



Assessment of ecosystem services in the Tehran metropolitan and analysis of their sensitivity to climate drivers

Salimeh Sadeghi ^a, Aliakbar Shamsipour ^b , Faeze Shoja ^c , Masoumeh Moghbel ^d 

^a. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Teheran, Iran

Email: salimeh.sadeghi2018@gmail.com

^b. (Corresponding Author) Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Teheran, Iran

Email: shamsipr@ut.ac.ir

^c. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Teheran, Iran

Email: Faeze.shoja@yahoo.com

^d. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Teheran, Iran

Email: moghbel@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Carbon storage,
Climate change,
Habitat quality,
Land Investment,
LULC.

The objective of this study is to assess the impact of land use/land cover (LULC) changes in Tehran metropolis and its suburbs on carbon storage and habitat quality using models available in InVEST software. Therefore, the first step was the calculation of carbon storage values in four primary pools, and then we estimated the sources of threats, the distance of threat impact, and the sensitivity, quality and degradation levels of habitats in each of the LULC classes. To investigate the relationship between ecosystem services (ESs) and the climatic conditions of the region, the trend of climatic components affecting ES in the study area was evaluated and the correlation between the two factors was determined. The findings revealed that, out of all 4 pools, the Chitgar Forest Park and Tehran's northeastern regions had the greatest carbon absorption values, with a maximum annual absorption rate of 650 tonnes of carbon. The output of the habitat quality also showed that the most favorable habitat quality with 16% coverage (values between 0.7 and 1) belongs to the northern parts of the region, and the habitat quality gradually decreases towards the southern and especially the southwestern regions. Finally, it was found that ES have a direct and inverse relationship with precipitation and temperature, respectively, by looking at the linear relationship between ESs and climate parameters in the study area. Although the values of correlation coefficient between the factors were low (temperature and ES=0.221, precipitation and ES=0.234), but the increasing trend of temperature and significant decrease of precipitation (confidence level 0.95) in the period 1991-2022 and LULC changes due to human activities cause the favorable conditions of ecosystem services to face challenges in the future of Tehran metropolis.

Received:

26 July 2023

Received in revised form:

31 October 2023

Accepted:

28 November 2023

Available online:

24 December 2023

pp. 65-86

Citation: Sadeghi, S., Shamsipour, A. A., Shoja, F., & Moghbel, M. (2023). Assessment of ecosystem services in the Tehran metropolitan and analysis of their sensitivity to climate drivers. *Journal of Sustainable City*, 6 (4), 65-86.

 <http://doi.org/10.22034/JSC.2024.415781.1737>



© The Author(s)

Publisher: Iranian Geography and Urban Planning Association.

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Extended Abstract

Introduction

Ecosystem services (ES) refer to the benefits derived from the structure and function of ecosystems and play an important role in human well-being and welfare (Adelisardou et al., 2021). The two interconnected approaches of carbon sequestration and habitat provisioning are ecosystem services that have the potential to mitigate climate change and biodiversity loss caused by the built environment (Varshney et al., 2022). The rapid urbanization of Tehran in recent decades has led to significant disruptions to both the natural and urban landscape. Sustainable population growth, industrialization, and urbanization processes have led to the reduction or destruction of natural vegetation, the development of urban constructions, various human activities (such as transportation and production centres), and drastic changes in land cover/land use (LULC). These factors have also contributed to an increase in energy consumption, which has resulted in elevated surface temperatures in urban environments. Under these conditions, the current research aims to examine two ecosystem services - regulatory services (carbon storage) and support services (habitat quality) - provided by the InVEST model. The research will focus on the role and impact of these two crucial services in enhancing the quality of the environment and analyzing the climate of the Tehran metropolis.

Methodology

The current research aims to investigate the effect of land use/land cover on changes in carbon storage (regulating service) and habitat quality (supporting service) at spatial and regional scales using the InVEST software. The carbon storage model integrates land use and land cover (LULC) data with information on carbon storage inventories in four main carbon storage pools: aboveground biomass, belowground biomass, deadwood, and soil organic carbon. This integration enables calculations and spatial distribution of inventories and carbon storage in the area.

To conduct habitat quality modelling, several components are necessary, including the (LULC) map, threat sources, impact weight tables, impact distance for each threat, and the sensitivity of each habitat to the threat source. One of the important inputs of the InVEST model is the land use/land cover map. In the present study, the classification of local climate zones (LCZ) was utilized to calculate and generate a land use and land cover (LULC) map for the city and suburbs of Tehran.

Results and Discussion

The results showed that the highest amount of carbon storage on an annual scale is associated with aboveground biomass and soil organic carbon, while the lowest amounts are found in deadwood and belowground biomass. The aboveground biomass in region 22, specifically the Chitgar Forest Park area and the northeastern areas of the region where trees are densely and sparsely distributed, has the highest carbon storage capacity. It is estimated to be between 218 and 335 tons per hectare per year. After that, the southern and southeastern parts of region 15, as well as the northern and eastern parts of regions 8 and 14, which are characterized by open mid-rise land cover, are ranked next in terms of carbon storage. The results of the Habitat Quality Index also showed that the highest amount of habitat quality, indicated by a 16% coverage (values between 0.7 and 1), was concentrated in the northern parts of the study area. The habitat quality gradually decreased towards the southern and, in particular, the southwestern areas. In 65% of the study area, the habitat quality is extremely low, primarily due to urban development and settlements in the southwest of the city. The central (10, 11, and 12) and western (21 and 22) areas of the municipality have the lowest habitat quality due to the lack of urban green spaces, the destruction of existing ones, and the expansion of settlements and industrial complexes. Finally, to measure the sensitivity of ecosystem services to climate, we analyzed the effect of two primary climate components: temperature and precipitation, on ecosystem services. The

results showed that although the correlation coefficients between the studied series were relatively low (temperature and ES=0.221, precipitation and ES=0.234), the regression analysis indicates that both ecosystem services will decrease under conditions of increasing temperature and decreasing precipitation.

Conclusion

In this study, we evaluated the spatial changes of two carbon storage services and habitat quality concerning land use/land cover change in the Tehran metropolis and its surrounding suburbs. The results showed that the land is covered with dense and scattered trees, as well as open mid-rise, sparsely built, open low-rise, and low plants. These areas had the highest absorption values in all four carbon pools. In this sense, Region 22 and the eastern part of the Northern Region had the best conditions for carbon absorption. The output of InVEST habitat quality also indicated that the highest amount of habitat quality, with a coverage of 16% (values between 0.7 and 1), is found in the northern parts of the basin. Gradually, the quality of the habitat decreases towards the southern areas, especially in the southwest. Although the obtained results indicate the favourable ecological potential of some areas in the metropolis of Tehran, climate change and human activities have severely affected this potential. Based on the linear relationship between the normalized series of climatic components (temperature and precipitation) and ES, there was an inverse relationship between temperature and ES and a direct relationship between precipitation and ES. As a result, both regulatory services and ecosystem support will decrease under conditions of increasing temperature and decreasing precipitation.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

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

سنجش خدمات اکوسیستمی کلان شهر تهران و تحلیل میزان حساسیت آن‌ها به محرک‌های اقلیمی*

سلیمه صادقی^۱، علی اکبر شمسی پور^۲، فائزه شجاع^۳، معصومه مقبل^۴

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. Email: salimeh.sadeghi2018@gmail.com

۲- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. Email: shamsipr@ut.ac.ir

۳- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. Email: faeze.shoja@yahoo.com

۴- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. Email: moghbel@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف پژوهش حاضر ارزیابی اثر تغییرات پوشش/کاربری زمین (LULC) کلان‌شهر تهران و حومه آن بر میزان ذخیره کربن و کیفیت زیستگاه با مدل‌های موجود در نرم‌افزار InVEST است. بنابراین نخست مقادیر ذخیره کربن در ۴ مخزن اصلی محاسبه و سپس منابع تهدید منطقه، فاصله اثرگذاری تهدید و میزان حساسیت، کیفیت و تخریب زیستگاه‌ها در هر یک از طبقات LULC برآورد گردید. در نهایت با هدف واکاوی ارتباط بین خدمات اکوسیستم (ESs) و شرایط اقلیمی، روند مؤلفه‌های اقلیمی مؤثر بر ESs در حوضه مطالعاتی ارزیابی و همبستگی بین دو عامل مشخص شد. نتایج نشان داد محدوده پارک چیتگر و نواحی شمال شرق حومه شهر، با بیشینه میزان جذب ۶۵۰ تن کربن در سال، بالاترین مقادیر جذب کربن را در هر ۴ مخزن دارا هستند. خروجی کیفیت زیستگاه InVEST نیز حاکی از این بود که مطلوب‌ترین کیفیت زیستگاه با پوشش ۱۶ درصدی (ارزش‌های بین ۰/۷ تا ۱) متعلق به بخش‌های شمالی حوضه است و به‌مرور به سمت نواحی جنوبی و به‌ویژه جنوب غربی، کیفیت زیستگاه کاهش پیدا می‌کند. در نهایت با تحلیل رابطه خطی بین ESs و پارامترهای اقلیمی در پهنه مورد مطالعه این نتیجه حاصل شد که ESs با بارش و دما به ترتیب ارتباط مستقیم و معکوسی دارند؛ هرچند مقادیر ضریب همبستگی بین عامل‌ها پایین بود (دما و $ES=0.221$ ، بارش و $ES=0.234$) اما روند معنی‌دار افزایشی دما و کاهش بارش (سطح اطمینان ۰/۹۵) در دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۲ از یک‌سو و تغییرات LULC در نتیجه فعالیت‌های انسانی از سوی دیگر، امید به شرایط مطلوب خدمات اکوسیستمی در آینده کلان‌شهر تهران را به چالش می‌کشد.

واژگان کلیدی:

تغییرات اقلیمی،
ذخیره‌سازی کربن،
کیفیت زیستگاه،
پوشش زمین،
ارزش‌گذاری کربن.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۵/۰۴

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۱/۰۸/۰۹

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۹/۰۷

تاریخ چاپ:

۱۴۰۲/۱۰/۰۳

صص. ۸۶-۶۵

استناد: صادقی، سلیمه؛ شمسی پور، علی اکبر؛ شجاع، فائزه و مقبل، معصومه. (۱۴۰۲). سنجش خدمات اکوسیستمی کلان‌شهر تهران و تحلیل میزان حساسیت آن‌ها به محرک‌های اقلیمی. *مجله شهر پایدار*، ۶ (۴)، ۸۶-۶۵.

<http://doi.org/10.22034/JSC.2024.415781.1737>

ناشر: انجمن جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری ایران

© نویسندگان



* این مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم سلیمه صادقی به راهنمایی نویسنده دوم و مشاوره نویسندگان سوم و چهارم در گروه جغرافیای طبیعی دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران می‌باشد.

مقدمه

خدمات اکوسیستم (ESS) به مزایایی اشاره دارند که از ساختار و عملکرد اکوسیستم‌ها ناشی شده و سهم عمده‌ای در بهزیستی و رفاه انسان ایفا می‌کنند (Adelisardou et al., 2021). با این حال، در شرایط فعلی حفاظت از این اکوسیستم‌ها و افزایش خدمات آن‌ها به دلیل فشار زیاد ناشی از فعالیت‌های انسانی، تغییر اقلیم، رشد مداوم جمعیت، صنعتی شدن، شهرنشینی، آتش‌سوزی جنگل‌ها و ... (Tolessa et al., 2017; Xie et al., 2017) به یک چالش جهانی فوری تبدیل شده است (Ouyang et al., 2016). یکی از مهم‌ترین خدمات اکوسیستمی که در حال حاضر باعث ایجاد شرایط بحرانی در مقیاس جهانی گردیده، کاهش ذخیره کربن در خاک و انتشار گاز کربنیک به جو می‌باشد که با تغییر ترکیب جو، منجر به تغییرات شدید اقلیمی، الگوهای بارشی، دوره‌های خشکی و همچنین وقوع بارش‌های سیل‌آسا می‌گردد (شاهی و همکاران، ۱۳۹۷). استفاده بیش از حد از سوخت‌های فسیلی برای انرژی، همچنین تغییرات کاربری/ پوشش زمین (LULC) مانند تبدیل فضاهای سبز به مناطق شهری و زمین‌های زراعی، ذخیره کربن را کاهش داده و تبادل شار کربن را مختل می‌کند (Li et al., 2022) و از این حیث محیط‌های شهری منعکس‌کننده چشمگیرترین تغییرات در LULC هستند (Allan et al., 2022). به همین دلیل ذخیره‌سازی و ترسیب کربن از مهم‌ترین و شناخته‌شده‌ترین خدمات اکوسیستم است که از طریق تنظیم اقلیم در مقیاس‌های خرد و محلی تا جهانی، به کاهش و تعدیل سریع تغییرات اقلیمی منجر می‌شود (Pagiola, 2008). خدمات اکوسیستم اغلب به‌طور پیچیده به هم مرتبط هستند (Hou et al., 2021) و روابط آن‌ها برحسب هم‌افزایی، مبادله یا استقلال ارزیابی و تفسیر می‌شود. هم‌افزایی زمانی است که توسعه و بهبود یک خدمت اکوسیستمی سبب بهبود دیگر خدمات می‌شود. معاوضه زمانی اتفاق می‌افتد که یک خدمت اکوسیستمی بهبود یافته درحالی که دیگری کاهش می‌یابد. هنگامی که تغییر یک خدمت اکوسیستمی هیچ رابطه آشکاری با دیگری نداشته باشد، ES ها مستقل هستند. ترسیب کربن و تأمین زیستگاه، رویکردهای به‌هم‌پیوسته‌ای هستند که به‌طور بالقوه می‌توانند تغییرات اقلیمی و از دست دادن تنوع زیستی را که به محیط ساخته‌شده نسبت داده می‌شود، کاهش دهند (Varshney et al., 2022) اصطلاح «کیفیت زیستگاه» به ظرفیت یک اکوسیستم برای ارائه شرایط مطلوب با هدف رشد طولانی‌مدت اشاره دارد و تا حدی نشان‌دهنده تنوع زیستی منطقه است (Wang et al., 2022). بنابراین استفاده صحیح از زمین و شیوه‌های مدیریت علمی می‌تواند تا ۶۰ - ۷۰ درصد کربن تخلیه‌شده را دوباره جذب کند (Fellman et al., 2015). با توجه به مطالب ذکرشده، هدف اصلی پژوهش حاضر این است که دو خدمت تنظیمی (ذخیره‌سازی کربن) و حمایتی (کیفیت زیستگاه) اکوسیستم را برای نخستین بار در کلان‌شهر تهران بررسی نموده و نقش و تأثیر این دو مهم را در بهبود کیفیت محیط و شرایط اقلیمی منطقه مورد واکاوی قرار دهد.

در راستای رسیدن به این هدف، بسته نرم‌افزاری ارزش‌گذاری یکپارچه خدمات اکوسیستم و مبادلات (InVEST) مورد استفاده قرار گرفت. مدل‌های موجود در بسته نرم‌افزاری InVEST به دلیل قابلیت نمایش نتایج ارزیابی و دسترسی به داده‌ها و سهولت عملیاتی، در مقیاس‌های مختلف و به‌طور گسترده برای سنجش و شبیه‌سازی خدمات مختلف اکوسیستم‌های زمینی توسط پژوهشگران به کار گرفته شده است (Long & Zhou, 2022). باببار^۴ و همکاران (۲۰۲۱) مقدار ترسیب کربن را بر اساس تغییر کربن کل، در دو سناریو مختلف با استفاده از زنجیره مارکوف^۵ و مدل ذخیره‌سازی و

1 Ecosystem Services

2 Land use/Land cover

3 Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs

4 Babbar

5 Markov chain

ترسیب کربن (CSS) در نرم‌افزار InVEST طی سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۸، ارزیابی و برای سال ۲۰۳۵ پیش‌بینی نمودند و شیوه‌های مدیریت جنگل را مهم‌ترین عامل انتشار کمتر کربن در سال ۲۰۳۵ نسبت به سال ۲۰۱۸ معرفی کردند. مطابق مطالعه زو^۱ و همکاران (۲۰۲۱) تخریب مراتع در مناطق خشک شمال غربی چین عامل اصلی کاهش ذخیره کربن است و چنانچه الگوی توسعه تغییر نکند، بر اساس پیش‌بینی مدل، ذخیره‌سازی کربن در آینده نیز با شدت بیشتر به کاهش خود ادامه خواهد داد. نتایج پژوهش لیو^۲ و همکاران (۲۰۲۲) حاکی از این است که تغییرات LULC در طول سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۹ در جزیره هاینان^۳ چین، ذخیره‌سازی کربن را حدود ۱/۵۰ (تراگرم (Tg) یا میلیون تن) کاهش داده است. افزون بر این، پژوهشگران داخلی نیز به اهمیت ذخیره‌سازی و ترسیب کربن در ارتباط با تغییرات LULC توجه کرده‌اند: اسدالهی و سلمان ماهینی (۱۳۹۶) با اشاره به نقش تغییر کاربری اراضی بر عرضه خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن به این نتیجه رسیدند که روند تغییر کاربری اراضی با کاهش ذخیره کربن در بخش شرقی حوزه آبخیز گرگان‌رود همراه بوده است. سنجش اثرات ناشی از تغییر کاربری زمین و برآورد هزینه‌های ائتلاف ظرفیت ذخیره‌سازی و ترسیب کربن در ناحیه جنگلی هیرکانی با کاربست مدل CSS در نرم‌افزار InVEST گویای این بود که ۱۸ درصد از پوشش جنگلی متراکم و ۵۵ درصد از پوشش جنگلی کم تراکم طی سه دهه کاهش یافته که موجب کاهش توان ترسیب کربن در منطقه شده است (بادام فیروز و همکاران، ۱۳۹۸). کاربرد مدل CSS در بررسی روند تغییرات ذخیره‌سازی و ترسیب کربن بر رشد و توسعه شهری شهر بندرعباس نیز نشان داد مناطق بایر و مرتع طی دوره مورد مطالعه (۲۰۰۰-۲۰۲۰) کاهش و کاربری‌های انسان‌ساخت، پهنه‌های آبی و کشاورزی افزایش یافته‌اند (جهاندار و همکاران، ۱۴۰۱). در ارتباط با اهمیت مطالعه خدمت اکوسیستمی کیفیت زیستگاه و خطرات زیست‌محیطی از بین رفتن زیستگاه‌های طبیعی نیز می‌توان به پژوهش ژانگ و همکاران (۲۰۲۲) اشاره کرد؛ علاوه بر این، چن^۴ و همکاران (۲۰۲۳) پارامترهای مؤثر بر کیفیت زیستگاه را در ۳۰ استان چین از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ با استفاده از مدل کیفیت زیستگاه (HQ) نرم‌افزار InVEST ارزیابی کرده و تفاوت‌های مکانی آن را با همبستگی خودکار فضایی مورد مطالعه قرار دادند. دانشی و همکاران (۱۳۹۹) نیز در پژوهشی با پیش‌بینی اثرات تغییر کاربری اراضی بر کیفیت زیستگاه حوزه سد نرمام در استان گلستان به این نتیجه رسیدند که در اثر تغییرات شدید کاربری اراضی و تبدیل اراضی طبیعی به‌ویژه جنگلی به اراضی کشاورزی و مسکونی، کیفیت زیستگاه‌ها از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ کاهش یافته و تخریب سرزمین نیز به همان میزان افزایش پیدا کرده است.

با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات الگوی منظر ناشی از فعالیت‌های انسانی از مهم‌ترین عوامل محرکه‌ای است که خدمت اکوسیستمی CSS و HQ را به‌طور چشمگیری تحت تأثیر قرار می‌دهد (Wang et al., 2022; Li et al., 2023; He et al., 2023; Ding et al., 2023)؛ سجادی قائم‌مقامی، ۱۴۰۰؛ نارویی و همکاران، ۱۴۰۱) و از سوی دیگر با پیش‌زمینه کنونی شهرنشینی جهانی، توسعه سریع ساخت‌وسازها، مطمئناً منجر به از بین رفتن اراضی طبیعی، تغییر توزیع فضایی کیفیت زیستگاه‌های منطقه‌ای و جریان مواد و انرژی می‌شود (Wang et al., 2023). در چنین شرایطی درک تغییرات فضایی خدمات مختلف اکوسیستم در یک منطقه، زمینه لازم برای توسعه برنامه‌ریزی و مدیریت کاربری زمین را فراهم خواهد کرد.

1 Carbon Sequestration and Storage

2 Zhu

3 Liu

4 Hainan

5 Chen

6 Habitat quality

رشد فیزیکی تهران در دهه‌های اخیر، اغتشاش‌های ساختاری مهمی در منظر طبیعی و شهری ایجاد کرده است. بررسی الگوهای فضایی- زمانی پوشش زمین در منطقه کلان‌شهری تهران نشان می‌دهد که در سال ۱۳۵۲ اراضی ساخته‌شده مساحتی حدود ۲۶ هزار هکتار را در بر گرفته که در سال ۱۳۹۲ با افزایش شایان توجه به بیش از ۱۵۵ هزار هکتار رسیده است (مهتاب تدبیر دلتا، ۱۴۰۲). تغییرات شدید LULC در این کلان‌شهر موجب افزایش مصرف انرژی و بالا رفتن دمای سطح زمین شده که این مسئله در نهایت منجر به تغییر شرایط اکولوژیکی و خرد اقلیم منطقه می‌گردد. با توجه به اینکه خدمات اکوسیستمی از عوامل کلیدی در دستیابی به بسیاری از اهداف توسعه پایدار در نواحی شهری هستند (Hawken et al., 2021)، پرسش اصلی پژوهش این است که وضعیت تنوع زیستی و دست‌نخورده‌گی، همچنین میزان ذخیره‌سازی کربن در کاربری‌های مختلف کلان‌شهر تهران، در شرایط فعلی به چه شکلی است و از طرف دیگر تغییر در این چشم‌اندازها، چه تأثیری بر شرایط اقلیمی منطقه مطالعاتی دارد؟

مبانی نظری

فرآیندهای اکوسیستم همکنشی‌های پیچیده میان اجزاء زیستی و غیر زیستی از طریق مجموعه‌ای از فعل‌وانفعالات فیزیکی، شیمیایی و زیستی هستند که ساختار اکوسیستم را به عملکرد و در نهایت به خدمات اکوسیستم تبدیل می‌کنند. خدمات اکوسیستم به خدمات و محصولات ارائه‌شده توسط یک اکوسیستم تحت شرایط اکولوژیکی مناسب و یکپارچگی ساختاری و عملکردی برای رفاه انسان اشاره دارد (محمدیاری و زرندیان، ۱۴۰۰). این خدمات شامل خدمات تأمین (تولید آب، غذا، منابع درمانی)، خدمات تنظیم (تنظیم شرایط آب‌وهوایی، تعدیل رویدادهای شدید، کنترل فرسایش و یا کنترل بیولوژیکی)، خدمات فرهنگی (مزایای معنوی، تفریحی، زیباشناختی و فرهنگی) و خدمات حمایتی (زیستگاه گونه‌ها و مراقبت از تنوع ژنتیکی) هستند (مثنوی و دبیری، ۱۳۹۶) که شرایط را برای زندگی بر روی کره زمین حفظ می‌کنند. بنابراین خدمات اکوسیستم کمک مستقیم و غیرمستقیم یک اکوسیستم به رفاه و بقای انسان است و ارزش‌گذاری اکوسیستم روشی برای تخصیص ارزش پولی به یک اکوسیستم با کالاها و خدمات آن است که اغلب به‌عنوان ارزش خدمات اکوسیستمی (ESV) از آن یاد می‌شود. با گسترش سریع شهرها، عدم تطابق بین توسعه شهری و توسعه اکولوژیکی رخ می‌دهد و ایجاد یک روش ارزیابی اکولوژیکی معتبر به‌طور فزاینده‌ای ضرورت می‌یابد (Shao et al., 2021). در سال ۲۰۰۰، سازمان ملل متحد خواستار این مهم شد که اکوسیستم‌های جهان و خدماتی که این اکوسیستم‌ها ارائه می‌کنند، همچنین رابطه بین سلامت انسان و سلامت اکوسیستم‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. این ارزیابی که ارزیابی اکوسیستم هزاره نامیده می‌شود، هم پیشرفت توسعه انسانی و هم هزینه‌های هنگفت این پیشرفت برای اکوسیستم‌های طبیعی در سراسر جهان را در نیمه دوم قرن بیستم شرح می‌دهد. بر اساس این گزارش چنانچه استفاده از اکوسیستم‌ها کنترل نشود، مشکلات کنونی در نحوه استفاده انسان از منابع به‌طور قابل توجهی منافع کمتری را برای نسل‌های آینده به همراه خواهد داشت (Sutton-Grier et al., 2014). در سال ۲۰۰۶، سه نویسنده کلیدی ارزیابی اکوسیستم هزاره، دست به ابتکاری جدید زدند و پروژه سرمایه طبیعی (NCP) را تعریف نمودند تا بر اساس آن دانش نظری خدمات اکوسیستمی را در عمل پیاده‌سازی نمایند. ابزار InVEST خروجی کلیدی پروژه مذکور می‌باشد که در دهه اخیر در گستره جهانی مورد استفاده قرار گرفته است. این ابزار و سری مدل‌های وابسته به آن می‌توانند برای تحلیل اثرات کاربری‌های مختلف زمین و سناریوهای مدیریتی بر روی تولید و تدارک خدمات اکوسیستمی مختلف و زیستگاه‌های واجد تنوع زیستی

1Ecosystem Service Value

2Natural Capital Project

مورد استفاده قرار گیرند (Polasky et al., 2011).

روش پژوهش

هدف پژوهش حاضر مطالعه تأثیر کاربری/پوشش زمین بر تغییرات ذخیره‌سازی کربن (خدمت تنظیمی اکوسیستم) و کیفیت زیستگاه (خدمت حمایتی) به شکل مکانی و در مقیاس منطقه‌ای با استفاده از نرم‌افزار InVEST است. مدل ذخیره و ترسیب کربن شامل دو ابزار ارزیابی بیوفیزیکی و ارزش‌گذاری اقتصادی است (Tallis et al., 2013; Sharp, 2018). ارزیابی بیوفیزیکی زمین با پوشش گیاهی و فضاها، سبز و جنگلی برای برآورد موجودی کربن ذخیره‌شده در محدوده شهر تهران انجام می‌شود. مدل برای انجام محاسبات لازم، اطلاعات پوشش/کاربری زمین را با داده‌های مربوط به موجودی ذخیره کربن در چهار مخزن اصلی ذخیره کربن شامل زیست‌توده بالای زمینی (اندام‌های هوایی درختان)، زیست‌توده زیرزمینی (ریشه‌ها)، مواد آلی مرده (شاخ و برگ مرده و لاش برگ‌ها) و کربن آلی خاک که توسط کاربر تهیه می‌شود، تلفیق می‌کند و توزیع فضایی کمیت‌های موجودی و ذخیره‌سازی را در پهنه محدوده شهری به صورت نقشه تولید می‌کند. تغییرات سالانه موجودی کربن برای کل حوضه مورد پژوهش از طریق محاسبه مجموع تغییرات در همه انواع طبقات LULC و طبق معادله ۱ به دست می‌آید (Aalde et al., 2006).

$$\Delta C_{AFOLU} = \Delta C_{FL} + \Delta C_{CL} + \Delta C_{GL} + \Delta C_{WL} + \Delta C_{SL} + \Delta C_{OL} \quad (1)$$

که در این رابطه ΔC = مجموع تغییرات سالانه موجودی کربن در یک محدوده، AFOLU = کشاورزی، جنگلداری و دیگر کاربری‌ها، FL = زمین جنگلی، CL = مزرعه، GL = مرتع، WL = تالاب، SL = سکونتگاه‌ها، OL = دیگر کاربری‌ها. همچنین تغییرات موجودی کربن برای یک طبقه از کاربری زمین (مثلاً پوشش جنگلی متراکم)، از طریق محاسبه مجموعی از تغییرات در هر چهار مخزن و طبق معادله ۲ به دست می‌آید (Aalde et al., 2006):

$$\Delta C_{LUI} = \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} + \Delta C_{DW} + \Delta C_{LI} + \Delta C_{SO} \quad (2)$$

که در این رابطه: ΔC_{LUI} = تغییرات موجودی کربن برای یک کاربری، AB = زیست‌توده بالای زمینی، BB = زیست‌توده زیرزمینی و DW = مواد آلی چوبی مرده، LI = برگ‌های مرده و SO = خاک‌ها.

برای تعیین داده‌های مربوط به موجودی ذخیره کربن در چهار مخزن اصلی ذخیره کربن، دقیق‌ترین روش انجام سنجش‌های مستقیم میدانی است که در پژوهش حاضر به دلیل محدودیت زمان و هزینه از داده‌های موجود در پانل بین دولتی تغییرات اقلیمی (IPCC, 2006) و راهنمای کاربر InVEST (Sharp et al., 2018) استفاده گردید.

مدل کیفیت زیستگاه بر این فرض استوار است که مناطقی با کیفیت زیستگاه بالا شامل تنوع زیستی بالاتر نیز هستند و تخریب زیستگاه بر تنوع زیستی منطقه اثر منفی می‌گذارد (Chu et al., 2018). بر این اساس، تغییرات کیفیت زیستگاه می‌تواند به طور مستقیم تغییرات منطقه‌ای تنوع زیستی را نشان دهد. از آنجایی که اندازه‌گیری تنوع زیستی به طور معمول به هزینه و زمان بسیار زیادی نیاز دارد (Chu et al., 2018)، کیفیت زیستگاه به عنوان یک نماینده برای چنین اندازه‌گیری استفاده می‌شود (Sharp et al., 2018).

برای مدل‌سازی کیفیت زیستگاه، نقشه LULC و منابع تهدید در فرمت رستری، مناطق حفاظت‌شده محدوده مورد مطالعه در ساختار برداری و جداول وزن تأثیر، فاصله اثرگذاری هر تهدید و میزان حساسیت هر زیستگاه به منابع تهدید با فرمت CSV تهیه و به مدل ارائه گردید. در این مدل تأثیر تهدیدها بر روی زیستگاه مورد نظر با واسطه چهار عامل تأثیر نسبی هر تهدید در فضا، فاصله بین زیستگاه و منبع تهدید، دسترسی به منابع تهدید و حساسیت نسبی هر نوع زیستگاه به هر تهدید تعیین می‌شود. مدل کیفیت زیستگاه InVEST بر اساس معادله (۳) تعریف می‌شود (Liang &

(Liu, 2017; Sharp et al., 2018)

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \quad (۳)$$

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{W_r}{\sum_{r=1}^R W_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (۴)$$

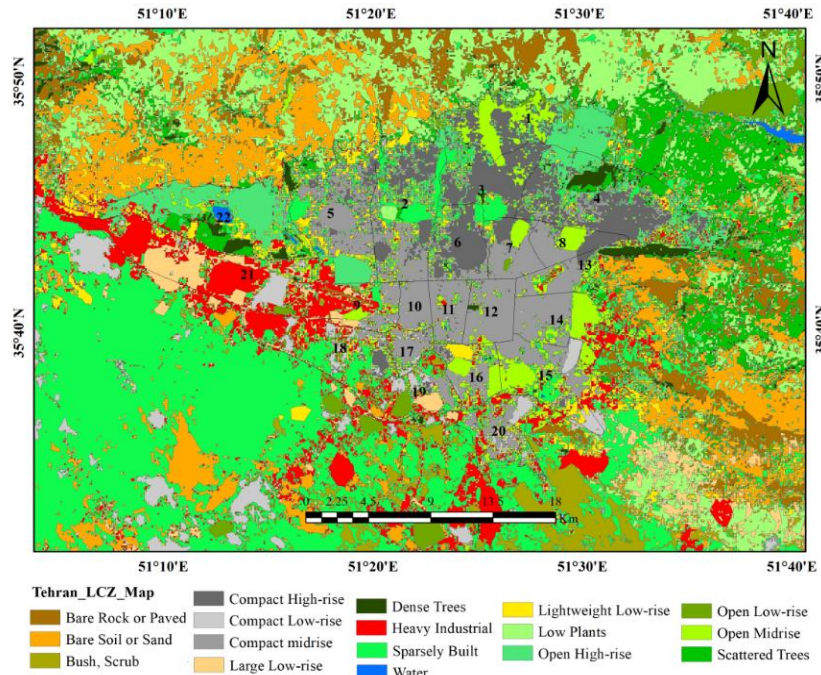
جایی که Q_{xj} ارزش کیفیت زیستگاه برای سلول x با کاربری/پوشش اراضی نوع j است، H_j : درجه کیفیت زیستگاه است که در دامنه‌ای از صفر تا یک قرار دارد (غیر زیستگاه ارزش صفر، زیستگاه کامل ارزش یک و نیم برای زیستگاهی با شرایطی در حد متوسط)، D_{xj} : میزان کل تهدید در سلول x با کاربری/پوشش اراضی نوع j است، y تمامی سلول‌ها در نقشه رستری r و Y_r ، مجموعه‌ای از سلول‌ها در نقشه رستری r می‌باشد، وزن تهدید W_r : اثر مخرب یک منبع تهدید بر تمامی زیستگاه‌ها است، r_y نقشه رستری r و β_x سطح دسترسی در سلول x است که ارزش یک نشان‌دهنده دسترسی کامل می‌باشد و S_{jr} نیز میزان حساسیت هر زیستگاه به هر تهدید است که در دامنه‌ای از صفر تا یک قرار دارد (ارزش یک حساسیت بالا و ارزش صفر بدون حساسیت به تهدید را نشان می‌دهد). i_{rxy} : اثر تهدید r است که از سلول شبکه‌ای y (r_y) بر روی زیستگاه در سلول شبکه‌ای x حاصل می‌شود و بر اساس معادلات ۵ و ۶ محاسبه می‌گردد (عشورنژاد، ۱۳۹۸):

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{r \max}} \right) \text{ if linear} \quad (۵)$$

$$i_{rxy} = \exp\left(-\left(\frac{2.99}{d_{r \max}}\right)d_{xy}\right) \text{ if exponential} \quad (۶)$$

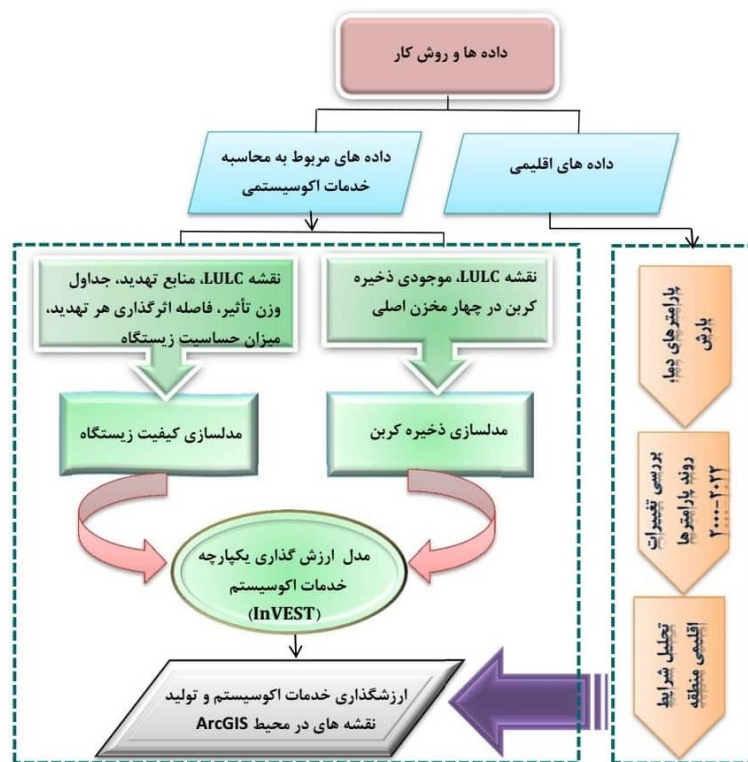
که در آن d_{xy} فاصله خطی میان سلول x و y است و $d_{r \max}$ حداکثر فاصله مؤثر تهدید r است. بر اساس معادلات مدل کیفیت زیستگاه InVEST تخمین دقیق این مدل نیاز به شناسایی تهدیدها و ارائه اطلاعات مکانی دقیق از این تهدیدات و زیستگاه‌های موجود در منطقه دارد.

نقشه‌های LULC در واقع مهم‌ترین ورودی نرم‌افزار InVEST برای محاسبه خدمات اکوسیستم است که در قالب فایل رستر به محیط نرم‌افزار فراخوانی می‌شوند. در مطالعه حاضر با مرور بر نقشه‌های مختلف تهیه‌شده توسط شهرداری تهران و یا محققان و دیگر مؤسسات، برای تهیه نقشه کاربری اراضی/پوشش زمین محدوده مورد مطالعه، از طبقه‌بندی زون‌های اقلیم محلی (LCZ) محاسبه‌شده برای شهر و حومه شهر تهران استفاده گردید (شکل ۲)، (شمسی‌پور، ۱۴۰۱). LCZ یک سیستم زون بندی است که مشخصات فیزیکی و سطحی مرتبط با اقلیم را در مقیاس محلی در محیط‌های شهری مستند می‌نماید. این طبقه‌بندی، مناظر شهری را به ده منطقه «ساخته‌شده» و هفت منطقه «طبیعی» طبقه‌بندی می‌کند (شکل ۱).



شکل ۱. پهنه‌های اقلیم محلی شهر و حومه تهران

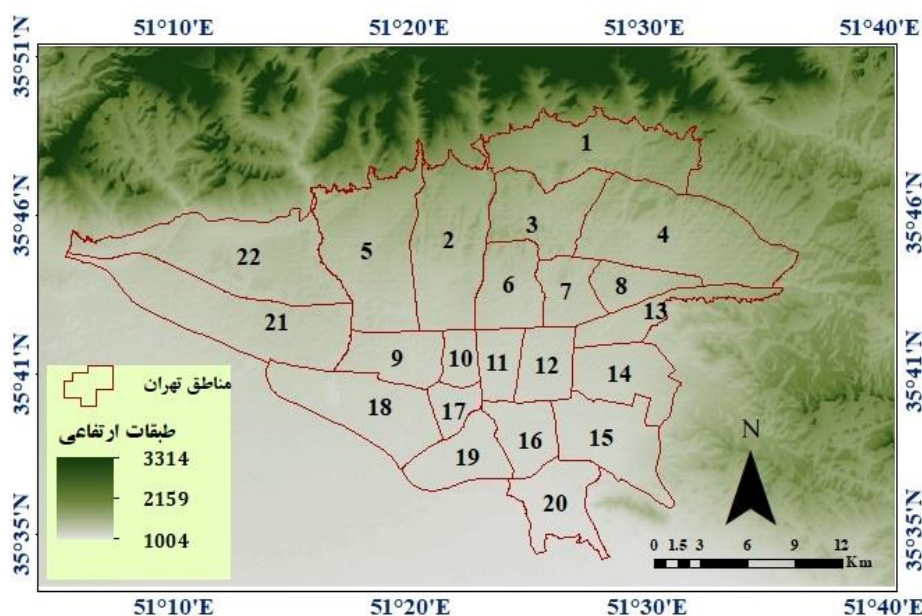
افزون بر داده‌های ذکرشده، برای ارزیابی شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه، پارامترهای اقلیمی دما و بارش ۴ ایستگاه همدید واقع در محدوده شهری تهران برای یک دوره ۳۲ ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۲) از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. شکل ۲ روند نمای گرافیکی پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۲. فلوجارت فرایند انجام پژوهش

محدوده مورد مطالعه

کلان‌شهر تهران با مساحت ۷۳۰ کیلومترمربع به‌عنوان بیست و هفتمین شهر بزرگ جهان در دامنه رشته‌کوه البرز در موقعیت جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۹ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۴ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه طول شرقی واقع شده (شکل ۳) و مطابق ارزیابی مرکز آمار ایران در سال ۱۴۰۰ جمعیت آن ۹ میلیون و ۳۹ هزار نفر برآورد گردیده است. موقعیت نسبی تهران را رشته‌کوه‌های البرز در شمال و دشت کویر نمک از جنوب مشخص می‌کند. به‌طوری‌که فاصله بیابان‌های خشک و دشت کویر نمک تا پابکوه‌های البرز حدود ۷۰ کیلومتر است و در نتیجه شرایط اقلیمی در جنوب و شمال آن متفاوت می‌باشد. نواحی شمالی از اقلیم سرد و نیمه‌خشک و مناطق جنوبی از اقلیم گرم و خشک برخوردارند. ارتفاعات شمال تهران با پوشش برفی چندین ماهه در طول ماه‌های سرد سال و رود دره‌هایی با جریان آب غالباً فصلی و بعضاً سرسبز شناخته می‌شود. حال آنکه دشت‌های ضلع جنوبی تهران با کاربری‌های زراعی و باغی گسترده و شهرهای اقماری متعدد و بزرگ مشخص می‌شوند (شمسی‌پور، ۱۴۰۲).



شکل ۳. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

یافته‌ها

برآورد موجودی‌های کربن در مخازن اصلی

LULC بصری‌ترین و گسترده‌ترین نمایش سیستم‌های سطحی است که چهار نوع ذخیره کربن شامل زیست‌توده بالای زمین، زیست‌توده زیرزمینی، کربن آلی خاک و مواد مرده را پوشش می‌دهد (Liu et al., 2022). بنابراین پویایی LULC ناشی از تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی به‌عنوان متغیر اصلی مؤثر بر ذخیره کربن در اکوسیستم زمینی در نظر گرفته شده است (Zaehle et al., 2007). توسعه سریع شهرنشینی در کلان‌شهر تهران به‌واسطه تمرکز زیاد جمعیت و نحوه پراکنش آن در چند دهه اخیر منجر به شتاب تغییرات کاربری/پوشش اراضی موجود شده است. این تغییرات متأثر از فرآیندهای فضایی تغییر سیمای سرزمین در طول زمان شکل گرفته و بدون تردید بر میزان عملکرد اکوسیستمی ترسیب کربن تأثیرگذار بوده است (نارویی و همکاران، ۱۴۰۱). در جدول ۱ مقادیر ذخیره کربن در ۴ مخزن اصلی برای LULC

های مختلف حوضه مورد مطالعه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین میزان کربن در نواحی پوشیده از درختان انبوه و کمترین آن متعلق به نواحی شهری و ساختمان‌های مرتفع است.

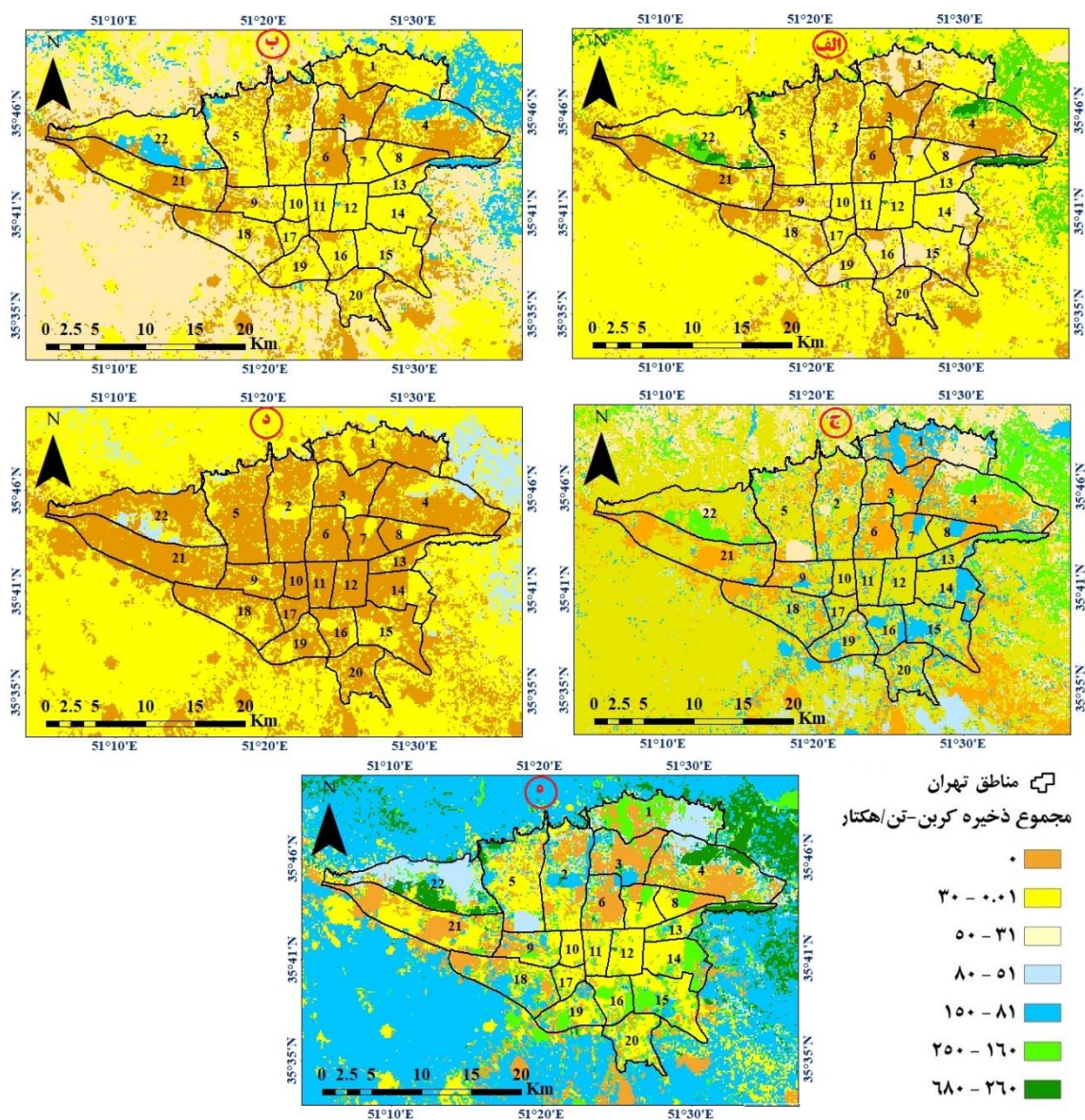
جدول ۱. مقدار متوسط ذخیره‌سازی کربن (تن در هکتار) در چهار مخزن اصلی کاربری‌های مختلف

ردیف	نام کاربری / پوشش زمین	زیست‌توده بالای زمینی	زیست‌توده زیرزمینی	کربن آلی خاک	مواد آلی مرده
۱	متراکم بلندمرتبه	۰	۰	۰	۰
۲	متراکم با ارتفاع متوسط	۲	۱	۵	۰
۳	متراکم کم ارتفاع	۲	۱	۵	۰
۴	چیدمان باز بلندمرتبه	۵	۳	۲۰	۰
۵	چیدمان باز ارتفاع متوسط	۱۵	۱۰	۶۰	۱
۶	چیدمان باز کم ارتفاع	۱۵	۱۰	۶۰	۱
۷	بافت سبک کم ارتفاع	۰	۰	۱۰	۰
۸	ساختمانی بزرگ و کم ارتفاع	۲	۱	۵	۰
۹	ساختمانی محدود	۱۰	۲۰	۱۰	۵
۱۰	صنایع سنگین	۰	۰	۰	۰
۱۱	جنگل متراکم	۱۳۵	۵۰	۷۵	۱
۱۲	درختان تنک	۸۸	۵۹	۹۶	۲۹
۱۳	علف کوتاه	۶	۶	۲۰	۲
۱۴	درختچه و بوته‌زار	۸	۸	۲۵	۳
۱۵	رخنمون سنگی و سنگ‌فرش	۱۰	۲۰	۱۰	۵
۱۶	زمین بایر و ماسه	۱۰	۲۰	۱۰	۵
۱۷	آب	۱۰	۵	۲۰	۰

منبع: (IPCC, 2006)

مطابق نتایج ارائه شده در شکل ۴، بیشترین میزان ذخیره‌سازی کربن در مقیاس سالانه مربوط به زیست‌توده بالای زمین و کربن آلی خاک است و کمترین مقادیر در مواد آلی مرده و زیست‌توده زیرزمین یافت می‌شود. خاک به‌عنوان مهم‌ترین مخزن کربن در جهان و بزرگ‌ترین مخزن کربن آلی در مناطق شهری شناخته می‌شود؛ به‌طوری‌که حدود ۸۲ درصد از کربن آلی در خاک‌ها و ۱۳ درصد آن در پوشش گیاهی قرار دارد (Edmondson et al., 2012). با توجه به شکل ۴، الف، زیست‌توده بالای زمینی بالاترین میزان ذخیره‌سازی کربن معادل ۲۱۸-۳۳۵ تن در هکتار (یک سال) را به خود اختصاص داده که در منطقه ۲۲ (محدوده پارک جنگلی چیتگر) و مناطق شمال شرقی حوضه (با پوشش درختان جنگلی انبوه و متراکم) مشاهده می‌گردد. پس‌از آن بخش‌های جنوب و جنوب شرق منطقه ۱۵، همچنین شمال و شرق مناطق ۸ و ۱۴ که با کاربری Open midrise مشخص گردیده از نظر ذخیره کربن در جایگاه بعدی قرار می‌گیرند (شکل ۴، الف) در دیگر کاربری‌های حوضه، ذخیره‌سازی کربن پایین بوده و از صفر تا ۵۰ تن در سال متغیر است. درخور ذکر است که مناطق حداکثری در زیست‌توده بالای زمینی، در سایر جاذب‌ها نیز بیش‌ترین مقدار ذخیره کربن را نشان می‌دهند؛ به‌طوری‌که بیشینه ذخیره کربن در نواحی یادشده، در خاک، زیست‌توده زیرزمینی و مواد آلی مرده به ترتیب برابر ۲۳۸، ۱۴۶ و ۷۲ تن در هکتار است (شکل ۴، ب، ج، د). در مجموع بالاترین مقادیر جذب در منطقه مورد مطالعه، متعلق به کاربری‌های پوشیده از درختان انبوه، پراکنده و همچنین طبقات ساختمانی باز با ارتفاع متوسط و کوتاه و زمین‌های زراعی و مرتعی با ساختمان‌های پراکنده می‌باشد که این نواحی در نقشه ذخیره‌سازی کل با پوشش ۷ درصدی حوزه مطالعاتی، تا ۶۵۰ تن کربن در سال ذخیره می‌کنند (شکل ۴، ه). فضاهای سبز شهری نقش زیادی در ایجاد

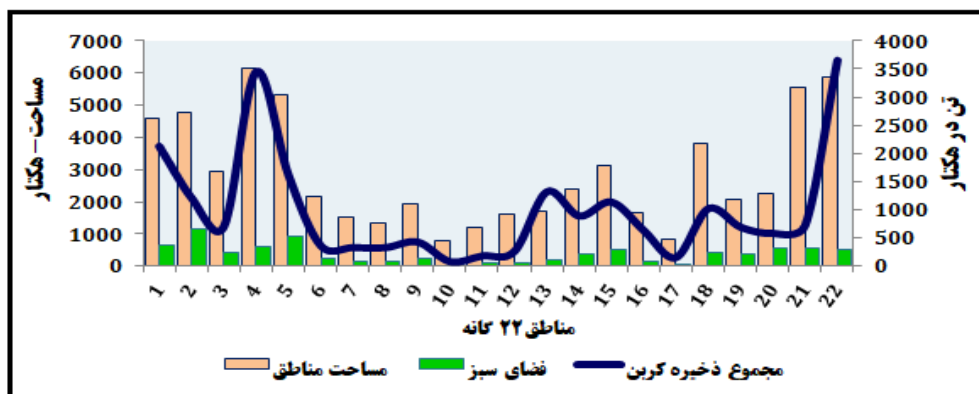
شهرهای کم کربن دارند؛ در واقع فضای سبز نه تنها قادر است به طور غیرمستقیم انتشار کربن را کاهش دهد، بلکه ترسیب کربن را نیز تا حد زیادی افزایش داده و بر خرد اقلیم محیط اطراف در محدوده معینی تأثیر می‌گذارد (Fan et al., 2022).



شکل ۴. توزیع مکانی ذخیره‌سازی کربن (تن در هکتار) در چهار جاذب اصلی در LULC های مورد مطالعه، الف: زیست‌توده بالای زمینی، ب: زیست‌توده زیرزمینی، ج: خاک، د: مواد آلی مرده، ه: ذخیره کربن کل

در حال حاضر بالاترین سرانه و بیش‌ترین میزان مساحت فضای سبز در بین مناطق ۲۲ گانه تهران به ترتیب متعلق به منطقه ۲۲ و منطقه ۲ است (شکل ۵). منطقه ۲۲ با سرانه فضای سبز بیش از ۶۲ مترمربع، فاصله بسیار زیادی نسبت به استاندارد سرانه فضای سبز در شهر تهران که ۱۵ مترمربع است، دارد. هرچند از نظر وسعت فضای سبز با مساحت ۵۸۵۱ هکتار تنها ۵۰۴/۱ هکتار فضای سبز را در خود جای‌داده و رتبه ۷ را در بین مناطق ۲۲ گانه تهران دارا می‌باشد. از این لحاظ، منطقه ۲ با مساحت ۴۷۶۱ هکتار و فضای سبزی با وسعت ۱۱۳۹ هکتار در جایگاه نخست واقع گردیده است.

شرایط ذکرشده موجب گردیده مجموع ذخیره‌سازی کربن در کل منطقه ۲ و ۲۲ به ترتیب به ۱۲۱۳/۵۶ و ۳۶۵۵/۰۸ تن در هکتار برسد. مناطق ۵ و ۱ نیز به ترتیب با در اختیار داشتن فضای سبزی به مساحت ۹۳۹/۵ و ۶۳۷ هکتار نقش مهمی در ذخیره‌سازی کربن کلان‌شهر تهران دارند. بافت فشرده و مسکونی مناطق ۱۰ و ۱۷ موجب کاهش خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن در این نواحی گردیده و با عملکرد ۸۱/۵ و ۱۵۴ تن در هکتار کمترین مقدار ذخیره‌سازی کربن را نسبت به دیگر مناطق دارا می‌باشند. با توجه به نقشه کاربری اراضی کلان‌شهر تهران (شکل ۲)، مناطق مرکزی شهر که عمدتاً جزو محدوده بافت فرسوده پایتخت محسوب می‌شوند با کمبود سرانه فضای سبز مواجه هستند. بررسی‌ها نشان می‌دهد، در مناطقی همچون ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ به دلیل بافت فشرده و تراکم مسکونی و ریزدانه شهری، کمبود پهنه سبز، هزینه سنگین تملک عرصه‌ها برای توسعه فضای سبز و... مدیریت شهری در زمینه توسعه سرانه فضای سبز با مشکل مواجه است (یزدانی، ۱۴۰۰). مطابق پژوهش علیپور و همکاران (۱۳۹۸) تنها ۳/۲۵ درصد از کل منطقه ۱۰ را فضای سبز در برمی‌گیرد و بخش قابل توجهی از منطقه با دارا بودن کمتر از ۴ مترمربع فضای سبز برای هر نفر بسیار پایین‌تر از حد استاندارد قرار دارند. وضعیت ذکرشده در منطقه ۱۲ شهرداری نیز به همین شکل است و سرانه فضای سبز موجود برای هر نفر معادل ۵/۱۲ مترمربع می‌باشد که از سرانه استاندارد فضای سبز بسیار پایین‌تر است (صفری و همکاران، ۱۴۰۱). شایان‌ذکر است که مناطق یادشده به لحاظ وسعت نیز کمترین مساحت را در بین مناطق تهران به خود اختصاص داده‌اند و این خود تأثیر به‌سزایی در کاهش فضای سبز و به‌تبع آن ذخیره‌سازی کربن دارد. در شکل ۵ مساحت منطقه، فضای سبز و همچنین مجموع ذخیره‌سازی کربن به تفکیک مناطق ۲۲ گانه تهران نشان داده شده است.



شکل ۵. مقایسه مناطق ۲۲ گانه تهران به لحاظ وسعت فضای سبز و میزان ذخیره‌سازی کربن

سنجش و ارزیابی خدمات حمایتی کیفیت زیستگاه در منطقه مطالعاتی

طبق معادلات مدل کیفیت زیستگاه InVEST تخمین دقیق این مدل نیاز به شناسایی تهدیدها و ارائه اطلاعات مکانی دقیق از این تهدیدها و زیستگاه‌های موجود در منطقه مطالعاتی دارد. در این پژوهش تمامی اراضی طبیعی شامل مراتع، علفزارها، چمن، پارک‌ها و حتی اراضی بدون پوشش گیاهی یا با پوشش گیاهی کم به‌عنوان زیستگاه شناخته‌شده و نمره ۱ دریافت کردند و اراضی تحت کنترل انسان شامل ساختمان‌ها، نواحی صنعتی و نواحی شهری با نمره صفر به‌عنوان غیر زیستگاه در نظر گرفته شدند. در جدول ۲ زیستگاه بودن یا نبودن کاربری‌های مورد مطالعه شناسایی شده و میزان حساسیت خاص آن‌ها به هریک از تهدیدها و عوامل محرک که بر اساس نظر متخصصین و راهنمای کاربر InVEST (Sharp et al., 2018) مشخص گردیدند، نشان داده شده است. بررسی تأثیر بالقوه هر تهدید بر روی زیستگاه موردنظر با استفاده از یک ماتریس مقایسه زوجی با اولویت ۰ به ۱ انجام گرفت.

جدول ۲. انواع LULC های منطقه مورد مطالعه و میزان حساسیت آن‌ها نسبت به تهدیدها

ردیف	نام کاربری / پوشش زمین	زیستگاه	اراضی کشاورزی	راه آهن	محدوده شهری	بزرگراهها	شریان‌های درجه ۱	شریان‌های درجه ۲
۱	متراکم بلندمرتبه	.	.	.	.	.	.	.
۲	متراکم با ارتفاع متوسط	.	.	.	.	.	.	.
۳	متراکم کم ارتفاع	.	.	.	.	.	.	.
۴	چیدمان باز بلندمرتبه	۰/۳	۰/۱	۰/۲۵	۰/۶	۰/۴	۰/۳	۰/۲
۵	چیدمان باز ارتفاع متوسط	۰/۴	۰/۱	۰/۲۵	۰/۵	۰/۳	۰/۲	۰/۱
۶	چیدمان باز کم ارتفاع	۰/۵	۰/۱	۰/۲۵	۰/۵	۰/۳	۰/۲	۰/۱
۷	بافت سبک کم ارتفاع	.	.	.	.	.	.	.
۸	ساختمانی بزرگ و کم ارتفاع	.	.	.	.	.	.	.
۹	ساختمانی محدود	۰/۶	۰/۰۵	۰/۴	۰/۷	۰/۴	۰/۳	۰/۲
۱۰	صنایع سنگین	.	.	.	.	.	.	.
۱۱	جنگل متراکم	۱	۰/۳	۰/۲	۰/۳	۰/۱	۰/۱	۰/۱
۱۲	درختان تنک	۰/۸	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۱	۰/۱	۰/۱
۱۳	علف‌های کوتاه	۰/۶	۰/۲	۰/۱	۰/۶	۰/۲	۰/۱	۰/۱
۱۴	درختچه و بوته‌زار	۱	۰/۰۵	۰/۲	۰/۳	۰/۱	۰/۱	۰/۱
۱۵	رخمون سنگی و سنگ‌فرش	۰/۱	.	.	.	.	.	.
۱۶	زمین بایر و ماسه	۰/۱	۰/۰۵	۰/۲	۰/۳	۰/۱	۰/۱	۰/۱
۱۷	آب	۱	۰/۶	۰/۲	۰/۸	۰/۳	۰/۲	۰/۱

جدول ۳ فاصله تأثیرگذاری تهدیدها و به دنبال آن وزن محاسبه شده ارزش آن‌ها را نشان می‌دهد. افزایش سطح زیر کشت باعث تهدید فرسایش خاک و کاهش پوشش گیاهی شده و در نتیجه گونه‌های زیستگاهی، زمین‌های جنگلی، بوته‌زارها و چراگاه‌ها نیز کاهش پیدا می‌کند. علاوه بر این، افزایش شهرنشینی منجر به افزایش تجمع آلودگی می‌شود که این خود باعث تخریب زیستگاه می‌گردد. به همین دلیل اراضی کشاورزی و مناطق شهری بالاترین وزن اثرگذاری تهدید را به خود اختصاص داده‌اند. به عقیده ژانگ^۱ و همکاران (۲۰۲۲) فعالیت‌های انسانی در زمین‌های شهری برای زیستگاه‌های مجاور بیشتر از سایر عوامل تهدید مخرب است. اگرچه وزن اثرگذاری کاربری‌های جاده و راه‌آهن نسبت به اراضی کشاورزی و نواحی شهری کمتر است؛ اما ۴ مورد از تهدیدهای زیستگاهی را سیستم جاده در برمی‌گیرد. یک سیستم جاده معمولاً دارای اثرات اکولوژیکی مثبت و منفی است و شناسایی آن‌ها برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی ترابری ضروری است. برای نمونه، در برخی از گونه‌ها، زیرساخت‌های جاده‌ای می‌تواند زیستگاه‌های با کیفیت ایجاد کند و زیستگاه‌های موجود را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. برعکس، ساخت‌وساز جاده می‌تواند با تبدیل زیستگاه‌ها به پیاده‌رو و کنار جاده‌ها باعث از بین رفتن زیستگاه شود (Wu et al., 2014).

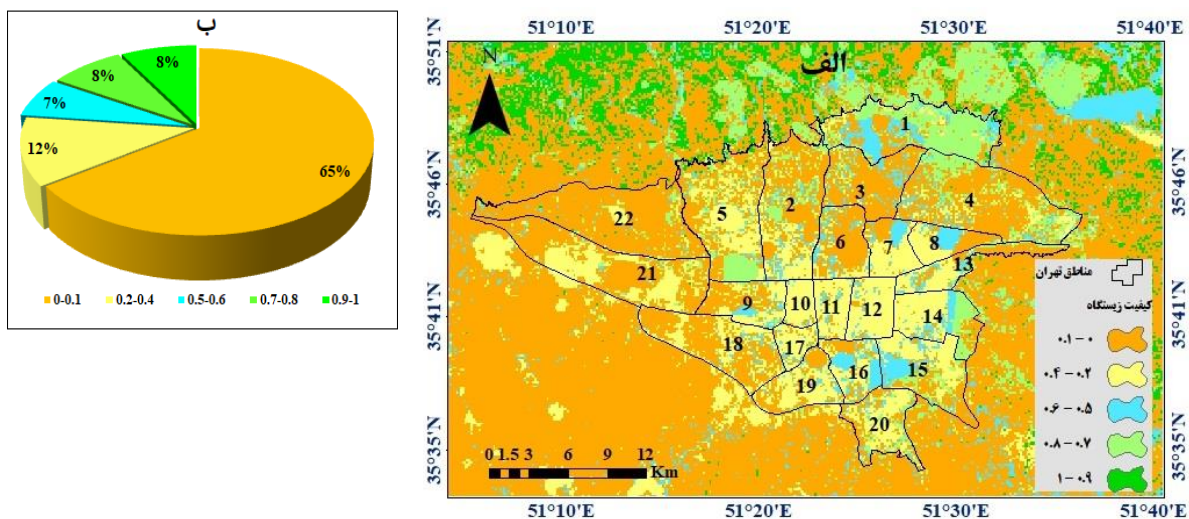
پس از برآورد ارزش وزنی هر تهدید، تأثیر این تهدیدها بر انواع خاص LULC ارزیابی گردید. به‌طور کلی، تأثیر یک تهدید بر روی یک زیستگاه با افزایش فاصله از منبع تخریب کاهش می‌یابد و برعکس. زیستگاه‌های نزدیک‌تر به تهدید، تأثیر بیشتری را متحمل می‌شوند، درحالی‌که تهدیدهای دور از زیستگاه تأثیر کمتری دارند. خروجی حاصل از این مرحله، تولید دو نقشه توزیع مکانی کیفیت زیستگاه و تخریب زیستگاه است که وضعیت هر یک در ۵ کلاس طبقه‌بندی شده است (شکل‌های ۶ و ۷).

¹ - Zhang

جدول ۳. تهدیدهای زیستگاه، حداکثر فاصله، وزن و نوع اثرگذاری تهدید

تهدیدات	حداکثر فاصله اثرگذاری تهدید	وزن اثرگذاری تهدید	نوع اثرگذاری تهدید
اراضی کشاورزی	۱	۰/۷	خطی
راه‌آهن	۲	۰/۳	خطی
محدوده شهری	۱۰	۱	خطی
بزرگراه	۴	۰/۶	خطی
شریان‌های درجه ۱	۲	۰/۴	خطی
شریان‌های درجه ۲	۱	۰/۲	خطی

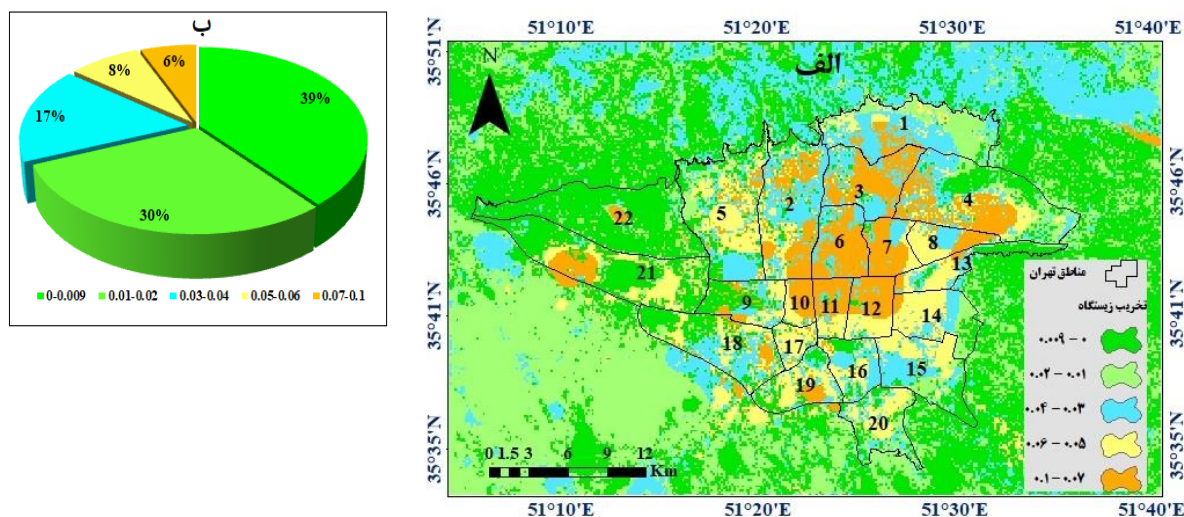
در شکل ۶ خروجی سطح نسبی کیفیت زیستگاه در وضعیت فعلی در هر سلول نشان داده شده است. ارزش‌های کیفیت زیستگاه در دامنه صفر (کیفیت بسیار پایین) تا یک (کیفیت بسیار بالا) طبقه‌بندی می‌گردد. اعداد بالاتر نشان‌دهنده کیفیت بهتر زیستگاه نسبت به سایر سلول‌های موجود هستند و سلول‌هایی که زیستگاه نیستند امتیاز صفر دریافت می‌کنند (Sharp et al., 2018). بدین ترتیب بیشترین میزان کیفیت زیستگاه با پوشش ۱۶ درصدی (ارزش‌های بین ۰/۷ تا ۱) در بخش‌های شمالی محدوده شهر مشاهده می‌گردد و به‌مرور به سمت نواحی جنوبی و به‌ویژه جنوب غربی کیفیت زیستگاه کاهش پیدا می‌کند (شکل ۵، الف). مطابق نمودار دایره‌ای در ۶۵ درصد حوضه مطالعاتی کیفیت زیستگاه به شدت پایین است که عمدتاً محدوده شهر و سکونتگاه‌های اقماری جنوب غرب شهر را تشکیل می‌دهند (شکل ۶، ب)، هرچند بخش قابل توجهی از این قسمت مربوط به مناطقی است که زیستگاه محسوب نمی‌گردند. در محدوده شهر مناطق مرکزی (۱۰، ۱۱ و ۱۲) و غربی (۲۱ و ۲۲) شهرداری پایین‌ترین کیفیت زیستگاه را ناشی از کمبود و تخریب فضاهای سبز شهری، گسترش شهرک‌ها و مجتمع‌های صنعتی دارند. مناطق ۴ و ۱۵ با مقادیر کیفیت زیستگاه بین ۰/۵ تا ۰/۸ با کیفیت‌ترین زیستگاه‌ها را در بین تمام مناطق شهرداری تهران نشان می‌دهند.



شکل ۶. توزیع مکانی کیفیت زیستگاه در حوزه مطالعاتی (الف) و درصد کیفیت زیستگاه در هر طبقه (ب)

در شکل ۷ وضعیت تخریب زیستگاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. نمره بالا در هر سلول به این معنی است که تخریب زیستگاه در آن سلول نسبت به سلول‌های دیگر زیادتر است و هر سلولی که پوشش غیر زیستگاهی داشته، امتیاز تخریب صفر دریافت کرده است. به طوری که در این رابطه محدوده شهر و رخنمون‌های سنگی زون کوهستانی شمال تهران جزو این پهنه قرار گرفته‌اند. در حالی که اگر محدوده شهری در طول زمان پایش می‌گردید؛ میزان تخریب زیستگاه

به واسطه تغییر و تبدیل کاربری/پوشش اراضی مشخص می‌شد. با توجه به نمودار (شکل ۷، ب) ۶۹ درصد از کل قلمرو (با احتساب نواحی غیر زیستگاهی) کمتر تخریب شده و ۱۴ درصد از محدوده مطالعاتی که عمدتاً نواحی مسکونی واقع در مرکز شهر و حاشیه جنوب غربی حوضه را شامل می‌گردد، به شدت تخریب شده است. تخریب زیستگاه‌ها در جنوب غرب تهران متأثر از رشد و گسترش شهرهای اقماری و تبدیل کاربری‌ها به زراعی (کشاورزی و باغی) است (شکل ۷، الف).



شکل ۷. نقشه توزیع مکانی تخریب زیستگاه به عوامل بالقوه تهدید در حوزه مطالعاتی (الف) و درصد تخریب در هر طبقه (ب)

بحث

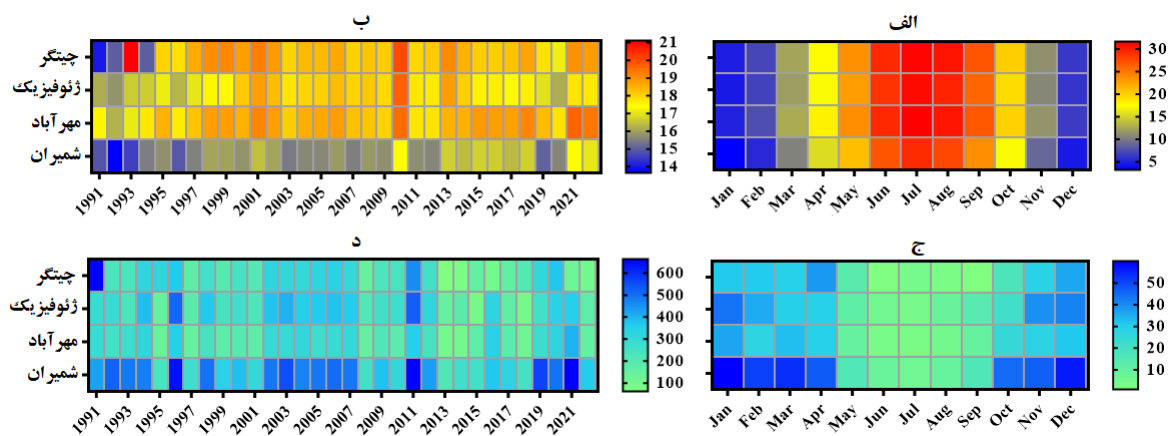
تأثیر مؤلفه‌های اقلیمی بر خدمات اکوسیستم

به عقیده اسکولز^۱ (۲۰۱۶) نادیده گرفتن اثر تغییرات اقلیمی می‌تواند ارزیابی‌های گمراه‌کننده‌ای از خدمات اکوسیستم ایجاد کند. به همین دلیل در ادامه پژوهش برای سنجش میزان حساسیت خدمات اکوسیستمی به محرک‌های اقلیمی، دو پارامتر دما و بارش به‌عنوان مؤلفه‌های مهم تغییر اقلیم که نقش تعیین‌کننده‌ای در فرآیندهای اکوسیستم مانند تولید اولیه خالص و فرسایش خاک دارند و از عوامل تعیین‌کننده ذخیره و ترسیب کربن خشکی محسوب می‌شوند (McGuire et al, 2021) واکاوی شدند.

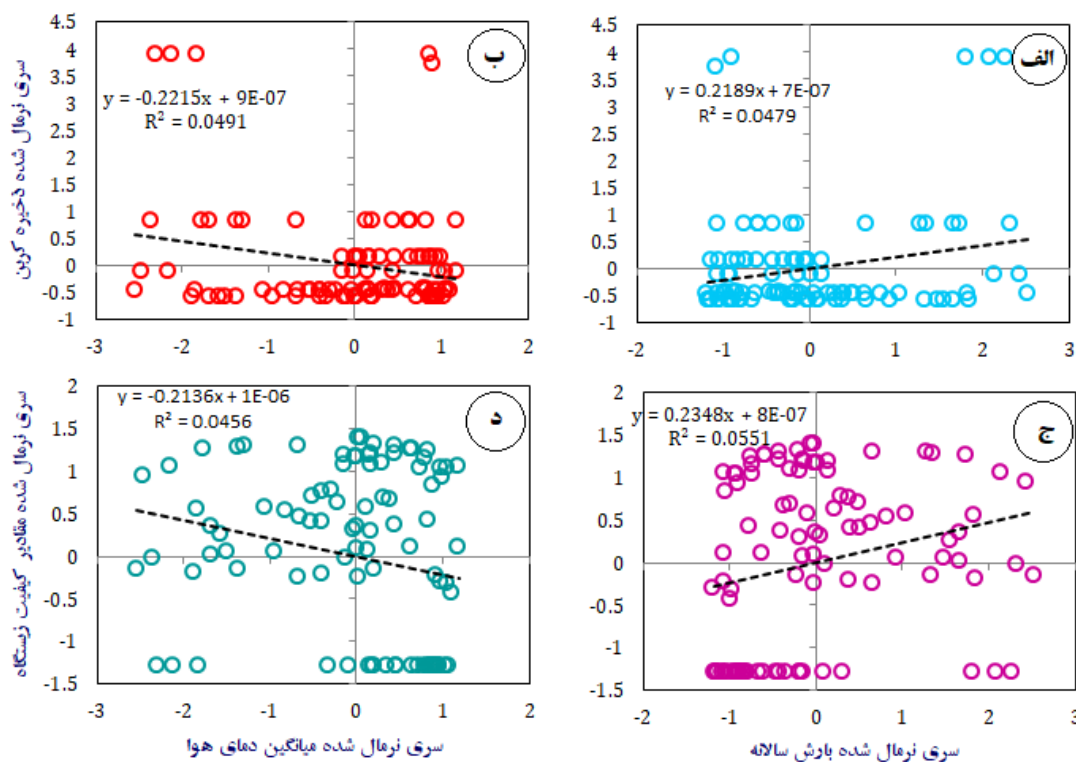
تغییرات دما و بارش حوضه مورد مطالعه طی دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۳ در قالب نمودارهای حرارتی در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق نمودار، در طول ۳۲ سال مورد مطالعه ایستگاه شمیران با میانگین دمای ۱۵/۹ درجه سانتی‌گراد سردترین و مهرآباد با متوسط ۱۸/۴ درجه سانتی‌گراد گرم‌ترین ایستگاه بوده است. در مقیاس سالانه نیز سال‌های ۱۹۹۳ و ۱۹۹۲ با ثبت میانگین دمای ۲۱/۱ و ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد در ایستگاه‌های چیتگر و شمیران به ترتیب گرم‌ترین و سردترین سال‌های مورد مطالعه در کلان‌شهر تهران بوده‌اند. نمودار حرارتی بارش سالانه نیز نشان می‌دهد که شمیران با متوسط بارش سالانه ۴۱۸/۱۷ میلی‌متر پربارش‌ترین ایستگاه در حوضه مورد مطالعه می‌باشد که از این حیث تفاوت قابل‌توجهی با دیگر ایستگاه‌ها دارد (میانگین سالانه بارش در ایستگاه‌های سینوپتیک چیتگر، مهرآباد و ژئوفیزیک به ترتیب برابر ۲۵۲/۴۲، ۲۳۸/۸ و ۲۸۴/۷۱ میلی‌متر است). نتایج ارزیابی‌های آماری همچنین حاکی از این است که متوسط سالانه دما در ایستگاه‌های منتخب روند افزایشی داشته که این روند در مهرآباد و شمیران با نمره Z، ۲/۷۱ و ۳/۳۲، در سطوح

¹Scholes

اطمینان ۰/۹۵ و ۰/۹۹ آزمون من-کندال معنی‌دار است. همچنین تغییرات کاهشی بارش نشان‌دهنده روند معنی‌دار این پارامتر در ایستگاه چیتگر در سطح اطمینان ۹۵٪ می‌باشد ($Z = -2.06$). در شکل ۹ رابطه خطی بین سری نرمال شده میانگین مؤلفه‌های اقلیمی و خدمات اکوسیستم در حوضه مورد بررسی نمایش داده شده است؛ مطابق نمودارها اگرچه مقادیر ضریب همبستگی R بین سری‌های بررسی شده نسبتاً پایین است، (دما و $ES = 0.221$ ، بارش و $ES = 0.234$) اما نوع رابطه رگرسیونی بیانگر این مهم است که هر دو خدمت تنظیمی و حمایتی اکوسیستم در شرایط افزایش دما و کاهش بارش، کاهش خواهند یافت. در مقیاس جهانی و منطقه‌ای، دما و بارش عوامل غالبی هستند که بر ذخیره کربن آلی خاک (بزرگ‌ترین مخزن کربن آلی زمینی) تأثیر می‌گذارند و کربن آلی خاک نیز با افزایش بارندگی و کاهش دما افزایش می‌یابد (Follett et al., 2012; Herold et al., 2014). مسئله مهم تغییرات اقلیمی در مورد خدمت اکوسیستمی حمایتی این است که گرم شدن هوا و شدیدتر شدن شرایط جوی (خشک‌سالی‌های شدید، بارش سنگین، امواج گرما و سرما) می‌تواند مناسب بودن زیستگاه فعلی، توزیع و فنولوژی گونه‌ها را تغییر داده و بقای آن‌ها را به خطر بیندازد (Shen et al., 2021).



شکل ۸. میانگین دما و مجموع بارش ایستگاه‌های سینوپتیک محدوده مورد مطالعه (۱۹۹۱-۲۰۲۲) الف: دمای ماهانه، ب: دمای سالانه، ج: بارش ماهانه، د: بارش سالانه



شکل ۹. رابطه خطی بین مقادیر پارامترهای اقلیمی و خدمات اکوسیستم، الف و ب: خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن، ج و د: کیفیت زیستگاه (مقادیر متغیرها با استفاده از Z-Score استاندارد شده است).

نتیجه گیری

در این مطالعه تغییرات فضایی دو خدمت تنظیمی (ذخیره سازی کربن) و حمایتی (کیفیت زیستگاه)، در ارتباط با تغییر کاربری/پوشش زمین در کلان‌شهر تهران و حومه‌های اطراف مورد ارزیابی قرار گرفت تا از این راه مشخص گردد خدمات اکوسیستمی چه تأثیری در بهبود کیفیت محیط و شرایط اقلیمی یک منطقه دارند. خروجی‌های پژوهش در محدوده مطالعه شده نشان داد که در هر ۴ مخزن کربن بالاترین مقادیر جذب، متعلق به کاربری‌های پوشیده از درختان انبوه، پراکنده و همچنین طبقات ساختمانی باز با ارتفاع متوسط و کوتاه و زمین‌های زراعی و مرتعی با ساختمان‌های پراکنده می‌باشد که از این لحاظ منطقه ۲۲ و محدوده شمال شرق حوزه، بهترین شرایط جذب کربن را دارند. این نواحی در نقشه ذخیره کل با پوشش ۷ درصدی محدوده مطالعاتی، تا ۶۵۰ تن کربن در سال ذخیره می‌کنند. خروجی کیفیت زیستگاه InVEST نیز حاکی از این بود که بالاترین میزان کیفیت زیستگاه با پوشش ۱۶ درصدی (ارزش‌های بین ۰/۷ تا ۱) متعلق به بخش‌های شمالی حوزه است و به‌مرور به سمت نواحی جنوبی و به‌ویژه جنوب غرب، کیفیت زیستگاه کاهش پیدا می‌کند. همچنین نواحی مسکونی واقع در مرکز شهر و حاشیه جنوب غربی منطقه مطالعاتی، به‌شدت تخریب شده است. نتایج به‌دست‌آمده اگرچه نشان‌دهنده توان اکولوژیکی مطلوب برخی مناطق در کلان‌شهر تهران است اما تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی این پتانسیل را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده است؛ در واقع بر مبنای رابطه خطی بین سری نرمال شده میانگین مؤلفه‌های اقلیمی (دما، بارش) و ES ارتباط معکوس و مستقیمی به ترتیب بین دما و بارش با ES ها وجود داشت و دو خدمت تنظیمی و پشتیبانی اکوسیستم تحت شرایط افزایش دما و کاهش بارش، کاهش خواهند یافت. این مسئله با توجه به روند افزایشی معنی‌دار دما و روند کاهشی بارش در ایستگاه‌های منتخب بسیار حائز

اهمیت است. در راستای نتایج به‌دست‌آمده، زو و همکاران (۲۰۲۲) نیز به این نتیجه رسیدند که اثر ترکیبی افزایش دما و کاهش بارندگی به‌شدت بر ساختار و عملکرد اکوسیستم‌های جنگلی تأثیر می‌گذارد و منطقه توزیع پوشش گیاهی جنگلی را در سراسر جهان تغییر خواهد داد. همچنین مطالعه کیفیت زیستگاه در منطقه تانچنگ^۱ چین بیانگر این بود که بارش عامل غالب در تغییر کیفیت زیستگاه در مراتع و جنگل‌های مناطق کوهستانی، به‌ویژه نواحی با بارندگی بیش از ۲۰۰ میلی‌متر است، حال آنکه در مناطق با بارندگی کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر، بارش تأثیر چندانی بر کیفیت زیستگاه ندارد (Ge et al., 2023). اما هولمبرگ^۳ و همکاران (۲۰۱۹) برخلاف نتایج تحقیق حاضر، نشان دادند که گرمایش جهانی منجر به افزایش رشد ۶۰ درصدی سالانه جنگل‌های شمالی و ۴۰ درصدی ذخیره کربن در شرایط آینده خواهد شد؛ اگرچه در این مورد عدم قطعیت قابل‌توجهی در ارائه خدمات اکوسیستم جنگل‌های شمالی وجود دارد. همان‌طور که نیکول^۴ و همکاران (۲۰۱۱) نیز معتقد هستند، جنبه‌های مختلف آب‌وهوای گرم‌تر در آینده، ممکن است اثرات متضادی بر جمعیت‌ها داشته باشد که این اثرات بیش از هر چیز به کیفیت زیستگاه محلی بستگی دارد.

پیشنهاد‌های پژوهشی آتی

- طبق مطالعات انجام‌شده، سه دسته عوامل اصلی، شامل تغییرات زمانی، مکانی و عوامل اجتماعی-اقتصادی بر میزان خدمات اکوسیستم در نواحی شهری تأثیر دارند؛ از آنجایی‌که در پژوهش حاضر تنها جنبه فضایی خدمات اکوسیستم موردتوجه قرار گرفت، پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های آتی، نقش عوامل اقتصادی-اجتماعی در بعد زمان نیز مطالعه گردد.

- با توجه به تأثیرپذیری خدمات اکوسیستم از تغییرات دما و بارش در منطقه مطالعاتی، پیش‌نمایی پارامترهای اقلیمی مبتنی بر مدل‌های گردش کلی جو (GCMs) در تحقیقات بعدی، به توسعه استراتژی‌های سازگاری و حفاظت از تنوع گونه‌ها در مواجهه با تغییرات آب‌وهوایی آینده کمک خواهد کرد.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهام نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسنده از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقاله را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نماید.

1Zhou

2Tacheng

3Holmberg

4Nicole

5General Circulation Models

منابع

- اسدالهی، زهرا و سلمان ماهینی، عبدالرسول. (۱۳۹۶). بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر عرضه خدمات اکوسیستم (ذخیره و ترسیب کربن). *پژوهش‌های محیط‌زیست*، ۱(۱۵)، ۲۱۴-۲۰۳.
- بادام فیروز، جلیل، زرندیان، اردوان، موسی زاده، رویا و عظیمی، سیده بهاره. (۱۳۹۸). سنجش اثرهای تغییر کاربری زمین و برآورد هزینه‌های اتلاف ظرفیت ذخیره‌سازی و ترسیب کربن در سرزمین جنگلی هیرکانی با استفاده از مدل InVEST. *پژوهش و توسعه جنگل*، ۵(۲)، ۳۱۶-۲۹۳.
- جهانداری، جاوید، حجازی، رخشاد، جوزی، سید علی و مرادی، عباس. (۱۴۰۱). اثرات توسعه شهری بر الگوهای مکانی، زمانی خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن در حوزه آبخیز بندرعباس با نرم‌افزار InVEST. *مدل‌سازی و مدیریت آب‌و‌خاک*، ۲(۴)، ۹۱-۱۰۶.
- دانشی، علیرضا، نجفی نژاد، علی، پناهی مصطفی و زرندیان، اردوان. (۱۳۹۹). پیش‌بینی اثرات تغییر کاربری اراضی بر کیفیت زیستگاه حوزه سد نرماب در استان گلستان. *تخریب و احیاء اراضی طبیعی*، ۱(۱)، ۱۲۰-۱۳۱.
- سجادی قائم‌مقامی، ساره السادات، سیاح نیا، رومینا، مبرقی دینان، نغمه و مخدوم فرخنده، مجید. (۱۴۰۰). ارزشیابی پیامدهای رشد شهری بر خدمات اکوسیستمی ذخیره کربن (مطالعه موردی: زیر حوزه‌های آبریز شهر کرج). *سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، ۱۲(۱)، ۳۷-۲۰.
- شاهی، الهام و کریمی، سعید و جعفری، حمیدرضا. (۱۳۹۷). ارزش‌گذاری اقتصادی کارکرد ترسیب کردن با استفاده از مدل یکپارچه خدمات اکوسیستمی IVNEST. *دوازدهمین کنگره ملی پیشگامان پیشرفت، تهران*.
- شمسی‌پور، علی‌اکبر، (۱۴۰۱). *نگاشت اقلیم شهر و توصیه‌های برنامه‌ریزی (مروری بر تجارب جهانی)*. موسسه انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول، تهران.
- شمسی‌پور، علی‌اکبر، سپاسی زنگی‌آبادی، سعید و حسینی، علی. (۱۴۰۲). پهنه‌بندی آب‌وهوای محلی کلان‌شهر تهران بر پایه ساختار فیزیکی. *فصلنامه مطالعات شهری*، ۱۲(۴۸)، ۵۴-۴۳.
- صفری، مائده، شریفی، علیرضا و حسینعلی فرهاد. (۱۴۰۱). آشکارسازی تغییرات فضای سبز تهران با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور. *علوم و فنون نقشه‌برداری*، ۱۲(۱)، ۴۹-۶۱.
- عشورنژاد، غدیر. (۱۳۹۸). بهبود نقشه‌های ارزیابی و پایش خدمات اکوسیستمی مناطق ویژه اقتصادی با تلفیق داده‌های Landsat و Sentinel-۲. رساله دکتری، اساتید راهنما: دکتر فرشاد امیر اصلانی، دکتر مجید کیاورزمقدم، دانشگاه تهران.
- علیپور، عباس، باقری، میلاد، چارکانه، خالق، محمودی چناری، حبیب و خداداد، مهدی. (۱۳۹۸). تجزیه و تحلیل کیفیت و اثرات محیط‌زیستی فضاهای سبز شهری (مطالعه موردی: منطقه ۱۰ شهرداری تهران). *توسعه پایدار محیط جغرافیایی*، ۱(۱)، ۴۲-۳۳.
- مثنوی، محمدرضا و دبیری، مریم. (۱۳۹۶). ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستم شهری به‌عنوان ابزاری برای برنامه‌ریزی شهرهای پایدارتر. *منظر*، ۹(۴۱)، ۳۵-۲۴.
- محمدیاری، فاطمه و زرندیان، اردوان. (۱۴۰۰). ارزش‌گذاری اقتصادی خدمات اکوسیستم: مروری بر مفاهیم و روش‌ها. *مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز*، ۱(۲)، ۸۱-۶۳.
- مهاب تدبیر دلتا، مهندسین مشاور (۱۴۰۲). *تاب‌آوری اکولوژیک شهر تهران*. طرح تحقیقاتی، اداره کل محیط‌زیست و توسعه پایدار شهر تهران، جلد سوم؛ خدمات اکوسیستم شهر تهران، تهران.
- نارویی، بهروز، برق جلوه، شهیندخت، اسماعیل‌زاده، حسن و زبردست، لعبت. (۱۴۰۱). تحلیل روند تغییر خدمت تنظیمی ترسیب کربن شهر تهران، متأثر از فرایندهای فضایی موزاییک سیمای سرزمین. *آمایش سرزمین*، ۱۴(۱)، ۲۵۳-۲۸۳.
- یزدانی، مجتبی. (۱۴۰۰). *خبرگزاری فارس، صدور شناسنامه برای ۳۴۲۸ باغ در تهران/آخرین وضعیت تملک باغات، لینک خبر:*

References

- Aalde, H., Gonzalez, P., Gytarsky, M., Krug, T., Kurz, W. A., Lasco, R. D., ... & Verchot, L. (2006). Generic methodologies applicable to multiple land-use categories. *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*, 4, 1-59.
- Adelisdardou, F., Zhao, W., Chow, R., Mederly, P., Minkina, T., & Schou, J. S. (2021). 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://dx.doi.org/10.1007/s13762-021-03676-6>
- Alipour, A., Bagheri, M., Charkane, Kh., Mahmoudi Chenari, H., & Khodadad, M. (2020). Analysis of the quality and environmental effects of urban green spaces (Study: District 10 of Tehran Municipality). *Sustainable Development of Geographical Environment*, 1(1), 33-42. <https://doi:10.52547/sdgc.1.1.33> [In Persian]
- Allan, A., Soltani, A., Abdi, M. H., & Zarei, M. (2022). Driving forces behind land use and land cover change: A systematic and bibliometric review. *Land*, 11(8), 1222. <https://doi.org/10.3390/land11081222>
- Asdalahi, Z., & Salman Mahini, A. (2017). Assessing the Impact of Land Use Change on Ecosystem Services Supply (Carbon Storage and Sequestration). *Environmental Researches*, 8(15), 203-214. [In Persian]
- Ashournejad, Q. (2019). *Improvement of Ecosystem Services Assessment and Monitoring Maps of Special Economic zones by Integrating Landsat and Sentinel-2*. doctoral thesis, supervisors: Dr. Farshad Amiraslani, Dr. Majid Kiavarz Moghadam, University of Tehran. [In Persian]
- Babbar, D., Areendran, G., Sahana, M., Sarma, K., Raj, K., & Sivadas, A. (2021). Assessment and prediction of carbon sequestration using Markov chain and InVEST model in Sariska Tiger Reserve, India. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123333. <https://doi.10.1016/j.jclepro.2020.123333>
- Badamfirooz, J., Zarandian, A., Mousazadeh, R., & Azimi, S. B. (2019). Land use change impacts and cost estimation of capacity loss of carbon storage and sequestration in the Hyrcanian forested landscape using InVEST model. *Forest Research and Development*, 5(2), 293-316. <https://doi:10.30466/jfrd.2019.120729> [In Persian]
- Chen, C., Liu, J., & Bi, L. (2023). Spatial and temporal changes of habitat quality and its influential factors in China based on the InVEST model. *Forests*, 14(2), 374. <https://doi.org/10.3390/f14020374>
- Chu, L., Sun, T., Wang, T., Li, Z., & Cai, C. (2018). Evolution and prediction of landscape pattern and habitat quality based on CA-Markov and InVEST model in Hubei section of Three Gorges Reservoir Area (TGRA). *Sustainability*, 10(11), 3854. <https://doi.org/10.3390/su10113854>
- Daneshi, A., Najafinejad, A., Panahi, M., & Zarandian, A. (2020). Projecting Land Use Change Effects on Habitat Quality of Narmab Dam Basin in Golestan Province. *Degradation and Rehabilitation of Natural Land*, 1 (1), 120-131. [In Persian]
- Ding, Y., Wang, L. Z., Gui, F., Zhao, S., & Zhu, W. Y. (2023). Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models. *Huan Jing ke Xue= Huanjing Kexue*, 44(6), 3343-3352. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202204080>
- Edmondson, J. L., Davies, Z. G., McHugh, N., Gaston, K. J., & Leake, J. R. (2012). Organic carbon hidden in urban ecosystems. *Scientific reports*, 2(1), 963. <https://doi.10.1038/srep00963>
- Fan, L., Wang, J., Han, D., Gao, J., & Yao, Y. (2022). Research on Promoting Carbon Sequestration of Urban Green Space Distribution Characteristics and Planting Design Models in Xi'an. *Sustainability*, 15(1), 572. <https://doi.org/10.3390/su15010572>
- Fellman, J. B., Hood, E., Dryer, W., & Pyare, S. (2015). Stream physical characteristics impact habitat quality for Pacific salmon in two temperate coastal watersheds. *PloS one*, 10(7), e0132652. <https://doi.10.1371/journal.pone.0132652>
- Follett, R. F., Stewart, C. E., Pruessner, E. G., & Kimble, J. M. (2012). Effects of climate change on soil carbon and nitrogen storage in the US Great Plains. *Journal of Soil and Water*

- Conservation*, 67(5), 331-342. <https://doi.org/10.2489/jswc.67.5.331>
- Ge, Y., Li, C., Zhang, T., & Wang, B. (2023). Temporal and spatial change of habitat quality and its driving forces: The case of Tacheng region, China. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 410. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1118179>
- Hawken, S., Rahmat, H., Sepasgozar, S. M., & Zhang, K. (2021). The SDGs, ecosystem services and cities: a network analysis of current research innovation for implementing urban sustainability. *Sustainability*, 13(24), 14057. <https://doi.org/10.3390/su132414057>
- He, Y., Ma, J., Zhang, C., & Yang, H. (2023). Spatio-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Guilin Based on FLUS and InVEST Models. *Remote Sensing*, 15(5), 1445. <https://doi.org/10.3390/rs15051445>
- Herold, N., Schöning, I., Michalzik, B., Trumbore, S., & Schrumpp, M. (2014). Controls on soil carbon storage and turnover in German landscapes. *Biogeochemistry*, 119, 435-451. <https://doi.org/10.1007/s10533-014-9978-x>
- Holmberg, M., Aalto, T., Akujärvi, A., Arslan, A. N., Bergström, I., Böttcher, K., ... & Forsius, M. (2019). Ecosystem services related to carbon cycling—modeling present and future impacts in boreal forests. *Frontiers in plant science*, 10, 343. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00343>
- Hou, Y., Zhao, W., Liu, Y., Yang, S., Hu, X., & Cherubini, F. (2021). Relationships of multiple landscape services and their influencing factors on the Qinghai–Tibet Plateau. *Landscape Ecology*, 36, 1987-2005. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01140-3>
- IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories – Volume 5. Waste. In: Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, et al. (eds) *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Hayama, Japan: Institute for Global Environment Strategies (IGES), pp.4.1–4.8.
- Jahandari, J., Hejazi, R., Jozi, S. A., & Moradi, A. (2022). Impacts of urban expansion on spatio-temporal patterns of carbon storage ecosystem service in Bandar Abbas Watershed using InVEST software. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(4), 91-106. <https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11069.1097> [In Persian]
- Li, S., Cao, Y., Liu, J., Wang, S., & Zhou, W. (2022). Assessing spatiotemporal dynamics of land use and cover change and carbon storage in China's ecological conservation pilot zone: A case study in Fujian Province. *Remote Sensing*, 14(16), 4111. <https://doi.org/10.3390/rs14164111>
- Li, Y., Yang, X., Wu, B., Zhao, J., Jiang, W., Feng, X., & Li, Y. (2023). Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Kunming based on PLUS and InVEST models. *PeerJ*, 11, e15285. <https://doi.org/10.7717/peerj.15285>
- Liang, Y., & Liu, L. (2017). Simulating land-use change and its effect on biodiversity conservation in a watershed in northwest China. *Ecosystem Health and Sustainability*, 3(5), 1335933. <https://doi.org/10.1080/20964129.2017.1335933>
- Liu, Q., Yang, D., Cao, L., & Anderson, B. (2022). Assessment and prediction of carbon storage based on land use/land cover dynamics in the tropics: a case study of hainan island, China. *Land*, 11(2), 244. <https://doi.org/10.3390/land11020244>
- Long, S., & Zhou, S. (2022). Assessment on Changes of Ecosystem Carbon Storage in Reservoir Area due to Hydroproject. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/7511216>
- Mahab Tadbir Delta, Consulting engineers (2023). *Ecological resilience of Tehran*. Research project, General Department of Environment and Sustainable Development of Tehran, Third volume; Tehran ecosystem services, Tehran. [In Persian]
- Masnavi, M. R., & Dabiri, M. (2018). The Potential of Urban Ecosystem Services Valuation as a Tool for Planning More Sustainable Cities. *MANZAR, the Scientific Journal of landscape*, 9(41), 24-35. [In Persian]
- McGuire, A. D., Sitch, S., Clein, J. S., Dargaville, R., Esser, G., Foley, J., ... & Wittenberg, U. (2001). Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: Analyses of

- CO₂, climate and land use effects with four process-based ecosystem models. *Global biogeochemical cycles*, 15(1), 183-206. <https://doi.org/10.1029/2000GB001298>
- Mohammadyari, F., & Zarandian, A. (2022). Economic Valuation of Ecosystem Services: A Review of Concepts and Methods. *Integrated Watershed Management*, 1(2), 63-81. <https://doi:10.22034/iwm.2022.250823> [In Persian]
- Naroei, B., Barghjelveh, S., Esmailzadeh, 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. <https://doi:10.22059/jtcp.2022.339907.670313> [In Persian]
- Nicole, F., Dahlgren, J. P., Vivat, A., Till-Bottraud, I., & Ehrlen, J. (2011). Interdependent effects of habitat quality and climate on population growth of an endangered plant. *Journal of Ecology*, 99(5), 1211-1218. <https://doi:10.1111/j.1365-2745.2011.01852.x>
- Ouyang, Z., Zheng, H., Xiao, Y., Polasky, S., Liu, J., Xu, W., ... & Daily, G. C. (2016). Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 352(6292), 1455-1459. <https://doi:10.1126/science.aaf2295>
- Pagiola, S. (2008). Payments for environmental services in Costa Rica. *Ecological economics*, 65(4), 712-724. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.07.033>
- Polasky, S., Nelson, E., Pennington, D., & Johnson, K. A. (2011). The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: a case study in the state of Minnesota. *Environmental and Resource Economics*, 48, 219-242. <https://doi:10.1007/s10640-010-9407-0>
- Safari, M., Sharifi, A. R., & Hosseinali, F. (2022). Detection of Changes in Tehran Green Space Using Remote Sensing Data. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 12 (1), 49-61. [In Persian]
- Sajjadi Ghaemmaghami, S. A., Sayahnia, R., Mobarghei Dinan, N., & Makhdoum 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. <https://doi:10.30495/girs.2021.677995> [In Persian]
- Scholes, R. J. (2016). Climate change and ecosystem services. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(4), 537-550. <https://doi.org/10.1002/wcc.404>
- Sepasi Zangiabadi, S., Shamsipour, A. A., & Hosseini, A. (2023). Local Climate Zoning of Tehran metropolitan base on physical structure. *Motaleate Shahri*, 12(48), 43-54. <https://doi:10.34785/J011.2022.019> [In Persian]
- Shahi, E., Karimi, S., & Jafari, H. (2017). *Economic Valuation of Segregation Function Using IVNEST*, Twelfth National Congress of Progressive Pioneers, Tehran. [In Persian]
- Shamsipour, A.A. (2022). Urban Climate Mapping and Planning Recommendations (Reviewing on global experiences), University of Tehran Press. [In Persian]
- Sharp, R., Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S. A., Chaplin-Kramer, R., ... & Olwero, N. (2018). InVEST 3.2. 0 User's Guide. *The Natural Capital Project, Stanford*. <https://doi:10.13140/RG.2.2.32693.78567>
- Shen, T., Yu, H., & Wang, Y. Z. (2021). Assessing the impacts of climate change and habitat suitability on the distribution and quality of medicinal plant using multiple information integration: Take *Gentiana rigescens* as an example. *Ecological Indicators*, 123, 107376. <https://doi:10.1016/j.ecolind.2021.107376>
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900. <https://doi:10.1175/BAMS-D-11-00019>
- Sutton-Grier, A. E., Moore, A. K., Wiley, P. C., & Edwards, P. E. (2014). Incorporating ecosystem services into the implementation of existing US natural resource management regulations: operationalizing carbon sequestration and storage. *Marine Policy*, 43, 246-253. <https://doi:10.1016/j.marpol.2013.06.003>
- Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A., Wood, S. A., Sharp, R., Nelson, E., ... & Lacayo, M.

- (2013). *InVEST 2.5. 6 User's Guide: Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*. Natural Capital Project Stanford, Palo Alto, CA, 155.
- Tolessa, T., Senbeta, F., & Kidane, M. (2017). The impact of land use/land cover change on ecosystem services in the central highlands of Ethiopia. *Ecosystem services*, 23, 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.11.010>
- Varshney, K., Pedersen Zari, M., & Bakshi, N. (2022). Carbon Sequestration and Habitat Provisioning through Building-Integrated Vegetation: A Global Survey of Experts. *Buildings*, 12(9), 1458. <https://doi.org/10.3390/buildings12091458>
- Wang, H., Zhang, M., Wang, C., Wang, K., Wang, C., Li, Y., ... & Zhou, Y. (2022). Spatial and temporal changes of landscape patterns and their effects on ecosystem services in the huaihe river basin, China. *Land*, 11(4), 513. <https://doi.org/10.3390/land11040513>
- Wang, J., Wu, Y., & Gou, A. (2023). Habitat quality evolution characteristics and multi-scenario prediction in Shenzhen based on PLUS and InVEST models. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 210. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1146347>
- Wang, L., Zhu, R., Yin, Z., Chen, Z., Fang, C., Lu, R., ... & Feng, Y. (2022). Impacts of land-use change on the spatio-temporal patterns of terrestrial ecosystem carbon storage in the Gansu Province, Northwest China. *Remote Sensing*, 14(13), 3164. <https://doi.org/10.3390/rs14133164>
- Wu, C. F., Lin, Y. P., Chiang, L. C., & Huang, T. (2014). Assessing highway's impacts on landscape patterns and ecosystem services: A case study in Puli Township, Taiwan. *Landscape and Urban Planning*, 128, 60-71. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.04.020>
- Xie, G., Zhang, C., Zhen, L., & Zhang, L. (2017). Dynamic changes in the value of China's ecosystem services. *Ecosystem services*, 26, 146-154. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.06.010>
- Yazdani, M. (2021). Fars News Agency, Issuance of birth certificates for 3428 gardens in Tehran/recent status of ownership of gardens, <https://www.farsnews.ir> [In Persian]
- Zaehle, S., Bondeau, A., Carter, T. R., Cramer, W., Erhard, M., Prentice, I. C., ... & Sykes, M. (2007). Projected changes in terrestrial carbon storage in Europe under climate and land-use change, 1990–2100. *Ecosystems*, 10, 380-401. <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9028-9>
- Zhang, Y., Zhang, C., Zhang, X., Wang, X., Liu, T., Li, Z., ... & Ma, F. (2022). Habitat Quality Assessment and Ecological Risks Prediction: An Analysis in the Beijing-Hangzhou Grand Canal (Suzhou Section). *Water*, 14(17), 2602. <https://doi.org/10.3390/w14172602>
- Zhou, R., Zhang, Y., Peng, M., Jin, Y., & Song, Q. (2022). Effects of climate change on the carbon sequestration potential of forest vegetation in Yunnan Province, Southwest China. *Forests*, 13(2), 306. <https://doi.org/10.3390/f13020306>
- Zhu, G., Qiu, D., Zhang, Z., Sang, L., Liu, Y., Wang, L., ... & Wan, Q. (2021). Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China. *Ecological Indicators*, 127, 107770. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107770>