامدهای رشد شهری بر خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن (مطالعه موردی: زیرحوزه‌های آبریز شهر کرج). سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بوشهر، دوره دوازدهم، شماره ۱، صص ۲۰-۳۷.

https://girs.bushehr.iau.ir/article_677995.html?lang=fa

سیاح‌نیا، رومینا؛ مخدوم، مجید؛ فریادی، شهرزاد. (۱۳۹۶). نمایه‌های اکولوژیکی در ارزیابی توان رشد و توسعه شهری (بررسی موردی: کلانشهر تهران). فصلنامه علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی؛ پژوهشکده علوم محیطی، دوره پانزدهم، شماره ۱، صص ۷۷-۸۸.

https://envs.sbu.ac.ir/article_97820.html?lang=fa

عبداللهی، صدیقه؛ ایلدرمی، علیرضا. (۱۴۰۱). ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستمی؛ مفاهیم و روش‌ها. انسان و محیط‌زیست، انجمن متخصصان محیط زیست ایران، دوره بیستم، شماره ۱، صص ۱-۱۸.

<https://doi.net/dor/20.1001.1.15625532.1401.20.1.1.0>

عبداللهی، صدیقه؛ ایلدرمی، علیرضا؛ سلمان ماهینی، عبدالرسول؛ فاخران، سیما. (۱۳۹۹). تعیین مناطق همگن عرضه خدمات اکوسیستمی در بخش مرکزی استان اصفهان. سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بوشهر، دوره یازدهم، شماره ۱، صص ۲۹-۴۷.

[doi: 10.30495/girs.2020.672371](https://doi.org/10.30495/girs.2020.672371)

فرج‌الهی، اصغر؛ عسگری، حمیدرضا؛ اونق، مجید؛ محبوبی، محمدرضا؛ سلمان ماهینی، عبدالرسول. (۱۳۹۴). پایش و پیش‌بینی روند تغییرات مکانی و زمانی کاربری/ پوشش اراضی (مطالعه موردی: منطقه مراوه‌تپه، گلستان). سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بوشهر، دوره ششم، شماره ۴، صص ۱-۱۴.

https://girs.bushehr.iau.ir/article_518869.html?lang=fa

کشتکار، مصطفی؛ سیاح‌نیا، رومینا. (۱۳۹۹). پایش امنیت اکولوژیک شهرستان اصفهان با رهیافت خدمات اکوسیستمی. جغرافیا و پایداری محیط، دانشگاه رازی کرمانشاه، دوره دهم، شماره ۴، صص ۹۱-۱۰۷.

<https://doi.org/10.22126/ges.2021.5975.2329>

موسوی، سید محسن؛ فلاحتکار، سامره؛ فرج‌زاده، منوچهر. (۱۳۹۹). نقش جریان‌ات باد بر منشأ غلظت گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن در مقیاس استانی. علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دوره بیست‌ودوم، شماره ۶، صص ۱۴۷-۱۶۰.

https://jest.srbiau.ac.ir/article_14447.html?lang=fa

References

Adelisardou, 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*, 19(7), 5929-5944.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-021-03676-6>

Borhani, F., Shafiepour Motlagh, M., Ehsani, A. H., Rashidi, Y., Maddah, S., & Mousavi, S. M. (2023). On the predictability of short-lived particulate matter around a cement plant in Kerman, Iran: machine learning analysis. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(2), 1513-1526.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-022-04645-3>

Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.

<https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>

Fan, F., Wen, X., Feng, Z., Gao, Y., & Li, W. (2022). Optimizing urban ecological space based on the scenario of ecological security patterns: The case of central Wuhan, China. *Applied Geography*, 138, 102619.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143622821002356>

Ghayoumi, R., Charles, A., & Mousavi, S. M. (2023). A multi-level analysis of links between government institutions and community-based conservation: insights from Iran. *Ecology and Society*, 28(2).

<https://ecologyandsociety.org/vol28/iss2/art33/>

Ghosh, S., Chatterjee, N. D., & Dinda, S. (2021). Urban ecological security assessment and forecasting using integrated DEMATEL-ANP and CA-Markov models: A case study on Kolkata Metropolitan Area, India. *Sustainable Cities and Society*, 68, 102773.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670721000652>

- Golkar, F., & Mousavi, S. M. (2022). Variation of XCO₂ anomaly patterns in the Middle East from OCO-2 satellite data. *International Journal of Digital Earth*, 15(1), 1219-1235.
<https://doi.org/10.1080/17538947.2022.2096936>
- Li, J., Jiang, H., Bai, Y., Alatalo, J. M., Li, X., Jiang, H., ... & Xu, J. (2016). Indicators for spatial-temporal comparisons of ecosystem service status between regions: A case study of the Taihu River Basin, China. *Ecological Indicators*, 60, 1008-1016.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X15004860>
- Mohaghegh, M. S., Dinan, N. M., Vafaeinejad, A., Sobhanardakani, S., & Monavari, S. M. (2022). Carbon sequestration potential as affected by air quality parameters and landscape metrics under urbanization. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(14), 1-14.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-022-10535-2>
- Mousavi, S. M., Dinan, N. M., Ansarifard, S., & Sonnentag, O. (2022). Analyzing spatio-temporal patterns in atmospheric carbon dioxide concentration across Iran from 2003 to 2020. *Atmospheric Environment: X*, 14, 100163.
<https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2022.100163>
- Mousavi, S. M., Dinan, N. M., Ansarifard, S., Borhani, F., Ezimand, K., & Naghibi, A. (2023). Examining the Role of the Main Terrestrial Factors Won the Seasonal Distribution of Atmospheric Carbon Dioxide Concentration over Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 51(4), 865-875.
<https://doi.org/10.1007/s12524-022-01650-4>
- Mousavi, S. M., Falahatkar, S., & Farajzadeh, M. (2017). Monitoring of monthly and seasonal methane amplitude in Iran using GOSAT data. *Physical Geography Research Quarterly*, 49(2), 327-340.
https://jphgr.ut.ac.ir/article_62848_0168c358354548e26a4560412665569c.pdf
- Mousavi, S. M., Falahatkar, S., & Farajzadeh, M. (2018). Concentration in changes of CO₂ and CH₄ greenhouse gases relation to environmental variable in Iran. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 6(4), 65-79.
https://ijae.iut.ac.ir/browse.php?a_id=781&slc_lang=en&sid=1&printcase=1&hbnr=1&hmb=1
- Mousavi, S. M., Falahatkar, S., & Farajzadeh, M. (2020). The role of wind flow on sources of carbon dioxide concentration in the provincial scale. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(6), 147-160.
https://jest.srbiau.ac.ir/article_14447.html?lang=en
- Naroei, B., Barghjelveh, S., Esmaeilzadeh, H., & Zebardast, L. (2022). An Analysis of the Trend of Changes in the Regulatory Services Related to Carbon Sequestration in Tehran City affected by the Spatial Processes of Landscape Mosaic. *Town and Country Planning*, 14(1), 253-283. (*In Persian*).
https://jtcp.ut.ac.ir/article_86766_a4e6fc07b26df852352d65eda376568f.pdf?lang=en
- Pan, Z., He, J., Liu, D., Wang, J., & Guo, X. (2021). Ecosystem health assessment based on ecological integrity and ecosystem services demand in the Middle Reaches of the Yangtze River Economic Belt, China. *Science of The Total Environment*, 774, 144837.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720383704>
- Peng, J., Tian, L., Liu, Y., Zhao, M., & Wu, J. (2017). Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification. *Science of the Total Environment*, 607, 706-714.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896971731639X>
- Qiu, M., Yang, Z., Zuo, Q., Wu, Q., Jiang, L., Zhang, Z., & Zhang, J. (2021). Evaluation on the relevance of regional urbanization and ecological security in the nine provinces along the Yellow River, China. *Ecological Indicators*, 132, 108346.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X21010116>

Ramyar, R., Saeedi, S., Bryant, M., Davatgar, A., & Hedjri, G. M. (2020). Ecosystem services mapping for green infrastructure planning—The case of Tehran. *Science of the Total Environment*, 703, 135466.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719354592>

Sebastiani, A., Marando, F., & Manes, F. (2021). Mismatch of regulating ecosystem services for sustainable urban planning: PM10 removal and urban heat island effect mitigation in the municipality of Rome (Italy). *Urban Forestry & Urban Greening*, 57, 126938.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S161886672030755X>

Sharp, R., Chaplin-Kramer, R., Wood, S., Guerry, A., Tallis, H., & Ricketts, T. H. (2014). InVEST user's guide: integrated valuation of environmental services and tradeoffs. The Natural Capital Project. In Stanford Woods Institute for the Environment. University of Minnesota's Institute on the Environment, the Nature Conservancy & WW Foundation Stanford.

<https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>

van Oorschot, J., Sprecher, B., van't Zelfde, M., van Bodegom, P. M., & van Oudenhoven, A. P. (2021). Assessing urban ecosystem services in support of spatial planning in the Hague, the Netherlands. *Landscape and Urban Planning*, 214, 104195.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204621001584>

Vignoli, F., de Luca, C., & Tondelli, S. (2021). A spatial ecosystem services assessment to support decision and policy making: The case of the city of Bologna. *Sustainability*, 13(5), 2787.

<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/5/2787>

Xu, C., Pu, L., Zhu, M., Li, J., Chen, X., Wang, X., & Xie, X. (2016). Ecological security and ecosystem services in response to land use change in the coastal area of Jiangsu, China. *Sustainability*, 8(8), 816.

<https://www.mdpi.com/2071-1050/8/8/816>

Yuan, Y., Bai, Z., Zhang, J., & Xu, C. (2022). Increasing urban ecological resilience based on ecological security pattern: A case study in a resource-based city. *Ecological Engineering*, 175, 106486.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857421003414>

Zhang, R., Pu, L., Li, J., Zhang, J., & Xu, Y. (2016). Landscape ecological security response to land use change in the tidal flat reclamation zone, China. *Environmental monitoring and assessment*, 188(1), 1-10.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-015-4999-z>