

Evaluation of Carbon Storage and Sequestration Ecosystem Services of Urban Green Infrastructures in Metropolitan Areas: A Case Study of the Tabriz Metropolis

Mahdi Herischian¹ , Hassan Mahmoudzadeh² 

1. Department of Urban and Regional Planning, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran Email: mahdi.herischian@tabrizu.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Urban and Regional Planning, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran Email: mahmoudzadeh@tabrizu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received:
12 September 2025
Received in revised form:
9 December 2025
Accepted:
11 December 2025
Available online:
16 December 2025

Keywords:

Carbon Storage and Sequestration, Ecosystem Service, Green Infrastructure, Positive Sequestration, Negative Sequestration, Tabriz Metropolitan.

ABSTRACT

Objective: Over the past decades, urban development patterns and changes and transformations of urban land use have caused climate change and increased greenhouse gases, especially in metropolitan areas. The continuation of this trend has caused changes in the flow of ecosystem services, including carbon storage and sequestration. The reduction of ecosystem services negatively impacts the well-being and quality of life of citizens. In this regard, urban green infrastructures play a special and important role in carbon storage and sequestration. Therefore, the purpose of the present study is to evaluate the ecosystem service of carbon storage and sequestration of green infrastructures in the Tabriz metropolitan area.

Method: In this study, using data related to Landsat satellite images, land use/land cover, biophysical tables, GIS, and InVEST software, the ecosystem services of carbon storage and sequestration of the green infrastructure of Tabriz metropolis were evaluated.

Results: The findings showed that the Tabriz metropolis was able to store about 26155.15, 26154.62, and 26151.03 tons of carbon per hectare during 1984, 2002, and 2022, respectively. This indicated that the capacity of the Tabriz metropolitan area to store carbon gradually decreased. Also, the Tabriz metropolitan area was able to sequester 26154.62, 26151.03, and 26154.62 tons of carbon during the periods of 1984-2002, 2002-2022, and 2022-2040, equivalent to 261.55, 261.51, and 261.51 million dollars in economic value, respectively. In all three periods, the Tabriz metropolitan was able to sequester most of the carbon it had stored, but its negative sequestration was much more effective than the positive sequestration. In other words, the situation of Tabriz metropolitan was worsened in the study period in terms of carbon sequestration.

Conclusions: The results showed that land use/land cover played an important and special role in carbon storage and sequestration in Tabriz. In the case of carbon storage capacity of the Tabriz metropolitan area during the three mentioned time periods, the following land uses played the most important role, i.e., green spaces and bare lands. Carbon sequestration, especially positive carbon sequestration, in the Tabriz metropolitan area was unbalanced and heterogeneous in all 3 mentioned time periods. Most parts of the Tabriz city had negative sequestration, and only limited parts in the northwest and southeast of the city and the western parts of Tabriz had positive sequestration.

Cite this article: Herischian, M. & Mahmoudzadeh, H. (2025). Evaluation of Carbon Storage and Sequestration Ecosystem Services of Urban Green Infrastructures in Metropolitan Areas: A Case Study of the Tabriz Metropolis, *Journal of Environmental Studies*, 51 (3), 313- 334. <http://doi.org/10.22059/JES.2025.399032.1008624>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2025.399032.1008624>

Introduction

Over the past decades, urban development patterns and changes and transformations of urban land use have caused climate change and increased greenhouse gases, especially in metropolitan areas. The continuation of this trend has caused changes in the flow of ecosystem services, including carbon storage and sequestration. As urbanization continues, its effects extend beyond metropolis areas to peri-urban regions and small cities, particularly in developing countries, threatening global economic and social stability (McDonnell, 2015). This drastic spatial reorganization not only directly alters the pathways of material cycling in regional ecosystems but also creates a profound impact on essential ecosystem services, especially carbon storage and sequestration, through mechanisms such as landscape fragmentation and biodiversity loss (Liu et al., 2024; Song et al., 2024). For example, the expansion of forest land can increase carbon sequestration but also reduce water resource efficiency (Fang et al., 2022; Zhao et al., 2022). The reduction of ecosystem services has significant consequences, including environmental degradation, the intensification of urban heat islands (UHI), the increased impacts of climate change on reducing well-being and increasing flood risk, and mitigating carbon storage and sequestration (Morando-Figueroa et al., 2023). In this regard, urban green infrastructure plays a critical role in carbon storage and sequestration. Urban green infrastructure is defined as a strategically planned network of natural and semi-natural areas, together with other environmental features, designed and managed to provide a wide range of ecosystem services (European Commission, D.-G, 2016; European Environment Agency, 2006) and includes green spaces and other physical elements in terrestrial (including coastal areas) and marine environments. Green infrastructure can help solve the problems of flood management, thermal challenges, water scarcity, carbon storage, energy consumption, groundwater recharge, erosion, well-being, ecological connectivity, environmental education, aesthetics, food production, and green job opportunities (Jato-Espino et al., 2023). Urban green infrastructure can significantly impact the urban carbon cycle and net carbon dioxide exchanges by sequestering carbon through photosynthesis and storing it as above- and below-ground biomass (such as stems, branches, or roots) and soil organic matter, acting as a sink for atmospheric carbon dioxide (Nowak et al, 2013; Dusenget al, 2019). The city of Tabriz, as one of the important metropolitan areas of Iran, faces challenges arising from climate change and rapid urban development. The Tabriz metropolis, with its important industrial centers such as the thermal power plant, the petrochemical complex and refinery, various factories, dozens of brick kilns, etc., is considered one of the most polluted cities in Iran. On the other hand, more than 50 percent of industrial towns and 61 percent of the province's industries are located in the suburbs of the Tabriz metropolis and within a radius of 30 kilometers of this city, which are responsible for the major share of the city's industrial pollutants. The establishment of traditional brick kilns, asphalt and sand-making plants at distances of 10 to 25 kilometers west and south of Tabriz city are important factors in the transfer of air pollutants to the Tabriz metropolis (Ghorbani et al., 2012). Therefore, the purpose of the present study is to evaluate the ecosystem service of carbon storage and sequestration of green infrastructures in the Tabriz Metropolitan area.

Method

In this study, using data related to Landsat satellite images, land use/land cover, biophysical tables, GIS, and InVEST software, the ecosystem services of carbon storage and sequestration of the green infrastructure of Tabriz were evaluated. In this study, the carbon storage and sequestration model from the InVEST 3.12.0 software package was used. This model estimates carbon storage and sequestration based on land use/land cover maps, biophysical tables, and economic valuation (social cost of carbon). This model estimates the result by applying the following data:

- Carbon storage map in raster format
- Carbon sequestration map in raster format
- Economic valuation map (social cost of carbon) in raster format
- Estimates of the monetary value of the ecosystem service of carbon storage and sequestration using the economic valuation method (social cost of carbon) in the form of a descriptive table.

Results

An examination of the trends in land use changes from 1984 to 2022 showed that barren and agricultural lands had a decreasing trend in this 38-year period, while residential land use showed an increasing trend (about 16.54 percent) from 1984 to 2002 and increased by about 0.50 percent from 2002 to 2022, and from 2022 to 2040, according to the Markov chain prediction, land use/land cover would increase by about 35.4 percent. Green space also had a decreasing trend (0.87 percent) from 1984 to 2002 and increased by about 0.97 percent from 2002 to 2022 and would increase by 1.94 percent from 2022 to 2040. Overall, a study of land use changes in the Tabriz metropolis over a 56-year period showed that land uses related to green infrastructure, such as green spaces and pastures, with an increasing role in carbon storage and sequestration, accounted for the least amount of all urban land uses in Tabriz. The maps related to the carbon storage capacity for the Tabriz metropolis were classified into 4 classes from the lowest to the highest carbon

storage in tons. The results showed that in 1984, the Tabriz metropolis had 20496.04 tons (78.36%) and 1473.57 tons (5.63%) of carbon storage in the minimum and maximum classes, respectively. In total, in this year this metropolis was able to store about 26155.15 tons of carbon. In 2002, Tabriz metropolis had 21983.06 tons (84.05%) and 1241.78 tons (4.75%) of carbon storage in the minimum and maximum classes, respectively, which means the Tabriz metropolis was able to store about 26154.62 tons of carbon. In 2022, this metropolis had carbon storage of 17,197.57 tons (65.76%) and 1,497.88 tons (5.73%) in the minimum and maximum classes; respectively. Overall, the Tabriz metropolis was able to store about 26,151.03 tons of carbon this year. During all three mentioned periods, regions 5, 7, and 1 of Tabriz had the highest amount of carbon storage, respectively. The analysis of carbon storage in Tabriz (1984) showed distinct land-use patterns for different storage levels. The lowest storage class (0–1.7 tons) consisted primarily of bare land (33.80%), medium-density residential areas (33.9%), and high-density residential areas (10.6%). In contrast, the highest storage class (3.5–6.9 tons) was dominated by green space (42.99%), followed by bare land (20.0%) and medium-density residential areas (19.0%). In 2002, the lowest storage class (0–1.7 tons) was attributed to bare land (61.91%), low-density residential areas (16.79%), and medium-density residential areas (11.61%). In the highest storage class (5.3–6.9 tons), green space was overwhelmingly dominant at 98.63%, with minimal contributions from low-density residential (0.60%) and bare land (0.58%). Analysis of the 2022 land covers revealed that the lowest carbon storage class (0–1.7 tons) consisted mainly of bare land (52.1%) and low- to medium-density residential areas. Conversely, the highest storage class (5.3–6.9 tons) was related to green space, which accounted for 99.32% of the area.

Overall, data analysis showed that in the carbon storage capacity of the Tabriz metropolis during the three time periods of 1984, 2002, and 2022, green spaces, bare lands, and low residential density areas played the largest role, respectively. During all three mentioned time periods, negative sequestration in the Tabriz metropolitan area was more than positive sequestration. In the period 1984–2002, the Tabriz metropolitan area had 24378.53 tons (93.21%) of negative sequestration and 1776.41 tons (6.79%) of positive sequestration. In the period 2002–2022, 17197.57 tons (65.76%) of negative sequestration and 1497.88 tons (5.73%) of positive sequestration were calculated, and in the period 2022–2040, 20449.55 tons (78.20%) of negative sequestration and 5700.97 tons (21.80%) of positive sequestration were estimated. In other words, the Tabriz metropolis was not able to effectively sequester most of the carbon it had stored, and in this respect, it was in a bad state during all three time periods. During all three mentioned time periods, the maximum class of green space and bare lands played the greatest role in carbon sequestration. The results showed that because the green infrastructure of the Tabriz metropolis comprised a small percentage of the total land use of the Tabriz metropolis during the years 1984, 2002, 2022, and the projection for 2040, it was not able to have a positive and effective carbon sequestration for this metropolitan area. During the study period, the green infrastructure accounted for 5.88, 4.76, 5.73, and 7.67 percent of the total land use of Tabriz. During the period of 1984–2002, this metropolis was able to sequester approximately 26154.62 tons of carbon, equivalent to 261.55 million dollars, of which approximately 24378.53 tons (93.21%) were negative sequestration and 1776.41 tons (6.79%) were positive sequestration, which is approximately 243.79 million dollars for the economic value of negative sequestration and approximately 17.76 million dollars for the economic value of positive sequestration. During the period 2002–2022, the Tabriz Metropolis was able to sequester about 26151.03 tons of carbon equivalent to 261.51 million, of which about 19622.99 tons (75.04%) were negative sequestration and 6528.18 tons (24.96%) were positive sequestration, which was about 196.23 million dollars for the economic value of negative sequestration and about 65.28 million dollars for the economic value of positive sequestration. During the period 2022–2040, the Tabriz Metropolis was able to sequester about 26150.49 tons of carbon, equivalent to 261.51 million dollars, of which about 20449.55 tons (78.20%) were negative sequestration and 5700.97 tons (21.80%) were positive sequestration, so the economic value was about 204.50 million dollars for negative sequestration and about 57.01 million dollars for positive sequestration, which is a significant amount in itself, and if this amount of ecosystem service value were not available, the Tabriz Metropolis would have to bear the costs and consequences of carbon emissions in the atmosphere.

Conclusions

The results showed that land use/land cover played a critical role in the carbon storage and sequestration of the Tabriz metropolis, so that due to the insignificant amount of green infrastructure, this metropolis was unable to perform effective and desirable sequestration, and its negative sequestration was greater than the positive sequestration. The Tabriz metropolitan area was able to store about 26155.15, 26154.62 and 26151.03 tons of carbon per hectare during 1984, 2002 and 2022, respectively. This indicates that the capacity of the Tabriz metropolis to store carbon has gradually decreased. Also, the Tabriz metropolitan area was able to sequester 26154.62, 26151.03, and 26150.49 tons of carbon during the period of 1984–2002, 2002–2022, and 2022–2040, respectively. The Tabriz metropolis was able to sequester most of the carbon it has stored in all three mentioned time periods, but its negative sequestration was much more than the positive and effective sequestration. In other words, the situation of the Tabriz metropolitan area has worsened in terms of carbon sequestration in all three mentioned periods. Tabriz's constrained carbon sequestration

capacity stemmed from factors such as population growth, economic development (with a significant emphasis on industry), and patterns of urban expansion.

Overall, it can be concluded that carbon sequestration, especially positive carbon sequestration, in the Tabriz metropolitan area was unbalanced and heterogeneous in all three mentioned time periods. Most parts of Tabriz had negative sequestration, and only limited parts of the northwestern parts and parts of the southeastern and western parts of Tabriz have had positive sequestration, especially in the time periods of 1984-2002 and 2022-2040.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

We would like to thank the esteemed referees for their structural and scientific comments.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



ارزیابی خدمت اکوسیستمی ذخیره و ترسیب کربن زیرساخت‌های سبز شهری در مناطق کلانشهری، مطالعه موردی: کلانشهر تبریز

مهدی هریسچیان^۱، حسن محمودزاده^۲✉

۱. گروه برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، رایانامه: mahdi.herischian@tabrizu.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، رایانامه: mahmoudzadeh@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: در طی دهه‌های اخیر الگوهای توسعه شهری و تغییر و تبدیل کاربری اراضی شهری، باعث تغییرات اقلیمی و افزایش گازهای گلخانه‌ای بخصوص در کلانشهرها شده که تداوم این روند باعث تغییر در جریانات مربوط به خدمات اکوسیستمی از جمله ذخیره و ترسیب کربن می‌شود. کاهش خدمات اکوسیستمی بر رفاه و کیفیت زندگی شهروندان تاثیر منفی دارد. در این بین زیرساخت‌های سبز شهری نقش ویژه و مهمی در ذخیره و ترسیب کربن برعهده دارند. از این رو هدف از پژوهش حاضر ارزیابی خدمت اکوسیستمی ذخیره و ترسیب کربن زیرساخت‌های سبز کلانشهر تبریز است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۱	روش پژوهش: در این پژوهش با استفاده از داده‌های مربوط به تصاویر ماهواره ای لندست، کاربری اراضی/پوشش اراضی، جدول بیوفیزیکی، GIS و نرم افزار InVEST به ارزیابی خدمت اکوسیستمی ذخیره و ترسیب کربن زیرساخت‌های سبز تبریز پرداخته شده است.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۸	یافته‌ها: یافته‌ها نشان داد که کلانشهر تبریز در طی سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ به ترتیب توانسته در حدود ۲۶۱۵۵/۱۵، ۲۶۱۵۴/۶۲ و ۲۶۱۵۱/۰۳ تن کربن را در هکتار ذخیره کند. این مورد نشان‌دهنده این است که ظرفیت کلانشهر تبریز برای ذخیره کربن رفته رفته کاهش پیدا کرده است. همچنین کلانشهر تبریز توانسته در طی دوره زمانی ۱۳۸۱-۱۳۶۳، ۱۳۸۱-۱۴۰۱ و ۱۴۱۹-۱۴۰۱ به ترتیب ۲۶۱۵۴/۶۲، ۲۶۱۵۱/۰۳ و ۲۶۱۵۰/۴۹ تن کربن را ترسیب کند که به ترتیب ۲۶۱/۵۱ و ۲۶۱/۵۱ میلیون دلار ارزش اقتصادی دارد. کلانشهر تبریز در هر سه دوره زمانی مذکور توانسته بیشتر کربن ذخیره شده را ترسیب کند ولی ترسیب منفی در این منطقه خیلی بیشتر از ترسیب مثبت و موثر بوده است. به عبارتی وضعیت کلانشهر تبریز در هر سه دوره مذکور به لحاظ ترسیب کربن بدتر شده است.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۰	نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که در ذخیره و ترسیب کربن تبریز، کاربری اراضی/پوشش اراضی نقش مهم و ویژه‌ای داشته است. در ظرفیت ترسیب کربن کلانشهر تبریز در طی سه دوره زمانی مذکور به ترتیب کاربری‌های فضای سبز و اراضی بایر بیشترین نقش را داشته‌اند. ترسیب کربن به ویژه ترسیب مثبت در کلانشهر تبریز در هر سه دوره زمانی مذکور به صورت نامتوازن و ناهمگون بوده است. بیشتر قسمت‌های تبریز دارای ترسیب منفی بوده است و تنها قسمت‌های محدودی از بخش‌های شمال غربی و قسمت‌هایی از جنوب شرقی و غربی تبریز ترسیب مثبت داشته است.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵	کلیدواژه‌ها: ترسیب مثبت، ترسیب منفی، خدمت اکوسیستمی، ذخیره و ترسیب کربن، زیرساخت‌های سبز، کلانشهر تبریز.

استناد: هریسچیان، مهدی و محمودزاده، حسن (۱۴۰۴). ارزیابی خدمت اکوسیستمی ذخیره و ترسیب کربن زیرساخت‌های سبز شهری در مناطق کلانشهری، مطالعه موردی: کلانشهر تبریز. نشریه محیط‌شناسی، ۵۱(۳)، ۳۳۴-۳۳۳.

<http://doi.org/10.22059/JES.2025.399032.1008624>

© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2025.399032.1008624>

مقدمه

در طی دهه‌های اخیر، تغییرات جهانی کاربری و پوشش اراضی، الگوهای چشم‌انداز زمینی، ترکیب زیستگاه، سیستم‌های هیدرولوژیکی و چرخه مواد مغذی را به شکل بی‌سابقه‌ای تغییر داده‌اند (Alberti, 2005). این سازمان‌دهی مجدد شدید فضایی نه تنها مستقیماً مسیرهای چرخه مواد را در اکوسیستم‌های منطقه‌ای تغییر می‌دهد، بلکه از طریق سازوکارهایی مانند تکه‌تکه شدن چشم‌انداز و از بین رفتن تنوع زیستی، تأثیر عمیقی بر خدمات اکوسیستم ضروری به ویژه بر ذخیره و ترسیب کربن نیز می‌گذارد (Liu et al., 2024; Song et al., 2024). با ادامه شهرنشینی، اثرات آن فراتر از کلانشهرها رفته و به مناطق پیرامونی شهری و شهرهای کوچک، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، گسترش می‌یابد و ثبات اقتصادی و اجتماعی جهانی را تهدید می‌کند (McDonnell, 2015). مطالعات نشان می‌دهد که تغییرات جهانی اراضی کشاورزی در طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۵ منجر به از دست رفتن ۱۶۶/۸۲ میلیارد دلار خدمات اکوسیستم زمینی شده است (Li et al., 2019). تغییرات کاربری اراضی و به تبع آن تغییر در خدمات اکوسیستمی نتایج پیچیده‌ای را به دنبال دارد، به عنوان نمونه گسترش اراضی جنگلی ضمن این که می‌تواند ترسیب کربن را افزایش دهد، بازده منابع آبی را نیز کاهش می‌دهد (Fang et al., 2022; Zhao et al., 2022). کاهش خدمات اکوسیستمی پیامدهای قابل توجهی از جمله تخریب محیط‌زیست، تشدید جزایر حرارتی شهری (UHI)، افزایش تأثیرات تغییرات اقلیمی بر کاهش میزان رفاه و افزایش ریسک سیل و کاهش میزان ذخیره و ترسیب کربن را به همراه دارد (Morando-Figueroa et al, 2023).

زیرساخت‌های سبز شهری، به عنوان یک شبکه برنامه‌ریزی شده استراتژیک شامل مناطق طبیعی و نیمه‌طبیعی همراه با سایر ویژگی‌های محیطی، تعریف می‌شود که به منظور ارائه طیف وسیعی از خدمات اکوسیستمی طراحی و مدیریت می‌شود (European Commission, D.-G, 2016; European Environment Agency, 2006) و شامل فضاهای سبز و سایر عناصر فیزیکی در محیط‌های زمینی (از جمله مناطق ساحلی) و دریایی است. زیرساخت سبز یکی از اصطلاحاتی است که به طور فزاینده‌ای به منظور توصیف رسمی و غیررسمی مزایایی که انسان‌ها از محیط طبیعی به دست می‌آورند، در معنای اقتصادی و غیراقتصادی، به منظور پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های محیط‌زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرد (European Union, 2018; Washbourne, 2022). زیرساخت‌های سبز می‌تواند به حل مشکلات مدیریت سیل، چالش حرارتی، کمبود آب، ذخیره کربن، مصرف انرژی، تغذیه آب‌های زیرزمینی، فرسایش، رفاه، اتصال اکولوژیکی، آموزش محیط‌زیستی، زیبایی‌شناسی، تولید غذا یا فرصت‌های شغلی سبز کمک کند (Jato-Espino et al, 2023). زیرساخت‌های سبز شهری می‌تواند به میزان قابل توجهی بر چرخه کربن شهری و تبادلات خالص دی‌اکسیدکربن تأثیر بگذارد. زیرساخت‌های سبز این مورد را با استفاده از تثبیت کربن از طریق عمل فتوسنتز و ذخیره آن به عنوان زیست توده بالا و پایین زمینی (مانند ساقه‌ها، شاخه‌ها یا ریشه‌ها) و ماده آلی خاک، به عنوان مخزن دی‌اکسیدکربن اتمسفر انجام می‌دهد (Nowak et al, 2013; Dusenge et al, 2019).

کلانشهر تبریز به عنوان یکی از کلانشهرهای مهم ایران، با چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و توسعه سریع شهری مواجه است که با دارا بودن مراکز صنعتی مهمی نظیر نیروگاه حرارتی، مجتمع پتروشیمی، پالایشگاه، ماشین‌سازی، تراکتورسازی، ده‌ها کوره آجرپزی و ... به عنوان یکی از شهرهای آلوده کشور به شمار می‌رود. از طرفی بیش از ۵۰ درصد شهرک‌های صنعتی و ۶۱ درصد صنایع استان در حومه کلانشهر تبریز و در محدوده شعاع ۳۰ کیلومتری این شهر مستقر می‌باشند که سهم عمده آلاینده‌های صنعتی شهر را عهده‌دار هستند. استقرار کوره‌های آجرپزی سنتی و آسفالت پزی و شن و ماسه در فواصل ۱۰ تا ۲۵ کیلومتری غرب و جنوب شهر تبریز، از عوامل مهم در انتقال آلاینده‌های هوا به کلانشهر تبریز می‌باشند (قربانی و همکاران، ۱۳۹۱). از این‌رو هدف پژوهش حاضر این است که به نقش خدمت اکوسیستمی ذخیره و ترسیب کربن زیرساخت‌های سبز کلانشهر تبریز با استفاده از نرم افزار InVEST بپردازد.

پیشینه پژوهش

در رابطه با موضوع این تحقیق، پژوهش‌های متعددی در عرصه‌های داخلی و خارجی انجام شده است که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره

می‌شود. به عنوان مثال، در عرصه داخلی فدایی و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای در منطقه حفاظت‌شده جهان‌نما با مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی دریافتند که با کاهش تدریجی جنگل‌ها و مراتع که نقش کلیدی در ترسیب کربن دارند تا سال ۲۰۳۶ کاهش ۴۰ درصدی، معادل حدود ۴۰۰۸۵۹ تن، در میزان ترسیب کربن رخ خواهد داد. این روند نشان‌دهنده تأثیر منفی بهره‌برداری ناپایدار از سرزمین بر کارکرد اکوسیستم است. جهان‌داری و همکاران (۱۴۰۱) در حوضه آبخیز بندرعباس نشان دادند که توسعه شهری و اراضی کشاورزی باعث افزایش ترسیب کربن از حدود ۳/۷۴ میلیون تن در سال ۲۰۰۰ به حدود ۳/۷۶ میلیون تن در سال ۲۰۲۰ شده است. این افزایش معادل ۲۲۳۷۴ تن و دارای ارزش اقتصادی در حدود ۸۷۴۳۹۳ دلار بوده است. محمدیاری (۱۴۰۲) در استان چهارمحال و بختیاری نشان دادند که مناطق جنگلی مهم‌ترین نقش را در ذخیره کربن برعهده دارند و الگوی فضایی ذخیره کربن از شمال به جنوب به صورت کم-زیاد و متوسط توزیع شده است. در مطالعه دیگری، انصاری قولنجی و همکاران (۱۴۰۳) در منطقه ارومیه دریافتند که باغ‌ها و درخت‌زارها بیشترین سهم را در ذخیره کربن دارند و پس از آن زمین‌های بایر با پوشش گیاهی تنک قرار می‌گیرند. در مقابل، مناطق فاقد پوشش گیاهی و خاک، هیچ ذخیره کربنی ندارند.

در عرصه خارجی نیز لیانگ و پن (۲۰۲۴) به بررسی مناطق تأمین اولویت‌دار ترسیب کربن حوضه رودخانه شیانگ^۱ در شمال غربی چین با استفاده از مدل‌های تنفس خاک^۲ و مدل رویکرد کارنگی-ایمز-استنفورد (CASA و پایتون^۳ پرداخته و نشان دادند که اولاً، توزیع مکانی عرضه و تقاضای خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن به وضوح ناهمگونی را نشان می‌دهد. این امر در ویژگی‌های مکانی عرضه که «در جنوب زیاد و در شمال کم» است، و تقاضا که «در مناطق شهری زیاد و در حومه شهر کم» است، منعکس شده است. این ناهمگونی، لزوم مدیریت هدفمند را نشان می‌دهد. دوم، بخش‌های میانی و پایینی حوضه که دارای بارندگی و پوشش گیاهی کم است، مکان‌هایی با جریان ضعیف ترسیب کربن هستند. این مناطق تقریباً ۶۰ درصد از کل مساحت حوضه آبخیز را در طول زمان تشکیل می‌دهند که نیازمند توجه ویژه برای احیا هستند. سوم، منطقه با اولویت اول خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن، ۱۹/۳ درصد از کل مساحت حوضه را شامل می‌شود، در حالی که منطقه با اولویت دوم، ۲۱/۴۶ درصد حوضه را شامل می‌شود. این اولویت‌بندی می‌تواند به تخصیص بهینه منابع کمک کند (Liang & Pan, 2024).

ژو و همکاران (۲۰۲۵) تأثیر تغییر کاربری اراضی بر خدمات اکوسیستم در شمال غربی چین را با استفاده از نرم‌افزار InVEST و دوره زمانی ۲۰۲۰ - ۲۰۰۰ مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که تبدیل مرتع به بایر باعث کاهش ذخیره کربن خواهد شد. این یافته بر اهمیت حفاظت از مراتع به عنوان مخازن مهم کربن تأکید می‌کند، اما در نقطه مقابل در شمال غربی تغییر کاربری بین اراضی کشاورزی و مرتع تأثیر کمی بر خدمات اکوسیستمی دارد. این نشان می‌دهد که این دو کاربری می‌توانند در برخی شرایط عملکرد مشابهی در ترسیب کربن داشته باشند (Zhou et al., 2025).

آقالو و شریفی (۲۰۲۵) تغییر کاربری اراضی و پویایی خدمات اکوسیستم شهری را با استفاده از نرم‌افزار InVEST و دوره زمانی ۲۰۴۳-۲۰۱۷ مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که برخی از سناریوها کاهش قابل‌توجهی در ذخیره کربن به ویژه در مناطق جنوبی نشان دادند (Aghaloo & Sharifi, 2025).

شیه و همکاران (۲۰۲۵) ذخیره و ترسیب موثر کربن به وسیله فضای سبز شهری در شهر پکن را طی سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۰ با استفاده از معادلات آلومتری^۴ و ترکیبات مختلف پوشش گیاهی و انواع مناظر در سراسر پکن انجام داده و نشان دادند که بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰، ذخیره کربن و تراکم فضای سبز شهری به صورت خطی در طول زمان افزایش یافته است. با این حال، میزان ترسیب کربن یا نرخ سالانه ترسیب کربن در ابتدا افزایش یافته و سپس در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ کاهش یافته است، که احتمالاً با تغییرات در فیزیولوژی پوشش گیاهی و ساختار سنی گیاه مرتبط است. به عبارتی این مطالعه بر اهمیت ترکیب گونه‌ای و ساختار سنی

1. Shiyang
2. Soil Respiration Model
3. Python
4. Allometric Equations

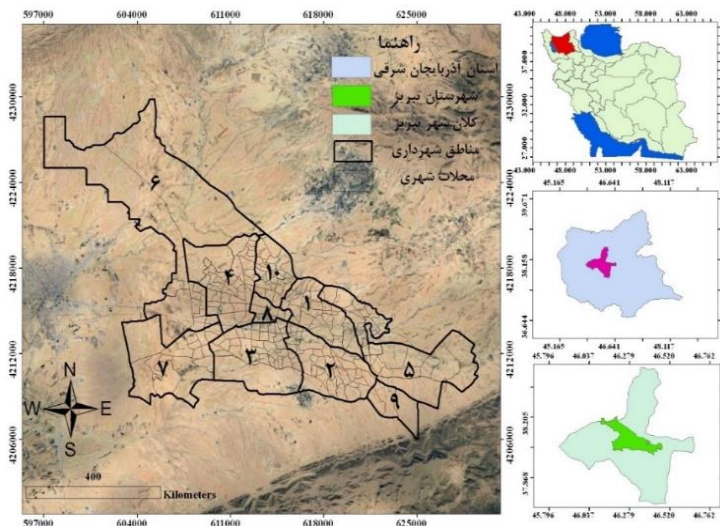
پوشش گیاهی در کارایی ترسیب کربن فضای سبز شهری تأکید کرد، به این معنی که انتخاب گونه‌های مناسب و مدیریت بهینه می‌تواند نرخ ترسیب کربن را به حداکثر برساند (Xie et al., 2025).

تفاوتی که پژوهش حاضر با پژوهش‌های انجام شده داخلی و خارجی دارد در این است که در پژوهش حاضر به خدمت اکوسیستمی ذخیره و ترسیب کربن در سه دوره زمانی ۱۳۸۱-۱۳۶۳، ۱۴۰۱-۱۳۸۱ و ۱۴۱۹-۱۴۰۱ و در سطح مناطق ده‌گانه کلانشهر تبریز پرداخته شده است که در هیچ یک از پژوهش‌های انجام شده بدان پرداخته نشده است.

روش پژوهش

محدوده مورد مطالعه

کلانشهر تبریز در گوشه شمال غربی کشور و در امتداد محور بین‌المللی تهران-بازرگان که ایران را به اروپا متصل می‌سازد قرار گرفته است. شهر تبریز با وسعتی حدود ۱۱۸۰۰ کیلومتر در ۴۶ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۲ دقیقه عرض شمالی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است. متوسط ارتفاع شهر حدود ۱۳۴۰ متر از سطح دریاهای آزاد برآورد گردیده است (زینالی‌عظیم و همکاران، ۱۴۰۰). به لحاظ ویژگی‌های جغرافیایی و طبیعی، موقعیت استقرار شهر تبریز و هسته اولیه شکل‌گیری شهر حاکی از مناسب‌ترین و مساعدترین عوامل جغرافیایی بوده که به دلیل همین مواهب و مساعدت‌های جغرافیایی در روند تاریخی توسعه فیزیکی به یکی از بزرگ‌ترین شهرهای کشور تبدیل شده است (مهندسین مشاور نقش محیط، ۱۳۹۱). رودخانه آجی‌چای (تلخه رود) از قسمت شمال و شمال غرب تبریز می‌گذرد و بعد از طی مسافتی قابل توجه در دشت تبریز به دریاچه ارومیه می‌ریزد و مهران‌رود نیز از میانه تبریز می‌گذرد. بر اساس آمار مربوط به آخرین سرشماری عمومی نفوس و مسکن (۱۳۹۵) کلانشهر تبریز دارای ۱۵۵۸۶۹۳ نفر جمعیت و ۴۹۷۸۹۸ خانوار است که از این تعداد ۷۸۶۶۶۱ نفر مرد و ۷۷۲۰۳۲ نفر زن هستند و بعد خانوار آن هم ۳٫۱ است. بر پایه آخرین تقسیمات اداری، کلانشهر تبریز از ۱۰ منطقه شهرداری تشکیل شده است (شکل ۱). بزرگ‌ترین آن از لحاظ وسعت، منطقه ۶ و کوچک‌ترین آن، منطقه ۸ می‌باشد. از لحاظ جمعیتی نیز، منطقه ۴ بیشترین جمعیت و منطقه ۹، کمترین جمعیت را دارد (تابعی و همکاران، ۱۴۰۱).



شکل ۱. نقشه محدوده مورد مطالعه

داده‌ها

در این پژوهش از مدل ذخیره و ترسیب کربن از مجموعه بسته‌های نرم‌افزاری InVEST 3.12.0 استفاده شده است. این مدل از جمله مدل‌هایی است که ذخیره و ترسیب کربن را بر اساس نقشه کاربری اراضی / پوشش اراضی، جدول بیوفیزیکی، ارزشگذاری اقتصادی (هزینه اجتماعی کربن) محاسبه می‌کند. در نهایت این مدل نتیجه را از طریق فایل‌های رستری زیر برآورد می‌کند:

- نقشه میزان ذخیره کربن در قالب رستری
- نقشه میزان ترسیب کربن در قالب رستری
- نقشه ارزشگذاری اقتصادی (هزینه اجتماعی کربن) در قالب رستری
- نقشه ارزش پولی خدمت اکوسیستمی ذخیره و ترسیب کربن را با استفاده از روش ارزشگذاری اقتصادی (هزینه اجتماعی کربن) در قالب رستری
- ارزش پولی خدمت اکوسیستمی ذخیره و ترسیب کربن را با استفاده از روش ارزشگذاری اقتصادی (هزینه اجتماعی کربن) در قالب جدول توصیفی برآورد می‌کند.

مدل خدمت اکوسیستمی ذخیره و ترسیب کربن

مدل InVEST ارزش اقتصادی پتانسیل ترسیب کربن را بین زمان حال و آینده بر اساس ظرفیت ذخیره کربن فعلی در چشم‌اندازها محاسبه می‌کند. کربن زمینی، به ظرفیت کربن ذخیره شده در چشم‌اندازهای ناهمگن اشاره دارد (Arcidiacono et al., 2015; IPCC, 2006). کربن ذخیره شده در یک قطعه زمین در زمان t که در C_{xt} آورده شده و با C اندازه‌گیری می‌شود، برابر با کل کربن ذخیره شده در هر مخزن در یک قطعه زمین در زمان t است (رابطه ۱) (Conte et al., 2011).

$$C_{xt} = \sum_{j=1}^J A_{xjt} (C_{aj} + C_{bj} + C_{sj} + C_{oj}) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$C_t = \sum_{x=1}^X C_{xt} \quad \text{رابطه (۲)}$$

A_{xjt} مساحت کاربری اراضی / پوشش اراضی z در قطعه زمین x در زمان t است، C_{aj} زیست توده رو زمینی، C_{bj} زیست توده زیرزمینی، C_{sj} کربن آلی مرده و C_{oj} کربن ماده آلی مرده است (Ibid). کل ذخیره کربن در تمام قطعات زمین در منطقه مورد مطالعه با C_t در قالب رابطه ۲ آورده شده است (Gibbs et al., 2007; Glenday, 2006). برای تعیین Mg (مگاگرم) کربن ذخیره شده در کل چشم‌انداز در زمان t ، تمام مقادیر ذخیره کربن در سطح قطعه زمین با هم جمع می‌شوند. تعداد کلاس‌های کاربری اراضی / پوشش اراضی که در منطقه بر اساس ساختار چشم‌انداز تغییر می‌کنند، برای هر نوع کاربری اراضی / پوشش اراضی در زمان آینده، (i) احتمال تغییر کلاس کاربری اراضی / پوشش اراضی z به کلاس دیگر، یا (ii) ثابت ماندن نوع کاربری اراضی / پوشش اراضی z بدون وقوع هیچ‌گونه تغییری در کاربری اراضی / پوشش اراضی وجود دارد. در حالی که C_{xt} کل ذخیره کربن زمینی در قطعه زمین x را در زمان t نشان می‌دهد، C_{xm} ظرفیت ذخیره کربن در قطعه زمین x را برای سال $m \in [t, T]$ نشان می‌دهد، که در آن m نشان‌دهنده دوره زمانی از سال t تا T است. مدل، ضرایب از t تا T ظرفیت ذخیره‌سازی کربن را با فواصل α_{jtTj1} ، α_{jtTj5} ، α_{jtTj11} و ... افزایش می‌دهند (Conte et al., 2011; Nelson et al., 2009; Smith et al., 2006).

$$C_{xm} = \sum_{j=1}^J A_{xjtm} (\alpha_{jij1} C_{aj} + \beta_{jij1} C_{bj} + \gamma_{jij1} C_{sj} + \eta_{jij1} C_{oj}) \quad \text{رابطه (۳)}$$

برای تعیین میزان کربن ذخیره شده در یک قطعه زمین از سال t تا T ($t < T$) که با ΔC_{xtT} نشان داده می‌شود، از رابطه ۴ برای محاسبه میزان کربن ذخیره شده در یک قطعه زمین در سال t ، C_{xt} ، و در سال T ، C_{xT} استفاده می‌شود که هرگونه تغییر در کاربری اراضی / پوشش اراضی هر قطعه زمین بین t و T را در نظر می‌گیرد و سپس C_{xt} را از C_{xT} کم می‌کند (Conte et al., 2014):

$$\Delta C_{xtT} = C_{xT} - C_{xt} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\Delta C_{tT} = \sum_{x=1}^X \Delta C_{xtT} \quad \text{رابطه (۵)}$$

رابطه ۵ تغییر در ذخیره کربن از t تا T را در کل چشم‌انداز نشان می‌دهد. در این مورد، C_{xt} نقطه مبنا یا پایه برای تعیین این که آیا ترسیب خالص از t تا T اتفاق افتاده است یا خیر، می‌باشد. اگر ΔC_{tT} مثبت باشد، ترسیب کربن از t تا T در چشم‌انداز اتفاق افتاده است. اگر

ΔC_{tT} منفی باشد، کربن بین t و T از بین رفته و ترسیب اتفاق نیافتاده است (Glenday, 2006). کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌تواند از طریق افزایش ذخیره و ترسیب کربن زمینی، شدت تغییرات اقلیمی آینده و آسیب‌های مرتبط با آن را کاهش دهد. مدل‌های ارزیابی یکپارچه (IAMs)^۱ از طریق ارتباط افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو و افزایش مورد انتظار دما با خسارت خالص اقتصادی جهانی یا منطقه‌ای مورد انتظار در طی زمان، آسیب‌های بالقوه را تخمین می‌زند (Nordhaus, 1992). هزینه اجتماعی کربن (SCC)^۲ در صورتی که سایر عوامل ثابت باشند، نشان‌دهنده هزینه نهایی انتشار یک تن متریک کربن اضافی است. این هزینه بیشتر خود را در خسارت اقتصادی ناشی از غلظت بالای گازهای گلخانه‌ای جوی نشان می‌دهد. برای محاسبه ارزش اجتماعی ترسیب کربن در چشم‌انداز x در طی سال‌های t تا T ، میزان ترسیب کربن x (مثبت یا منفی) در آن دوره بایستی در هزینه اجتماعی کربن ضرب شود. تمام مقادیر سالانه بایستی به مقادیر سال t محدود شده و حاصل در تمام مقادیر محدود شده جمع شود (Conte et al., 2011).

$$VAD_{xtT} = \sum_{m=t}^{T-1} \frac{\Delta C_{x,m,m+1} SCC_{m+1}}{(1+r)^{m-t}} \quad \text{رابطه (۶)}$$

VAD_{xtT} (ارزش خسارت اجتناب شده) ارزش فعلی تمام خسارت‌های اقتصادی اجتناب شده به دلیل ترسیب کربن در فضای سبز x از زمان t تا T است (رابطه ۶). $\Delta C_{x,z,z+1}$ میزان کربن ترسیب شده در فضای سبز x را بین سال z و $z+1$ اندازه‌گیری می‌کند، SCC_{z+1} میزان هزینه اجتماعی کربن (SCC) در سال $z+1$ است و r نرخ تنزیل است (Ibid; Sharp et al., 2016). برای تهیه هر یک از داده‌های مورد نیاز مدل طبق روش زیر عمل شد:

نقشه کاربری اراضی/پوشش اراضی و سناریوی آبی آن

برای تهیه نقشه کاربری اراضی/پوشش اراضی از تصاویر ماهواره ای لندست ۵ برای سال‌های ۱۹۸۴ سنجنده TM و ۲۰۰۲ سنجنده ETM+ و لندست ۸ برای سال ۲۰۲۲ سنجنده OLS، نرم افزار ENVI 5.8، GIS و روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال (MLC)^۳ استفاده شد. تصاویر ماهواره‌ای موردنظر مربوط به فصل تابستان، طول روز و تاریخ‌های ۱۹۸۴/۰۶/۲۴، ۲۰۰۲/۰۶/۲۶ و ۲۰۲۲/۰۶/۱۷ بوده است. برای ارزیابی صحت نقشه‌های به‌دست آمده از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای، از روش نمونه‌برداری تصادفی (نمونه‌های تعلیمی) به عنوان نقاط واقعیت زمینی (نقاط کنترلی) استفاده شد. با به کارگیری نقاط کنترلی که از طریق تصاویر گوگل ارث، نقشه‌های کاربری اراضی و تفسیر بصری جمع‌آوری شده‌اند، دقت طبقه‌بندی با استفاده از ماتریس خطا و پارامترهای آماری (صحت کلی و ضریب کاپا)، محاسبه گردید که نشان‌دهنده دقت بالای طبقه‌بندی است (جدول ۱). علت استفاده از روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال در این پژوهش قابلیت این روش در محاسبه دقیق احتمال تعلق هر پیکسل به کلاس‌های مختلف بر اساس توزیع آماری و ضریب همبستگی باندهای مورد استفاده در داده‌های آموزشی می‌باشد.

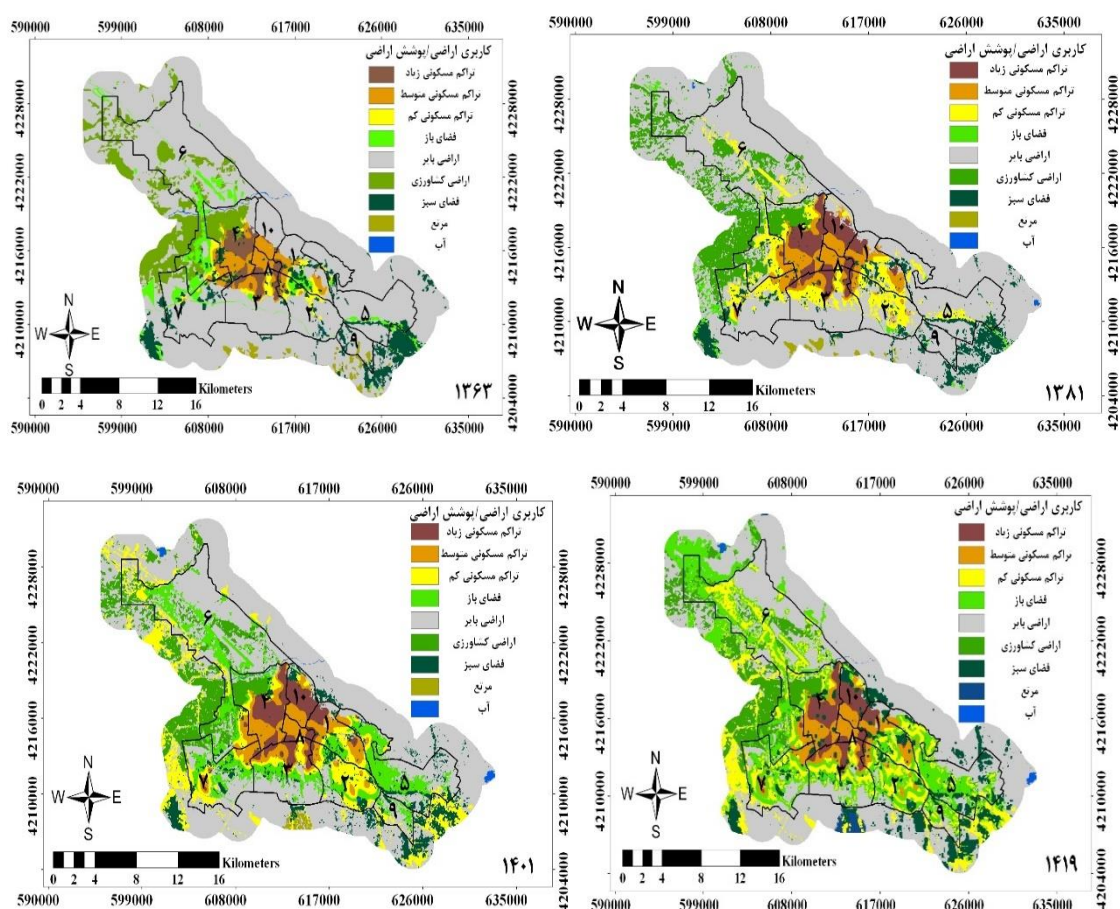
جدول ۱. مقادیر ارزیابی صحت تصاویر طبقه‌بندی شده به روش حداکثر احتمال (منبع: یافته‌های تحقیق)

سال	ضریب کاپا (%)	صحت کلی (%)
۱۹۸۴	۹۵	۹۶/۴
۲۰۰۲	۹۳	۹۵/۲
۲۰۲۲	۹۶/۶	۹۷/۴

در این پژوهش نقشه کاربری اراضی/پوشش اراضی سال ۲۰۴۰ تبریز نیز با استفاده از روش زنجیره مارکوف (MC)^۴ به همراه سناریوی روند فعلی برای دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۲ تهیه شد. نقشه کاربری اراضی/پوشش اراضی در ۹ کلاس شامل تراکم مسکونی زیاد،

1. Integrated Assessment Models
2. Social Cost of Carbon
3. Maximum Likelihood Classification
4. Markov Chain

تراکم مسکونی متوسط، تراکم مسکونی کم، فضای باز، اراضی باغی، اراضی کشاورزی، فضای سبز، مرتع و آب با پیکسل ۳۰ متر تهیه شد. در این پژوهش کلاس کاربری تراکم مسکونی زیاد، تراکم مسکونی متوسط و تراکم مسکونی کم با استفاده از نقشه طرح جامع تبریز و هم‌پوشانی نقشه تراکم ساختمانی با لایه LULC در مرحله طبقه‌بندی و در مرحله پس پردازش با لایه‌برداری به دست آمده است. همچنین در این پژوهش کلاس کاربری اراضی کشاورزی، فضای سبز و مرتع از نظر موقعیت جغرافیایی، در شیب‌های متفاوت زمین قرار گرفته و در کنار بازتاب طیفی مختلف با استفاده از طبقه‌بندی و پس‌پردازش از هم جدا شده‌اند. با توجه به این که خارج از محدوده مناطق شهرداری تبریز و در اطراف این مناطق زیرساخت‌های سبزی وجود دارد که در ذخیره و ترسیب کربن شهری نقش دارند، از این‌رو برای این که بتوان به صورت کامل نقش زیرساخت‌های سبز را ذخیره و ترسیب کربن تبریز نشان داد، نقشه کاربری اراضی/پوشش اراضی تبریز در حدود ۲۵۰ هکتار از تمام جهات بیشتر از محدوده مناطق ده‌گانه شهرداری در نظر گرفته شد و ترسیم گردید (شکل ۲).



شکل ۲. نقشه کاربری اراضی/پوشش اراضی کلانشهر تبریز به ترتیب از چپ به راست برای سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۱، ۱۴۰۱ و ۱۴۱۹ (منبع: یافته‌های تحقیق)

جدول بیوفیزیکی

جدول بیوفیزیکی، یک فایل اکسل با پسوند CSV است که در آن اطلاعاتی راجع به هر یک از کاربری اراضی/پوشش اراضی که در نقشه کاربری اراضی وجود دارد و اطلاعاتی در مورد جذب کربن با توجه به چهار جاذب زیست‌توده رو زمینی، زیست‌توده زیرزمینی، خاک و مواد مرده روی زمین به ازای هر تن در هکتار آورده می‌شود. به عبارتی، هر یک از کاربری اراضی/پوشش اراضی با توجه به میزان

جاذب چهارگانه، میزان کربنی را که می‌تواند ترسیب دهد، آورده می‌شود. لازم است اطلاعات مرتبط با نقشه کاربری اراضی و جدول بیوفیزیکی باهم منطبق باشد. مقادیر آماری کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه برای هر یک از چهار جاذب با توجه به عدم وجود مطالعات جامع در مقیاس منطقه‌ای از میزان کربن موجود در چهار منبع ذخیره کربن و عدم امکان مطالعات میدانی و نمونه‌برداری داده‌های ورودی مورد نیاز مدل از گزارش‌های مربوط به دستورالعمل پانل بین دولتی تغییرات اقلیمی IPCC (۲۰۰۶) و همچنین با استفاده از مطالعات سارگای^۱ و همکاران (۲۰۲۴) که منطقه مورد مطالعه آنها از نظر مشابه تبریز می‌باشند استخراج گردیده، در جدول بیوفیزیکی و سپس در مدل InVEST وارد شد (جدول ۲).

جدول ۲. بیوفیزیکی (منبع: یافته‌های تحقیق)

lucode	LULC_Name	C_above	C_below	C_soil	C_dead
1	Residential 9-16 units/acre	0	0	0	0
2	Residential 4-9 units/acre	0	0	0	0
3	Residential 0-4 units/acre	0	0	0	0
4	Vacant	1.55	5.76	63.02	0
5	Bare/fallow	1.66	5.76	33.32	0
6	Irrigated annual crop rotation	5.29	14.87	74.58	2.36
7	Orchard	11.45	27.4	126.92	6.26
8	Pasture	3.17	14.68	57.37	1.87
9	Stream orders 5-7	0	0	0	0

ارزشگذاری اقتصادی (هزینه اجتماعی کربن (SCC))

در این پژوهش، واحد پولی دلار با توجه به پذیرش جهانی آن انتخاب شده و هزینه ۱۰۰ دلار با توجه به حداقل هزینه لازم برای جمع‌آوری و ذخیره‌سازی کربن آزاد شده از نیروگاه‌ها لحاظ شده است. در مدل InVEST، دو نوع نرخ تورم وجود دارد که نرخ تورم اولی مربوط به نرخ تورم هر کشوری به تنهایی می‌باشد که در مورد ایران با توجه به داده‌های مربوط به سایت www.fred.stlouisfed.org، این نرخ ۰/۱۲ در نظر گرفته شد و نرخ تورم دوم مربوط به تغییر تاثیر انتشار کربن در مورد آسیب‌های موردانتظار مربوط به تغییرات اقلیمی است. در صورتی که انتظار برود کربن ترسیب شده در وضعیت حال، تاثیر بیشتری بر کاهش تغییرات اقلیمی نسبت به ترسیب کربن آتی داشته باشد، این نرخ باید مثبت باشد. اما اگر انتظار برود که کربن ترسیب شده امروز تاثیر کمتری بر کاهش تغییرات آب و هوایی نسبت به کربن ترسیب شده آتی داشته باشد، این نرخ باید منفی باشد. با توجه به انتشار شدید و روزافزون گازهای گلخانه‌ای و تاثیر آن بر تغییرات آب و هوایی، با استفاده از شاخص‌های اقتصادی، داده‌های مرتبط با سایت www.tradingeconomics.com و داده‌های مرتبط با انتشار دی‌اکسیدکربن این نرخ مثبت و ۰/۳۴ در نظر گرفته شد.

یافته‌ها

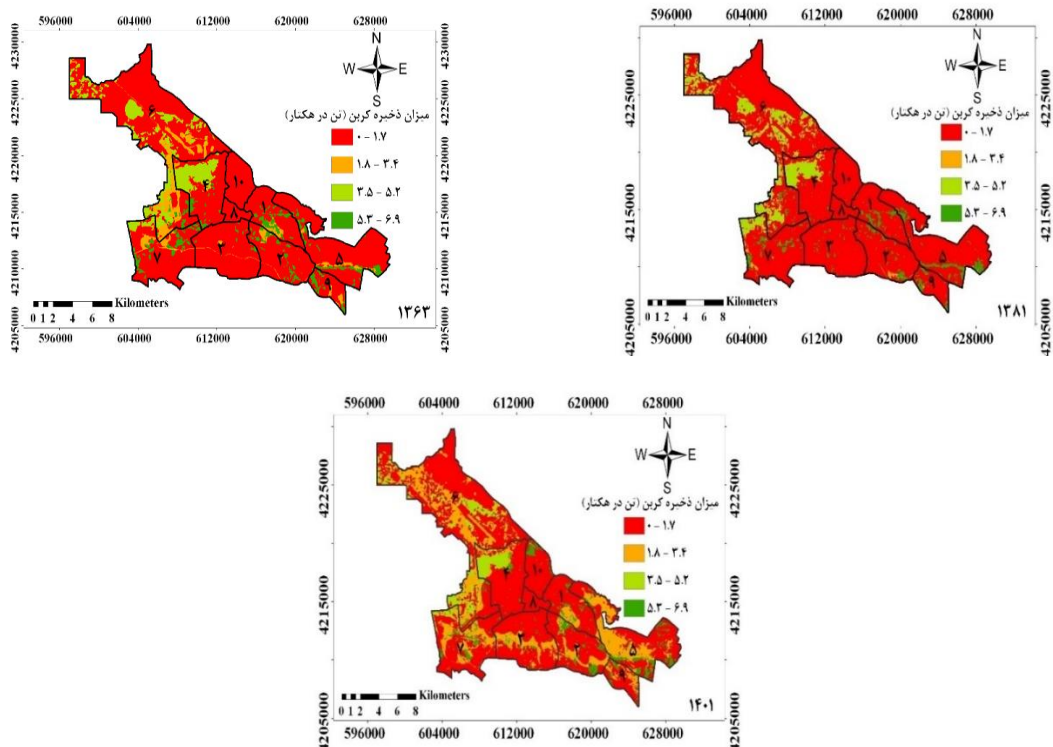
کاربری اراضی/پوشش اراضی

بررسی روند تغییرات کاربری اراضی از سال ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۱ نشان می‌دهد که اراضی بایر و کشاورزی در این بازه زمانی ۳۸ ساله روند کاهشی داشته است، کاربری مسکونی از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۱ روند افزایشی (در حدود ۱۶/۵۴ درصد) داشته و از سال ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱، در حدود ۰/۵۰ درصد افزایش داشته و از سال ۱۴۰۱ تا ۱۴۱۹ طبق پیش‌بینی زنجیره مارکوف کاربری اراضی/پوشش اراضی در حدود ۴/۳۵ درصد افزایش خواهد داشت. فضای سبز نیز از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۱ روند کاهشی (۰/۸۷ درصد) داشته، از سال ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱ در حدود ۰/۹۷ درصد افزایش داشته و از سال ۱۴۰۱ تا ۱۴۱۹ نیز ۱/۹۴ درصد افزایش خواهد داشت. در کل بررسی تغییرات کاربری اراضی مربوط

به کلانشهر تبریز در بازه زمانی ۵۶ ساله نشان می‌دهد که کاربری‌های مربوط به زیرساخت‌های سبز مانند فضای سبز و مرتع که نقش فزاینده‌ای در ذخیره و ترسیب کربن دارند، کمترین میزان از کل کاربری‌های شهری تبریز را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۲).

ظرفیت ذخیره کربن در بین مناطق دهگانه کلانشهر تبریز

نقشه‌های مربوط به ظرفیت ذخیره کربن برای کلانشهر تبریز در ۴ کلاس کمترین تا بیشترین میزان ذخیره کربن برحسب واحد تن طبقه‌بندی گردید. در سال ۱۳۶۳ در بین مناطق دهگانه تبریز در کلاس کمینه یعنی کلاس ۰ تا ۱/۷ تن، به ترتیب مناطق ۶، ۵ و ۳ با ۲۸/۴۵، ۱۵/۲۶ و ۱۲/۷۶ درصد، و در کلاس بیشینه یعنی کلاس ۵/۳ تا ۶/۹ تن، مناطق ۷، ۵ و ۱ با ۲۱/۸۳، ۲۰/۲۶ و ۱۵/۳۱ درصد رتبه‌های اول تا سوم ذخیره کربن را به خود اختصاص داده‌اند. کلانشهر تبریز در سال ۱۳۶۳، در کلاس‌های مذکور به ترتیب ۲۰۴۹۶/۰۴ تن (۷۸/۳۶ درصد) و ۱۴۷۲۳/۵۷ تن (۵/۶۳ درصد) ذخیره کربن داشته است. در کل، در این سال کلانشهر تبریز توانسته در حدود ۲۶۱۵۵/۱۵ تن کربن را ذخیره کند. در سال ۱۳۸۱ در بین مناطق دهگانه تبریز در کلاس کمینه یعنی کلاس ۰ تا ۱/۷ تن، به ترتیب مناطق ۶، ۵ و ۳ با ۲۹/۳۶، ۱۴/۵۳ و ۱۱/۹۴ درصد و در کلاس بیشینه یعنی کلاس ۵/۳ تا ۶/۹ تن، مناطق ۵، ۷ و ۱ با ۲۸/۱۶، ۱۷/۱۷ و ۱۴/۲۲ درصد رتبه‌های اول تا سوم ذخیره کربن را به خود اختصاص داده‌اند. در کل کلانشهر تبریز در سال ۱۳۸۱، در کلاس‌های مذکور به ترتیب ۲۱۹۸۳/۰۶ تن (۸۴/۰۵ درصد) و ۱۲۴۱/۷۸ تن (۴/۷۵ درصد) ذخیره کربن داشته است. در کل در این سال کلانشهر تبریز توانسته در حدود ۲۶۱۵۴/۶۲ تن کربن را ذخیره کند. در سال ۱۴۰۱ در بین مناطق دهگانه تبریز در کلاس کمینه یعنی ۰ تا ۱/۷ تن، مناطق ۶، ۳ و ۵ به ترتیب با ۳۰/۲۸، ۱۱/۷۸ و ۱۰/۸۴ درصد و در کلاس بیشینه ۵/۳ تا ۶/۹ تن، مناطق ۵، ۲ و ۷ با ۲۸/۱۴، ۱۸/۱۹ و ۱۴/۵۴ درصد رتبه‌های اول تا سوم ذخیره کربن را به خود اختصاص داده‌اند. کلانشهر تبریز در سال ۱۴۰۱، در کلاس‌های مذکور به ترتیب با ۱۷۱۹۷/۵۷ تن (۶۵/۷۶ درصد) و ۱۴۹۷/۸۸ تن (۵/۷۳ درصد) ذخیره کربن داشته است. در کل در این سال کلانشهر تبریز توانسته در حدود ۲۶۱۵۱/۰۳ تن کربن را ذخیره کند. در کلانشهر تبریز در طی هر سه دوره مذکور به ترتیب مناطق ۵، ۷ و ۱ بیشترین میزان ذخیره کربن را داشته‌اند. (شکل ۳).



شکل ۳. نقشه‌های ظرفیت ذخیره کربن برای سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ برحسب تن در هکتار (منبع: یافته‌های تحقیق)

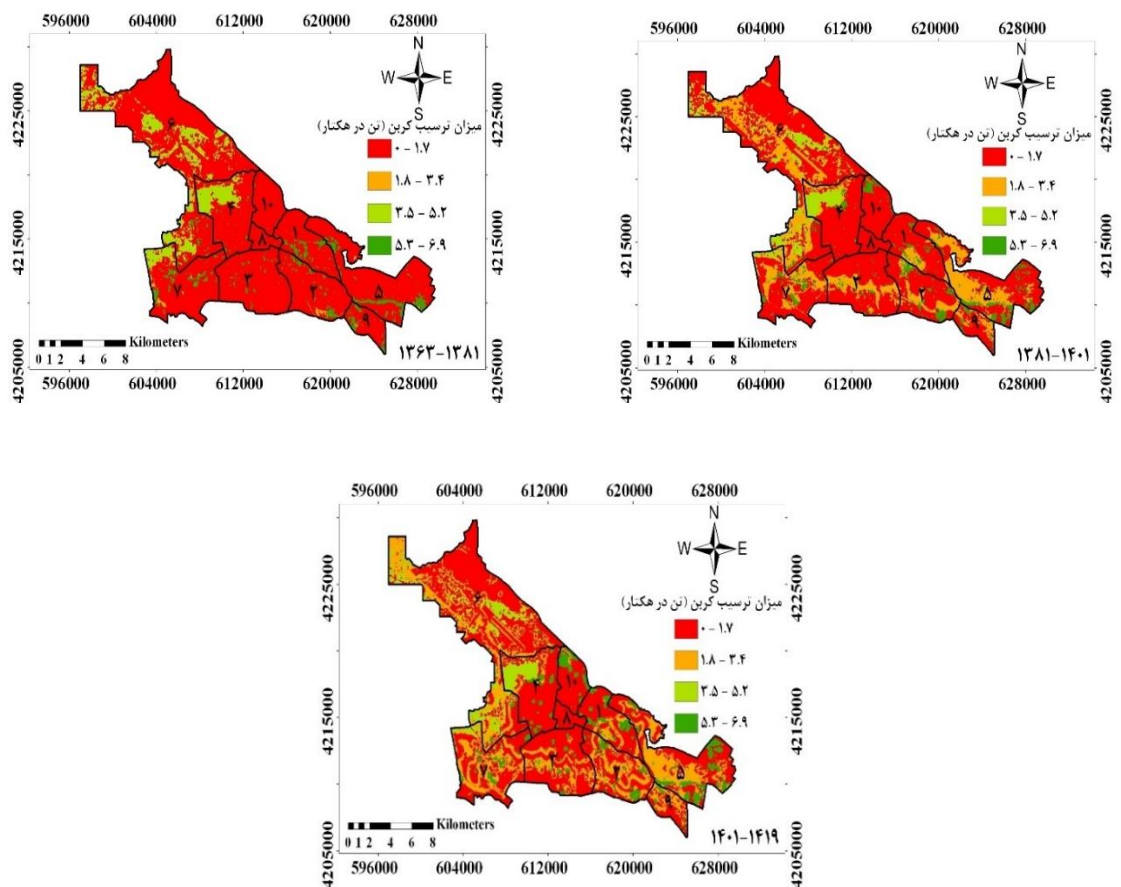
ظرفیت ذخیره کربن براساس کاربری اراضی/پوشش اراضی کلانشهر تبریز

تجزیه و تحلیل ظرفیت ذخیره کربن براساس کاربری اراضی/پوشش اراضی کلانشهر تبریز نشان می‌دهد که در سال ۱۳۶۳ در کلاس کمینه یعنی کلاس ۰ تا ۱/۷ تن به ترتیب کاربری‌های اراضی بایر، تراکم مسکونی متوسط و تراکم مسکونی زیاد با ۸۰/۳۳، ۹/۳۳ و ۶/۱۰ درصد و در کلاس بیشینه یعنی کلاس ۵/۳ تا ۶/۹ تن، کاربری‌های فضای سبز، اراضی بایر و تراکم مسکونی متوسط با ۹۹/۴۲، ۰/۲۰ و ۰/۱۹ درصد رتبه‌های اول تا سوم ذخیره کربن را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۳۸۱ در کلانشهر تبریز در کلاس کمینه یعنی کلاس ۰ تا ۱/۷ تن، به ترتیب کاربری‌های اراضی بایر، تراکم مسکونی کم و تراکم مسکونی متوسط با ۶۱/۹۱، ۱۶/۷۹ و ۱۱/۶۱ درصد و در کلاس بیشینه یعنی کلاس ۵/۳ تا ۶/۹ تن، کاربری‌های فضای سبز، تراکم مسکونی کم و اراضی بایر با ۹۸/۶۳، ۰/۶۰ و ۰/۵۸ درصد رتبه‌های اول تا سوم ذخیره کربن را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۴۰۱ در کلانشهر تبریز در کلاس کمینه یعنی کلاس ۰ تا ۱/۷ تن، به ترتیب کاربری‌های اراضی بایر، تراکم مسکونی کم و تراکم مسکونی متوسط به ترتیب با ۵۲/۱، ۱۸/۲۶ و ۱۶/۶۷ درصد و در کلاس بیشینه یعنی کلاس ۵/۳ تا ۶/۹ تن، کاربری‌های فضای سبز، تراکم مسکونی کم و اراضی بایر با ۹۹/۳۲، ۰/۲۳ و ۰/۲۲ درصد رتبه‌های اول تا سوم ذخیره کربن را به خود اختصاص داده‌اند. در کل تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که در ظرفیت ذخیره کربن کلانشهر تبریز در طی سه دوره زمانی ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ به ترتیب کاربری‌های فضای سبز، اراضی بایر و تراکم مسکونی کم بیشترین نقش را دارند.

ظرفیت ترسیب کربن در بین مناطق دهگانه کلانشهر تبریز

نقشه‌های مربوط به ظرفیت ترسیب کربن برای کلانشهر تبریز در ۴ کلاس کمترین تا بیشترین میزان ترسیب کربن برحسب واحد تن طبقه‌بندی گردید. در دوره زمانی ۱۳۶۳-۱۳۸۱ در بین مناطق دهگانه تبریز در کلاس کمینه یعنی کلاس ۰ تا ۱/۷ تن، مناطق ۵ و ۳ به ترتیب با ۲۹/۳۶، ۱۴/۵۳ و ۱۱/۹۴ درصد و در کلاس بیشینه یعنی کلاس ۵/۳ تا ۶/۹ تن، مناطق ۵، ۷ و ۱ با ۲۸/۱۶، ۱۷/۱۷ و ۱۴/۲۲ درصد رتبه‌های اول تا سوم ترسیب کربن را به خود اختصاص داده‌اند. کلانشهر تبریز در این دوره، در کلاس‌های مذکور به ترتیب ۲۱۹۸۳/۰۶ (۸۴/۰۵ درصد) و ۱۲۴۱/۷۸ تن (۴/۷۵ درصد) ترسیب کربن داشته است. در کل، کلانشهر تبریز در این دوره زمانی توانسته در حدود ۲۶۱۵۴/۶۲ تن کربن را ترسیب کند. کلانشهر تبریز در دوره زمانی مذکور، ۲۴۳۷۸/۵۳ تن (۹۳/۲۱ درصد) ترسیب منفی و ۱۷۷۶/۴۱ تن (۶/۷۹ درصد) ترسیب مثبت داشته است. در کلانشهر تبریز در دوره زمانی مذکور، مناطق ۵ و ۷ به ترتیب با ۷۵۴۴/۵۴ تن (۳۰/۹۵ درصد)، ۳۳۹۵/۵۱ تن (۱۳/۹۳ درصد) و ۲۶۹۴/۷۱ تن (۱۱/۰۵ درصد) بیشترین میزان ترسیب منفی و مناطق ۶، ۷ و ۲ با ۸۸۶/۳۵ تن (۴۹/۹۰ درصد)، ۲۵۳/۴۴ (۱۴/۲۷ درصد) و ۱۷۲/۳۳ تن (۹/۷۰ درصد) بیشترین میزان ترسیب مثبت را به خود اختصاص داده‌اند. در دوره زمانی ۱۳۸۱-۱۴۰۱ در بین مناطق دهگانه تبریز در کلاس کمینه یعنی کلاس ۰ تا ۱/۷ تن، مناطق ۵ و ۳ به ترتیب با ۳۰/۲۸، ۱۱/۷۸ و ۱۰/۸۴ درصد و در کلاس بیشینه یعنی کلاس ۵/۳ تا ۶/۹ تن، مناطق ۵، ۲ و ۷ با ۲۸/۱۴، ۱۸/۱۹ و ۱۴/۵۴ درصد رتبه‌های اول تا سوم ترسیب کربن را به خود اختصاص داده‌اند. در کل کلانشهر تبریز در دوره زمانی ۱۳۸۱-۱۴۰۱، در کلاس‌های مذکور به ترتیب با ۱۷۱۹۷/۵۷ تن (۶۵/۷۶ درصد) و ۱۴۹۷/۸۸ تن (۵/۷۳ درصد) ترسیب کربن را داشته است. در کل، در این دوره زمانی کلانشهر تبریز توانسته در حدود ۲۶۱۵۱/۰۳ تن کربن را ترسیب کند. کلانشهر تبریز در دوره زمانی مذکور، ۱۹۶۲۲/۹۹ تن (۷۵/۰۴ درصد) ترسیب منفی و ۶۵۲۸/۱۸ تن (۲۴/۹۶ درصد) ترسیب مثبت داشته است. مناطق ۴ و ۵ به ترتیب با ۶۲۳۰/۹۴ تن (۳۱/۷۵ درصد)، ۲۲۸۲/۰۹ تن (۱۱/۶۳ درصد) و ۲۱۲۴/۲۵ تن (۱۰/۸۳ درصد) بیشترین میزان ترسیب منفی و مناطق ۵ و ۷ با ۲۱۹۵/۷۱ تن (۳۳/۶۳ درصد)، ۱۴۴۱/۱۱ (۲۲/۰۸ درصد) و ۸۳۷/۱۳ تن (۱۲/۸۲ درصد) بیشترین میزان ترسیب مثبت را به خود اختصاص داده‌اند. در دوره زمانی ۱۴۰۱-۱۴۱۹ در بین مناطق دهگانه تبریز در کلاس کمینه یعنی کلاس ۰ تا ۱/۷ تن، مناطق ۳ و ۴ به ترتیب با ۳۱/۱۵، ۱۲/۶۳ و ۱۰/۸۱ درصد و در کلاس بیشینه یعنی کلاس ۵/۳ تا ۶/۹ تن، مناطق ۵، ۱ و ۱۰ با ۲۸/۳۱، ۱۴/۰۵ و ۱۱/۹۹ درصد رتبه‌های اول تا سوم ترسیب کربن را به خود اختصاص داده‌اند. در کل، کلانشهر تبریز در دوره زمانی ۱۴۰۱-۱۴۱۹، در کلاس‌های مذکور به ترتیب ۱۵۳۲۷/۳۶ تن (۵۸/۶۱ درصد) و ۲۰۰۴/۲۵ تن (۷/۶۶ درصد) ترسیب کربن داشته است. در کل، در این دوره زمانی کلانشهر

تبریز توانسته در حدود ۲۶۱۵۰/۴۹ تن کربن را ترسیب کند. این شهر در دوره زمانی مذکور، ۲۰۴۴۹/۵۵ تن (۷۸/۲۰ درصد) ترسیب منفی و ۵۷۰۰/۹۷ تن (۲۱/۸۰ درصد) ترسیب مثبت داشته است. در کلانشهر تبریز در دوره مذکور، مناطق ۵، ۴ و ۶ به ترتیب با ۶۵۵۸/۹۶ تن (۳۲/۰۷ درصد)، ۲۸۳۰/۱۲ تن (۱۳/۸۴ درصد) و ۲۲۲۶/۷۶ تن (۱۰/۸۹ درصد) بیشترین میزان ترسیب منفی و مناطق ۶، ۷ و ۲ با ۱۸۶۸/۰۵ تن (۳۲/۷۷ درصد)، ۷۵۰/۹ تن (۱۳/۱۷ درصد) و ۷۴۱/۷۷ تن (۱۳/۰۱ درصد) بیشترین میزان ترسیب مثبت را به خود اختصاص داده اند. در این کلانشهر در طی هر سه دوره زمانی مذکور، به ترتیب مناطق ۵، ۷ و ۱ و مناطق ۶، ۷ و ۲ بیشترین میزان ترسیب کربن و ترسیب مثبت کربن را داشته‌اند. کلانشهر تبریز در هر سه دوره زمانی مذکور توانسته بیشتر کربنی را که ذخیره کرده بود را ترسیب کند ولی ترسیب منفی آن خیلی بیشتر از ترسیب مثبت بوده است. به عبارتی وضعیت کلانشهر تبریز در هر سه دوره مذکور به لحاظ ترسیب کربن بدتر شده است (شکل‌های ۴ و ۵).

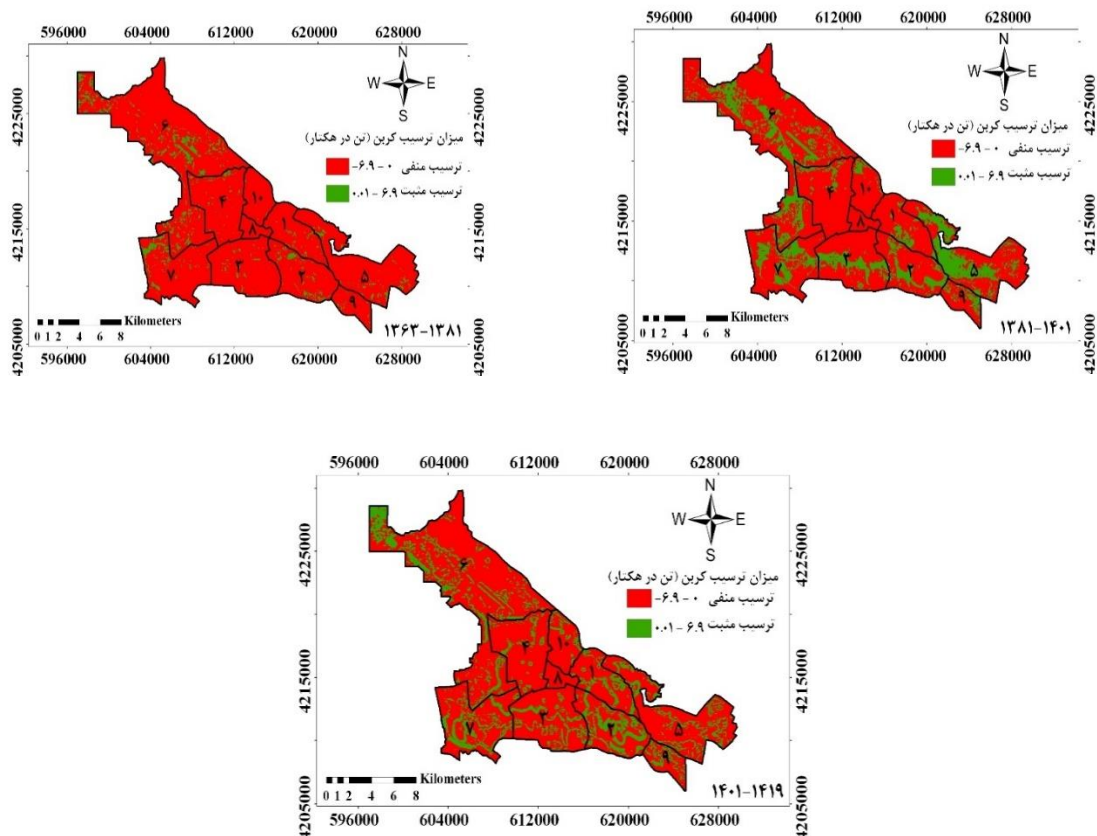


شکل ۴. نقشه‌های ظرفیت ترسیب کربن برای دوره‌های زمانی ۱۳۶۳-۱۳۸۱، ۱۳۸۱-۱۴۰۱ و ۱۴۰۱-۱۴۱۹ برحسب تن در هکتار (منبع: یافته‌های تحقیق)

ظرفیت ترسیب کربن براساس کاربری اراضی/پوشش اراضی کلانشهر تبریز

تجزیه و تحلیل ظرفیت ذخیره کربن براساس کاربری اراضی/پوشش اراضی کلانشهر تبریز نشان می‌دهد که در دوره زمانی ۱۳۶۳-۱۳۸۱، در کلاس کمینه یعنی کلاس ۰ تا ۱/۷ تن، به ترتیب کاربری‌های اراضی بایر، تراکم مسکونی متوسط و فضای باز با ۶۸/۷۹، ۸/۵۰ و ۶/۴۸ درصد، و در کلاس بیشینه یعنی کلاس ۵/۳ تا ۶/۹ تن، کاربری‌های فضای سبز، اراضی بایر و فضای باز با ۵۳/۸۶، ۲۷/۶۶ و ۶/۷۸ درصد رتبه‌های اول تا سوم ترسیب کربن را به خود اختصاص داده‌اند. در دوره زمانی ۱۳۸۱-۱۴۰۱ در کلانشهر تبریز در کلاس کمینه یعنی کلاس ۰ تا ۱/۷ تن، به ترتیب کاربری‌های اراضی بایر، تراکم مسکونی متوسط و تراکم مسکونی زیاد با ۵۴/۴۸، ۱۴/۷۲ و ۱۱/۹۹

درصد و در کلاس بیشینه یعنی کلاس ۵/۳ تا ۶/۹ تن، کاربری‌های اراضی بایر، فضای سبز و تراکم مسکونی کم با ۴۵/۴۴، ۴۰/۲۱ و ۸/۲۳ درصد رتبه‌های اول تا سوم ترسیب کربن را به خود اختصاص داده‌اند. در دوره زمانی ۱۴۰۱-۱۴۱۹ در کلانشهر تبریز در کلاس کمینه یعنی کلاس ۰ تا ۱/۷ تن، به ترتیب کاربری‌های اراضی بایر، فضای باز و تراکم مسکونی متوسط به ترتیب با ۳۹/۳۵، ۲۲/۶۳ و ۱۷/۲۵ درصد و در کلاس بیشینه یعنی کلاس ۵/۳ تا ۶/۹ تن، کاربری‌های فضای سبز، اراضی بایر و تراکم مسکونی زیاد با ۶۰/۶۶، ۱۵/۹۱ و ۱۱/۷۷ درصد رتبه‌های اول تا سوم ترسیب کربن را به خود اختصاص داده‌اند. در کل تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که در ظرفیت ترسیب کربن کلانشهر تبریز در طی سه دوره زمانی مذکور به ترتیب کاربری‌های فضای سبز و اراضی بایر بیشترین نقش را داشته‌اند.

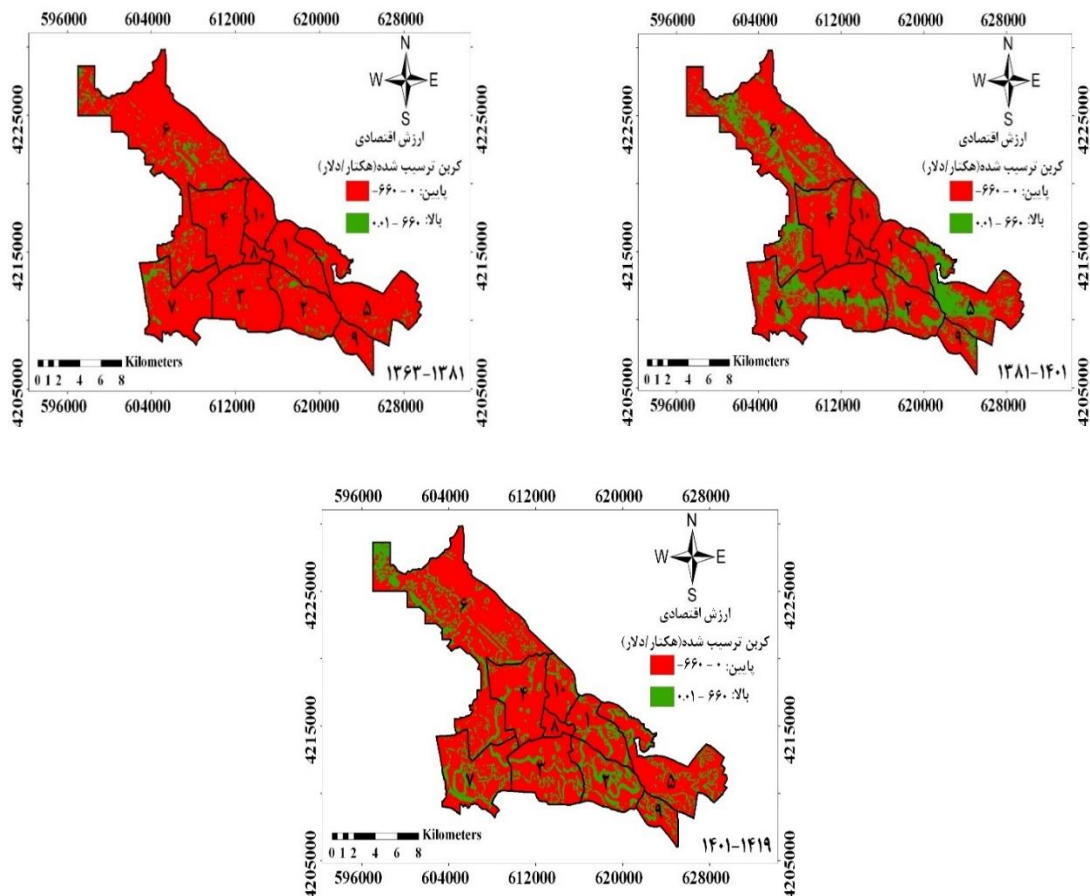


شکل ۵. نقشه‌های ترسیب مثبت و منفی کربن برای دوره‌های زمانی ۱۳۶۳-۱۳۸۱، ۱۴۰۱-۱۴۱۹ و ۱۳۸۱-۱۴۱۹ برحسب تن در هکتار (منبع: یافته‌های تحقیق)

ارزش اقتصادی ترسیب کربن کلانشهر تبریز

نقشه‌های مربوط به ارزش اقتصادی ترسیب کربن برای کلانشهر تبریز در ۲ کلاس ارزش اقتصادی ترسیب مثبت و منفی کربن برحسب واحد دلار در هکتار طبقه‌بندی گردید. ارزش مثبت نشان‌دهنده ترسیب موفق کربن‌های ذخیره شده است (منافعی است که در اثر ترسیب مثبت کربن عاید کلانشهر تبریز می‌شود) و ارزش منفی نیز نشان‌دهنده کربن‌هایی است که ترسیب نشده و در اتمسفر انتشار یافته است (خسارت‌هایی است که در اثر ترسیب منفی کربن شامل کلانشهر تبریز می‌شود). در دوره زمانی ۱۳۶۳-۱۳۸۱ در بین مناطق دهگانه تبریز در کلاس ارزش اقتصادی ترسیب منفی که از ۰ تا ۶۶۰- دلار در هکتار را در بر می‌گیرد، مناطق ۶، ۵ و ۷ به ترتیب با ۷۵/۴۵، ۳۳/۹۶ و ۲۶/۹۵ میلیون دلار و در کلاس ارزش اقتصادی ترسیب مثبت که از ۰/۰۱ تا ۶۶۰ دلار در هکتار را در بر می‌گیرد، مناطق ۶، ۷ و ۲ با ۸/۸۶، ۲/۵۳ و ۱/۷۲ میلیون دلار رتبه‌های اول تا سوم را در بین مناطق دهگانه کلانشهر تبریز به خود اختصاص داده‌اند. در کل،

کلانشهر تبریز در این دوره زمانی توانسته ۲۶۱/۵۵ میلیون دلار را ترسیب کند که از این میزان حدود ۲۴۳/۷۹ میلیون دلار برای ارزش اقتصادی ترسیب منفی است و حدود ۱۷/۷۶ میلیون دلار برای ارزش اقتصادی ترسیب مثبت است. در دوره زمانی ۱۴۰۱-۱۳۸۱ در بین مناطق دهگانه تبریز در کلاس ارزش اقتصادی ترسیب منفی که از ۰ تا -۶۶۰ دلار در هکتار را در بر می‌گیرد، مناطق ۴ و ۵ با ۶۲/۳۱، ۲۲/۸۲ و ۲۱/۲۴ میلیون دلار و در کلاس ارزش اقتصادی ترسیب مثبت که از ۰/۰۱ تا ۶۶۰ دلار در هکتار را در بر می‌گیرد، مناطق ۴ و ۵ با ۲۱/۹۶، ۱۴/۴۱ و ۸/۳۷ میلیون دلار رتبه‌های اول تا سوم را در بین مناطق دهگانه کلانشهر تبریز به خود اختصاص داده‌اند. در کل، کلانشهر تبریز در این دوره زمانی توانسته ۲۶۱/۵۱ میلیون دلار را ترسیب کند که از این میزان حدود ۱۹۶/۲۳ میلیون دلار برای ارزش اقتصادی ترسیب منفی است و حدود ۶۵/۲۸ میلیون دلار برای ارزش اقتصادی ترسیب مثبت است. در دوره زمانی ۱۴۰۱-۱۳۸۱ در بین مناطق دهگانه تبریز در کلاس ارزش اقتصادی ترسیب منفی که از ۰ تا -۶۶۰ دلار در هکتار را در بر می‌گیرد، مناطق ۴ و ۵ با ۶۵/۵۹، ۲۸/۳۰ و ۲۲/۲۷ میلیون دلار و در کلاس ارزش اقتصادی ترسیب مثبت که از ۰/۰۱ تا ۶۶۰ دلار در هکتار را در بر می‌گیرد، مناطق ۴ و ۷ با ۳۲/۷۷، ۱۳/۱۷ و ۱۳/۰۱ میلیون دلار رتبه‌های اول تا سوم را در بین مناطق دهگانه کلانشهر تبریز به خود اختصاص داده‌اند. در کل، کلانشهر تبریز در این دوره زمانی توانسته ۲۶۱/۵۱ میلیون دلار را ترسیب کند که از این میزان حدود ۲۰۴/۵ میلیون دلار برای ارزش اقتصادی ترسیب منفی است و حدود ۵۷/۰۱ میلیون دلار برای ارزش اقتصادی ترسیب مثبت است. در کلانشهر تبریز در طی هر سه دوره زمانی مذکور، به ترتیب مناطق ۴ و ۷ و ۲ بیشترین میزان ارزش اقتصادی ترسیب مثبت کربن را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۶).



شکل ۶. ارزش اقتصادی ترسیب کربن در بین مناطق دهگانه کلانشهر تبریز برای دوره‌های زمانی ۱۳۸۱-۱۳۶۳، ۱۴۰۱-۱۳۸۱ و ۱۴۱۹-۱۴۰۱ برحسب دلار در هکتار (منبع: یافته‌های تحقیق)

بحث

نتایج نشان داد که در کلانشهر تبریز در طی هر سه دوره زمانی ۱۳۸۱-۱۳۶۳، ۱۴۰۱-۱۳۸۱ و ۱۴۱۹-۱۴۰۱، در کلاس بیشینه به ترتیب مناطق ۵، ۷ و ۱ و مناطق ۶، ۷ و ۲ بیشترین میزان ترسیب کربن و ترسیب مثبت کربن را داشته‌اند که از این حیث پژوهش حاضر با پژوهش لیانگ و پن (۲۰۲۴) مشابهت دارد که به رتبه‌بندی کیفی میزان عرضه و تقاضای خدمت اکوسیستمی در مناطق شهری شمال‌غربی چین و حومه شهری پرداخته شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که در طی هر سه دوره زمانی مذکور در کلانشهر تبریز ترسیب منفی بیشتر از ترسیب مثبت بوده است. به طوری که کلانشهر تبریز در دوره زمانی ۱۳۸۱-۱۳۶۳، ۱۳۶۳/۵۳ تن (۹۳/۲۱ درصد) ترسیب منفی و ۱۷۷۶/۴۱ تن (۶/۷۹ درصد) ترسیب مثبت، در دوره زمانی ۱۴۰۱-۱۳۸۱، ۱۹۶۲۲/۹۹ تن (۷۵/۰۴ درصد) ترسیب منفی و ۶۵۲۸/۱۸ تن (۲۴/۹۶ درصد) ترسیب مثبت و در دوره زمانی ۱۴۱۹-۱۴۰۱، ۲۰۴۴۹/۵۵ تن (۷۸/۲۰ درصد) ترسیب منفی و ۵۷۰۰/۹۷ تن (۲۱/۸۰ درصد) ترسیب مثبت داشته است. به عبارتی کلانشهر تبریز نتوانسته بیشتر کربنی را که ذخیره کرده به طور موثری ترسیب کند و از این حیث در طی هر سه دوره زمانی وضعیت بدی داشته است. در طی هر سه دوره زمانی مذکور در کلاس بیشینه کاربری‌های فضای سبز و اراضی بایر بیشترین نقش را در ترسیب کربن تبریز داشته‌اند. همچنین نتایج نشان داد به دلیل این که زیرساخت‌های سبز کلانشهر تبریز در طی سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۱، ۱۴۰۱ و ۱۴۱۹ درصد ناچیزی از کل کاربری اراضی کلانشهر تبریز را به خود اختصاص داده است میزان ترسیب مثبت و موثر کربن تبریز پایین بوده است، به طوری که زیرساخت‌های سبز تبریز در طی سال‌های مذکور، به ترتیب ۵/۸۸، ۴/۷۶، ۵/۷۳ و ۷/۶۷ درصد از کل کاربری اراضی تبریز را به خود اختصاص داده است. کلانشهر تبریز در طی دوره زمانی ۱۳۸۱-۱۳۶۳ توانسته در حدود ۲۶۱۵۴/۶۲ تن کربن را معادل ۲۶۱/۵۵ میلیون دلار ترسیب کند که از این میزان حدود ۲۴۳۷۸/۵۳ تن (۹۳/۲۱ درصد) معادل ۲۴۳/۷۹ میلیون دلار برای ترسیب منفی و ۱۷۷۶/۴۱ تن (۶/۷۹ درصد) معادل ۱۷/۷۶ میلیون دلار برای ترسیب مثبت بوده است. در طی دوره زمانی ۱۴۰۱-۱۳۸۱ کلانشهر تبریز نتوانسته در حدود ۲۶۱۵۱/۰۳ تن کربن معادل ۲۶۱/۵۱ میلیون دلار را ترسیب کند که از این میزان حدود ۱۹۶/۲۳ میلیون دلار برای ترسیب منفی و ۶۵۲۸/۱۸ تن (۲۴/۹۶ درصد) معادل ۶۵/۲۸ میلیون دلار برای ترسیب مثبت بوده است. در طی دوره زمانی ۱۴۱۹-۱۴۰۱ کلانشهر تبریز نتوانسته در حدود ۲۶۱۵۰/۴۹ تن کربن معادل ۲۶۱/۵۱ میلیون دلار را ترسیب کند که از این میزان حدود ۲۰۴۴۹/۵۵ تن (۷۸/۲۰ درصد) معادل ۲۰۴/۵ میلیون دلار برای ترسیب منفی و ۵۷۰۰/۹۷ تن (۲۱/۸۰ درصد) معادل ۵۷/۰۱ میلیون دلار برای ترسیب مثبت بوده است که در جای خود میزان قابل‌توجهی است و اگر این میزان خدمت اکوسیستمی نیز نبود کلانشهر تبریز باید متحمل هزینه‌ها و پیامدهای ناشی از انتشار کربن در اتمسفر می‌شد که از این حیث پژوهش حاضر با پژوهش فدایی و همکاران (۱۳۹۹) مطابقت دارد که در پژوهش خود اذعان کرده‌اند که ترسیب کربن در منطقه حفاظت‌شده جهان‌نما با توجه به تغییر کاربری اراضی روند کاهشی داشته است. همچنین نتایج با پژوهش جهاننداری و همکاران (۱۴۰۱) نیز مطابقت دارد که توان ترسیب کربن را در دو دوره زمانی ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ و ارزش اقتصادی آن را در حوزه آبخیز بندرعباس با استفاده از نرم‌افزار InVEST مورد بررسی قرار داده‌اند، با این تفاوت که در پژوهش حاضر ترسیب کربن در ۳ دوره زمانی مورد بررسی قرار گرفته است.

نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر ارزیابی خدمت اکوسیستمی ذخیره و ترسیب کربن زیرساخت‌های سبز کلانشهر تبریز با استفاده از نرم‌افزار InVEST است. نتایج نشان داد که کلانشهر تبریز در طی سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ به ترتیب نتوانسته در حدود ۲۶۱۵۵/۱۵، ۲۶۱۵۴/۶۲ و ۲۶۱۵۱/۰۳ تن کربن در هکتار را ذخیره کند و معادل ۲۶۱۵۴/۶۲، ۲۶۱۵۱/۰۳ و ۲۶۱۵۰/۴۹ تن کربن را ترسیب کند. این مورد نشان‌دهنده این است که ظرفیت کلانشهر تبریز برای ذخیره و ترسیب کربن رفته رفته کاهش پیدا کرده است. همچنین نتایج نشان داد که در ذخیره و ترسیب کربن تبریز، کاربری اراضی/پوشش اراضی نقش مهم و ویژه‌ای برعهده داشته است، قسمت عمده کاربری اراضی تبریز را کاربری‌های مسکونی، اراضی بایر و فضای باز و در رتبه بعد اراضی کشاورزی تشکیل داده و میزان ناچیزی از کاربری

اراضی تبریز به زیرساخت‌های سبز که در ذخیره و ترسیب کربن نقش مهمی برعهده دارند اختصاص داشته است، بنابراین کلانشهر تبریز نتوانسته به صورت موثر و مطلوبی ترسیب کربن داشته باشد. این کلانشهر در طی هر سه دوره زمانی مذکور توانسته بیشتر کربنی را که ذخیره کرده بود را ترسیب کند ولی ترسیب منفی آن بیشتر از ترسیب مثبت بوده است. همچنین در ناچیز بودن میزان ترسیب مثبت کربن تبریز، رشد جمعیت، مسائل مرتبط با توسعه اقتصادی به ویژه مسائل مربوط به توسعه صنعتی، شهرنشینی و الگوی توسعه شهری نیز دخیل است. همچنین نتایج نشان داد که وضعیت کلانشهر تبریز در طی هر سه دوره زمانی مذکور به لحاظ ترسیب کربن بدتر شده است. ترسیب کربن به ویژه ترسیب مثبت کربن در کلانشهر تبریز در هر سه دوره زمانی مذکور به صورت نامتوازن و ناهمگون بوده است. بیشتر قسمت‌های تبریز دارای ترسیب منفی بوده است و تنها قسمت‌های محدودی از بخش‌های شمال غربی و قسمت‌هایی از جنوب شرقی و غربی تبریز به ویژه در دوره‌های زمانی ۱۳۸۳-۱۳۶۳ و ۱۴۱۹-۱۴۰۱ ترسیب مثبت داشته است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از رساله دکتری تقریباً یکسان بوده است.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این پژوهش از هیچ‌گونه حمایت مالی استفاده نکرده است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- انصاری قولنجی، رقیه؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر و شجاع، فائزه (۱۴۰۳). محاسبه میزان ظرفیت ذخیره کربن در شهری با اقلیم سرد و کوهستانی مطالعه موردی: شهر و پیرا شهر ارومیه. *مجله شهر پایدار*، ۷(۲)، ۴۵-۶۱. <https://doi.org/10.22034/jsc.2024.434150.1758>
- تابعی، نادر؛ بابایی اقدم، فریدون؛ و حکیمی، هادی (۱۴۰۱). شهر همه شمول؛ رویکردی نوین در برنامه‌ریزی شهری مطالعه موردی: شهر تبریز، *مجله پژوهش‌های جغرافیایی برنامه‌ریزی شهری*، ۱۰(۲)، ۱۱۵-۱۳۲. <https://doi.org/10.22059/JURBANGEO.2022.335543.1627>
- جهاننداری، جاوید،، حجازی، رخشاد،، جوزی، سیدعلی 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 آب و خاک*، ۲(۴): ۹۶-۱۰۱. <https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11069.1097>
- زینالی عظیم، علی؛ حاتمی گلزاری، الهام؛ کرمی، اسلام؛ و بابازاده اسکوتی، سولماز (۱۴۰۰). سنجش پایداری محیطی شهر تبریز براساس شاخص‌های زیست محیطی، *فصلنامه پایداری، توسعه و محیط زیست*، ۲(۳)، ۴۱-۵۹. <https://doi.org/JSDE-2111-1168> (R1)
- فدایی، انسبه؛ میرسنجری، میرمهرداد و امیری، محمد جواد (۱۳۹۹). مدل‌سازی خدمات اکوسیستمی مبتنی بر تغییرات پوشش و کاربری سیمای سرزمین با به‌کارگیری نرم‌افزار InVEST در منطقه حفاظت‌شده جهان‌نما (مورد مطالعه: خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن).

مجله علمی آمایش سرزمین. ۱۲(۱): ۱۵۳-۱۷۳. <https://doi.org/10.22059/jtcp.2020.294342.670051>

قربانی، رسول؛ حسین‌زاده دلیر، کریم. و شکری فیروزجاه، پری (۱۳۹۱). بررسی وضعیت آلودگی هوای شهر تبریز بر اساس تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA). *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی*. ۱۶(۳۹): ۸۹-۱۰۸.

محمدیاری، فاطمه (۱۴۰۲). ارزیابی آثار تغییرات کاربری اراضی بر خدمات اکوسیستم بر اساس مدل InVEST (مطالعه موردی: استان چهارمحال و بختیاری). *مجله علمی آمایش سرزمین*. ۱۵(۲): ۳۲۷-۳۴۲. doi:<https://doi.org/10.22059/jtcp.2023.365685>. 670408

مهندسین مشاور نقش محیط (۱۳۹۱). *طرح توسعه و عمران (جامع) شهر تبریز، گزارش محیطی مرحله موجود، وزارت راه و شهرسازی، اداره کل راه و شهرسازی استان آذربایجان شرقی*.

References

- Aghaloo, K., & Sharifi, A. (2025). Balancing priorities for a sustainable future in cities: Land use change and urban ecosystem service dynamics. *Journal of Environmental Management*, 382, 125460. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125460>
- Alberti, M. (2005). The effects of urban patterns on ecosystem function. *International regional science review*, 28(2), 168-192. <https://doi.org/10.1177/0160017605275160>.
- Ansari-Goleji, R., Shamsipour, A., & Shoja, F. (2024). Carbon storage capacity in a city with a cold and mountainous climate: the case study of Urmia city and Suburb. *Sustainable city*, 7(2), 45-61. <https://doi.org/10.22034/jsc.2024.434150.1758> [In Persian]
- Arcidiacono, A., Ronchi, S., & Salata, S. (2015, June). Ecosystem Services assessment using InVEST as a tool to support decision making process: critical issues and opportunities. In *International Conference on Computational Science and Its Applications* (pp. 35-49). Cham: Springer International Publishing.
- Conte, M., Nelson, E., Carney, K., Fissore, C., Olwero, N., Plantinga, A. J., ... & Ricketts, T. (2011). Terrestrial carbon sequestration and storage. *Natural capital: theory and practice of mapping ecosystem services*. Oxford University Press, New York, 111-128. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199588992.003.0007>.
- Conte, M., Nelson, E., Carney, K., Fissore, C., Olwero, N., Plantinga, A. J., ... & Ricketts, T. (2011). Terrestrial carbon sequestration and storage. *Natural capital: theory and practice of mapping ecosystem services*. Oxford University Press, New York, 111-128. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199588992.003.0007>
- Dusenge, M. E., Duarte, A. G., & Way, D. A. (2019). Plant carbon metabolism and climate change: elevated CO₂ and temperature impacts on photosynthesis, photorespiration and respiration. *New Phytologist*, 221(1), 32-49. <https://doi.org/10.1111/nph.15283>.
- European Commission, D.-G. For the E. (2016). Supporting the Implementation of Green Infrastructure.
- European Environment Agency. (2006). Annual report, pp. 1-64.
- European Union. (2018). Territorial Potentials for Green Infrastructure Introduction.
- Fadaei, E., Mirsanjari, M. M., & Amiri, M. J. (2020). Modeling of Ecosystem Services based on Land Cover Change and Land Use Using InVEST Software in Jahannama Conservation Area (Case: Carbon Sequestration Ecosystem Service). *Town and Country Planning*, 12(1), 153-173. <https://doi.org/10.22059/jtcp.2020.294342.670051> [In Persian]
- Fang, Z., Ding, T., Chen, J., Xue, S., Zhou, Q., Wang, Y., ... & Yang, S. (2022). Impacts of land use/land cover changes on ecosystem services in ecologically fragile regions. *Science of the Total Environment*, 831, 154967. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154967>.
- Ghorbani, R., Hosseinzadeh Dalir, K., & Shokri Firouzjah, P. (2012). Investigating the air pollution situation in Tabriz city based on principal component analysis (PCA). *Journal of Geography and Planning*, 16(39): 89-108. [In Persian]
- Gibbs, H. K., Brown, S., Niles, J. O., & Foley, J. A. (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental research letters*, 2(4), 045023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045023>.
- Glenday, J. (2006). Carbon storage and emissions offset potential in an East African tropical rainforest. *Forest Ecology and Management*, 235(1-3), 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.014>.
- IPCC. (2006). IPCC: Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IGES, Japan. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_02_Ch2_Generic.pdf.
- 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]
- Jato-Espino, D., Capra-Ribeiro, F., Moscardo, V., del Pino, L. E. B., Mayor-Vitoria, F., Gallardo, L. O., ... & Dietrich, K. (2023). A systematic review on the ecosystem services provided by green infrastructure. *Urban Forestry & Urban Greening*, 86, 127998. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127998>.
- Li, Y., Tan, M., & Hao, H. (2019). The impact of global cropland changes on terrestrial ecosystem services value, 1992-2015. *Journal of Geographical Sciences*, 29(3), 323-333. <https://doi.org/10.1007/s11442-019-1600-7>.
- Liang, J., & Pan, J. (2024). Identifying carbon sequestration's priority supply areas from the standpoint of ecosystem service flow: A case study for Northwestern China's Shiyang River Basin. *Science of the Total Environment*, 927, 172283. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172283>
- Liu, J., Liu, B., Wu, L., Miao, H., Liu, J., Jiang, K., ... & Liu, T. (2024). Prediction of land use for the next 30 years using the PLUS model's multi-scenario simulation in Guizhou Province, China. *Scientific Reports*, 14(1), 13143. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64014-7>.
- McDonnell, M. J. (2015). Journal of Urban Ecology: Linking and promoting research and practice in the evolving discipline of urban ecology. *Journal of Urban Ecology*, 1(1), juv003. <https://doi.org/10.1093/jue/juv003>.

- Mohammadyari, F. (2023). Evaluation the effects of land use changes on ecosystem services based on the InVEST model (Case study: Chaharmahal and Bakhtiari province). *Town and Country Planning*, 15(2), 327-342. <https://doi.org/10.22059/jtcp.2023.365685.670408> [In Persian]
- Morando-Figueroa, C. Z., Salazar-Briones, C., Ruiz-Gibert, J. M., & Lomelí-Banda, M. A. (2023). Ecosystem services valuation in developing countries: a review of methods and applicability approach. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Urban Design and Planning*, 176(1), 6-22. <https://doi.org/10.1680/jurdp.21.00045>.
- Naghsh-E-Mohit Consulting Engineers. (2012). Development and Construction (Comprehensive) Plan of Tabriz City, Environmental Report of the Existing Stage, Ministry of Roads and Urban Development, General Office of Roads and Urban Development of East Azerbaijan Province. [In Persian]
- Nelson, E., Mendoza, G., Regetz, J., Polasky, S., Tallis, H., Cameron, D., ... & Shaw, M. (2009). Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1), 4-11. <https://doi.org/10.1890/080023>.
- Nordhaus, W. D. (1992). An optimal transition path for controlling greenhouse gases. *Science*, 258(5086), 1315-1319. <http://www.jstor.org/stable/2880417>.
- Nowak, D. J., Greenfield, E. J., Hoehn, R. E., & Lapoint, E. (2013). Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental pollution*, 178, 229-236. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.019>.
- Sargai, Dong, Y., Kuang, W., Bao, Y., Dou, Y., & Wang, J. (2024). Impact of urbanization on terrestrial carbon storage loss in the Hohhot-Baotou-Ordos region, China: evaluating people-space interactions. *International Journal of Digital Earth*, 17(1), 2339365. <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2339365>
- Sharp, R., Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S. A., Chaplin-Kramer, R., ... & Douglass, J. (2016). InVEST+ VERSION+ User's guide. *The natural capital project*, 10. <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>.
- Smith, J. E. (2006). *Methods for calculating forest ecosystem and harvested carbon with standard estimates for forest types of the United States* (No. 343). United States Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station. <https://doi.org/10.2737/NE-GTR-343>.
- Song, X., Chen, F., Sun, Y., Ma, J., Yang, Y., & Shi, G. (2024). Effects of land utilization transformation on ecosystem services in urban agglomeration on the northern slope of the Tianshan Mountains, China. *Ecological Indicators*, 162, 112046. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112046>.
- Tabeyi, N., Babae Aghdam, F., & Hakimi, H. (2022). Inclusive city; A new approach in urban planning A case study the Tabriz city. *Journal of Geographical Urban Planning Research*, 10 (2), 115-132. <https://doi.org/10.22059/JURBANGEO.2022.335543.1627> [In Persian]
- Washbourne, C. L. (2022). Environmental policy narratives and urban green infrastructure: Reflections from five major cities in South Africa and the UK. *Environmental Science & Policy*, 129, 96- 106. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.12.016>.
- Xie, J., Zhan, Y., Li, X., Dai, Z., Cong, R., Xu, R., ... & Yao, Z. (2025). Significant carbon storage and sequestration by urban greenery in Beijing city during 2010-2020. *Urban Forestry & Urban Greening*, 128944. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.128944>
- Zeynali Azim, A., Hatami Golzari, E., Karami, I., & Babazadeh Oskoui, S. (2021). Measuring the Environmental Sustainability of Tabriz City Based on Environmental Indicators of Smart Urban Growth. *Journal of Sustainability, Development & Environment*, 2 (3), 41-59. [https://doi.org/JSDE-2111-1168 \(R1\)](https://doi.org/JSDE-2111-1168 (R1)) [In Persian]
- Zhao, Y., Han, Z., & Xu, Y. (2022). Impact of land use/cover change on ecosystem service value in Guangxi. *Sustainability*, 14(17), 10867. <https://doi.org/10.3390/su141710867>
- Zhou, P., Tian, Y., Zhai, J., Song, X., Li, Y., & Sun, W. (2025). How does land use transfer affect ecosystem services in Northwest China?. *Ecological Engineering*, 219, 107712. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2025.107712>