



<https://gep.ui.ac.ir/?lang=fa>

Geography and Environmental Planning

E-ISSN: 2252- 0910

Document Type: Research Paper

Vol. 37, Issue 2, No.102, 2026, pp. 125- 152

Received: 07/07/2026 Accepted: 22/09/2026

Evaluation of the Spatiotemporal Dynamics of Ecosystem Services of Carbon Emission and Sequestration in the Landscape of Arid and Semi-Arid Ecosystems in Western Kerman Province

Hadi Ghanbari

Master student of Environmental Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Ardakan, Ardakan, Iran
hadighanbari632p@gmail.com

Maryam Morovati  *

Associate professor, Department of Environmental Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Ardakan, Ardakan, Iran
mymorovati@ardakan.ac.ir

Zahra Parvar

Ph.D., Department of Environmental Sciences, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Golestan Province, Iran
Zahra.parvar@yahoo.com

Mahdi Tazeh

Associate professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Ardakan, Ardakan, Iran
mtazeh@ardakan.ac.ir

Abstract

Land Use and Land Cover (LULC) change is a key driver of carbon stock dynamics in arid and semi-arid ecosystems. This study assessed the spatiotemporal dynamics of the carbon sequestration ecosystem service in response to LULC changes across the arid and semi-arid ecosystems of western Kerman Province over a 25-year period (2000-2025). LULC maps were generated from Landsat satellite imagery by using an integrated classification approach that combined supervised, unsupervised, and decision tree methods. Selected landscape metrics were extracted by using FRAGSTATS software to characterize the spatial structure of the landscape. Carbon storage and sequestration were modeled with the carbon module of the InVEST model based on 4 carbon pools (aboveground, belowground, soil organic carbon, and litter) and the economic value of carbon sequestration was estimated by using the InVEST valuation function. The results showed an increase in total carbon storage with a net sequestration of 354,375 Mg. The area of orchards, rangelands, and agricultural lands

*Corresponding Author

Ghanbari, H. , Morovati, M. , Parvar, Z. and Tazeh, M. (2026). Evaluation of the spatiotemporal dynamics of ecosystem services of carbon emission and sequestration in the landscape of arid and semi-arid ecosystems in western Kerman Province. *Geography and Environmental Planning*, 37 (2), 125 - 152 .



2252-0910 © University of Isfahan

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



10.22108/gep.2026.149606.1800

expanded, while barren lands decreased by 15,731 ha. The net present value of carbon sequestration was estimated at USD 17.9 million (approximately IRR 2,327 billion). Landscape metrics indicated increasing fragmentation with the numbers of agricultural and built-up patches rising by 45% and 21%, respectively. These findings demonstrated that although LULC changes in western Kerman had been accompanied by increased landscape fragmentation and expansion of built-up areas, the growth of orchards, rangelands, and agricultural lands—particularly on barren lands—had offset these negative impacts, resulting in net positive carbon sequestration. Integrating conservation policies with sustainable agricultural development on low-yield lands represents an effective strategy for sustaining carbon sequestration in arid and semi-arid ecosystems.

Keywords: Ecosystem Services, InVEST, Landscape Metrics, Economic Valuation, Arid and Semi-Arid Ecosystems.

Introduction

Arid and semi-arid ecosystems constitute a substantial portion of the Earth's terrestrial surface and represent the dominant biome in many regions, including Kerman Province. These areas are ecologically fragile owing to water scarcity, poor soil fertility, and limited vegetation cover, which render them exceptionally sensitive to environmental change. The ecosystem services provided by these landscapes—categorized as provisioning, regulating, supporting, and cultural—are vital to human socio-economic well-being. Among regulating services, carbon sequestration plays a critical role in mitigating climate change by removing CO₂ from the atmosphere and storing it in biomass and soil pools. However, Land Use and Land Cover (LULC) changes, particularly in drylands, can disrupt this balance and lead to substantial carbon emissions. Processes like agricultural expansion, urbanization, overgrazing, and unsustainable resource exploitation often result in reduced carbon storage, soil degradation, and ecosystem decline. Climate change—including rising temperatures and decreasing precipitation—further alters carbon cycle dynamics in these ecosystems. Thus, precise spatiotemporal monitoring of carbon sequestration is essential for understanding ecosystem dynamics and developing sustainable land management strategies. The InVEST model has emerged as a powerful tool for the spatial and temporal estimation of carbon stocks across 5 pools: aboveground biomass, belowground biomass, dead organic matter, soil organic carbon, and harvested wood products. Despite its importance, previous studies in Iran—particularly in the arid and semi-arid ecosystems of western Kerman Province—have largely been limited to static assessments without employing advanced spatial models for temporal trend analysis. Domestic research has evolved from descriptive approaches toward quantification and economic valuation. International studies employing integrated models, such as InVEST, PLUS, and CA-MC, have made considerable progress in analyzing carbon sequestration dynamics. However, a fundamental research gap persists in the arid and hyper-arid ecosystems of western Kerman, a region that hosts valuable protected areas, including Khahr National Park, Rouchun Wildlife Refuge, and the Bidooieh and Bahram-e-Goor regions. Despite its high ecological sensitivity and mounting pressures from climate change and human activities, this area requires more detailed investigation of carbon emission and sequestration dynamics to inform effective management strategies. Accordingly, this study aimed to evaluate the spatiotemporal dynamics of carbon sequestration and emission in the arid and semi-arid landscapes of western Kerman by using remote sensing, the InVEST model, and economic valuation approaches. By analyzing carbon stock trends, assessing the impacts of LULC change, and identifying high-priority areas for conservation, this research sought to provide actionable management strategies to enhance ecosystem sustainability and mitigate the consequences of climate change in these fragile regions.

Materials & Methods

The study area encompassed Baft, Sirjan, and Bardsir counties in Kerman Province located between 55°30' and 57°10' E longitude and 27°50' and 30°10' N latitude. This region included valuable protected areas, such as Khahr National Park, Rouchun Wildlife Refuge, Bidooieh Protected Area, and a portion of Bahram-e-Goor Protected Area, providing a suitable context for analyzing carbon sequestration dynamics. LULC maps for 2000 and 2025 were produced by using Landsat satellite imagery with a 30-meter spatial resolution and cloud cover below 10%. An integrated approach combining supervised classification, unsupervised classification, and decision tree methods was implemented. NDVI and NDWI indices were employed to distinguish vegetated surfaces and water bodies. Overall accuracy and the Kappa coefficient were used to evaluate classification accuracy through error matrix analysis. Landscape metrics were calculated by using FRAGSTATS software, including Class Area (CA), Percentage of Landscape (PLAND), Number of Patches (NP), Patch Density (PD), Mean Patch Size (AREA-MN), Edge Density (ED), Aggregation Index (AI), and Shannon's Diversity Index (SHDI). The results were analyzed in Microsoft Excel to identify spatiotemporal dynamics. Carbon storage modeling was performed by using the InVEST model across 4 carbon pools: aboveground biomass,

belowground biomass, soil organic carbon, and litter. Carbon values for each land use class were derived from validated scientific data, local studies conducted in Kerman Province, and IPCC guidelines. The model's primary input consisted of the 30-meter resolution LULC maps. Economic valuation of carbon sequestration was performed by using the InVEST valuation function. A baseline carbon price of USD 51 per ton was adopted, along with an annual market discount rate of 5% and an annual carbon price growth rate of 3%. The shadow price of carbon was employed to estimate economic value, thereby avoiding double counting of ecosystem services. Statistical analyses and graphical outputs were generated using R and Python software. Topographic maps were used to extract elevation information and support spatial analyses. The study was conducted in 3 main steps: preparation of LULC maps and extraction of landscape metrics, carbon storage modeling, and monitoring of land use changes and carbon stock dynamics.

Research Findings

LULC maps for 2000 and 2025 revealed significant transformations over the 25-year period. Classification accuracy was high with Kappa coefficients of 87.2 and 93.2% for 2000 and 2025 and overall accuracies of 89.3 and 94.3%, respectively. Built-up areas increased from 21,188 to 25,301 ha (19.4% growth), while agricultural land expanded from 193,466 to 201,506 ha. Conversely, barren land decreased from 1,736,905 to 1,721,174 ha. Landscape metrics indicated increasing fragmentation with the Number of Patches rising across all classes, particularly for agriculture (52,094 to 75,581) and built-up areas (50,931 to 61,808). ED increased for agriculture (12.4 to 15.5) and barren land (45.3 to 47.8), suggesting more complex boundaries. The AI decreased for agriculture (85.2 to 82.2), indicating reduced spatial connectivity. SHDI increased slightly from 0.93 to 0.94, reflecting a moderate enhancement of landscape heterogeneity. Total carbon storage increased from 32,371,049 Mg in 2000 to 32,725,424 Mg in 2025, representing a net positive change of 354,375 Mg. Hotspots of carbon storage were concentrated in orchard and agricultural areas. Economic valuation using a carbon price of USD 51 per ton with a 5% discount rate and a 3% annual growth rate yielded a net present value of approximately USD 17,900,801 (equivalent to IRR 2,327 billion), indicating that land use changes during this period generated positive economic benefits from carbon sequestration services.

Discussion of Results & Conclusion

This study aimed to evaluate the spatiotemporal dynamics of carbon sequestration ecosystem services in the arid and semi-arid landscapes of western Kerman Province by integrating the InVEST model, remote sensing data, and economic valuation approaches. Unlike most previous studies, which had primarily reported a decline in carbon sequestration due to land use changes, this study offered a different perspective by identifying simultaneous increases in carbon sequestration alongside intensified landscape fragmentation. LULC analysis over the 25-year period revealed significant transformations. Built-up areas increased by 4,113 ha (19.4% growth) and agricultural land expanded by 8,040 ha, while barren land decreased by 15,731 ha. These changes reflected profound landscape transformation and mounting pressure on natural resources attributable to agricultural development, population growth, urbanization, and government policies supporting rehabilitation of barren land. Landscape metrics identified fragmentation as the most prominent consequence. The NP for agriculture increased by 45% (from 52,094 to 75,581) and for built-up areas by 21% (from 50,931 to 61,808), indicating agricultural land fragmentation and scattered urban expansion. The AI for agriculture decreased from 85.2 to 82.2, suggesting reduced spatial connectivity that might compromise irrigation efficiency and ecosystem services. ED increased for agriculture (12.4 to 15.5) and barren land (45.3 to 47.8), indicating more complex boundaries and increased edge effects. SHDI increased slightly from 0.93 to 0.94, reflecting a moderate enhancement of landscape heterogeneity. Although barren lands had been converted to economically valuable land uses, these changes had been accompanied by increased fragmentation and reduced spatial connectivity, threatening ecological functionality. Carbon storage modeling revealed that total carbon stock increased from 32,371,049 Mg in 2000 to 32,725,424 Mg in 2025, representing a net positive change of 354,375 Mg. This increase occurred despite urban development and expansion of built-up areas, which typically reduced vegetation cover and increased carbon emissions. The net present value of carbon sequestration was estimated at approximately USD 17.9 million (equivalent to IRR 2,327 billion), demonstrating the positive economic performance of this ecosystem service. Spatial analysis identified carbon storage hotspots concentrated in orchard and agricultural areas with the highest carbon density occurring in regions with dense vegetation cover. The presence of 3 protected areas within the study region—Bidooieh, Bahram-e-Goor, and Khahr-Rouchun—had contributed significantly to preventing vegetation degradation and creating conditions for natural restoration. Two primary factors explained this positive trend. First, the expansion of orchard and agricultural areas with relatively high carbon density (63 Mg/ha of aboveground carbon in orchards) had offset the negative impacts of urban expansion. Second, effective protected area management had prevented vegetation degradation and

facilitated natural regeneration. This finding aligns with international studies demonstrating that ecological protection policies can enhance carbon storage capacity. However, it is crucial to recognize that increased carbon sequestration should not be interpreted as an unequivocal environmental success. Landscape metrics simultaneously revealed intensified fragmentation, reduced connectivity, and increased edge density, indicating that although carbon stocks had increased, landscape ecological integrity had deteriorated. This duality represented a fundamental challenge: economic gains from carbon sequestration had been achieved at the cost of landscape fragmentation and reduced ecological connectivity. Therefore, the observed increase in sequestration should be regarded as a temporary consequence of land use conversion with potentially negative long-term ecological implications. In conclusion, this study demonstrated that integrating remote sensing, InVEST modeling, and economic valuation provides a robust framework for monitoring carbon dynamics in arid ecosystems. The findings confirmed that conservation policies and sustainable land management can maintain and even enhance ecosystem services, even under development pressure. However, the simultaneous increase in fragmentation and carbon storage presents a critical duality that requires careful attention from planners and decision-makers. Sustainable management strategies must balance the economic benefits of carbon sequestration against the ecological costs of landscape fragmentation. Strengthening protected area networks, promoting sustainable agricultural practices, and implementing integrated landscape planning are essential for maintaining carbon sequestration capacity while preserving ecological integrity. Future research should incorporate field measurements, simulate alternative development and conservation scenarios, assess climate change impacts, and evaluate community engagement in conservation programs in order to identify optimal land management pathways for sustaining these valuable ecosystem services in arid regions.

مقاله پژوهشی

ارزیابی و مدل‌سازی پویایی مکانی - زمانی خدمت اکوسیستمی انتشار و ترسیب کربن در سیمای سرزمین اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک غرب استان کرمان

هادی قنبری، دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران

hadighanbari632p@gmail.com

مریم مروتی* ، دانشیار گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران

mymorovati@ardakan.ac.ir

زهره پرور، دکتری گروه محیط زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

zahra.parvar@yahoo.com

مهدی تازه، دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران

mtazeh@ardakan.ac.ir

چکیده

تغییرات کاربری و پوشش اراضی یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پویایی ذخایر کربن در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی پویایی مکانی - زمانی ترسیب کربن در پاسخ به تغییرات کاربری اراضی در غرب استان کرمان طی دوره ۲۵ ساله (۲۰۰۰ - ۲۰۲۵) انجام شد. نقشه‌های کاربری اراضی با استفاده از تصاویر لندست و ترکیبی از طبقه‌بندی نظارت‌شده و نظارت‌نشده تهیه شد. برای تحلیل ساختار فضایی سیمای سرزمین، شاخص‌های منتخب با نرم‌افزار FRAGSTATS استخراج شد. مدل‌سازی ذخیره و ترسیب کربن با استفاده از ماژول کربن مدل InVEST و براساس چهار مخزن کربن (روزمینی، زیرزمینی، کربن آلی خاک و لاش برگ) و ارزش‌گذاری اقتصادی ترسیب کربن با استفاده از تابع ارزش‌گذاری اینوست انجام شد. نتایج نشان‌دهنده افزایش کل ذخیره کربن و ترسیب خالص ۳۵۴,۳۷۵ مگاگرم در طول دوره ۲۵ ساله است. افزایش مساحت باغات، مراتع و اراضی کشاورزی در کنار کاهش ۱۵,۷۳۱ هکتاری اراضی بایر مشاهده شد. ارزش فعلی خالص ترسیب کربن ۱۷.۹ میلیون دلار (۲,۳۲۷ میلیارد تومان) برآورد شد. سنجه‌های سیمای سرزمین افزایش تکه‌تکه‌شدگی را نشان داد؛ به‌طوری‌که تعداد لکه‌های کشاورزی ۴۵ درصد و انسان‌ساخت ۲۱ درصد افزایش یافت. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه تغییرات کاربری اراضی در منطقه غرب کرمان با افزایش تکه‌تکه‌شدگی سیمای سرزمین و گسترش مناطق انسان‌ساخت همراه بوده است، افزایش سطح باغات، مراتع و اراضی کشاورزی (به‌ویژه در اراضی بایر) توانسته است اثرات منفی را جبران کرده و منجر به ترسیب خالص مثبت کربن شود. تلفیق سیاست‌های حفاظتی با توسعه کشاورزی پایدار در اراضی کم‌بازده، راهبردی مؤثر برای حفظ ترسیب کربن در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خدمات اکوسیستمی، InVEST، سنجه‌های سیمای سرزمین، ارزش‌گذاری اقتصادی، اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک

*نویسنده مسئول

قنبری، هادی، مروتی، مریم، پرور، زهره و تازه، مهدی. (۱۴۰۵). ارزیابی پویایی مکانی - زمانی خدمت اکوسیستمی انتشار و ترسیب کربن در سیمای سرزمین اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک غرب استان کرمان، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۷ (۲)، ۱۵۲-۱۲۵.



مقدمه

اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک بخش چشمگیری از سطح خشکی‌های کره زمین را تشکیل می‌دهند و در بسیاری از مناطق، از جمله استان کرمان، زیست‌بوم غالب محسوب می‌شوند. در اکوسیستم‌های خشک، به دلیل محدودیت پوشش گیاهی، بخش چشمگیری از ذخایر کربن در مخزن کربن آلی خاک متمرکز است؛ از این رو، تغییرات کاربری و پوشش اراضی می‌تواند با تغییر شرایط خاک، به اکسیداسیون و انتشار کربن آلی خاک و کاهش ذخایر کربن منجر شود. این مناطق به دلیل کمبود منابع آبی، فقر خاک و محدودیت در پوشش گیاهی، از نظر اکولوژیکی بسیار شکننده هستند و حساسیت بالایی نسبت به تغییرات محیطی دارند (Raheb et al., 2023, p. 1). خدمات اکوسیستمی این اکوسیستم‌ها در چهار دسته اصلی قرار می‌گیرد که شامل خدمات تأمین‌کننده، تنظیمی، حمایتی و فرهنگی است و همگی برای رفاه اقتصادی - اجتماعی انسان‌ها حیاتی هستند (MEA, 2005, P.52 100). خدمات حمایتی شامل فرآیندهایی همچون شکل‌گیری خاک و چرخه غذایی، خدمات تنظیمی شامل ذخیره‌سازی و ترسیب کربن، تنظیم گردش آب، کنترل فرسایش و کنترل زیستی آفات می‌شود و خدمات فرهنگی، نیز ارزش‌های تفریحی، آموزشی و زیبایی‌شناختی را در برمی‌گیرد (Mirghaed & Souri, 2023, p.2). در این میان، ترسیب کربن به‌عنوان یک فرآیند کلیدی تنظیمی، نقش مهمی در تعدیل اثرات تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند. این فرآیند به جذب خالص دی‌اکسید کربن از جو و ذخیره بلندمدت آن در مخازن کربن مانند زیست‌توده زنده و خاک اطلاق می‌شود (Drexler et al., 2021, p. 2). اکوسیستم‌های خشکی از طریق توازن بین جذب و انتشار دی‌اکسید کربن در تنظیم اقلیم جهانی مشارکت می‌کنند (IPCC, 2006, p. 1.7)؛ با این حال، تغییرات LULC به‌ویژه در مناطق خشک می‌تواند این تعادل را برهم بزند و منجر به انتشار قابل توجه کربن در جو شود (Imran & Din, 2021, p.2).

علاوه بر این، فرآیندهایی همچون گسترش اراضی کشاورزی، توسعه شهری، چرای مفرط و بهره‌برداری ناپایدار از منابع طبیعی، اغلب با کاهش ذخیره‌سازی کربن، تخریب خاک و زوال اکوسیستم همراه است (پرور و همکاران، ۱۴۰۲، ص. ۳۷۳). تغییرات اقلیمی نظیر افزایش دما، کاهش بارندگی و نوسانات شدید اقلیمی نیز بر پویایی چرخه کربن در این اکوسیستم‌ها اثرگذارند (Zhang et al., 2020, p. 2; Parvar et al., 2024b, p. 2). در چنین شرایطی، پایش و تحلیل دقیق تغییرات فضایی - زمانی ترسیب کربن در مناظر خشک و نیمه‌خشک اهمیتی دوچندان می‌یابد. این پایش نه تنها برای درک بهتر پویایی اکوسیستم‌ها ضروری است، می‌تواند پایه‌ای برای توسعه راهبردهای مدیریت پایدار سرزمین و طراحی سیاست‌های مؤثر در زمینه کاهش انتشار کربن فراهم کند (Weitzman, 2019, p. 194). به‌علاوه، ارزش اقتصادی فرآیند ترسیب کربن نیز در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته و به‌عنوان یک ابزار سیاستی در بازارهای کربن و برنامه‌های جبران انتشار مطرح شده است. برای ارزیابی دقیق ظرفیت ترسیب و ذخیره‌سازی کربن، استفاده از مدل‌های مکانی پیشرفته امری ضروری است (Zheng et al., Zhang et al., 2020, p. 2; Zheng et al., 2023, p. 2). مدل اینوست^۱ یکی از ابزارهای قدرتمند در این زمینه محسوب می‌شود که امکان برآورد فضایی و زمانی

¹ InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)

ذخایر کربن در چشم‌اندازهای مختلف را فراهم می‌کند این مدل با استفاده از داده‌های مربوط به LULC و خصوصیات محیط‌زیستی، تغییرات ایجادشده در پنج مخزن کربن را که شامل زیست‌توده روزمینی، زیست‌توده زیرزمینی، مواد آلی مرده، خاک و محصولات چوبی برداشت شده است، تحلیل می‌کند (Parvar et al., 2024a, p. 4). تحلیل فضایی - زمانی ذخیره و ترسیب کربن به برنامه‌ریزان و مدیران کمک می‌کند تا مناطق اولویت‌دار برای حفاظت یا بهبود پوشش گیاهی را تعیین کنند و سیاست‌های کاربری زمین را براساس اهداف کاهش انتشار و افزایش ترسیب کربن بهینه کنند (Yang et al., 2025, p. 2). با وجود اهمیت ترسیب کربن به‌ویژه در اکوسیستم‌های خشک، مطالعات قبلی در ایران و به‌ویژه در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک غرب استان کرمان، کمتر به تحلیل پویایی فضایی - زمانی ذخیره و ترسیب کربن پرداخته‌اند؛ بیشتر تحقیقات به بررسی‌های ایستا محدود بوده‌اند و از مدل‌های مکانی پیشرفته برای تحلیل روندهای زمانی استفاده نشده است (Zafar et al., 2024, p. 2).

پژوهش‌های داخلی در دو دهه‌ی اخیر، با عبور از رویکردهای توصیفی به سمت کمی‌سازی و ارزش‌گذاری اقتصادی ترسیب کربن، به‌ویژه در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک، گام‌های مهمی برداشته‌اند. مطالعات اولیه در مراتع ملارد، با تمرکز بر تفاوت‌های گونه‌ای، سهم چشمگیر خاک و بیوماس زیرزمینی را در ذخیره‌سازی کربن آشکار ساخت. با پیشرفت ابزارهای سنجش‌ازدور، موج جدیدی از مطالعات با بهره‌گیری از مدل InVEST شکل گرفت (نصری و همکاران، ۱۳۹۵، ص. ۴۴). پژوهشی در تهران، نشان‌دادن گسترش کاربری‌های انسان‌ساخت لزوماً به کاهش ترسیب منجر نمی‌شود و حتی رشد زمین‌های کشاورزی آبی می‌تواند روند ذخیره‌سازی را مثبت کند (محقق و همکاران، ۱۳۹۹، ص. ۱). در منطقه ابرکوه (استان یزد) مطالعه دیگری به بررسی اثر تبدیل خاک‌های بیابانی به کاربری‌های کشاورزی (گندم و پسته) بر ذخیره کربن آلی و کربن آلی ذره‌ای خاک پرداخت. این مطالعه نشان دادند تبدیل خاک‌های بیابانی به کشاورزی در منطقه ابرکوه، کربن آلی خاک را تا ۵/۸ برابر افزایش می‌دهد و بیشترین ذخیره کربن در باغ‌های پسته مشاهده شد (فلاح‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳، ص. ۱). در سطح بین‌المللی نیز پژوهش‌های اخیر با بهره‌گیری از مدل‌های تلفیقی مانند InVEST، PLUS و CA-MC، گام‌های چشمگیری در تحلیل پویایی مکانی - زمانی ترسیب کربن برداشته‌اند (Imran & Din, 2021, p. 1; Kumara et al., 2023, p. 1; Babbar et al., 2021, p. 1; Rahim Abadi et al., 2025, p. 1; Weitzman, 2019, p. 194). مطالعه‌ای در کنیا نشان داد که تبدیل جنگل به زراعی، ذخیره‌ی کربن خاک را تا دو سوم کاهش می‌دهد (Omwoyo et al., 2025, p. 2). همچنین مطالعه‌ای در پاکستان، تمرکز شدید ظرفیت ترسیب را در لکه‌های خاص جنگلی شناسایی کردند (Imran & Din, 2021, p. 2). در چین، مطالعات مختلف همگی بر نقش کلیدی سیاست‌های حفاظتی در معکوس‌سازی روند کاهش کربن تأکید کرده‌اند (Peng et al., 2025, p. 1; Bai et al., 2025, p. 1; Jiang et al., 2025, p. 1). در کنار این چالش‌های مکانی، مقوله‌ی ارزش‌گذاری اقتصادی به‌عنوان پل ارتباطی اکولوژی و سیاست‌گذاری، در هر دو سطح داخلی و بین‌المللی به‌بلوغ چشمگیری رسیده است. در ایران، مطالعه‌ای در زاگرس با ارزش‌گذاری سالانه‌ی ۱۸۰ میلیارد ریالی ذخیره‌ی کربن (جعفرزاده و همکاران، ۱۳۹۹، ص. ۱۳۷) و در جنگل‌های هیرکانی با برآورد ارزش ۶۷ میلیارد دلاری ثابت کردند که سیاست‌های حفاظتی می‌توانند از انتشار ده‌ها میلیون تن CO₂ جلوگیری کنند (Rahim Abadi et al., 2025, p. 1).

1, p. 2025). در سطح جهانی نیز در یک پژوهش ارزش اقتصادی کربن ازدست‌رفته بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ حدود ۲۱۴/۵۷ میلیون دلار و بین ۲۰۱۸ تا ۲۰۳۵ حدود ۱۷/۱۹ میلیون دلار برآورد شد (Babbar et al., 2021, p. 1). مطالعه‌ای دیگر در جنگل‌های کوهستانی پاکستان ارزش اقتصادی کربن ذخیره‌شده را حدود ۲ میلیون دلار برای ۲۷/۶۲ هکتار محاسبه کرد (Imran & Din, 2021, p. 2).

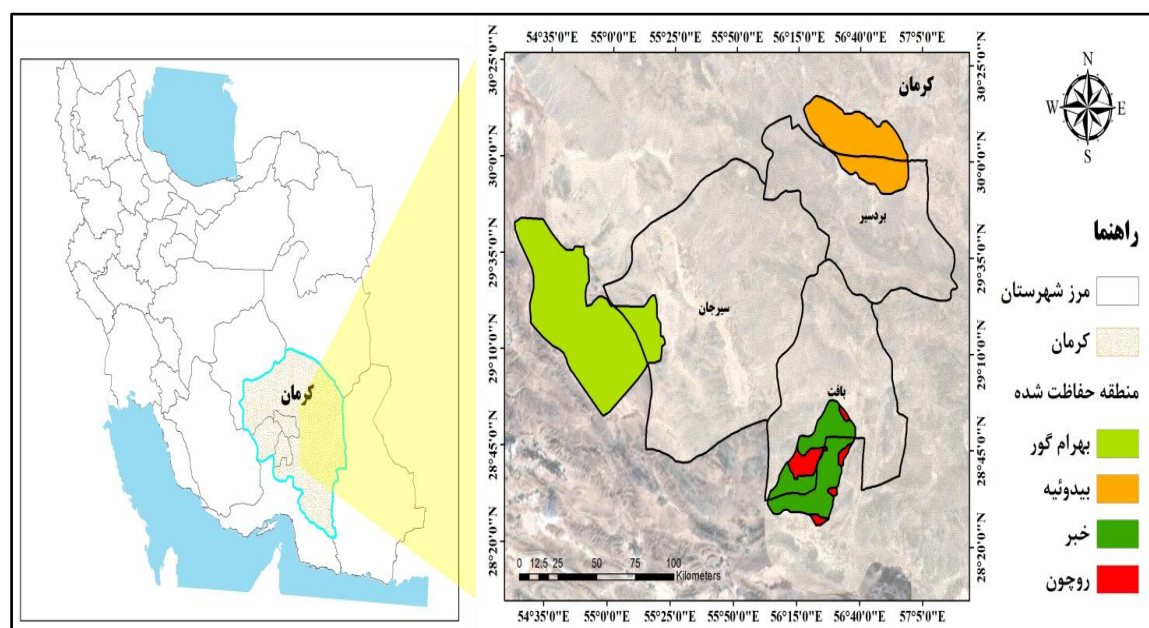
با وجود این پیشرفت‌ها، یک شکاف تحقیقاتی اساسی در اکوسیستم‌های خشک و فراخشک ایران، به‌ویژه در منطقه غرب استان کرمان (شهرستان‌های بافت، سیرجان و بردسیر)، به‌چشم می‌خورد. این منطقه که میزبان مناطق حفاظت‌شده ارزشمندی نظیر پارک ملی خبر، پناهگاه حیات‌وحش روچون و مناطق بیدوئیه و بخشی از پناهگاه بهرام‌گور است، باوجود حساسیت بالای اکولوژیکی و فشارهای روزافزون ناشی از تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، نیازمند بررسی دقیق‌تری در زمینه‌ی پویایی انتشار و ترسیب کربن است تا بتوان راهکارهای مدیریتی مؤثری برای حفاظت از آن ارائه داد.

ازاین‌رو، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی پویایی مکانی - زمانی خدمت اکوسیستمی انتشار و ترسیب کربن در سیمای سرزمین اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک غرب استان کرمان طراحی شده است. این تحقیق با بهره‌گیری از داده‌های سنجش‌ازدور، مدل InVEST و رویکردهای ارزش‌گذاری اقتصادی، درصدد است تا ضمن تحلیل روند تغییرات ذخایر کربن در دوره زمانی معین، اثر تغییرات کاربری زمین و فشارهای انسانی را بر این ظرفیت ارزیابی کرده و درنهایت، با شناسایی مناطق کلیدی دارای پتانسیل بالای ترسیب، راهکارهای مدیریتی مؤثری برای ارتقای پایداری اکوسیستم‌ها و مقابله با پیامدهای تغییرات اقلیمی ارائه دهد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به‌عنوان ابزاری قدرتمند در اختیار برنامه‌ریزان و مدیران محیط‌زیست قرار گیرد و به تدوین سیاست‌های بهینه کاربری اراضی و توسعه پایدار در این مناطق شکننده کمک شایانی کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل شهرستان‌های بافت، سیرجان و بردسیر در استان کرمان است که به دلیل تنوع بالای سیمای سرزمین، تفاوت‌های اکولوژیکی چشمگیر و وجود سه منطقه مهم تحت حفاظت، انتخاب شده است (شکل ۱). این منطقه از نظر جغرافیایی در محدوده ۳۰°۵۵' تا ۱۰°۵۷' طول شرقی و ۵۰°۲۷' تا ۱۰°۳۰' عرض شمالی قرار دارد و زیستگاه‌های متنوعی از کوهستان‌های مرتفع، دشت‌های نیمه‌خشک تا بیابانی و پوشش‌های جنگلی و مرتعی را در برمی‌گیرد. وجود پارک ملی خبر و پناهگاه حیات‌وحش روچون، منطقه حفاظت‌شده بیدوئیه و بخشی از منطقه حفاظت‌شده بهرام‌گور در این محدوده، ارزش حفاظتی و تنوع زیستی آن را دوچندان کرده است. این ترکیب کم‌نظیر از کاربری‌های اراضی و زیستگاه‌ها، بستری مناسب برای تحلیل فرآیندهای اکوسیستمی به‌ویژه ارزیابی مکانی - زمانی خدمات انتشار و ترسیب کربن فراهم می‌آورد و می‌تواند الگوی مناسبی برای مدیریت پایدار سرزمین در مناطق مشابه فراهم کند.



شکل ۱. موقعیت محدوده مورد مطالعه در ایران (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۵).

Fig. 1. Location of the study area in Iran (Source: Authors, 2026)

داده‌ها و روش کار

در این مطالعه به منظور استخراج نقشه‌های LULC، از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح مکانی مناسب و قابلیت تصحیح اتمسفری استفاده شد. برای این کار، تصاویر ماهواره‌ای لندست^۱ به عنوان منابع اصلی داده برای سال‌های مختلف (۲۰۰۰ و ۲۰۲۵) انتخاب شده‌اند که به دلیل وضوح بالا، امکان تصحیح جوی و به‌روزرسانی سریع، بسیار مناسب تحلیل‌های بلندمدت و مکانی - زمانی هستند. این تصاویر به گونه‌ای انتخاب شدند که میزان ابری‌بودن کمتر از ۱۰ درصد باشد تا کیفیت و دقت داده‌ها افزایش یابد. علاوه بر داده‌های ماهواره‌ای، نقشه‌های توپوگرافی نیز برای استخراج اطلاعات ارتفاعی و تحلیل‌های مکانی استفاده شد.

مدل‌سازی ذخیره‌سازی کربن با استفاده از مدل InVEST انجام شد که قادر است ذخیره کربن در بخش‌های مختلف اکوسیستم را با دقت مناسب برآورد کند. به‌طور کلی مطالعه حاضر در سه گام اصلی انجام شد:

تهیه نقشه LULC و استخراج سنجه‌های سیمای سرزمین
مدل‌سازی ذخیره‌سازی کربن

پایش تغییرات کاربری زمین و ذخیره کربن

مراحل فوق در نمودار جریانی شکل (۲) به صورت خلاصه و گام‌به‌گام نمایش داده شده است.

¹ Landsat



شکل ۲. نمودار جریان روش کار (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۵).

Fig 2. Flowchart of the working method (Source: Authors, 2026)

تهیه نقشه LULC و استخراج سنجه‌های سیمای سرزمین

نقشه‌های LULC برای دو دوره زمانی ۲۰۲۵ و ۲۰۰۰ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat با وضوح مکانی ۳۰ متر استفاده تهیه شد. این تصاویر با میزان ابری بودن کمتر از ۱۰ درصد انتخاب شدند تا کیفیت و دقت تحلیل افزایش یابد. به‌منظور افزایش دقت و تفکیک‌پذیری نقشه‌های LULC، با توجه به تفاوت ویژگی‌های طیفی و مکانی کلاس‌های مختلف و محدودیت هر یک از روش‌های طبقه‌بندی در تفکیک برخی کلاس‌ها، از یک رویکرد تلفیقی استفاده شد. در مرحله نخست، طبقه‌بندی نظارت‌شده با استفاده از نمونه‌های آموزشی حاصل از داده‌های میدانی، تصاویر Google Earth و سایر منابع معتبر انجام شد. همچنین، طبقه‌بندی نظارت‌نشده به‌منظور شناسایی الگوهای طیفی و تفکیک اولیه سطوح و کلاس‌های موجود به کار گرفته شد. علاوه بر این، شاخص‌های طیفی از جمله NDVI و NDWI برای استخراج اطلاعات مکمل مربوط به پوشش گیاهی و پهنه‌های آبی محاسبه شدند. در مرحله نهایی، نتایج حاصل از طبقه‌بندی نظارت‌شده، نظارت‌نشده و شاخص‌های طیفی به‌صورت جداگانه بررسی و قابلیت هر یک از آن‌ها در تفکیک کلاس‌های مختلف ارزیابی شد. سپس، با استفاده از قواعد تصمیم‌گیری تعریف‌شده در چارچوب Decision Tree، برای هر کلاس LULC مناسب‌ترین نتیجه از میان خروجی‌های حاصل از روش‌های مختلف انتخاب شد. به بیان دیگر، روش‌های مذکور به‌صورت یک ensemble یا رأی‌گیری مستقیم با یکدیگر ترکیب نشدند؛ بلکه بسته به قابلیت هر روش در شناسایی و تفکیک یک کلاس خاص، بهترین خروجی انتخاب و در نقشه نهایی LULC استفاده شد. به این ترتیب، نقشه نهایی حاصل از ادغام هدفمند بهترین نتایج روش‌های مختلف بود و امکان افزایش دقت تفکیک کلاس‌هایی فراهم شد که با استفاده از یک روش منفرد، با اطمینان کافی قابل شناسایی نبودند.

درنهایت، نقشه‌های LULC در قالب ۶ کلاس اصلی به شرح زیر تهیه شد:

کشاورزی: زمین‌های کشاورزی آبی و دیم،

باغ: باغ، جنگل، درخت‌کاری شده، پوشش گیاهی انبوه،

مرتع: مراتع انبوه و تنک، بوته‌زار،

بایر: زمین‌های بدون پوشش یا رهاشده،

انسان‌ساخت: مناطق مسکونی شهری و روستایی، سطوح انسان‌ساخت

برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی، از صحت کلی و ضریب کاپا^۱ استفاده شد. ضریب کاپا، دقت طبقه‌بندی را نسبت به حالت کاملاً تصادفی محاسبه می‌کند؛ مقدار صفر نشان‌دهنده‌ی طبقه‌بندی تصادفی و مقدار یک بیانگر تطابق کامل با واقعیت زمینی است (Parvar et al., 2024a, p. 3). این سنج‌ها از ماتریس خطا (ابهام^۲) استخراج می‌شوند که حاصل مقایسهٔ پیکسل به پیکسل داده‌های مرجع با نتایج طبقه‌بندی است.

محاسبهٔ شاخص‌های سیمای سرزمین^۳

پس از تهیه نقشه‌های LULC شاخص‌های سیمای سرزمین به‌منظور تحلیل تغییرات ساختار فضایی و پویایی اکوسیستم محاسبه شدند. این شاخص‌ها با استفاده از نرم‌افزار FRAGSTATS استخراج شد و تحلیل نتایج در نرم‌افزار Microsoft Excel انجام گرفت (McGarigal, 2015, p. 1).

این نرم‌افزار به‌عنوان ابزاری استاندارد در بوم‌شناسی سیمای سرزمین، امکان محاسبه سنج‌های هندسی، فیزیکی و مکانی را فراهم می‌کند. در این پژوهش، به‌منظور بررسی ترکیب و پیکربندی فضایی لکه‌ها، شاخص‌های منتخب شامل مساحت طبقه (CA) و درصد سیمای سرزمین (PLAND) برای ارزیابی ترکیب، تعداد لکه‌ها (NP)، تراکم لکه (PD) و متوسط اندازه لکه (AREA - MN) برای سنجش تکه‌تکه‌شدگی، تراکم حاشیه (ED) برای بررسی پیچیدگی مرزها، شاخص تجمع (AI) برای سنجش پیوستگی فضایی و شاخص تنوع شانون (SHDI) برای ارزیابی غنا و ناهمگنی کل منظر، استخراج و تحلیل شد.

نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده پس از آماده‌سازی، به نرم‌افزار FRAGSTATS وارد شدند. در این مرحله، شاخص‌های سیمای سرزمین برای هر کلاس کاربری محاسبه شد. داده‌های حاصل از این محاسبات به نرم‌افزار Excel منتقل شدند و تغییرات شاخص‌ها در بازه‌های زمانی مورد مطالعه (۲۰۰۰ و ۲۰۲۵) تحلیل شد تا پویایی و تغییرات مکانی - زمانی سیمای سرزمین شناسایی شود. استفاده از این شاخص‌ها امکان بررسی الگوهای پراکندگی، یکپارچگی و گسستگی کلاس‌های LULC را فراهم کرد و به‌عنوان مبنایی علمی برای توسعه راهبردهای مدیریت پایدار اکوسیستم‌ها استفاده شد (Turner & Gardner, 2001, p.1).

¹ Kappa Coefficient

² Confusion Matrix

³ Landscape Metrics

مدل‌سازی ذخیره‌سازی کربن

برای برآورد میزان ذخیره و تغییرات کربن در زیست‌توده زنده، زیست‌توده مرده، خاک و مواد آلی سطحی از مدل InVEST^۱ استفاده شد. ورودی اصلی مدل نقشه کاربری زمین با رزولوشن ۳۰ متر است که از تحلیل تصاویر لندست برای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۵ تهیه شد. برای برآورد میزان ذخیره و ترسیب کربن، استخرهای کربنی براساس میانگین مقادیر ذخیره‌سازی کربن متناسب با هر طبقه کاربری زمین تنظیم می‌شوند. در صورت عدم دسترسی به داده‌های میدانی، از داده‌های IPCC (۲۰۰۶) و نتایج مطالعات مشابه در مناطق هم اقلیم استفاده می‌شود (IPCC, 2006, p. 1.7). در پژوهش حاضر، مقادیر کربن چهار مخزن کربن شامل کربن روزمینی، زیرزمینی، کربن آلی خاک و لاش برگ مرتبط با هر کلاس کاربری از ترکیب داده‌های علمی معتبر، مطالعات محلی در استان کرمان، داده‌های جهانی و پژوهش‌های مشابه در مناطق هم اقلیم استخراج شد (عسکری ملک‌آبادی و همکاران، ۱۴۰۴، ص. ۱۲۵). مقادیر ذخیره کربن هر طبقه کاربری در جدول (۱) ارائه شده است:

جدول ۱. ذخایر کربن به تفکیک طبقات کاربری زمین (Mg/ha)

Table 1. Carbon stocks by land use class (Mg/ha)

منبع	لاش برگ	کربن آلی خاک	کربن زیرزمینی	کربن روزمینی	طبقه کاربری زمین
(Adelisardou et al., 2022)	۰	۱۸/۸۱	۱/۱۵	۷/۶۸	کشاورزی
	۰/۴	۶۸/۶	۱/۸	۶۳	باغ
(Nabikandi et al., 2024, p. 1).	۰	۱۹	۲/۱۶	۰/۷۶	مرتع
(Parvar et al., 2024a, p. 3).	۰	۹/۲	۰	۰	بایر
	۰	۰	۰	۰	مناطق انسان‌ساخت
	۰	۰	۰	۰	پهنه آبی

خروجی‌های مدل شامل نقشه‌های ذخیره کربن برای دوره‌های زمانی مختلف هستند که با نام‌های tot_c_cur و tot_c_fut، میزان کربن ذخیره‌شده در هر پیکسل، برحسب مگاگرم کربن در هکتار (Mg/ha) را برای سناریوهای فعلی و آینده نشان می‌دهند.

مقادیر مثبت، نشان‌دهنده ترسیب کربن و مقادیر منفی، بیانگر از دست رفتن کربن در منطقه مورد مطالعه هستند (Zafar et al., 2024, p. 3). به‌منظور پایش تغییرات LULC و ذخیره کربن، تغییرات در دوره‌های زمانی منتخب به‌صورت جامع شناسایی و تحلیل شدند تا روندهای مکانی - زمانی انتشار و ترسیب کربن در منطقه مشخص شود. تغییرات ذخیره کربن براساس خروجی‌های مدل InVEST تحلیل شد. نقشه‌های تفکیکی ذخیره کربن برای هر کلاس کاربری و کل ذخیره کربن در سطح پیکسل تهیه شد. همچنین، مقادیر کلی ذخیره یا از دست رفتن کربن برای هر شهرستان (بافت، سیرجان و بردسیر) و کل منطقه، محاسبه و نقاط بحرانی و مناطق با تغییرات چشمگیر شناسایی شدند (Adelisardou et al., 2022, p. 5929).

¹ Carbon Storage and Sequestration

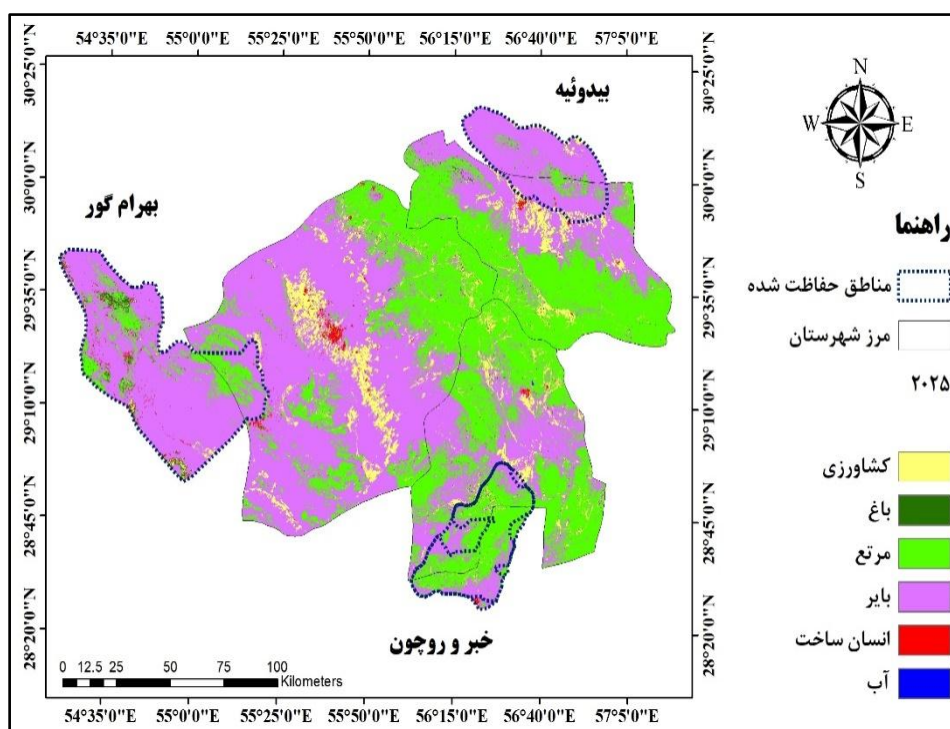
ارزش‌گذاری اقتصادی ترسیب کربن

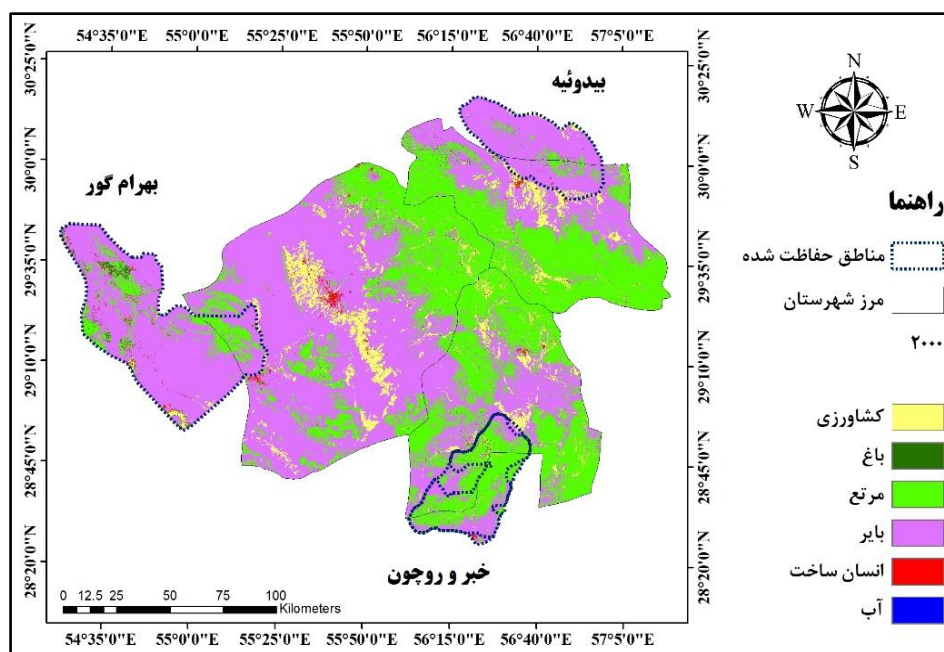
ارزش‌گذاری اقتصادی میزان ترسیب کربن با استفاده از تابع ارزش‌گذاری مدل InVEST انجام شد. قیمت پایه کربن معادل ۵۱ دلار به‌ازای هر تن کربن در نظر گرفته شد. نرخ تنزیل سالانه ۵ درصد و نرخ رشد سالانه قیمت کربن نیز ۳ درصد فرض گردید. در این پژوهش، ارزش اقتصادی صرفاً برای ترسیب خالص کربن ناشی از تغییرات ذخیره کربن بین سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۰۰ برآورد شد و از ارزش‌گذاری جداگانه ذخیره کربن اجتناب شد تا از برآورد مضاعف ارزش خدمت اکوسیستمی جلوگیری شود. بر این اساس، ارزش سایه‌ای کربن به‌عنوان مبنای ارزش‌گذاری ترسیب کربن استفاده شد. با توجه به مطالعات و برآوردهای موجود، مقدار ۵۱ دلار به‌ازای هر تن کربن به‌عنوان قیمت پایه کربن در نظر گرفته شد.

یافته‌ها

تغییرات کاربری و پوشش زمین LULC

نقشه‌های LULC در منطقه مورد مطالعه از سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۰۰ در بازه زمانی ۲۵ ساله در **شکل (۳)** ارائه شده است.





شکل ۳. نقشه‌های LULC سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۰۰

Fig 3. LULC maps for 2000 and 2025

نتایج ارزیابی صحت نشان داد که ضریب کاپا برای سال‌های مورد بررسی در سطح مطلوبی قرار دارد؛ به‌طوری‌که برای سال ۲۰۰۰ مقدار آن ۸۷/۲ درصد و برای سال ۲۰۲۵ مقدار ۹۳/۲ درصد به دست آمد. همچنین درستی کل طبقه‌بندی برای این دو سال به‌ترتیب ۸۹/۳ و ۹۴/۳ درصد محاسبه شد. این نتایج بیانگر آن است که نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده از دقت پذیرفتنی برخوردار است.

جدول (۲) تغییرات کاربری در بازه ۲۵ ساله را نشان می‌دهد:

جدول ۲. مساحت کاربری‌ها (هکتار)

Table 2. Land use area (hectares)

کاربری	سال ۲۰۰۰	سال ۲۰۲۵
کشاورزی	۱۹۳۴۶۶	۲۰۱۵۰۶
باغ	۱۹۴۰۱	۱۹۹۰۶
مرتع	۱۱۱۴۳۶۳	۱۱۱۷۲۲۳
بایر	۱۷۳۶۹۰۵	۱۷۲۱۱۷۴
انسان‌ساخت	۲۱۱۸۸	۲۵۳۰۱
آب	۱۰۴	۳۱۵

براساس نتایج به‌دست‌آمده، درحالی‌که مساحت کاربری انسان‌ساخت در منطقه مورد مطالعه از ۲۱۱۸۸ هکتار در سال ۲۰۰۰ به ۲۵۳۰۱ هکتار در سال ۲۰۲۵ افزایش یافته است که نشان‌دهنده رشد تقریبی ۱۹/۴٪ است. در همین دوره، مساحت

کاربری کشاورزی نیز از ۱۹۳۴۶۶ هکتار به ۲۰۱۵۰۶ هکتار افزایش یافته است. کاربری باغ نیز افزایش جزئی را تجربه کرده و از ۱۹۴۰۱ به ۱۹۹۰۶ هکتار رسیده است. در مقابل، مساحت کاربری بایر طی این سال‌ها کاهش یافته و از ۱۷۳۶۹۰۵ هکتار به ۱۷۲۱۱۷۴ هکتار رسیده است (کاهش حدود ۱۵۷۳۱ هکتار). کاربری مرتع نیز تغییرات اندکی را نشان می‌دهد و از ۱۱۱۴۳۶۳ هکتار به ۱۱۱۷۲۲۳ هکتار افزایش یافته است. همچنین، مساحت کاربری آب از ۱۰۴ هکتار به ۳۱۵ هکتار افزایش یافته که هرچند در مقیاس مطلق کم است، درصد رشد چشمگیری را نشان می‌دهد.

افزایش مساحت کاربری‌های انسان‌ساخت و کشاورزی، در کنار کاهش مساحت کاربری بایر، نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های انسانی، از جمله توسعه شهری و کشاورزی، بر تحولات پوشش و کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه است.

الگوهای مکانی تغییرات LULC

نتایج حاصل از سنج‌های سیمای سرزمین در **جدول (۳)** نشان داده شده است.

جدول ۳. نتایج حاصل از کمی‌سازی طبقات LULC با سنج‌های سیمای سرزمین

Table 3. Results of quantifying LULC classes with landscape metrics

سال	کاربری	CA	PLAND	PD	NP	AREA_MN	ED	AI	SHDI
۲۰۰۰	کشاورزی	۱۹۳۴۶۶	۶/۳	۱/۷	۵۲۰۹۴	۳/۷	۱۲/۴	۸۵/۲	۰/۹۳
	باغ	۱۹۴۰۱	۰/۶	۲	۶۱۶۰۲	۰/۳	۴/۸	۴۲/۱	
	مرتع	۱۱۱۴۳۶۳	۳۶/۰۹۷	۴	۱۲۳۲۱۹	۹/۲	۴۴/۳	۱۱۱/۸	
	بایر	۱۷۳۶۹۰۵	۵۶/۳	۴/۳	۱۳۲۶۴۷	۱۳/۱	۴۵/۳	۹۳/۹	
	انسان‌ساخت	۲۱۱۸۸	۰/۷	۱/۷	۵۰۹۳۱	۰/۴	۴/۶	۴۹/۴	
	آب	۱۰۴	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۱۹	۵/۵	۰/۰۰۸	۸۳/۷	
۲۰۲۵	کشاورزی	۲۰۱۵۰۶	۶/۵	۲/۴	۷۵۵۸۱	۲/۷	۱۵/۵	۸۲/۲	۰/۹۴
	باغ	۱۹۹۰۶	۰/۶۴	۲	۶۲۱۴۰	۰/۳	۴/۸	۴۳/۶	
	مرتع	۱۱۱۷۲۲۳	۳۶/۲۴	۴/۳	۱۳۲۴۵۹	۸/۶	۴۵	۱۱۰/۴	
	بایر	۱۷۲۱۱۷۴	۵۵/۸۱	۴/۶	۱۴۲۶۵۶	۱۲/۱	۴۷/۸	۹۳/۶	
	انسان‌ساخت	۲۵۳۰۱	۰/۸	۲	۶۱۸۰۸	۰/۴	۵/۲	۵۲/۵	
	آب	۳۱۵	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۳۷	۸/۵	۰/۰۱	۸۸/۲	

نتایج کمی‌سازی LULC در دو مقطع زمانی ۲۰۰۰ و ۲۰۲۵ نشان می‌دهد که ساختار سیمای سرزمین طی این دوره دستخوش تغییرات چشمگیری شده است. براساس سنج مساحت طبقه (CA) و درصد سیمای سرزمین (PLAND)، کاربری بایر همچنان بیشترین سهم را از کل منطقه مورد مطالعه به خود اختصاص داده است؛ به‌طوری‌که مقدار آن از ۱۷۳۶۹۰۵ در سال ۲۰۰۰ به ۱۷۲۱۱۷۴ در سال ۲۰۲۵ کاهش یافته است؛ اما همچنان با ۵۵/۸ درصد در سال ۲۰۲۵ غالب‌ترین کاربری منطقه محسوب می‌شود. پس از آن، مرتع با سهمی حدود ۳۶ درصد در هر دو سال، دومین کاربری غالب بوده و تغییرات آن بسیار محدود بوده است. در مقابل، کاربری‌های کشاورزی و انسان‌ساخت طی دوره مورد

بررسی روند افزایشی داشته‌اند؛ این روند بیانگر توسعه تدریجی کاربری‌های انسانی و فشار بر اراضی طبیعی و نیمه‌طبیعی است. همچنین مساحت کاربری آب اگرچه در مقیاس مطلق بسیار اندک است، افزایش یافته است که می‌تواند ناشی از تغییرات موضعی در پهنه‌های آبی یا دقت طبقه‌بندی باشد.

از نظر تعداد لکه‌ها (NP) و تراکم لکه (PD)، هر شش طبقه در سال ۲۰۲۵ نسبت به ۲۰۰۰ با افزایش تعداد لکه‌ها مواجه بوده‌اند که نشان‌دهنده افزایش تکه‌تکه‌شدگی و ریزدانه‌تر شدن الگوی کاربری‌هاست؛ به‌ویژه کاربری بایر با افزایش تعداد لکه از ۱۳۲۶۴۷ به ۱۴۲۶۵۶ و کاربری انسان‌ساخت از ۵۰۹۳۱ به ۶۱۸۰۸، بیشترین رشد را نشان داده‌اند. در مقابل، کاربری کشاورزی نیز با افزایش چشمگیر تعداد لکه از ۵۲۰۹۴ به ۷۵۵۸۱، بیانگر پراکنش بیشتر و تفکیک فضایی شدیدتر این کاربری است. این الگو با افزایش تراکم لکه‌ها برای کشاورزی از ۱/۷ به ۲/۴ و برای انسان‌ساخت از ۱/۷ به ۲ همراه بوده که نشان‌دهنده تشدید ناهمگنی فضایی در سیمای سرزمین است. افزایش تعداد لکه‌ها و تراکم لکه‌ها معمولاً به معنای کاهش پیوستگی فضایی و افزایش اختلال در ساختار سرزمین است.

سنجه میانگین مساحت لکه (AREA_MN) نشان می‌دهد که اندازه متوسط لکه‌ها در برخی طبقات کاهش و در برخی دیگر افزایش یافته است. برای کاربری کشاورزی این سنجه از ۳/۷ به ۲/۷ کاهش یافته که نشان‌دهنده خردشدگی بیشتر اراضی کشاورزی است. در مقابل، کاربری بایر از ۱۳/۱ به ۱۲/۱ کاهش یافته و کاربری انسان‌ساخت ثابت مانده، هرچند افزایش تعداد لکه‌ها در این دوطبقه نشان می‌دهد که گسترش آنها بیشتر به‌صورت پراکنده و در قالب لکه‌های کوچک‌تر رخ داده است. در کاربری مرتع نیز کاهش نسبی میانگین اندازه لکه از ۹/۲ به ۸/۶ مشاهده می‌شود که می‌تواند حاکی از افت تدریجی انسجام فضایی این طبقه باشد. به‌طور کلی، کاهش AREA_MN در طبقات طبیعی و افزایش NP در طبقات انسانی، نشانه‌ای از تشدید تکه‌تکه‌شدگی و تغییر در سازمان فضایی منطقه است.

سنجه طول حاشیه (ED) نیز بیانگر افزایش مرزهای بین‌طبقه‌ای در اغلب کاربری‌هاست. کاربری کشاورزی از ۱۲.۴ به ۱۵/۵، بایر از ۴۵/۳ به ۴۷/۸ و انسان‌ساخت از ۴/۶ به ۵/۲ افزایش داشته‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که لبه‌ها و تماس بین لکه‌ها و کاربری‌ها بیشتر شده و ساختار سیمای سرزمین پیچیده‌تر و ناهمگون‌تر شده است. افزایش ED معمولاً با افزایش تکه‌تکه‌شدگی و اختلاط کاربری‌ها همراه است و می‌تواند اثرات اکولوژیکی مهمی مانند افزایش حساسیت به اختلالات محیطی را در پی داشته باشد.

از سوی دیگر، شاخص تجمع (AI) در کاربری کشاورزی از ۸۵/۲ به ۸۲/۲ کاهش یافته که بیانگر کاهش هم‌جواری و پیوستگی لکه‌های کشاورزی است؛ با این حال، این شاخص برای کاربری بایر تقریباً ثابت و حتی اندکی کاهش یافته است (۹۳.۹ به ۹۳.۶)؛ درحالی‌که برای انسان‌ساخت از ۴۹/۴ به ۵۲/۵ افزایش نشان می‌دهد. این افزایش در طبقه انسان‌ساخت می‌تواند به معنی تمرکز بیشتر توسعه‌های انسانی در لکه‌های مجاور و شکل‌گیری هسته‌های پیوسته‌تر باشد. در مقابل، کاهش AI در کشاورزی نشان‌دهنده افت انسجام فضایی و احتمال تبدیل بخشی از اراضی کشاورزی به سایر کاربری‌ها یا تقسیم شدن آنها به قطعات کوچک‌تر است.

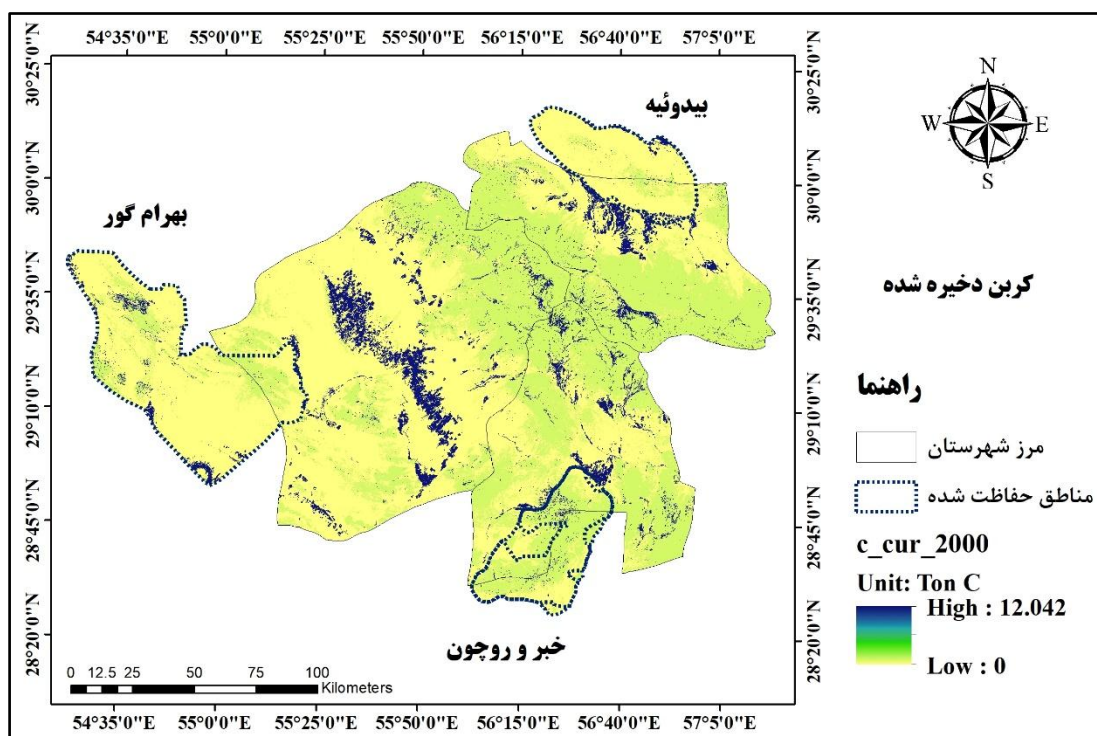
درنهایت، مقدار شاخص تنوع شانون (SHDI) برای کل منظر از ۰/۹۳ در سال ۲۰۰۰ به ۰/۹۴ در سال ۲۰۲۵ افزایش اندکی یافته است. این افزایش هرچند محدود است، نشان می‌دهد که تنوع و ناهمگنی کاربری‌ها در طول زمان

اندکی بیشتر شده است. با توجه به افزایش مساحت و تعداد لکه‌های کاربری‌های انسان‌ساخت و کشاورزی، و در عین حال کاهش نسبی انسجام برخی طبقات طبیعی، می‌توان نتیجه گرفت که سیمای سرزمین منطقه مورد مطالعه به سمت افزایش پراکنش فضایی، تکه‌تکه‌شدگی و پیچیدگی ساختاری حرکت کرده است.

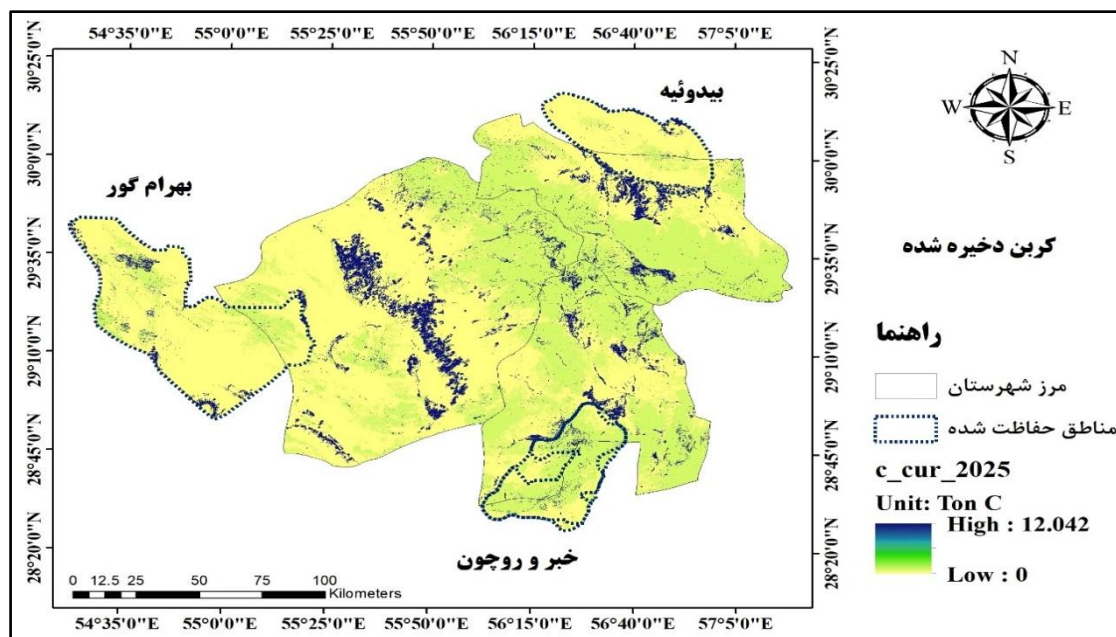
جمع‌بندی کلی این سنج‌ها نشان می‌دهد که سیمای سرزمین منطقه به سمت افزایش تکه‌تکه‌شدگی، رشد لکه‌های انسان‌ساخت، و کاهش پیوستگی کاربری‌های طبیعی و کشاورزی حرکت کرده است. برای مسئولان و برنامه‌ریزان، این روند یک هشدار روشن است که توسعه فضایی بدون کنترل می‌تواند به افت کارکردهای اکولوژیکی، کاهش انسجام اراضی کشاورزی و افزایش فشار بر منابع سرزمین منجر شود؛ بنابراین، تحولات مشاهده‌شده در سه شهرستان بردسیر، بافت و سیرجان را نمی‌توان کاملاً مثبت ارزیابی کرد؛ این تغییرات بیشتر نشانه‌ای از فشار انسانی بالا و حرکت تدریجی به سوی تخریب و ناپایداری سیمای سرزمین هستند تا یک توسعه متوازن و پایدار.

خدمات بوم‌سازگانی ترسیب کربن

در شکل (۴)، میزان ذخیره کربن برحسب تن در پیکسل کربن برای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۵ که در دامنه صفر تا ۱۲ تن کربن متغیر است مشاهده می‌شود. رنگ آبی تیره در شکل، نقاط داغ^۱ خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن را نشان می‌دهد که بیشتر منطبق بر کاربری‌های باغ و کشاورزی است. اصطلاح نقاط داغ در اینجا برای اشاره به مناطقی است که نسبت زیادی از خدمت ترسیب کربن را ارائه می‌دهند.



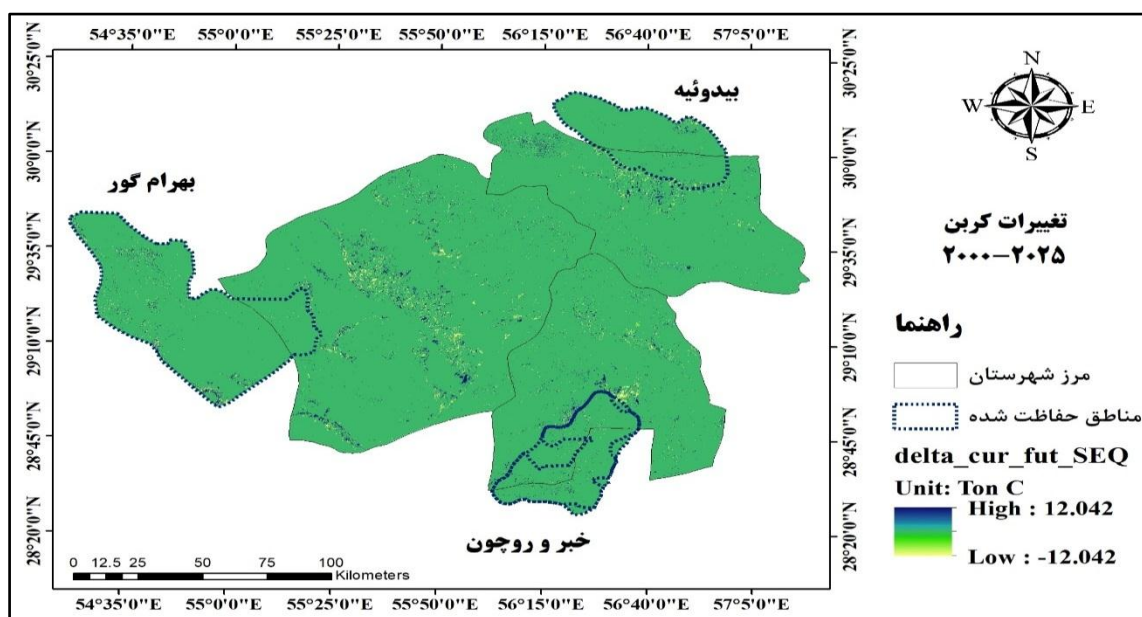
¹ hotspots



شکل ۴. نقاط داغ ذخیره کربن (رنگ آبی تیره) سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۰۰

Fig 4. Carbon storage hotspots (dark blue) 2000 and 2025

براساس خروجی مدل، ذخیره کل کربن در سال ۲۰۰۰ معادل (۳۲,۳۷۱,۰۴۹) ۳۲ میلیون و ۳۷۱ هزار و ۴۹ مگاگرم و در سال ۲۰۲۵ معادل (۳۲,۷۲۵,۴۲۴) ۳۲ میلیون و ۷۲۵ هزار و ۴۲۴ مگاگرم برآورد شد. تفاوت کربن ذخیره شده بین چشم‌انداز آینده و فعلی برحسب مگاگرم کربن در هر پیکسل در شکل (۵) نمایش داده شده است.



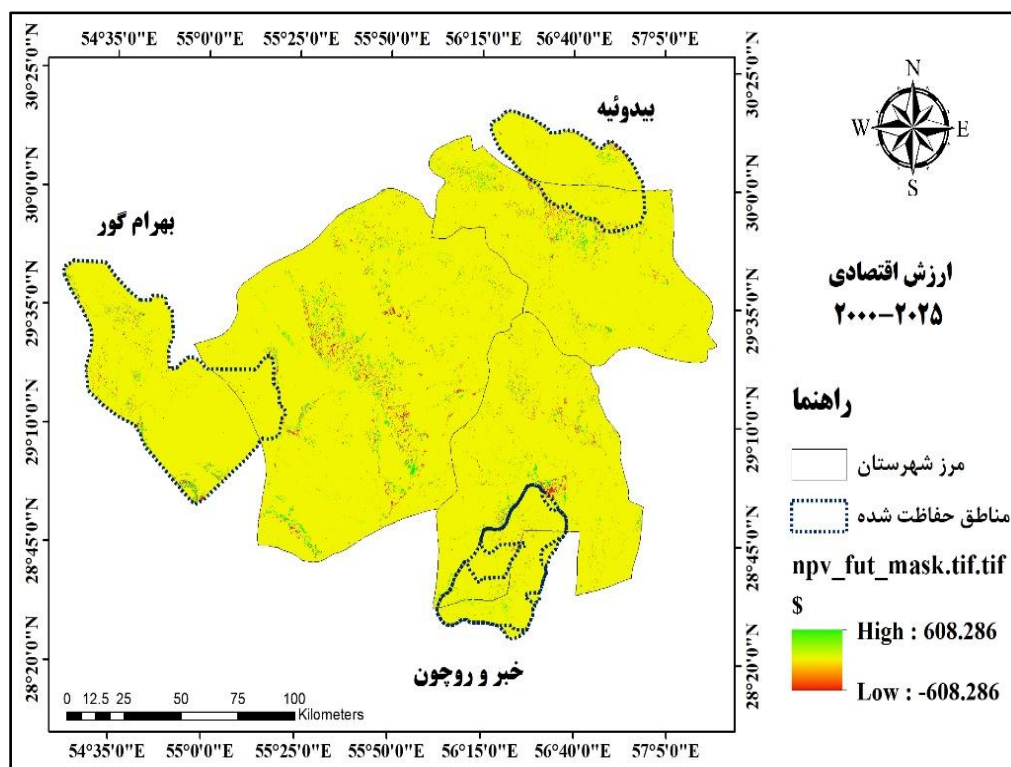
شکل ۵. تغییرات کربن در منطقه مورد مطالعه

Fig 5. Carbon changes in the study area

در این نقشه، مقادیر منفی با رنگ زرد نشان‌دهنده کربن از دست رفته و مقادیر مثبت با رنگ آبی نشان‌دهنده کربن ترسیب شده است. تغییر خالص کربن طی بازه زمانی ۲۵ ساله معادل (۳۵۴,۳۷۵) ۳۵۴ هزار و ۳۷۵ مگاگرم بوده که نشان‌دهنده ترسیب مثبت کربن در منطقه مورد مطالعه است.

ارزش اقتصادی ترسیب کربن

شکل (۶) ارزش اقتصادی ترسیب کربن را نشان می‌دهد. مقدار ارزش اقتصادی دلار در واحد سلول است؛ به گونه‌ای که مناطق با ترسیب مثبت دارای ارزش اقتصادی مثبت و مناطق با ترسیب منفی نیز دارای کاهش ارزش اقتصادی خواهد بود.



شکل ۶. ارزش اقتصادی کربن (دلار در هر پیکسل)

Fig 6. Economic value of carbon (dollars per pixel)

ارزش‌گذاری اقتصادی میزان ترسیب کربن با استفاده از تابع ارزش‌گذاری مدل اینوست انجام شد. قیمت پایه کربن معادل ۵۱ دلار به ازای هر تن کربن در نظر گرفته شد. نرخ تنزیل سالانه بازار ۵ درصد و نرخ رشد سالانه قیمت کربن نیز ۳ درصد فرض شد (Sharp et al., 2014, p. 1). با اعمال این مفروضات و با فرض توزیع خطی ترسیب کربن در طول دوره ۲۵ ساله، ارزش فعلی خالص ترسیب کربن ناشی از تغییرات کاربری اراضی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ حدود (۱۷,۹۰۰,۸۰۰) ۱۷ میلیون و ۹۰۰ هزار و ۸۰۱ دلار محاسبه شد.

به‌منظور بررسی حساسیت ارزش اقتصادی نسبت به قیمت کربن، در یک سناریوی جایگزین قیمت ۱۰۰ دلار به‌ازای هر تن کربن نیز در نظر گرفته شد. در این حالت، با ثابت نگه‌داشتن سایر مفروضات، ارزش فعلی خالص ترسیب کربن به حدود ۳۵.۱ میلیون دلار افزایش می‌یابد. این اختلاف نشان می‌دهد که نتایج ارزش‌گذاری اقتصادی نسبت به قیمت پایه کربن حساس است و انتخاب قیمت کربن می‌تواند دامنه چشمگیری از ارزش اقتصادی خدمت ترسیب کربن را ایجاد کند.

مقدار مثبت ارزش فعلی خالص نشان می‌دهد که الگوی کاربری اراضی در سال ۲۰۲۵ نسبت به سال پایه از منظر اقتصادی سودآور بوده و منطقه مورد مطالعه موفق به ارائه خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن با ارزش خالص چشمگیری شده است. با فرض نرخ ارز دولتی ۱۳۰ هزار تومان (سال ۱۴۰۵) به ازای هر دلار، ارزش فعلی خالص ترسیب کربن در منطقه مورد مطالعه معادل حدود (۲۳۲۷ میلیارد تومان) دو هزار و سیصد و بیست‌وهفت میلیارد تومان برآورد می‌شود.

بحث

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی پویایی مکانی - زمانی خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن در سیمای سرزمین اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک غرب استان کرمان و با تلفیق مدل InVEST، داده‌های سنجش‌ازدور و رویکردهای ارزش‌گذاری اقتصادی طراحی شده است. برخلاف اغلب مطالعات پیشین که عمدتاً به بررسی کاهش ترسیب کربن در اثر تغییرات کاربری پرداخته‌اند، این مطالعه با شناسایی هم‌زمانی افزایش ترسیب کربن با وجود تشدید تکه‌تکه‌شدگی سیمای سرزمین رویکرد متفاوتی ارائه می‌دهد.

یافته‌ها نشان‌دهنده تغییرات چشمگیری در الگوی کاربری زمین طی ۲۵ سال است. افزایش مساحت کاربری انسان‌ساخت (۴۱۱۳ هکتار، رشد ۴/۱۹ درصد) و کشاورزی (۸۰۴۰ هکتار) در کنار کاهش ۱۵۷۳۱ هکتاری اراضی بایر، بیانگر دگرگونی عمیق در ساختار سرزمین و فشار فزاینده بر منابع طبیعی منطقه است. این روند را می‌توان به توسعه فعالیت‌های کشاورزی (به‌ویژه کشت آبی در اراضی حاشیه‌ای)، رشد جمعیت و توسعه شهری، و سیاست‌های حمایتی دولت در زمینه احیای اراضی بایر نسبت داد. الگوی مشاهده‌شده با پژوهش انجام شده در مناطق خشک مرکزی ایران (منطقه حفاظت‌شده جهان‌نما) هم‌خوانی دارد. افزایش اندک مساحت مراتع (۲۸۶۰ هکتار) اگرچه در نگاه اول مثبت به نظر می‌رسد، با توجه به افزایش تکه‌تکه‌شدگی و کاهش پیوستگی (که در سنجش‌های سیمای سرزمین نمایان می‌شود)، نمی‌تواند نشان‌دهنده بهبود کیفیت مراتع باشد (فدایی و همکاران، ۱۳۹۹، ص. ۱۵۴).

نتایج نشان داد مناطق ذخیره‌سازی کربن با ارزش بسیار زیاد در مناطق با پوشش درختی متمرکز شده‌اند که ظرفیت جذب کربن قوی دارند و بزرگ‌ترین مخزن کربن در اکوسیستم‌ها هستند. به همین ترتیب در این مناطق نیز بالاترین کیفیت زیستگاه مشاهده شد و در مکان‌هایی که پوشش گیاهی تکه‌تکه شده و محیط اطراف آن با منابع تهدید انسانی اشغال شده است، کیفیت زیستگاه کاهش یافته است. از نظر توزیع فضایی، ذخیره کربن و کیفیت زیستگاه الگوی توزیع فضایی کم - بالا - متوسط از شمال به جنوب را نشان دادند. نقشه‌های خدمات اکوسیستمی ایجادشده در این مطالعه

می‌تواند در شناسایی مناطق بالقوه عرضه ذخیره‌سازی کربن و کیفیت زیستگاه مفید باشد و مبنای علمی را برای بحث بیشتر توسط سیاست‌گذاران درباره برنامه‌ریزی کاربری زمین در آینده از منظر به حداقل رساندن تغییرات اقلیمی و افزایش تنوع زیستی فراهم کند.

نتایج سنج‌های سیمای سرزمین نشان‌دهنده تحولات ساختاری قابل توجه در چشم‌انداز، فراتر از تغییرات صرفاً سطحی در مساحت طبقات LULC است. افزایش تکه‌تکه‌شدگی یکی از بارزترین پیامدهای این تغییرات بود؛ به‌طوری‌که تعداد لکه‌های کشاورزی ۴۵ درصد (از ۵۲۰۹۴ به ۷۵۵۸۱) و لکه‌های انسان‌ساخت ۲۱ درصد (از ۵۰۹۳۱ به ۶۱۸۰۸) افزایش یافت که می‌تواند بیانگر افزایش پراکندگی اراضی کشاورزی و توسعه پراکنده مناطق انسان‌ساخت باشد. هم‌زمان، کاهش شاخص تجمع (AI) در اراضی کشاورزی از ۲/۸۵ به ۲/۸۲ نشان‌دهنده کاهش پیوستگی فضایی این کاربری است. کاهش پیوستگی لکه‌های کشاورزی و طبیعی می‌تواند از طریق افزایش فاصله میان لکه‌ها و کاهش اتصال فضایی، جابه‌جایی آب، مواد و موجودات زنده در سطح چشم‌انداز را محدود کند و کارایی برخی فرایندهای اکولوژیک را تحت تأثیر قرار دهد.

افزایش تراکم حاشیه (ED) در اراضی کشاورزی از ۴/۱۲ به ۵/۱۵ و در اراضی بایر از ۳/۴۵ به ۸/۴۷ نیز نشان‌دهنده افزایش پیچیدگی و طول نسبی مرز لکه‌ها و در نتیجه افزایش احتمال اثرات لبه‌ای است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، افزایش نسبت لبه به مساحت می‌تواند شرایط محیطی در حاشیه لکه‌ها را از طریق تغییر تابش، دما، تبخیر - تعرق و الگوی نگهداشت رطوبت تحت تأثیر قرار دهد. این تغییرات می‌توانند بر رطوبت قابل دسترس خاک و شرایط رشد پوشش گیاهی اثر گذاشته و در نهایت، از طریق تغییر در تولید زیست‌توده و فعالیت فتوسنتزی، بر ظرفیت ترسیب کربن اثرگذار باشند؛ بنابراین، افزایش ED را می‌توان نه صرفاً به‌عنوان یک تغییر هندسی در ساختار چشم‌انداز، بلکه به‌عنوان عاملی بالقوه مؤثر بر شرایط خرد محیطی و عملکرد اکوسیستم در نظر گرفت. کاهش AI نیز از منظر ترسیب کربن اهمیت دارد. در یک چشم‌انداز متراکم و پیوسته، لکه‌های پوشش گیاهی معمولاً از شرایط درونی باثبات‌تری نسبت به حاشیه‌ها برخوردارند؛ در مقابل، افزایش تکه‌تکه‌شدگی و کاهش تجمع می‌تواند سهم نواحی تحت تأثیر اثرات لبه‌ای را افزایش دهد. این امر در مراتع و باغات منطقه خشک کرمان، که عملکرد پوشش گیاهی به‌شدت به دسترسی محدود به آب وابسته است، می‌تواند اهمیت بیشتری داشته باشد. کاهش پیوستگی فضایی ممکن است با افزایش نوسانات دمایی و تبخیر سطحی و تغییر در نگهداشت رطوبت، شرایط رشد پوشش گیاهی را محدود کند و از این طریق بر تولید زیست‌توده و جذب کربن اثرگذار باشد؛ با این حال، این روابط باید به‌عنوان سازوکارهای احتمالی تفسیر شوند؛ زیرا سنج‌های سیمای سرزمین به‌طور مستقیم روابط فیزیولوژیک یا شار کربن را اندازه‌گیری نمی‌کنند. کاهش میانگین مساحت لکه‌ها در مرتع (از ۲/۹ به ۶/۸) و اراضی بایر (از ۱/۱۳ به ۱/۱۲) نیز با افزایش تکه‌تکه‌شدگی و کاهش اندازه لکه‌ها سازگار است. درباره مراتع، کاهش اندازه لکه‌های پیوسته می‌تواند ظرفیت حفظ شرایط درونی لکه و مقاومت پوشش گیاهی در برابر تنش‌های محیطی را کاهش دهد و در نتیجه، به‌صورت غیرمستقیم بر تولید زیست‌توده و ترسیب کربن اثرگذار باشد. این تفسیر با یافته‌های ژائو و همکاران در حوضه هیهه، که ارتباط میان افزایش طول حاشیه و کاهش ذخیره کربن را گزارش کردند، همسو است (Zhao et al., 2019, p. 29).

در سطح چشم‌انداز، افزایش اندک شاخص تنوع شانون (SHDI) از ۰/۹۳ به ۰/۹۴ نشان‌دهنده افزایش جزئی تنوع و ناهمگنی طبقات کاربری است؛ با این حال، افزایش تنوع کاربری لزوماً به معنای بهبود عملکرد اکوسیستم یا افزایش ترسیب کربن نیست؛ زیرا اثر آن به نوع طبقات، میزان پیوستگی آنها و نحوه آرایش فضایی لکه‌ها نیز وابسته است؛ بنابراین، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تغییرات سیمای سرزمین باید در کنار تغییرات مساحت کاربری‌ها و ذخایر کربن تفسیر شوند؛ زیرا تغییر در ساختار فضایی چشم‌انداز می‌تواند از طریق تغییر در شرایط خرد محیطی، دسترسی به رطوبت و عملکرد پوشش گیاهی، مسیرهای غیرمستقیمی را بر ظرفیت ترسیب کربن ایجاد کند.

اگرچه اراضی بایر به کاربری‌های باارزش اقتصادی بالاتر تبدیل شده‌اند، این تغییرات با افزایش تکه‌تکه‌شدگی و کاهش پیوستگی فضایی همراه است که کارایی اکولوژیک سرزمین را به خطر می‌اندازد. پژوهش انجام‌شده در اکوسیستم خشک کنیا نیز تأکید کرد مدیریت ناپایدار اراضی در مناطق خشک، با وجود افزایش موقت بهره‌وری اقتصادی، در بلندمدت به تخریب خاک و کاهش خدمات اکوسیستمی می‌انجامد (Omwoyo et al., 2025, p. 2)؛ بنابراین، تحولات سه شهرستان بردسیر، بافت و سیرجان را نمی‌توان کاملاً مثبت ارزیابی کرد؛ این تغییرات بیشتر نشانه‌ای از فشار انسانی فزاینده و حرکت به سوی ناپایداری سیمای سرزمین است تا یک توسعه متوازن. این یافته‌ها برای برنامه‌ریزان هشدار می‌دهد که توسعه بدون برنامه‌ریزی جامع می‌تواند به افت کارکردهای اکولوژیکی، کاهش انسجام اراضی کشاورزی و افزایش فشار بر منابع طبیعی منجر شود.

نتایج حاصل از مدل‌سازی ارزش اقتصادی ترسیب کربن نشان می‌دهد که برخلاف بسیاری از مناطق دیگر که معمولاً با تخریب منابع طبیعی و کاهش ذخایر کربن همراه هستند، در منطقه مورد مطالعه شامل شهرستان‌های بردسیر، بافت و سیرجان، ارزش اقتصادی ترسیب کربن روندی افزایشی داشته است. به عبارت دیگر، طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵، با وجود وقوع توسعه شهری و گسترش مناطق انسان‌ساخت که معمولاً با کاهش پوشش گیاهی و انتشار کربن همراه است، مجموع ذخایر کربن منطقه کاهش نیافته بلکه با افزایش مواجه شده است. دلیل اصلی این پدیده را می‌توان در تغییرات الگوی کاربری اراضی جستجو کرد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که در طول سال‌های مورد بررسی، سطح باغات و مراتع در منطقه افزایش یافته است. این دوطبقه کاربری به دلیل دارا بودن تراکم کربن نسبتاً بالا (به‌ویژه باغات با کربن روزمینی ۶۳ مگاگرم در هکتار) توانسته‌اند اثرات منفی ناشی از توسعه شهری را جبران و حتی ترسیب خالص مثبت ایجاد کنند. نکته تأمل‌برانگیز دیگر، نقش مناطق حفاظت‌شده در این روند مثبت است. منطقه مورد مطالعه دربرگیرنده سه منطقه حفاظت‌شده مهم است: منطقه حفاظت‌شده بیدویی در بردسیر، منطقه حفاظت‌شده بهرام‌گور در سیرجان و منطقه حفاظت‌شده و پارک ملی خبر و روچون در بافت. حضور این مناطق تحت مدیریت حفاظتی، تا حد چشمگیری از تخریب پوشش گیاهی و تغییر کاربری‌های مخرب جلوگیری کرده است. به نظر می‌رسد که این حفاظت‌های رسمی، علاوه بر حفظ وضعیت موجود، بستر مناسبی برای احیای طبیعی و افزایش تراکم کربن در طول زمان فراهم نموده است؛ بنابراین می‌توان گفت موفقیت منطقه در ترسیب کربن و کسب ارزش اقتصادی مثبت، حاصل تعامل دو عامل اصلی یعنی افزایش سطح باغات و مراتع از یک‌سو و وجود مناطق تحت حفاظت مؤثر از سوی دیگر است. این یافته

تأکید می‌کند که سیاست‌های حفاظتی و مدیریت پایدار سرزمین، حتی در مناطقی که با فشار توسعه شهری مواجه هستند، می‌تواند منجر به حفظ و حتی بهبود خدمات اکوسیستمی از جمله ترسیب کربن شود.

یافته‌های مدل‌سازی با InVEST نشان داد که ذخیره کل کربن در منطقه طی بازه ۲۵ ساله افزایش یافته است و تغییر خالص مثبت ۳۵۴,۳۷۵ مگاگرم را نشان می‌دهد. این افزایش در شرایطی رخ داده که توسعه شهری و گسترش مناطق انسان‌ساخت معمولاً با کاهش پوشش گیاهی و انتشار کربن همراه است. ارزش فعلی خالص ترسیب کربن معادل ۹/۱۷ میلیون دلار (معادل ۲۳۲۷ میلیارد تومان) برآورد شد که نشان‌دهنده عملکرد مثبت اقتصادی منطقه در ارائه این خدمت اکوسیستمی است.

این یافته با مطالعات بین‌المللی هم‌خوانی دارد. در حوضه هیبه محققان نشان دادند که اجرای مهندسی اکولوژیکی از طریق افزایش پوشش‌های با ظرفیت بالای کربن، موجب افزایش ۲۷/۱۰ تراگرمی ذخیره کربن شده است (Zhao et al., 2019, p. 29).

همچنین، Bai و همکاران نشان دادند که تحت سناریوی حفاظت اکولوژیکی، ظرفیت ذخیره کربن قابل افزایش است (Bai et al., 2025)؛ با این حال، نتایج پژوهش حاضر با مطالعاتی که کاهش کربن را گزارش کرده‌اند، تفاوت اساسی دارد. Babbar و همکاران در منطقه حفاظت‌شده ساریسکا، کاهش ۱۰۳۵۱ تراگرم (معادل ۱۰۳۵۱ میلیون تن) را به دلیل قطع غیرقانونی چوب گزارش کردند (Babbar et al., 2021, p. 1). پژوهش یزد نیز نشان داده است که تبدیل اراضی بیابانی به کشاورزی می‌تواند منجر به افزایش ۳/۴ تا ۵/۸ برابری کربن آلی خاک شود. دوم، حضور سه منطقه حفاظت‌شده (بیدوئی، بهرام‌گور و خبر - روچون) که از تخریب پوشش گیاهی جلوگیری کرده و بستر احیای طبیعی را فراهم کرده‌اند (فلاح‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳، ص. ۱). این یافته با پژوهش Peng و همکاران که نشان داد اجرای سیاست‌های حمایتی پوشش گیاهی می‌تواند ذخیره کربن را افزایش دهد، هم‌خوانی دارد (Peng et al., 2025 p.1).

با این حال، باید به این نکته مهم توجه کرد که افزایش ترسیب کربن نباید به‌عنوان یک موفقیت زیست‌محیطی مطلق تلقی شود. همان‌گونه که در بخش پیشین نشان داده شد، سنج‌های سیمای سرزمین حکایت از تشدید تکه‌تکه‌شدگی، کاهش پیوستگی تکه‌تکه‌شدگی اراضی کشاورزی دارند. هرگونه دخالت در اکوسیستم‌های طبیعی می‌تواند اثرات منفی بر ذخایر کربن خاک داشته باشد؛ بنابراین افزایش ترسیب مشاهده‌شده را باید پیامدی موقت از تغییر کارکرد اراضی با پیامدهای اکولوژیکی بلندمدت در نظر گرفت.

موفقیت منطقه در ترسیب کربن و کسب ارزش اقتصادی مثبت، حاصل تعامل دو عامل افزایش سطح باغات و مراتع و وجود مناطق تحت حفاظت مؤثر است. این یافته تأکید می‌کند که سیاست‌های حفاظتی و مدیریت پایدار سرزمین، حتی در مناطقی که با فشار توسعه مواجه هستند، می‌تواند به حفظ و بهبود خدمات اکوسیستمی کمک کند؛ با این حال، تشدید تکه‌تکه‌شدگی هم‌زمان با افزایش کربن، یک دوگانگی اساسی است که نیازمند توجه ویژه برنامه‌ریزان است. پژوهش‌های آتی با شبیه‌سازی سناریوهای مختلف توسعه و حفاظت، می‌توانند مسیرهای بهینه مدیریت سرزمین را برای حفظ این خدمت ارزشمند در مناطق خشک شناسایی کنند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی پویایی مکانی - زمانی ترسیب کربن در پاسخ به تغییرات LULC در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک غرب کرمان طی دوره ۲۵ ساله انجام شد. با وجود اهمیت روزافزون خدمات تنظیمی اکوسیستم‌ها در کاهش تغییرات اقلیمی، تاکنون مطالعه‌ای جامع با تلفیق مدل‌سازی مکانی - زمانی و ارزش‌گذاری اقتصادی در این مناطق حساس که میزبان مناطق حفاظت‌شده ارزشمندی هستند، انجام نشده بود. این تحقیق با بهره‌گیری از مدل InVEST و سنجش‌های سیمای سرزمین، ضمن تحلیل روند تغییرات ذخایر کربن، نقش تغییرات LULC را در پویایی این خدمت بررسی کرده و با ارزش‌گذاری اقتصادی، اهمیت آن را در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی برجسته ساخته است. این پژوهش به‌عنوان یکی از نخستین تلاش‌ها در منطقه، تصویری شفاف از رابطه متقابل ساختار سیمای سرزمین و ترسیب کربن ارائه می‌دهد و سهم مهمی در پرکردن خلأ دانش موجود در اکوسیستم‌های فراخشک ایران ایفا می‌کند.

یافته‌های کلیدی این مطالعه در زیر بیان شده است:

- منطقه مورد مطالعه طی دوره ۲۵ ساله به‌عنوان مخزن کربن عمل کرده و ترسیب خالصی معادل ۳۵۴,۳۷۵ مگاگرم کربن ثبت شده است.

• افزایش مساحت باغات، مراتع و اراضی کشاورزی در کنار کاهش قابل توجه اراضی بایر، با افزایش ذخایر کربن در منطقه همراه بوده است. باغات به دلیل برخورداری از پوشش گیاهی پایدارتر و زیست‌توده بیشتر، بالاترین ظرفیت ذخیره و ترسیب کربن را در میان طبقات کاربری داشته و سهم چشمگیری در افزایش ذخایر کربن ایفا کرده‌اند؛ با این حال، در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک، افزایش ترسیب کربن ناشی از توسعه باغات و اراضی کشاورزی را نمی‌توان صرفاً به‌عنوان یک پیامد مثبت محیط زیستی تلقی کرد؛ زیرا در صورت وابستگی این توسعه به برداشت بیش از ظرفیت تجدیدپذیر منابع آب زیرزمینی، افزایش پوشش گیاهی و ترسیب کربن ممکن است با هزینه‌های اکولوژیکی ناشی از افت سطح آب زیرزمینی همراه باشد؛ ازاین‌رو، پایداری این افزایش ترسیب کربن به نحوه تأمین آب، الگوی کشت و میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی وابسته است.

• با وجود افزایش ۱۹.۴ درصدی مساحت کاربری‌های انسان‌ساخت، ذخیره خالص کربن منطقه طی دوره مورد بررسی افزایش یافته است. این افزایش را می‌توان در ارتباط با افزایش هم‌زمان مساحت باغات، مراتع و اراضی کشاورزی و ظرفیت بیشتر این کاربری‌ها برای ذخیره کربن تفسیر کرد؛ با این حال، افزایش مساحت مناطق انسان‌ساخت نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه در سیمای سرزمین است و تداوم گسترش این کاربری می‌تواند در بلندمدت با کاهش پوشش گیاهی و ظرفیت ذخیره کربن همراه باشد.

• ارزش فعلی خالص ترسیب کربن طی دوره مطالعه معادل ۱۷.۹ میلیون دلار (حدود ۲,۳۲۷ میلیارد تومان) برآورد شد که بیانگر اهمیت اقتصادی بالای خدمات تنظیمی اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک است

براساس یافته‌های این پژوهش، حفاظت از ظرفیت ترسیب کربن منطقه نیازمند مدیریت هم‌زمان تغییرات کاربری اراضی و ساختار فضایی سیمای سرزمین است. جلوگیری از تبدیل باغات و مراتع به اراضی بایر یا انسان‌ساخت و

توسعه کشاورزی پایدار با هدف افزایش بهره‌وری بدون گسترش سطح زیرکشت، از مهم‌ترین اقدامات مدیریتی محسوب می‌شود. همچنین، با توجه به افزایش تکه‌تکه‌شدگی، ایجاد و حفظ کریدورهای اکولوژیک برای اتصال لکه‌های طبیعی و پوشش‌دار با کیفیت بالا می‌تواند به حفظ پیوستگی فضایی و کاهش اثرات منفی انزوای لکه‌ها کمک کند. در مناطق شهری نیز جلوگیری از گسترش خطی و پراکنده و هدایت توسعه به سمت الگوی رشد فشرده و هوشمند می‌تواند از تبدیل و انزوای بیشتر لکه‌های طبیعی و کشاورزی جلوگیری کند. مناطق حفاظت‌شده بیدوئیه، بهرام‌گور، خبر و روچون نیز به‌عنوان کانون‌های مهم حفظ پوشش گیاهی و ذخیره کربن، نیازمند توجه و حمایت حفاظتی بیشتری هستند.

درنهایت، با توجه به تغییرات اقلیمی آینده و افزایش فشار بر منابع آب، پایش مستمر ذخایر کربن و ارزیابی سناریوهای آینده‌نگر تغییرات LULC و اقلیم ضروری است. شبیه‌سازی سناریوهای مختلف توسعه و حفاظت تا افق ۲۰۵۰ می‌تواند مسیرهای محتمل آینده را مشخص کند و امکان اتخاذ اقدامات پیشگیرانه را فراهم سازد. همچنین، انجام مطالعات میدانی و نمونه‌برداری از خاک و زیست‌توده در نقاط کلیدی منطقه برای اعتبارسنجی و کالیبراسیون ضرایب کربن و افزایش دقت برآوردهای مدل InVEST توصیه می‌شود. در مجموع، رویکرد تلفیقی این پژوهش می‌تواند چارچوبی کاربردی برای ارزیابی و مدیریت خدمت ترسیب کربن در سایر اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک ایران فراهم کند و نشان دهد که حفظ این خدمت، مستلزم ایجاد توازن میان توسعه اقتصادی، حفاظت از منابع طبیعی و مدیریت پایدار سرزمین است.

منابع

- پرور، زهرا، محمدزاده، مرجان، وسعیدی، سپیده (۱۴۰۲). ارزیابی کمی پویایی مکانی - زمانی کاربری/پوشش زمین و دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم‌های مختلف و داده‌های لندست. *محیط‌زیست طبیعی*، ۱۶(۲)، ۲۲۹-۲۴۳.
https://jne.ut.ac.ir/article_90705_en.html?lang=fa
- جعفرزاده، علی‌اکبر، مهدوی، علی، فالح شمسی، سید رشید، و یوسف‌پور، رسول (۱۳۹۹). ارزش‌گذاری اقتصادی برخی از مهم‌ترین خدمات اکوسیستمی جنگل‌های زاگرس. *فصلنامه علوم محیطی*، ۱۸(۱)، ۱۳۷-۱۵۰.
<https://doi.org/10.29252/envs.18.1.137>
- عسکری ملک‌آباد، فاطمه، مروتی، مریم، سلطانی گردفرامری، سمیه، کرمی، پیمان، و پرور، زهرا (۱۴۰۴). آشکارسازی تأثیرات محیط‌زیستی سد جیرفت با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۶(۴)، ۱۲۵-۱۵۰.
<https://doi.org/10.22108/gep.2026.146738.1747>
- فدایی، انسیه، میرسنجری، میرمهرداد، 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). *آمایش سرزمین*، ۱۲(۱)، ۱۵۳-۱۷۳.
<https://doi.org/10.22059/jtcp.2020.294342.670051>

فلاح‌زاده، جابر، کریمی، احمد، نادری، مهدی، و شیرانی، حسین (۱۴۰۳). تأثیر نوع پوشش/کاربری زمین بر ذخیره کربن آلی خاک در منطقه ابرکوه، استان یزد. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵(۵)، ۷۴۹-۷۶۵.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.369784.669620>

نصری، مائده، قربانی، مهدی، جعفری، محمد، آذرینوند، حسین، و رفیعی، حامد (۱۳۹۵). برآورد ارزش اقتصادی کارکرد ترسیب کربن در مراتع خشک و نیمه‌خشک (منطقه مورد مطالعه: شهرستان ملارد). *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۲۳(۲)، ۳۹۶-۴۰۳.

<https://doi.org/10.22092/ijrdr.2016.107040>

محقق، میر سعید، مبرقی، نغمه، وفایی نژاد، علیرضا، سبحان اردکانی، سهیل، و منوری، سید مسعود (۱۳۹۹). بررسی تغییرات بوم‌سازگان با استفاده از سنجش‌های سیمای سرزمین و ترسیب کربن شهر تهران. *محیط‌شناسی*، ۴۶(۱)، ۱-۲۲.

<https://doi.org/10.22059/jes.2019.282612.1007871>

References

- Adelisardou, F., Zhao, W., Chow, R., Mederly, P., Minkina, T., & Schou, J. S. (2022). Spatiotemporal change detection of carbon storage and sequestration in an arid ecosystem by integrating Google Earth Engine and InVEST (the Jiroft plain, Iran). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(7), 5929 - 5944. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03676-6>
- Askari Malekabad, F., Morovati, M., Soltani - Gerdefaramarz, S. i., Karami, P., & Parvar, Z. (2025). Detecting the Environmental Impacts of Jiroft Dam Using Satellite Imagery. *Geography and Environmental Planning*, 36(4), 125-150. <https://doi.org/10.22108/gep.2026.146738.1747> [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.org/10.1016/j.jclepro.2020.123333>
- Bai, Y., Tang, X., Xue, F., Long, D., Li, J., & Tang, Y. (2025). Spatiotemporal variation and dynamic simulation of carbon stock based on PLUS and InVEST models in the Li River Basin, China. *Scientific Reports*, 15(1), 6060. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86226-1>
- Drexler, S., Gensior, A., & Don, A. (2021). Carbon sequestration in hedgerow biomass and soil in the temperate climate zone. *Regional Environmental Change*, 21(3), 74. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01798-8>
- 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]
- Fallahzade, J., Karimi, A., Naderi, M., & Shirani, H. (2024). Effects of land use/land cover changes on soil organic carbon stocks in Abarkooh region (Yazd province). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(5), 749 - 765. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.369784.669620> [In Persian]
- Imran, M., & Din, N. U. (2021). Geospatially mapping carbon stock for mountainous forest classes using InVEST model and Sentinel - 2 data: a case of Bagrote valley in the Karakoram range. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(9), 756. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07023-4>
- Change, I. P. O. C. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Institute for global environmental strategies: Hayama, Kanagawa, Japan. <https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- Jafarzadeh, A. A., Mahdavi, A., Fallah Shamsi, S. R., & Yousefpour, R. (2020). Economic evaluation of some of the most important ecosystem services in Zagros forests. *Environmental Sciences*, 18(1), 137 - 150. <https://doi.org/10.29252/envs.18.1.137> [In Persian]

- Jiang, H., Cui, Z., Fan, T., & Yin, H. (2025). Impacts of land use change on carbon storage in the Guangxi Beibu Gulf Economic Zone based on the PLUS - InVEST model. *Scientific Reports*, 15(1), 6468. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89407-0>
- Kumara, K., Pal, S., Chand, P., & Kandpal, A. (2023). Carbon sequestration potential of agroforestry systems in Indian agricultural landscape: a meta - analysis. *Ecosystem Services*, 62, 101537. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2023.101537>
- McGarigal, K. (2015). FRAGSTATS help. *University of Massachusetts: Amherst, MA, USA*, 182. <https://www.fragstats.org/index.php/tutorial>
- Millennium Ecosystem Assessment (M. E. A.) (2005). *Ecosystems and human well - being* (Vol. 5, p. 563). Island press.
- Mirghaed, F. A., & Souri, B. (2023). Contribution of land use, soil properties and topographic features for providing of ecosystem services. *Ecological Engineering*, 189, 106898. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106898>
- Mohaqeq, M. S., Mobarghei Dinan, N., Vafaeinejad, A., Sobhan Ardakani, S., & Monavvari, S. M. (2020). Assessing the changes in Tehran'Ecosystems using the landscape metrics and carbon sequestration rates. *Journal of Environmental Studies*, 46(1), 1-22. <https://doi.org/10.22059/jes.2019.282612.1007871> [In Persian]
- Nasri, M., Ghorbani, M., Azarnivand, H., & Rafiee, H. (2016). Economic valuation of stocked carbon function in arid and semi - arid rangelands (case study: Malard District). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 23(2), 403 - 396. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2016.107040> [In Persian]
- Nabikandi, B. V., Shahbazi, F., Hami, A., & Malone, B. (2024). Exploring carbon storage and sequestration as affected by land use/land cover changes toward achieving sustainable development goals. *Soil Advances*, 2, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.soilad.2024.100017>
- Omwoyo, A. M., Onwonga, R. N., Wasonga, O. V., & Mwangi, K. J. (2025). Sequestration potential of soil organic carbon under selected land use, land cover and climate change scenarios in Kibwezi West dryland, Eastern Kenya. *Discover Soil*, 2(1), 74. <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00101-z>
- Parvar, Z., Mohammadzadeh, M., & Saeidi, S. (2023). Quantitative assessment of spatio - temporal dynamics of land use/land cover and land surface temperature using different algorithms and landsat imagery. *Journal of Natural Environment*, 76(2), 229-243. https://jne.ut.ac.ir/article_90705_en.html?lang=fa [In Persian]
- Parvar, Z., Mohammadzadeh, M., & Saeidi, S. (2024a). Enhancing decision - making for climate change mitigation and sustainable urban growth. *Urban Climate*, 58, 102223. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102223>
- Parvar, Z., Saeidi, S., & Mirkarimi, S. (2024b). Integrating meteorological and geospatial data for forest fire risk assessment. *Journal of environmental management*, 358, 120925. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120925>
- Peng, M., Yang, Y., Deng, Y., Jize, D., Chen, H., Hai, Y., ... & Luo, J. (2025). The impact of the Grain - for - Green Programme on carbon storage in the Upper Yangtze River Basin based on the PLUS - InVEST model. *Carbon Balance and Management*, 20(1), 24. <https://doi.org/10.1186/s13021-025-00315-2>
- Rahim - Abadi, A. H. N., Mohammadi - Nejad, A., Amir - Nejad, H., & Moghadasi, R. (2025). Evaluation of carbon sequestration service in the forest ecosystem (Case study: Hyrcanian Forests, North Iran). *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 1-16. <https://doi.org/10.22124/cjes.2025.9175>
- Raheb, A., Asgari Lajayer, B., & Senapathi, V. (2023). The effect of short - term plants cultivation on soil organic/inorganic carbon storage in newly formed soils. *Scientific Reports*, 13(1), 18500. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45679-y>
- Sharp, R., Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S. A., Chaplin - Kramer, R., ... & Douglass, J. (2014). *InVEST user's guide. The natural capital project*. The Natural Capital. <https://community.naturalcapitalalliance.org/t/invest-3-9-0-users-guide/1992>

- Turner, M. G., & Gardner, R. H. (2001). *Landscape ecology in theory and practice*. Pattern and process. <https://doi.org/10.1007/b97434>
- Weitzman, J. (2019). Applying the ecosystem services concept to aquaculture: A review of approaches, definitions, and uses. *Ecosystem Services*, 35, 194 - 206. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.12.009>
- Yang, Y., Duan, H., Wan, H., Lü, Y., Zhang, Y., & Sun, X. (2025). Analysis of 20 years of monitoring data reveals insufficient carbon sequestration potential of planted forests in dryland regions. *Scientific Reports*, 15(1), 26973. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11740-1>
- Zafar, Z., Zubair, M., Zha, Y., Mehmood, M. S., Rehman, A., Fahd, S., & Nadeem, A. A. (2024). Predictive modeling of regional carbon storage dynamics in response to land use/land cover changes: An InVEST - based analysis. *Ecological Informatics*, 82, 102701. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102701>
- Zhang, F., Xu, N., Wang, C., Wu, F., & Chu, X. (2020). Effects of land use and land cover change on carbon sequestration and adaptive management in Shanghai, China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 120, 102948. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102948>
- Zhao, M., He, Z., Du, J., Chen, L., Lin, P., & Fang, S. (2019). Assessing the effects of ecological engineering on carbon storage by linking the CA - Markov and InVEST models. *Ecological indicators*, 98, 29 - 38. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.052>
- Zheng, K., Shi, M., Wu, H., Gu, H., Jiang, P., He, P., ... & Wei, R. (2023). Estimation and simulation of carbon sequestration in typical dryland areas of China under future climate change scenarios. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1250586. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1250586>