The University of Tehran Press

# Town & Country Planning

Home Page: https://jtcp@ut.ac.ir

Online ISSN: 2423-6268

# Evaluation the effects of land use changes on ecosystem services based on the InVEST model (Case study: Chaharmahal and Bakhtiari province)

**Fatemeh Mohammadyari**

Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, P.O. Box 115, Shahrekord, Iran. Email: mohammadyari.f@sku.ac.ir

## ARTICLE INFO

**Article type:**
Research Article

**Article History:**
Received September 26, 2023
Revised November 07, 2023
Accepted November 07, 2023
Published online 09 December 2023

**Keywords:**
*Ecosystem Services,*
*Land Use/Cover,*
*Climate Changes,*
*Land Management.*

## ABSTRACT

The most obvious example of human activities on the land due to the increase in population and the need for development is land use changes, which lead to changes in the provision of ecosystem services. To that end, the present study was done with the aim of quantitatively evaluating the carbon storage capacity and habitat quality and showing their spatial distribution to achieve social-ecological stability, sustainable use of land resources, and develop appropriate plans and policies in Chaharmahal and Bakhtiari province. The modeling of selected ecosystem services was calculated using InVEST software models and the capacity to provide them in land use classes using Zonal Statistics analysis in a GIS software environment. The results indicated that high-value carbon storage areas are focused in areas with forest cover, which have strong carbon storage capacity and are the largest carbon sinks in ecosystems. Likewise, the highest habitat quality was also observed in these areas, and in places where the vegetation is fragmented and the surrounding environment is occupied by human threat sources, the quality of the habitat has decreased. Spatially, carbon storage and habitat quality Indicated a low-high-medium spatial distribution pattern from north to south. The maps of ecosystem service created in this study can be useful in identifying potential areas of carbon storage supply and habitat quality, and provide a scientific basis for further discussion by policymakers about future land use planning, from the perspective of minimizing climate change and increasing biodiversity.

**Cite this article:** 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. DOI: 10.22059/jtcp.2023.365685.670408

© Fatemeh Mohammadyari. **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/jtcp.2023.365685.670408

انتشارات دانشگاه تهران

**آمایش سرزمین**

**سایت نشریه:** https://jtcp@ut.ac.ir/

شاپا الکترونیکی: ۶۲۶۸-۲۴۲۳

# ارزیابی آثار تغییرات کاربری اراضی بر خدمات اکوسیستم بر اساس مدل InVEST (مطالعهٔ موردی: استان چهارمحال و بختیاری)

**فاطمه محمدیاری**

گروه مهندسی محیطزیست، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: mohammadyari.f@sku.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:**
پژوهشی

**تاریخ‌های مقاله:**
**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۲/۰۷/۰۴
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۲/۰۸/۱۶
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۲/۰۸/۱۶
**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۲/۰۹/۱۸

**کلیدواژه:**
*خدمات اکوسیستم،*
*تغییر اقلیم،*
*کاربری اراضی،*
*مدیریت زمین.*

**چکیده**

بارزترین نمونهٔ فعالیت‌های انسان در سرزمین، به دلیل افزایش جمعیت و نیاز به توسعه، تغییرات کاربری اراضی است که منجر به تغییر در تدارک خدمات اکوسیستم می‌شود. بدین منظور، مطالعهٔ حاضر با هدف ارزیابی کمّی ظرفیت ذخیرهٔ کربن و کیفیت زیستگاه و نمایش توزیع فضایی آن‌ها برای دستیابی به پایداری اجتماعی‌ـ اکولوژیکی، استفادهٔ پایدار از منابع زمین، و تدوین برنامه‌ها و سیاست‌های مناسب در برنامه‌های آمایشی استان چهارمحال و بختیاری انجام شد. مدل‌سازی خدمات اکوسیستمی منتخب با استفاده از مدل‌های نرم‌افزار InVEST و ظرفیت ارائهٔ آن‌ها در طبقات کاربری اراضی با استفاده از آنالیز Zonal Statistics در محیط نرم‌افزار GIS محاسبه شد. نتایج نشان داد مناطق ذخیره‌سازی کربن با ارزش بسیار زیاد در مناطق با پوشش جنگلی 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، ذخیرهٔ کربن و کیفیت زیستگاه الگوی توزیع فضایی کم‌ـ بالاـ متوسط از شمال به جنوب را نشان دادند. نقشه‌های خدمات اکوسیستمی ایجادشده در این مطالعه می‌تواند در شناسایی مناطق بالقوهٔ عرضهٔ ذخیره‌سازی کربن و کیفیت زیستگاه مفید باشد و مبنای علمی را برای بحث بیشتر توسط سیاست‌گذاران دربارهٔ برنامه‌ریزی کاربری زمین در آینده از منظر به حداقل رساندن تغییرات اقلیمی و افزایش تنوع‌زیستی فراهم کند.

**استناد:** محمدیاری، فاطمه (۱۴۰۲). ارزیابی آثار تغییرات کاربری اراضی بر خدمات اکوسیستم بر اساس مدل InVEST (مطالعهٔ موردی: استان چهارمحال و بختیاری). *آمایش سرزمین*. *آمایش سرزمین*، ۱۵ (۲) ۳۲۷-۳۴۲.

DOI: http//doi.org/10.22059/jtcp.2023.365685.670408

© فاطمه محمدیاری

**ناشر:** مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: http//doi.org/10.22059/jtcp.2023.365685.670408

## مقدمه/ بیان مسئله

در سال‌های اخیر، مشکلات اکولوژیکی و محیط زیست جهانی به طور فزاینده برجسته شده است که توسعهٔ پایدار جامعهٔ انسانی را به طور جدّی تهدید می‌کند (Wei et al., 2022). تغییرات در کاربری و پوشش زمین[1] محرک‌های مهم تغییرات اکولوژیکی جهانی، مانند تغییرات اقلیمی و تغییر در ذخیره‌سازی کربن[2] (Liang et al., 2021; Abegaz et al., 2022; Xu et al., 2023) و کاهش تنوع زیستی (Janus & Bozek, 2019; Zhang et al., 2020; Mengist et al., 2021; Ren et al., 2022)، هستند که به طور قابل توجهی بر یکپارچگی و تنوع عملکردهای اکوسیستم (Chen et al., 2022) و جریان انرژی و گردش مواد (Sallustio et al., 2017) تأثیر می‌گذارد و تهدیدی برای اکوسیستم‌ها و محیط زیست (Hoekstra et al., 2018; Zhang et al., 2022) و زیستگاه‌ها است. در این زمینه، رابطهٔ بین تغییرات کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی و آثار آن بر اکوسیستم‌ها به موضوعات مورد علاقه محققان تبدیل شده است. تغییرات اقلیم ممکن است منجر به کاهش، جابه‌جایی، و تکه‌تکه شدن زیستگاه‌های حیات وحش شود (Wei et al., 2023). همچنین ممکن است به ذوب یخچال‌ها، رواناب سطحی بیشتر، تغییر در پوشش گیاهی غالب، و افزایش تغییرات در شرایط اکولوژیکی زیستگاه‌های حیات وحش بینجامد (Rutten et al., 2019). بنابراین تغییرات کاربری اراضی یکی از پارامترهای اصلی تغییرات در دو خدمت اکوسیستمی مهم ذخیرهٔ کربن و تنوع زیستی است. مفهوم خدمات اکوسیستم[3] به منزلهٔ کمک اکوسیستم‌ها به رفاه انسان رایج شد (Cordero-Penín et al., 2023) که در چهار دسته خدمات تولیدی[4]، تنظیمی[5]، فرهنگی[6]، حمایتی[7] قرار دارند (Finisdore et al., 2020). ارزیابی ارزش این خدمات به درک عمیق‌تر مکانیسم‌های داخلی اکوسیستم‌های طبیعی و درک واضح‌تر از اهمیت خدمات مختلف ارائه‌شده توسط اکوسیستم‌ها به انسان منجر می‌شود و نتایج تحقیقات آن پایه‌ای علمی برای انسان‌ها فراهم می‌کند تا روابط انسان و زمین را بهتر هماهنگ کنند و با اتخاذ تصمیمات مدیریتیِ مناسب پایداریِ توسعهٔ اجتماعی انسان را تضمین کنند (Cheng et al., 2022). ذخیرهٔ کربن پرکاربردترین و در دسترس‌ترین رویکرد و شناخته‌شده‌ترین و مهم‌ترین خدمت تنظیمی اکوسیستم است که با تنظیم اقلیم در مقیاس‌های خرد محلی تا کلان جهانی به کاهش و تعدیل تغییرات اقلیمی منجر می‌شود (Solomon et al., 2018). ذخیرهٔ کربن مقدار تجمعی کربن ذخیره‌شده در یک اکوسیستم است (He et al., 2016) و به فرایندهای اکوسیستم‌ها که شرایط آب‌وهوایی را با افزایش یا کاهش گازهای گلخانه‌ای، مانند $CO_2$، تنظیم می‌کنند اطلاق می‌شود (Sun et al., 2022). کیفیت زیستگاه[8] نیز از دستهٔ خدمات حمایتی به توانایی یک اکوسیستم برای تأمین و حمایت از کالاها و خدمات ضروری برای گونه‌ها و افراد و گروه‌ها با هدف بقا و تولید مثل اشاره دارد که به مثابهٔ نماینده‌ای برای تنوع زیستی و امنیت اکولوژیکی می‌تواند به طور دقیق سطوح خدمات اکوسیستمی و تنوع زیستی منطقه‌ای و امنیت محیط زیستی را منعکس کند (Bai et al., 2019; Yang et al., 2021; Nie et al., 2023).

بسیاری از زیستگاه‌های استان چهارمحال و بختیاری در چند سال اخیر گسترش شهری و افزایش ساخت‌وساز و تغییر کاربری اراضی را تجربه کرده‌اند. این تغییرات کاهش تنوع زیستی و کاهش ظرفیت پشتیبانی اکولوژیکی (Hu et al., 2022) و در نتیجه کاهش قابل توجه ذخیرهٔ کربن (Liang et al., 2021) و کیفیت زیستگاه (Tang et al., 2023) را به دنبال خواهد داشت. بنابراین، با توجه به اهمیت موضوع افزایش تغییرات اقلیمی و کاهش تنوع زیستی، ارزیابی دو خدمت اکوسیستمی مهم ذخیرهٔ کربن و کیفیت زیستگاه به منظور مدیریت بهتر اکوسیستم و توجه به آن‌ها در برنامه‌های آمایشی استان در پژوهش حاضر مورد توجه قرار گرفته است. از طرف دیگر با توجه به اهمیت این خدمات اکوسیستمی در ارزیابی‌های محیط زیستی به دلیل فقدان مدل‌های مناسب امکان برآوردهای دقیق در مقیاس‌های وسیع فیزیکی موجود نیست. بنابراین بیشتر مطالعات در زمینهٔ کربن و

1. Land use and land cover
2. Carbon storage
3. Ecosystem services
4. Provisioning
5. Regulating
6. Cultural
7. Supporting
8. Habitat quality

کیفیت زیستگاه با استفاده از برآوردهای آزمایشگاهی و میدانی انجام شده است. با توجه به اینکه توزیع فضایی- زمانی کارکردهای اکولوژیکی بستگی به شرایط توزیع و کیفیت دارایی‌های طبیعی در پهنهٔ سرزمین دارد، نتایج ارزیابی‌های توصیفی با تکیه بر برآوردهای کلی و بدون توجه به توزیع فضایی آن‌ها، در نهایت، به روشی نه چندان صحیح به کل محدودهٔ مورد مطالعه تعمیم داده می‌شود و امکان طبقه‌بندی نواحی مختلف که واجد طیف متفاوتی از موجودی‌ها و در نتیجه ظرفیت‌های متفاوت از نظر کارکردهای اکولوژیک هستند فراهم نمی‌شود. بنابراین نمی‌توان به سادگی و با تکیه بر اطلاعات دقیق نواحی ارزشمندتر را از نواحی کم‌ارزش‌تر تفکیک کرد و به تصمیم درست در ارائهٔ مجوزهای توسعه‌ای نائل شد. در این زمینه با توجه به اینکه فرایند تصمیم‌گیری آگاهانهٔ توسعهٔ سرزمین با برنامه‌ریزی کاربری زمین و ارزیابی‌های آثار توسعه به صورت تجمعی در ارتباط است، نیازمند کمّی‌سازی و نقشه‌سازی و مدل‌سازی قدرتمند موجودی‌ها و جریان‌های اکوسیستمی است. بدین منظور، در مطالعهٔ حاضر با استفاده از روش‌ها و مدل‌های استاندارد به منزلهٔ یک رویکرد جدید امکان محاسبهٔ کارکرد ذخیره‌سازی کربن و کیفیت زیستگاه فراهم شده و بخش عمده‌ای از مشکل فوق برطرف شده است.

در این رابطه، پژوهش حاضر به دنبال پاسخ‌گویی به سؤالات زیر است.

- چگونه می‌توان ظرفیت ذخیرهٔ کربن و کیفیت زیستگاه را با استفاده از داده‌ها و ابزارهای گوناگون نقشه‌سازی کرد و تغییرات در عرضهٔ آن‌ها را در فضا بررسی کرد؟
- آثار طبقات مختلف کاربری زمین بر توان ذخیره‌سازی کربن و کیفیت زیستگاه چگونه است؟

بر این اساس، مطالعهٔ حاضر با هدف ارزیابی کمّی ظرفیت ذخیرهٔ کربن و کیفیت زیستگاه و نمایش توزیع فضایی آن‌ها با استفاده از مدل‌های نرم‌افزار InVEST، برای دستیابی به پایداری اجتماعی- اکولوژیکی، استفادهٔ پایدار از منابع زمین، و تدوین برنامه‌ها و سیاست‌های معقول برای حفاظت از زیستگاه‌ها و کاهش تنوع زیستی و ذخیرهٔ کربن در استان چهارمحال و بختیاری انجام شد.

## پیشینهٔ تجربی پژوهش

از مطالعات داخلی استفاده‌شده با ماژول‌های نرم‌افزار InVEST می‌توان به تحلیل روند تغییر خدمت ترسیب کربن شهر تهران (ناروئی و همکاران، ۱۴۰۱)، کمّی‌سازی کیفیت زیستگاه در حوضهٔ آبخیز سد ایلام (Tavakoli & Mohammadyari, 2023)، اثر بهینه‌سازی نقشهٔ کاربری اراضی بر کیفیت زیستگاه در حوضهٔ آبخیز شهر ایلام (Mohammadyari et al., 2023)، مدل‌سازی ترسیب کربن مبتنی بر تغییرات پوشش اراضی در منطقهٔ حفاظت‌شدهٔ جهان‌نما (فدایی و همکاران، ۱۳۹۹)، اثر تغییر کاربری زمین بر ذخیره‌سازی و ترسیب کربن در سرزمین جنگلی هیرکانی (بادام‌فیروز و همکاران، ۱۳۹۸)، بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر عرضهٔ ذخیره و ترسیب کربن در حوضهٔ آبخیز گرگان‌رود (اسداللهی و ماهینی، ۱۳۹۵)، و مدل‌سازی ترسیب کربن و کیفیت زیستگاه در منطقهٔ حفاظت‌شدهٔ سرولات و جواهردشت (Zarandian et al., 2017) اشاره کرد. همچنین، گسترش شهری و تغییرات فضایی- زمانی خدمات اکوسیستمی ذخیرهٔ کربن و کیفیت زیستگاه در منطقهٔ آتلانتا متروپولیتن، ایالات متحدهٔ امریکا (Sun et al., 2018)، تغییرات خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن در غرب چین (Gong et al., 2019)، آثار تغییر کاربری و گسترش شهری بر ذخیرهٔ کربن در نانینگ چین (Nie et al., 2020)، تغییرات مکانی- زمانی ذخیرهٔ کربن و کیفیت زیستگاه در چین (Ma et al., 2021)، کمّی‌سازی کیفیت زیستگاه در شهر ویتوریا- گاستیز، کشور باسک در اروپا (Aznarez et al., 2022)، آثار تغییر کاربری زمین بر ذخیره‌سازی کربن در حوضهٔ رودخانهٔ زرد چین (Xu et al., 2023)، و ارزیابی آثار تغییر کاربری بر کیفیت زیستگاه در حوضهٔ شهرنشینی رودخانهٔ لهاسا در فلات تبت (Nie et al., 2023) از نمونه مطالعات خارجی در این زمینه هستند.

بر اساس مرور منابع مشاهده شد که در مطالعات داخلی ارزیابی ذخیرهٔ کربن و کیفیت زیستگاه در اکوسیستم‌های طبیعی مورد توجه قرار گرفته است و خلأ مطالعاتی ارزیابی این دو خدمت در اکوسیستم‌های شهری وجود دارد که در مطالعهٔ حاضر به آن

پرداخته شده است. از طرف دیگر، افزایش ارزیابی‌ها و نقشه‌سازی خدمات اکوسیستم در مقیاس‌های جغرافیایی کوچک در سطح استانی و منطقه‌ای یک نیاز و اولویت است که در این مطالعه در دستور کار قرار گرفته است.

## پیشینهٔ نظری پژوهش

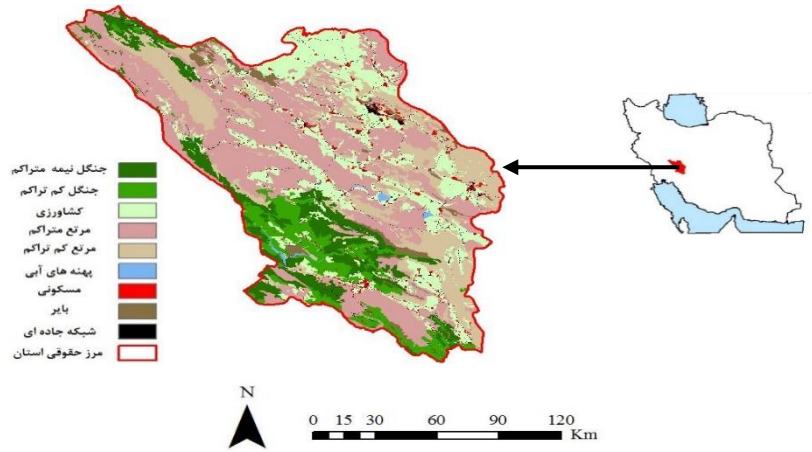
بارزترین نمونهٔ فعالیت‌های انسان در سرزمین به دلیل افزایش جمعیت و نیاز به توسعه تغییرات کاربری اراضی است که منجر به تغییر در توزیع فضایی خدمات اکوسیستم می‌شود. در حال حاضر، تحقیقات در مورد آثار اکولوژیکی تغییرات کاربری اراضی بر خدمات اکوسیستم را می‌توان به روش‌های مختلف طبقه‌بندی کرد. ارزیابی کیفیت اکولوژیکی بر اساس بررسی‌های میدانی، استفاده از سیستم‌های ارزیابی کیفیت محیط، مانند شاخص کیفیت محیط زیست (Fan et al., 2021)، شاخص اکولوژیکی سنجش از دور[1] (Zhou et al., 2021)، و تجزیه‌وتحلیل کمّی بر اساس مدل‌های ارزیابی محیط زیستی مانند مدل هوش مصنوعی برای خدمات اکوسیستمی[2] (Rimal et al., 2019; Dade et al., 2019)، مدل ارزش‌های اجتماعی برای خدمات اکوسیستمی[3] (Huang et al., 2023)، مدل حداقل مقاومت تجمعی[4] (Wei et al., 2022)، و مدل ارزش‌گذاری یکپارچهٔ خدمات اکوسیستم و مبادلات (InVEST)[5] (Bai et al., 2019; Chen et al., 2020) از جملهٔ این روش‌ها هستند. با توجه به اینکه بررسی‌های میدانی محدودیت‌های زیادی دارند و نظارت بر آن‌ها در طول زمان دشوار است (Tang et al., 2023)، بسیاری از محققان به دلیل مقرون به صرفه بودن (Müller et al., 2018) بر اهمیت روش‌های ارزیابی مبتنی بر مدل تأکید کرده‌اند (Yan et al., 2018). در میان این مدل‌ها، مدل InVEST دسترسی سریع به داده‌ها، قابلیت‌های تحلیلی مهم با پارامترهای کمتر، عملکرد آسان، و توانایی بالا در پردازش داده را فراهم می‌کند (Yang et al., 2021). علاوه بر این، می‌توان آن را به‌راحتی با یک زمینهٔ خاص و داده‌های در دسترس به صورت محلی یا جهانی تطبیق داد (Gao et al., 2017). بنابراین استفاده از ماژول‌ها و مدل‌های نرم‌افزار InVEST برای ارزیابی و کمّی‌سازی خدمات اکوسیستم بین محققان در سراسر جهان بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در این بین مدل کیفیت زیستگاه و ذخیرهٔ کربن InVEST به طور گسترده برای ارزیابی آثار تغییرات کاربری اراضی و سیاست‌های حفاظتی بر زیستگاه‌های زمینی برای حفظ تنوع زیستی (Yang et al., 2021) و ذخیرهٔ کربن (Hoque et al., 2021) استفاده شده و ثابت شده است که برای مدیریت محیط زیستی و برنامه‌ریزی کاربری زمین مفید است (Kunwar et al., 2020).

## محدودهٔ مورد مطالعه

استان چهارمحال و بختیاری در گسترهٔ زاگرس مرکزی در غرب ایران (عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۱۰ دقیقه- ۳۲ درجه و ۴۷ دقیقهٔ شمالی، طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۴۴ دقیقه- ۵۱ درجه و ۲۰ دقیقهٔ شرقی) با مساحت ۱۶۴۳۲ کیلومتر مربع واقع شده است. اقلیم استان مدیترانه‌ای با زمستان‌های مرطوب و سرد و تابستان‌های معتدل با دامنهٔ بارش سالیانهٔ ۵۴۲ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر و میانگین دمای ماهیانه بین ۸/۵ تا ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد است. این استان با دامنهٔ ارتفاعی بین ۷۸۵ تا ۴۱۵۹ متر از سطح دریا از نظر توپوگرافی سرزمینی تپه‌ماهوری با دشت‌های میان‌کوهی است که توسط ارتفاعات از یک‌دیگر جدا شده‌اند. بر این اساس ۵۵ درصد (۹۰۸۷/۱ کیلومتر مربع) از مساحت استان را مراتع، ۲۱ درصد (۳۳۸۳/۷ کیلومتر مربع) را اراضی کشاورزی و باغی، ۱۸ درصد را مناطق جنگلی (۳۰۲۱/۷)، ۲ درصد را مناطق مسکونی (۲۶۱/۲ کیلومتر مربع)، ۲ درصد را اراضی بایر (۳۶۲/۱ کیلومتر مربع)، ۱ درصد را شبکهٔ جاده‌ای (۲۳۶/۱ کیلومتر مربع)، و کمتر از ۱ درصد را پهنه‌های آبی و تالاب‌ها (۸۰/۱ کیلومتر مربع) تشکیل می‌دهد (شکل ۱). با توجه به اینکه دارایی‌های طبیعی (جنگل‌ها، مراتع، تالاب‌ها) پوشش غالب استان را تشکیل می‌دهند، سهم بیشتری از کربن را نسبت به آنچه در اتمسفر وجود دارد در خود ذخیره می‌کنند و در نتیجه پتانسیل بالایی در ذخیره و

1. Remote sensing ecological index (RSEI)
2. Artificial Intelligence for Ecosystem Services (ARIES)
3. Social Values for Ecosystem Services (SolVES)
4. Minimal Cumulative Resistance (MCR)
5. Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs

ترسیب کربن دارند. از طرف دیگر، این استان اکوسیستمی منحصربه‌فرد و زیستگاهی مطلوب برای زیست گونه‌های گیاهی و جانوری است و حدود ۱۱/۶ درصد از مساحت آن تحت مدیریت سازمان حفاظت محیط زیست قرار دارد.




**شکل ۱.** موقعیت منطقهٔ مطالعاتی

## روش‌ها و ابزار پژوهش

در مطالعهٔ حاضر برای تهیهٔ نقشهٔ کاربری اراضی به منزلهٔ ورودی دو خدمت اکوسیستمی منتخب (ذخیرهٔ کربن و کیفیت زیستگاه) از تصویر ماهوارهٔ لندست سنجندهٔ OLI (سال ۱۴۰۱) استفاده شد. سپس با اجرای اعمال پیش‌پردازش و تصحیحات هندسی و اتمسفری با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان طبقه‌بندی شد و نقشهٔ کاربری اراضی با ضریب کاپا ۹۰ درصد در ۹ طبقه به دست آمد. مدل‌سازی خدمات اکوسیستمی منتخب با استفاده از مدل‌های نرم‌افزار InVEST انجام شد. با توجه به نبود مطالعات جامع در مقیاس منطقه‌ای از میزان کربن موجود در چهار منبع ذخیرهٔ کربن به تفکیک هر کاربری اراضی، داده‌های ورودی مورد نیاز مدل بر اساس مرور منابع (محقق و همکاران، ۱۳۹۹؛ ناروئی و همکاران، ۱۴۰۱؛ Zarandian et al., 2017؛ Zhu, 2019؛ Sadat et al., 2020؛ Wang et al., 2022) و گزارش‌های IPCC[1] استخراج شد. همچنین امتیاز تناسب زیستگاه و همهٔ پارامترهای تهدید برای مدل‌سازی کیفیت زیستگاه با استفاده از راهنمای مدل کیفیت زیستگاه InVEST (Sharp et al., 2020) و یک نظرسنجی ساختاریافته توسط ۲۰ کارشناس در زمینهٔ حفاظت از تنوع زیستی و مدیریت محیط زیست شهری تعیین شد. سپس ظرفیت تدارک ذخیرهٔ کربن و زیستگاه در طبقات کاربری اراضی با استفاده از آنالیز Zonal Statistics در محیط نرم‌افزار GIS محاسبه شد. در پایان، به منظور ارزیابی رابطهٔ بین نقشهٔ کاربری اراضی و خدمات اکوسیستمی منتخب از روش همبستگی پیرسون در محیط نرم‌افزار $SPSS_{20}$ استفاده شد. جزئیات مدل‌سازی خدمات اکوسیستمی منتخب در ادامهٔ ارائه شده است. همچنین شکل ۲ روند تحقیق را نشان می‌دهد.

### مدل‌سازی ذخیرهٔ کربن (تنظیم اقلیم)

مدل ارزیابی بیوفیزیکی مدل InVEST می‌تواند مستقیماً تغییر کاربری زمین و ذخیره‌سازی کربن زمینی را بر اساس نقشه‌های کاربری زمین و چگالی کربن ترکیب کند. بنابراین، چگالی کربن یک شاخص کلیدی برای تخمین ذخیره‌سازی کربن زمینی است (Ma et al., 2023). با اینکه روش‌های نمونه‌گیری میدانی ابتدایی‌ترین و مؤثرترین روش‌ها برای برآورد کربن هستند، اجرای آن‌ها در مناطق با مقیاس بزرگ دشوار است. زیرا به فرایندهای سخت و طاقت‌فرسایی نیاز دارند (Li et al., 2013). بنابراین، استفاده از رابطهٔ بین پوشش زمین و مخازن کربن در خاک و پوشش گیاهی ساده‌ترین راه برای تخمین کل کربن در سیستم زمین است (Zarandian et al., 2017). بدین منظور برای تولید یک نقشهٔ ذخیرهٔ کربن مرتبط با انواع مختلف پوشش زمین از

1. Intergovernmental panel on climate change

مدل InVEST استفاده شد. این مدل کل ذخایر کربن منطقه‌ای را از طریق چهار استخر کربن، از جمله زیست‌تودهٔ روی زمین[1] (همهٔ مواد گیاهی زندهٔ بالای خاک مانند تنه و شاخه و برگ‌ها)، زیست‌تودهٔ زیرزمینی[2] (سیستم‌های ریشه زنده)، ذخیرهٔ کربن آلی خاک[3] (خاک)، و ذخیرهٔ کربن مواد آلی مرده[4] (آشغال و چوب مرده) محاسبه می‌کند (Zhai et al., 2021; Sharp et al., 2020). در این مدل مقدار خالص کربن ذخیره‌شده در هر محدودهٔ زمین در طول زمان با استفاده از مقدار کربن ذخیره‌شده در این مخازن و نقشه‌های کاربری زمین برآورد می‌شود. برای هر یک از انواع کاربری مدل به برآوردی از مقدار کربن در حداقل یکی از چهار مخزن اصلی ذخیرهٔ آن نیاز دارد. مدل با استفاده از این مقدار تعیین‌شده می‌تواند یک نقشهٔ ذخیرهٔ کربن را که شامل مخازن مربوطه در ارتباط با انواع پوشش کاربری زمین است ایجاد کند (فدایی و همکاران، ۱۳۹۹). انتشار یا حذف دی‌اکسید کربن در انواع کاربری‌های زمین بر پایهٔ تغییرات در موجودی کربن اکوسیستم سنجش می‌شود. تغییرات سالیانهٔ موجودی کربن برای کل محدودهٔ مورد مطالعه از طریق محاسبهٔ مجموع تغییرات در همهٔ انواع طبقات کاربری زمین بر اساس رابطهٔ ۱ به دست می‌آید (Aalde et al., 2006):

$$\Delta C_{AFOLU} = \Delta C_{FL} + \Delta C_{CL} + \Delta C_{GL} + \Delta C_{WL} + \Delta C_{SL} + \Delta C_{OL} \quad (۱)$$

که در آن $\Delta C$ مجموع تغییرات سالیانهٔ موجودی کربن در یک محدوده، AFOLU کشاورزی و جنگل‌داری و سایر کاربری‌ها، FL زمین جنگلی، CL مزرعه، GL مرتع، WL تالاب، SL سکونتگاه‌ها، و OL سایر کاربری‌ها است. برای هر طبقه از کاربری زمین تغییرات در موجودی کربن در لایه‌های مختلف برآورد می‌شود. تغییرات موجودی کربن در هر لایه از طریق در نظر گرفتن فرایندهای چرخهٔ کربن بین چهار مخزن اصلی زیست‌تودهٔ بالازمینی، زیست‌تودهٔ زیرزمینی، مواد آلی مرده، و کربن آلی خاک محاسبه می‌شود. در نهایت بر اساس رابطهٔ ۲ مقدار کلی تغییرات در موجودی کربن در هر لایه از طریق تجمیع تغییرات در همهٔ مخازن مقدار کل کربن در سطح کل سرزمین تعیین می‌شود.

$$\Delta C_{LUI} = \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} + \Delta C_{DW} + \Delta C_{LI} + \Delta C_{SO} \quad (۲)$$

که در آن $\Delta C_{LUI}$ تغییرات موجودی کربن برای یک کاربری، $\Delta C_{AB}$ زیست‌تودهٔ بالازمینی، $\Delta C_{BB}$ زیست‌تودهٔ زیرزمینی، $\Delta C_{DW}$ مواد آلی چوبی مرده، $\Delta C_{LI}$ برگ‌های مرده، و $\Delta C_{SO}$ خاک‌ها است.

## مدل‌سازی کیفیت زیستگاه (تنوع زیستی)

مدل کیفیت زیستگاه InVEST می‌تواند نقشه‌ای از کیفیت زیستگاه را با ترکیب نقشه‌های پوشش زمین و عوامل تهدید برای تنوع زیستی به دست آورد. این مدل تحت تأثیر نوع تهدید و فاصلهٔ بین تهدید و زیستگاه و حساسیت زیستگاه به تهدید است (Duan & Yu, 2022). رویکرد کیفیت زیستگاه را می‌توان برای گونه‌های خاص یا الگوهای کلی تنوع زیستی مرتبط با کیفیت زیستگاه، صرف‌نظر از هر گروه طبقه‌بندی یا عملکردی خاص، استفاده کرد که آن را به یک ابزار سریع مناسب برای مطالعات ارزیابی کلی تنوع زیستی تبدیل می‌کند (Sharp et al., 2020). در این مطالعه، کیفیت زیستگاه به عنوان تابعی از: الف) مناسب بودن هر کاربری برای فراهم کردن زیستگاه برای تنوع زیستی (به عنوان غنای گونه‌های محلی)؛ ب) تهدیدات انسانی که ممکن است کیفیت زیستگاه را مختل کند؛ و پ) حساسیت هر نوع کاربری زمین به هر تهدید برآورد شد. از آنجا که همهٔ زیستگاه‌ها تحت تأثیر تهدیدات مختلف قرار نمی‌گیرند، حساسیت انواع زیستگاه‌ها به تهدیدات مختلف مشخص شد (Aznarez et al., 2022). مقیاس نمرهٔ تناسب زیستگاه نسبی به هر طبقهٔ کاربری از ۰ تا ۱ است؛ که در آن عدد ۱ نشان‌دهندهٔ طبقات کاربری اراضی با بالاترین تناسب برای تنوع زیستی است.

کیفیت زیستگاه ($Q_{xj}$) با استفاده از رابطهٔ ۳ محاسبه می‌شود:

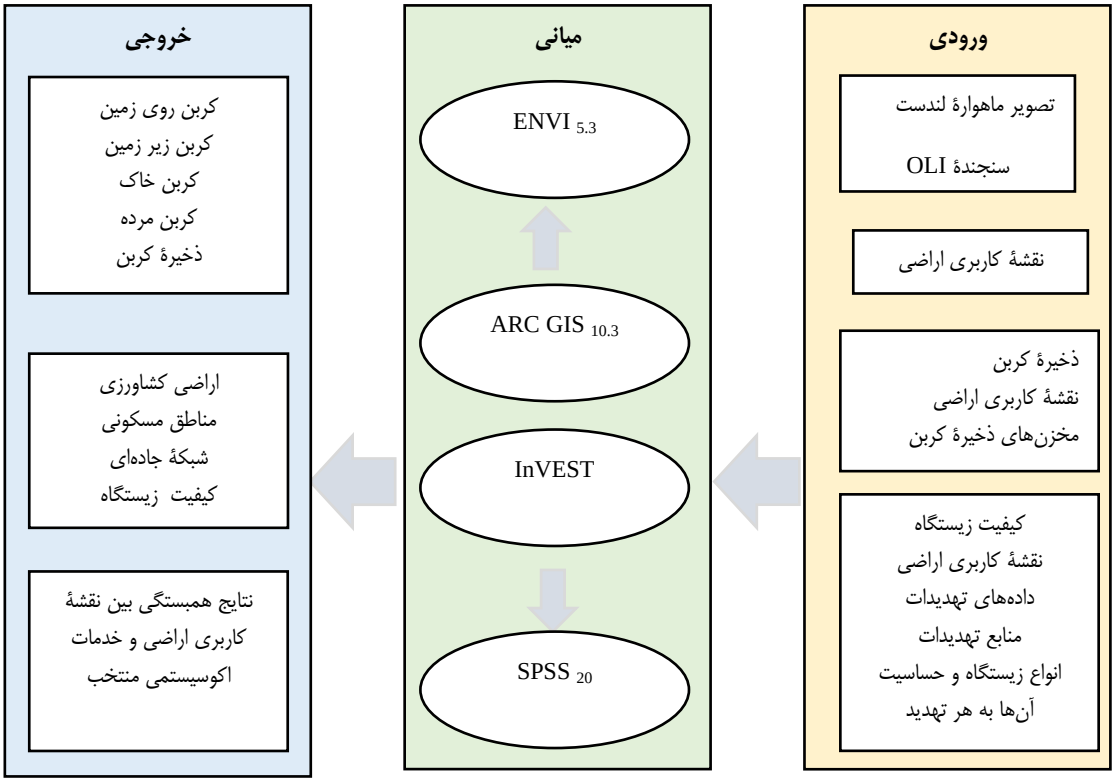
1. Aboveground carbon storage (AGC)
2. Belowground carbon storage (BGC)
3. Soil organic carbon storage (SOC)
4. Dead organic matter carbon storage (DOC)

$$Q_{xj} = H_j\left(1-\frac{D_{Xj}^{Z}}{D_{Xj}^{Z}+K^{2}}\right) \quad (۳)$$

که در آن $H_j$ کیفیت زیستگاه بر اساس نوع پوشش زمین، k ثابت نیمه‌اشباع، z یک پارامتر مقیاسی، و $D_{xj}$ سطح کل تهدید است که بر اساس رابطهٔ ۴ برآورد می‌شود:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^{R}\sum_{y=1}^{Yx}\left(\frac{\omega x}{\sum_{r=1}^{R}\omega r}\right) r_y \; i_{rxy}\,\beta_x\, s_{jx} \quad (۴)$$

که در آن y همهٔ شطرنج‌های موجود در نمودار شطرنجی تهدید r، $Y_r$ مجموعه‌ای از سلول‌های شبکه‌ای در نقشهٔ شطرنجی تهدید r، R نشان‌دهندهٔ تعداد عوامل تهدید، wr نشان‌دهندهٔ شدت تهدید عامل تهدید R، βx نشان‌دهندهٔ سلول شبکهٔ x از سطح حفاظت، Sjr نشان‌دهندهٔ j است که حساسیت نوع پوشش زمین به منبع تهدید R است، و irxy تابع واپاشی فاصلهٔ تهدید و شدت تهدید را نشان می‌دهد (Hu et al., 2022). پارامتر نیمه‌اشباع در دو مرحله تعیین شد. در مرحلهٔ اول با تنظیم پیش‌فرض محاسبه و در مرحلهٔ دوم مقدار آن به نیمی از حداکثر مقدار شطرنجی تخریب زیستگاه تنظیم و سپس دوباره محاسبه شد. همچنین تعریف توابع بر اساس رابطهٔ بین فاصله از منبع تخریب و اثر تهدید آن بر زیستگاه تعریف شد.



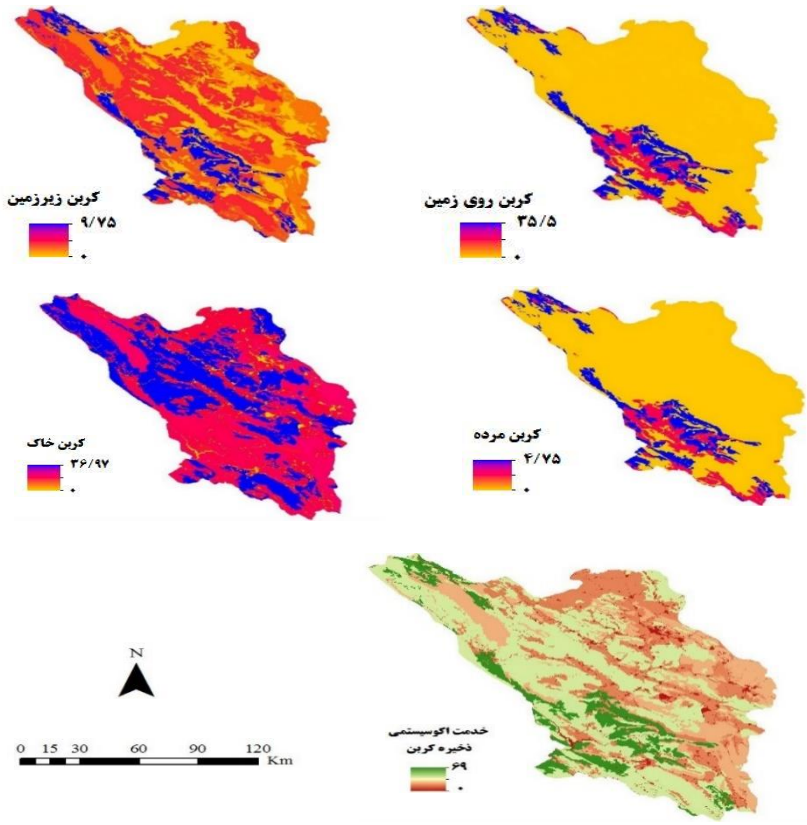

**شکل ۲.** نمودار روند تحقیق

## یافته‌ها و بحث

پس از اجرای مدل کربن InVEST در محدودهٔ مورد مطالعه، لایه‌های مخازن چهارگانهٔ کربن و نقشهٔ نهایی ذخیرهٔ کربن به دست آمد (شکل ۳). حداقل و حداکثر موجودی کربن در پهنهٔ سرزمین در طیف ۰ تا ۶۹ تن در هکتار قرار دارد و میانگین موجودی کربن ۳۳/۵ تن در هکتار است. با توجه به خروجی خدمت اکوسیستمی ذخیرهٔ کربن، در نوار شمال غرب و جنوب غرب استان، که دارای کاربری‌های جنگلی است، بالاترین ذخیرهٔ کربن مشاهده می‌شود. پس از آن مراتع بالاترین سهم در ذخیرهٔ کربن را دارند. سایر کاربری‌ها نیز با ذخیرهٔ کمتر کربن، که اغلب مربوط به سهم کربن آلی خاک است، مشاهده می‌شوند. در واقع در جاهایی مانند جنگل‌ها و مراتع که مخازن جذب کربن شامل هر چهار مخزن زیست‌تودهٔ بالازمینی، زیرزمینی، خاک، و مواد

آلی مرده است توان ذخیرهٔ کربن بیشتر است که به‌خوبی در شکل مشخص است. در سایر پهنه‌ها با محدود شدن مخازن جذب کربن، به دلیل فقدان یا ضعیف بودن پوشش گیاهی، توان ذخیرهٔ کربن نیز کاهش می‌یابد.

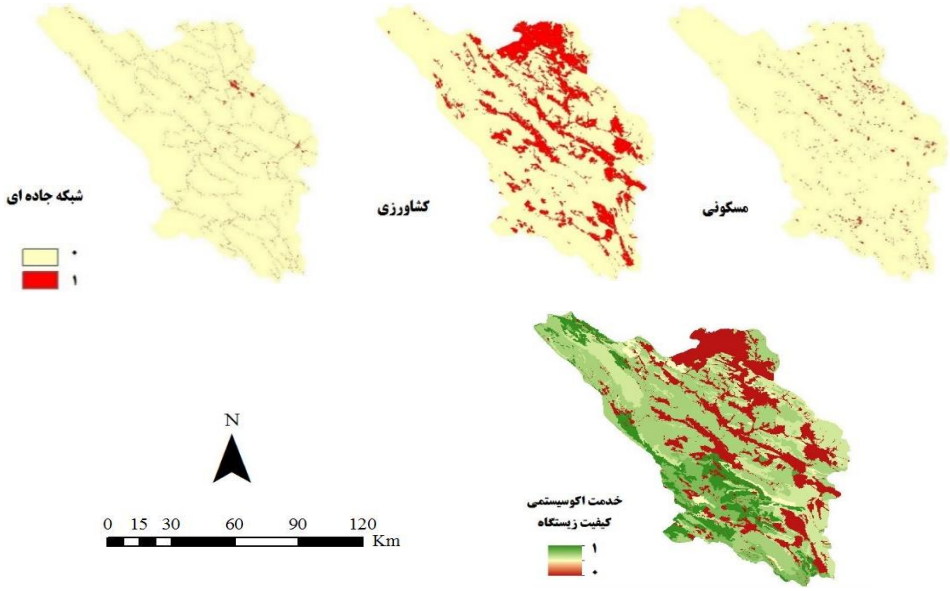
همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، کاربری‌های مرتع و جنگل به ترتیب بیشترین میزان ذخیرهٔ کربن استان، معادل ۵۳ درصد (۱۲۶۰۹۲۴۸۰) و ۳۱ درصد (۶۸۱۵۱۳۸۲)، را به خود اختصاص داده‌اند. کاربری‌های جنگل علی‌رغم اینکه مکان‌های با تجمع بالای ذخیرهٔ کربن هستند (شکل ۳)، به دلیل مساحت بسیار کمتر نسبت به کاربری‌های مرتعی، ذخیرهٔ کربن در آن‌ها کمتر از این کاربری‌ها است. از طرف دیگر کمترین میزان ذخیرهٔ کربن در کاربری‌های مسکونی، پهنه‌های آبی، و شبکهٔ جاده‌ای مشاهده شد (جدول ۱).




**شکل ۳.** لایه‌های خروجی خدمت اکوسیستمی ذخیرهٔ کربن

پس از اجرای مدل کیفیت زیستگاه، نقشهٔ کیفیت زیستگاه تهیه شد (شکل ۴). در این شکل امتیاز بالاتر به مفهوم کیفیت بهتر در سیمای سرزمین است. همچنین مناطق غیر زیستگاهی امتیاز ۰ دارند. بر اساس نتایج جدول ۳ کاربری‌های جنگل و مرتع به ترتیب مکان‌های با عرضهٔ بالای خدمت کیفیت زیستگاه هستند که توزیع مکانی آن‌ها در نقشهٔ کیفیت زیستگاه نیز تأییدکنندهٔ این مطلب است.

به منظور نشان دادن تغییرات کیفیت زیستگاه در استان و با هدف تعیین طبقات و کمیت اراضی تحت پوشش درجات مختلف خدمت اکوسیستمی تنوع زیستی، میانگین ارزش نسبی آن در نرم‌افزار Arc GIS در پنج کلاس کیفی (عالی، خوب، متوسط، ضعیف، بدون کیفیت) طبقه‌بندی شد (جدول ۲). با توجه به خروجی این جدول ۴۱ درصد از منطقه دارای کیفیت عالی و خوب است و ۲۴ درصد از منطقه فاقد مطلوبیت است. بر پایهٔ این نتایج قطعات سرزمینی که باید در برنامه‌ریزی حفاظت و مدیریت سرزمین برای تنوع زیستی مورد توجه تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان قرار گیرند، از نظر کمّی و توزیع فضایی، نشان داده شده است.




**شکل ٤.** لایه‌های تهدید و لایهٔ خروجی خدمت اکوسیستمی کیفیت زیستگاه

**جدول ۱.** میزان عرضهٔ کربن و زیستگاه در طبقات کاربری اراضی

| کلاس‌های کاربری اراضی | مساحت (کیلومتر مربع) | ذخیرهٔ کربن (تن) | عرضهٔ زیستگاه |
|---|---|---|---|
| جنگل نیمه‌متراکم | ۱۶۷۱/۵ | ۴۵۹۰۲۱۱۲ | ۱۵۰۳۲۲۹/۴۳ |
| جنگل کم‌تراکم | ۱۳۵۰/۲ | ۲۲۲۴۹۲۷۰ | ۴۲۷۳۷۶/۳۶ |
| کشاورزی | ۳۳۸۳/۷ | ۲۲۱۹۰۰۱۵ | ۷۰۰۱/۴۵ |
| مرتع متراکم | ۵۹۱۱/۵ | ۹۶۵۹۷۰۴۰ | ۶۶۲۹۳۴/۵۹ |
| مرتع کم‌تراکم | ۳۱۷۵/۶ | ۲۹۴۹۵۴۳۹ | ۸۷۸۱۷۳/۹ |
| پهنه‌های آبی | ۸۰/۱ | ۰ | ۲۴۷۰۰/۱ |
| مسکونی | ۲۶۱/۲ | ۲۰۸۵۳۴ | ۷۵۷/۴۱ |
| بایر | ۳۶۲/۱ | ۲۲۶۲۳۷۱ | ۷۴۰۴۹/۸۲ |
| شبکهٔ جاده‌ای | ۲۳۶/۱ | ۰ | ۲۸۱۸/۹۴ |

**جدول ۲.** مساحت کلاس‌های طبقات کیفیت زیستگاه

| ردیف | کلاس‌های کیفیت زیستگاه | مساحت | |
|---|---|---|---|
| | | کیلومتر مربع | درصد (٪) |
| ۱ | بدون کیفیت | ۳۸۶۱/۱ | ۲۴ |
| ۲ | کیفیت ضعیف | ۱۶۵۰/۲ | ۱۰ |
| ۳ | کیفیت متوسط | ۴۰۹۷/۵ | ۲۵ |
| ۴ | کیفیت خوب | ۵۱۲۷/۵ | ۳۱ |
| ۵ | کیفیت عالی | ۱۶۹۵/۷ | ۱۰ |

نتایج همبستگی خدمات اکوسیستمی منتخب با نقشهٔ کاربری اراضی (جدول ۳) حاکی از همبستگی مثبت و معنادار بین این سه پارامتر در سطح ۰/۰۱ است. با توجه به نتایج خدمت اکوسیستمی ذخیرهٔ کربن نسبت به خدمت اکوسیستمی کیفیت زیستگاه همبستگی بالاتری با نقشهٔ کاربری اراضی دارد که به این معناست که تغییرات در کاربری اراضی آثار منفی بیشتری بر ذخیرهٔ کربن در اکوسیستم‌های استان دارد.

**جدول ۳.** نتایج همبستگی پیرسون

| | کاربری اراضی | ذخیرهٔ کربن | کیفیت زیستگاه |
|---|---|---|---|
| کاربری اراضی | ۱ | | |
| ذخیرهٔ کربن | ۰/۹۱** | ۱ | |
| کیفیت زیستگاه | ۰/۸** | ۰/۷۵** | ۱ |

به طور کلی، نتایج مدل‌سازی ذخیرهٔ کربن (شکل ۳) نشان می‌دهد انواع کاربری‌های مختلف زمین دارای تراکم کربن متفاوت هستند که در نتیجه تفاوت‌های مکانی و زمانی در مقدار کل ذخیرهٔ کربن در مناطق مختلف ایجاد می‌شود. مناطق ذخیره‌سازی کربن با ارزش بسیار زیاد در حوضه‌های کوچک تحت سلطهٔ جنگل‌ها متمرکز شده‌اند که ظرفیت جذب کربن قوی دارند و بزرگ‌ترین مخزن کربن در اکوسیستم‌ها هستند. همچنین مناطق ذخیره‌سازی کربن کم‌ارزش عمدتاً در مناطقی از شمال و شرق و جنوب شرق متمرکز شده‌اند که عمدهٔ پوشش آن‌ها اراضی کشاورزی و مسکونی است. بنابراین مکانیسم تخریب اکولوژیک و تغییر کاربری اراضی، یعنی زمانی که جنگل‌ها و مراتع مورد تهاجم زمین‌های کشاورزی و مسکونی و زمین‌های بلااستفاده قرار می‌گیرند، اگرچه تراکم کربن زمین‌های زراعی و زمین‌های ساخته‌شده کم نیست، نمی‌توانند با تراکم کربن جنگل‌ها و مراتع مقایسه شوند که منجر به خطر کاهش ذخیره‌سازی کربن در استان چهارمحال و بختیاری می‌شود. از طرف دیگر انتشار کربن ناشی از فرایند تبدیل و تغییر و ترکیب کاربری اراضی آثار منفی جدّی با توجه به ذخیره‌سازی کربن اکوسیستم دارد (Zhu et al., 2022) که تغییر اقلیم یکی از این آثار است. به همین ترتیب در نقشهٔ کمّی‌سازی کیفیت زیستگاه (شکل ۴) مشاهده می‌شود که در مکان‌هایی که پوشش گیاهی تکه‌تکه شده و محیط اطراف آن با منابع تهدید انسانی اشغال شده است کیفیت زیستگاه کاهش پیدا کرده است. در مقابل بخش جنوبی و قسمت‌هایی از شمال استان که تحت پوشش کاربری‌های جنگلی و پهنه‌های آبی و مرتعی است از بالاترین کیفیت زیستگاه برخوردار هستند. این نتایج می‌تواند با شناسایی مکان‌های تخریب‌شده، در معرض خطر، نیازمند احیا، و دارای کیفیت مطلوب به منزلهٔ یک راهنمای شاخص برای مدیران توسعه‌ای و محیط زیستی در فرایند برنامه‌ریزی مورد توجه قرار گیرد. به این ترتیب تمرکز بر بهبود لکه‌ها از طبقات با کیفیت پایین به کلاس‌های بالاتر و حفظ زیستگاه‌هایی با بالاترین ارزش‌های کیفی ارتقا می‌یابد. به طور کلی آثار انواع کاربری‌های مختلف زمین بر ذخیرهٔ کربن و تنوع زیستی (جدول ۱) نشان داد کاربری‌های با پوشش طبیعی (اراضی جنگلی و مرتعی) ذخیرهٔ کربن بیشتر و کیفیت زیستگاه مطلوب‌تری دارند که در تأیید مطالعات قبلی است (اسداللهی و ماهینی، ۱۳۹۵؛ بادام‌فیروز و همکاران، ۱۳۹۸؛ فدایی و همکاران، ۱۳۹۹؛ ناروئی و همکاران، ۱۴۰۱؛ Ma et al., 2021؛ Aznarez et al., 2022؛ Xu et al., 2023؛ Nie et al., 2023). از طرف دیگر رابطهٔ مستقیم خدمت اکوسیستمی کیفیت زیستگاه به مثابهٔ یک خدمت حمایتی با سایر خدمات اکوسیستم، مانند ذخیرهٔ کربن، در بسیاری مطالعات از جمله مطالعهٔ زرندیان و همکاران (۱۳۹۴) ثابت شده است که بر اساس نتایج این مطالعه در منطقهٔ مورد مطالعه همبستگی بالایی بین کیفیت زیستگاه و ذخیرهٔ کربن وجود دارد (جدول ۳) که در نقشه‌های خروجی هر دو خدمت اکوسیستمی نیز این نکته کاملاً روشن است (شکل‌های ۳ و ۴). بنابراین در صورت افزایش تهدیدات و تخریب زیستگاه‌ها، علاوه بر کاهش تنوع زیستی در منطقه، تدارک سایر خدمات از جمله ذخیرهٔ کربن نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. علاوه بر این همبستگی هر دو خدمت اکوسیستمی با نقشهٔ کاربری اراضی نشان می‌دهد تغییرات در کاربری اراضی به‌راحتی می‌تواند به کاهش زیستگاه‌های طبیعی، مانند جنگل‌ها و مراتع و پهنه‌های آبی، منجر شود که در نتیجه به کاهش ذخیرهٔ کربن و کیفیت زیستگاه می‌انجامد که در تأیید مطالعات قبلی است (Yang et al., 2021; Ren et al., 2022; Tavakoli & Mohammadyari, 2023; Tang et al., 2023). در این مطالعات تغییرات در کاربری اراضی به مثابهٔ مهم‌ترین پارامتر در کاهش مساحت طبقات طبیعی و در نتیجه کاهش خدمات اکوسیستمی بیان شده است که آثار این تغییرات در نتایج این مطالعه نیز مشاهده شد.

در این زمینه مدیریت زمین با تقویت حفاظت از اراضی اکولوژیکی و کاهش تعرض اراضی شهری به زمین‌های جنگلی و مرتعی نقش بسیار مهمی در عرضهٔ خدمات اکوسیستمی ایفا می‌کند. مثلاً اگرچه تغییرات کاربری اراضی باعث تشدید اتلاف کربن در اکوسیستم زمینی می‌شود (Li et al., 2021)، تغییرات با برنامه‌ریزی و بهینه در کاربری اراضی تأثیر مثبتی بر ذخیره و ترسیب کربن خواهد داشت (Zhao et al., 2019; Standish & Prober, 2020).

## نتیجه

با توجه به اینکه درک آثار تغییرات کاربری اراضی بر خدمات اکوسیستمی برای مدیریت زمین و حفظ اکوسیستم‌ها توسط سیاست‌گذاران مهم است، مطالعه در مورد رابطهٔ بین کاربری اراضی و خدمات اکوسیستمی می‌تواند مبنایی برای تجزیه‌وتحلیل تغییرات محیطی، شکل‌گیری سیاست‌های حفاظت اکولوژیکی منطقه‌ای، و استفادهٔ پایدار از منابع زمین فراهم کند. بدین منظور، در پژوهش حاضر با تلفیق داده‌های فضایی به کمّی‌سازی دو خدمت اکوسیستمی مهم ذخیرهٔ کربن و کیفیت زیستگاه با مدل‌های موجود در نرم‌افزار InVEST پرداخته شد که امکان توزیع مکانی این دو خدمت را در مقیاس منطقه‌ای فراهم کرد. بر اساس نتایج، مناطق شهری و کشاورزی و پهنه‌های آبی مراکز کم‌ارزش ذخیرهٔ کربن و پهنه‌هایی از شمال غرب، غرب، و جنوب غرب مناطق باارزش برای ارائهٔ این خدمت اکوسیستمی هستند. همچنین، کیفیت زیستگاه در مناطق شهری و شبکهٔ جاده‌ای به منزلهٔ مرکز کم‌ارزش و حومهٔ غربی و جنوبی و تکه‌هایی از مرکز مکان تجمع تالاب‌های استان به منزلهٔ مرکزهای باارزش متمرکز است. به طور کلی مناطق با پوشش جنگلی و مرتعی ذخیرهٔ کربن بالا و زیستگاهی مطلوب دارند. در مقابل کاربری‌های انسان‌ساخت، مانند مناطق مسکونی و جاده‌ها، کمترین ذخیرهٔ کربن را دارند و از نظر کیفیت زیستگاه فاقد مطلوبیت هستند. بدین ترتیب پاسخ سؤالات مطرح‌شده در پژوهش حاضر مشخص شد. بر اساس این نتایج تغییرات کاربری اراضی می‌تواند آثار بارزی بر دینامیک فضایی‌ـ زمانی ذخیرهٔ کربن و در نتیجه تنظیم اقلیم و کیفیت زیستگاه و به دنبال آن تنوع زیستی در استان چهارمحال و بختیاری داشته باشد. بنابراین چگونگی روند تغییرات به صورت تداوم وضع موجود یا بهبود و توسعهٔ متوازن تغییرات در کاربری اراضی بستگی به تصمیمات مدیریتی و سیاست‌های اتخاذشده در برنامه‌ریزی‌های شهری دارد. در واقع برای دستیابی به توسعهٔ مؤثر سیاست‌های مقابله با خطرات احتمالی آینده باید از قبل تدوین شوند. رویکرد مورد استفاده در این مطالعه بر اساس نرم‌افزار دسترسی باز، داده‌های بیوفیزیکی، و داده‌های عمومی برای مدل‌سازی بود که می‌تواند سطح دقیقی از اطلاعات مکانی و فضایی در مورد ذخیرهٔ کربن و حفاظت از تنوع زیستی شهری ارائه دهد که یک ابزار تصمیم‌گیری کارآمد و کم‌هزینه برای حفاظت از اکوسیستم‌های طبیعی استان است و امکان برنامه‌ریزی و مدیریت کاربری یکپارچهٔ زمین در طرح‌ها و برنامه‌های آمایش سرزمین را فراهم می‌کند. در حال حاضر فعالیت‌های انسانی وارد مرحله‌ای شده است که در آن اکوسیستم‌ها در معرض تهدید جدّی قرار دارند و نیاز فوری به تدوین برنامه‌ها و سیاست‌های معقول برای حفاظت از اکوسیستم‌ها و محیط زیست و زیستگاه‌ها در مقیاس ملی وجود دارد. با توجه به اینکه در مطالعات آمایش استانی در بخش‌های محیط زیست و منابع طبیعی برنامه‌های اجرایی در زمینهٔ مدیریت فراگیر زیست‌بومی و مدیریت جامع منابع آب و خاک و هوا پیش‌بینی شده است، رویکرد خدمات اکوسیستمی به منزلهٔ یک تفکر محوری می‌تواند نقش مکمل برای داده‌های موجود آمایش در سیاست‌گذاری‌های یکپارچه و هم‌زمان مدیریت توسعه و حفاظت محیط زیست در مقیاس ملی را ایفا کند. در این میان نقش زیرساخت‌های سبز و توجه به اصول ارزیابی توان و آثار محیط زیست در جهت بهبود خدمات اکوسیستمی برجسته‌تر است. بدین منظور، پیشنهادهای اجرایی و پژوهشی زیر ارائه می‌شود:

- تعادل در ساختار پوشش کاربری اراضی و برنامه‌ریزی حفاظتی از جنگل‌ها و مراتع به منزلهٔ اکوسیستم‌های باارزش در تدارک خدمات اکوسیستمی؛
- طرح‌ریزی و هدایت صحیح گسترش مناطق شهری با توجه به اهمیت حفظ محیط زیست و افزایش پایداری محیط زیستی شهرها در جهتی که به اکوسیستم‌های طبیعی آسیب وارد نشود؛
- توسعهٔ متوازن بین برنامه‌ریزی‌های اقتصادی‌ـ اجتماعی برای توسعهٔ زیرساخت‌ها و برنامه‌ریزی‌های اکولوژیکی با هدف پایداری محیطی جهت تنظیم اقلیم و بهبود تنوع زیستی؛
- مدل‌سازی مکانی ترسیب کربن و کیفیت زیستگاه و طراحی سناریوهای برنامه‌ریزی فضایی با توجه به معیارهای سیمای سرزمین؛
- نقشه‌سازی و بهینه‌سازی آثار پوشش کاربری بر خدمات اکوسیستم به منظور ارتقای بینش مدیریتی در برنامه‌ریزان و مدیران شهری و طراحی سیاست ادغام خدمات اکوسیستم و کاربری زمین در برنامه‌ریزی‌های آمایش سرزمین.

## منابع


اسدالهی، زهرا و سلمان‌ماهینی، عبدالرسول (۱۳۹۵). بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر عرضهٔ خدمات اکوسیستم (ذخیره و ترسیب کربن). *پژوهش‌های محیط زیست*، ۸ (۱۵)، ۲۰۳ ـ ۲۱۴.

بادام‌فیروز، جلیل؛ زرندیان، اردوان؛ موسی‌زاده، رؤیا و عظیمی، بهار (۱۳۹۸). سنجش اثرهای تغییر کاربری زمین و برآورد هزینه‌های اتلاف ظرفیت ذخیره‌سازی و ترسیب کربن در سرزمین جنگلی هیرکانی با استفاده از مدل InVEST. *پژوهش و توسعهٔ جنگل*، ۵ (۲)، ۲۹۳ ـ ۳۱۶.

زرندیان، اردوان؛ یاوری، احمدرضا؛ جعفری، حمیدرضا و امیرنژاد، حمید (۱۳۹۴). مدل‌سازی آثار تغییر پوشش زمین بر کیفیت زیستگاه در سرزمین جنگلی سرولات و جواهردشت. *پژوهش‌های محیط زیست*، ۶ (۱۱)، ۱۸۳ ـ ۱۹۴.

فدایی، انسیه؛ میرسنجری، میرمهرداد و امیری، محمدجواد (۱۳۹۹). مدل‌سازی خدمات اکوسیستمی مبتنی بر تغییرات پوشش و کاربری سیمای سرزمین با به‌کارگیری نرم‌افزار InVEST در منطقهٔ حفاظت‌شدهٔ جهان‌نما (مورد مطالعه: خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن). *آمایش سرزمین*، ۱۲ (۱)، ۱۵۳ ـ ۱۷۳.

محقق، میرسعید؛ مبرقعی دینان، نغمه؛ وفایی‌نژاد، علی‌رضا؛ سبحان اردکانی، سهیل و منوری، مسعود (۱۳۹۹). بررسی تغییرات بوم‌سازگان با استفاده از سنجه‌های سیمای سرزمین و ترسیب کربن شهر تهران. *محیط‌شناسی*، ۴۶ (۱)، ۱ ـ ۱۸.

ناروئی، بهروز؛ برق‌جلوه، شهین‌دخت؛ اسماعیل‌زاده، حسن و زبردست، لعبت (۱۴۰۱). تحلیل روند تغییر خدمت تنظیمی ترسیب کربن شهر تهران، متأثر از فرایندهای فضایی موزاییک سیمای سرزمین. *آمایش سرزمین*، ۱۴ (۱)، ۲۵۳ ـ ۲۸۳.

Aalde, H., Gonzalez, P., Gytarsky, M., Krug, T., Kurz, W. A., Ogle, S., Paustian K., & Somogyi, Z. (2006). Forest land. *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*, 4, 1-83.

Abegaz, A., Ali, A., Tamene, L., Abera, W., & Smith, J. U. (2022). Modeling long-term attainable soil organic carbon sequestration across the highlands of Ethiopia. Environment, *Development and Sustainability*, 24 (4), 5131-5162.

Asadollahi, Z. & SalmanMahiny, A. (2017). Assessing the Impact of Land Use Change on Ecosystem Services Supply (Carbon Storage and Sequestration). *Environmental Reserches*, 15, 203-214. (in Persian)

Aznarez, C., Svenning, J. C., Taveira, G., Baró, F., & Pascual, U. (2022). Wildness and habitat quality drive spatial patterns of urban biodiversity. *Landscape and Urban Planning*, 228, 104570.

Badamfirooz, J., Zarandian, J., Mousazadeh, R., & Azimi, B. (2019). Land use change impacts and cost estimation of capacity loss of carbon storage and sequestration in the Hyrcanian forested landscape using InVEST model. *Forest Research and Development*, 5 (2), 293-316. (in Persian)

Bai, L., Xiu, C., Feng, X., & Liu, D. (2019). Influence of urbanization on regional habitat quality: A case study of Changchun City. *Habitat International*, 93, 102042.

Chen, J., Wang, S., & Zou, Y. (2022). Construction of an ecological security pattern based on ecosystem sensitivity and the importance of ecological services: A case study of the Guanzhong Plain urban agglomeration, China. *Ecological Indicators*, 136, 108688.

Chen, W., Zhao, H., Li, J., Zhu, L., Wang, Z., & Zeng, J. (2020). Land use transitions and the associated impacts on ecosystem services in the Middle Reaches of the Yangtze River Economic Belt in China based on the geo-informatic Tupu method. *Science of the Total Environment*, 701, 134690.

Cheng, Q., Zhou, L., & Wang, T. (2022). Assessment of ecosystem services value in Linghekou wetland based on landscape change. *Environmental and Sustainability Indicators*, 15, 100195.

Cordero-Penín, V., Abramic, A., García-Mendoza, A., Otero-Ferrer, F., & Haroun, R. (2023). Mapping marine ecosystem services potential across an oceanic archipelago: Applicability and limitations for decision-making. *Ecosystem Services*, 60, 101517.

Dade, M. C., Mitchell, M. G., McAlpine, C. A., & Rhodes, J. R. (2019). Assessing ecosystem service trade-offs and synergies: The need for a more mechanistic approach. *Ambio*, 48, 1116-1128.

Duan, H. & Yu, X. (2022). Linking landscape characteristics to shorebird habitat quality changes in a key stopover site along the East Asian–Australasian Flyway migratory route. *Ecological Indicators*, 144, 109490.

Fadaei, E., Mirsanjari, MM., & Amiri, MJ. (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. (in Persian)

Fan, F., Liu, Y., Chen, J., & Dong, J. (2021). Scenario-based ecological security patterns to indicate landscape sustainability: a case study on the Qinghai-Tibet Plateau. *Landscape Ecology*, 36, 2175-2188.

Finisdore, J., Rhodes, Ch., Haines-Young, R., Maynard, S., Wielgus, J., Dvarskas, A., Houdet, J., Quétier, F., Lamothe, A., Ding, H., Soulard, F., Van Houtven, G., & Rowcroft, P. (2020). The 18 benefits of using ecosystem services classification systems. *Ecosystem Services*, 45, 101160.

Gao, Y., Ma, L., Liu, J., Zhuang, Z., Huang, Q., & Li, M. (2017). Constructing ecological networks based on habitat quality assessment: a case study of Changzhou, China. *Scientific reports*, 7(1), 46073.

Gong, J., Liu, D., Zhang, J., Xie, Y., Cao, E., & Li, H. (2019). Tradeoffs/synergies of multiple ecosystem services based on land use simulation in a mountain-basin area, western China. *Ecological Indicators*, 99, 283-293.

He, C., Zhang, D., Huang, Q., & Zhao, Y. (2016). Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models. *Environmental Modelling & Software*, 75, 44-58.

Hoekstra, A. Y., Buurman, J., & Van Ginkel, K. C. (2018). Urban water security: A review. *Environmental research letters*, 13 (5), 053002.

Hoque, M. Z., Cui, S., Islam, I., Xu, L., & Ding, S. (2021). Dynamics of plantation forest development and ecosystem carbon storage change in coastal Bangladesh. *Ecological Indicators*, 130, 107954.

Hu, J., Zhang, J., & Li, Y. (2022). Exploring the spatial and temporal driving mechanisms of landscape patterns on habitat quality in a city undergoing rapid urbanization based on GTWR and MGWR: The case of Nanjing, China. *Ecological Indicators*, 143, 109333.

Huang, S., Tian, T., Zhai, L., Deng, L., & Che, Y. (2023). Understanding the dynamic changes in wetland cultural ecosystem services: Integrating annual social media data into the SolVES. *Applied Geography*, 156, 102992.

Janus, J. & Bozek, P. (2019). Land abandonment in Poland after the collapse of socialism: Over a quarter of a century of increasing tree cover on agricultural land. *Ecological Engineering*, 138, 106-117.

Kunwar, R. M., Evans, A., Mainali, J., Ansari, A. S., Rimal, B., & Bussmann, R. W. (2020). Change in forest and vegetation cover influencing distribution and uses of plants in the Kailash Sacred Landscape, Nepal. *Environment, Development and Sustainability*, 22 (2), 1397-1412.

Li, M., Zhang, X., Pang, G., & Han, F. (2013). The estimation of soil organic carbon distribution and storage in a small catchment area of the Loess Plateau. *Catena*, 101, 11-16.

Li, K., Cao, J., Adamowski, J.F., Biswas, A., Zhou, J., Liu, Y., Zhang, Y., Liu, C., Dong, X., & Qin, Y. (2021). Assessing the effects of ecological engineering on spatiotemporal dynamics of carbon storage from 2000 to 2016 in the Loess Plateau area using the InVEST model: A case study in Huining County, China. *Environmental Development*, 39, 100641.

Liang, Y., Hashimoto, S., & Liu, L. (2021). Integrated assessment of land-use/land-cover dynamics on carbon storage services in the Loess Plateau of China from 1995 to 2050. *Ecological Indicators*, 120, 106939.

Liu, X., Liang, X., Li, X., Xu, X., Ou, J., Chen, Y., Li, SH., Wang, Sh., & Pei, F. (2017). A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 168, 94-116.

Ma, S., Wang, L. J., Zhu, D., & Zhang, J. (2021). Spatiotemporal changes in ecosystem services in the conservation priorities of the southern hill and mountain belt, China. *Ecological Indicators*, 122, 107225.

Ma, Z., Duan, X., Wang, L., Wang, Y., Kang, J., & Yun, R. (2023). A Scenario Simulation Study on the Impact of Urban Expansion on Terrestrial Carbon Storage in the Yangtze River Delta, China. *Land*, 12 (2), 297.

Mengist, W., Soromessa, T., & Feyisa, G. L. (2021). Landscape change effects on habitat quality in a forest biosphere reserve: Implications for the conservation of native habitats. *Journal of Cleaner Production*, 329, 129778.

Mohammadyari, F., Tavakoli, M., Zarandian, A., & Abdollahi, S. (2023). Optimization land use based on multi-scenario simulation of ecosystem service for sustainable landscape planning in a mixed urban-Forest watershed. *Ecological Modelling*, 483, 110440.

Mohaqeq, M. S., Mobarghei Dinan, N., Vafaeinejad, A., Sobhan Ardakani, S., & Monavvari, S. M. (2022). Assessing the Changes in Tehran' Ecosystems Using the Landscape Metrics and Carbon Sequestration Rates. Journal of Environmental Studies, *46* (1), 1-22. (in Persian)

Müller, A., Bøcher, P. K., Fischer, C., & Svenning, J. C. (2018). 'Wild' in the city context: do relative wild areas offer opportunities for urban biodiversity?. *Landscape and Urban Planning*, 170, 256-265.

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

Nie, Y., Zhang, X., Yang, Y., Liu, Z., He, C., Chen, X., & Lu, T. (2023). Assessing the impacts of historical and future land-use/cover change on habitat quality in the urbanizing Lhasa River Basin on the Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 148, 110147.

Nie, X., Lu, B., Chen, Z., Yang, Y., Chen, S., Chen, Z., & Wang, H. (2020). Increase or decrease? Integrating the CLUMondo and InVEST models to assess the impact of the implementation of the Major Function Oriented Zone planning on carbon storage. *Ecological Indicators*, 118, 106708.

Ren, Q., He, C., Huang, Q., Shi, P., Zhang, D., & Güneralp, B. (2022). Impacts of urban expansion on natural habitats in global drylands. *Nature Sustainability*, 5(10), 869-878.

Rimal, B., Sharma, R., Kunwar, R., Keshtkar, H., Stork, N. E., Rijal, S., ... & Baral, H. (2019). Effects of land use and land cover change on ecosystem services in the Koshi River Basin, Eastern Nepal. *Ecosystem services*, 38, 100963.

Rutten, A., Casaer, J., Swinnen, K. R., Herremans, M., & Leirs, H. (2019). Future distribution of wild boar in a highly anthropogenic landscape: models combining hunting bag and citizen science data. *Ecological Modelling*, 411, 108804.

Sadat, M., Zoghi, M., & Malekmohammadi, B. (2020). Spatiotemporal modeling of urban land cover changes and carbon storage ecosystem services: case study in Qaem Shahr County, Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 8135-8158.

Sallustio, L., De Toni, A., Strollo, A., Di Febbraro, M., Gissi, E., Casella, L., ... & Marchetti, M. (2017). Assessing habitat quality in relation to the spatial distribution of protected areas in Italy. *Journal of Environmental Management*, 201, 129-137.

Sharp, R., Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., et al. (2020). InVEST 3.8.9 User's Guide.

Solomon, N., Pabi, O., Annang, T., Asante, I. K., & Birhane, E. (2018). The effects of land cover change on carbon stock dynamics in a dry Afromontane forest in northern Ethiopia. *Carbon balance and management*, 13, 1-13.

Standish, R. J. & Prober, S. M. (2020). Potential benefits of biodiversity to Australian vegetation projects registered with the Emissions Reduction Fund—is there a carbon-biodiversity trade-off?. *Ecological Management & Restoration*, 21 (3), 165-172.

Sun, X., Crittenden, J. C., Li, F., Lu, Z., & Dou, X. (2018). Urban expansion simulation and the spatio-temporal changes of ecosystem services, a case study in Atlanta Metropolitan area, USA. *Science of the Total Environment*, 622, 974-987.

Sun, X., Yang, P., Tao, Y., & Bian, H. (2022). Improving ecosystem services supply provides insights for sustainable landscape planning: A case study in Beijing, China. *Science of The Total Environment*, 802, 149849.

Tang, J., Zhou, L., Dang, X., Hu, F., Yuan, B., Yuan, Z., & Wei, L. (2023). Impacts and predictions of urban expansion on habitat quality in the densely populated areas: A case study of the Yellow River Basin, China. *Ecological Indicators*, 151, 110320.

Tavakoli, M. & Mohammadyari, F. (2023). Modeling the spatial distribution of multiple ecosystem services in Ilam dam watershed, Western Iran: Identification of areas for spatial planning. *Urban Ecosystems*, 1-20.

Wang, A., Kafy, A. A., Rahaman, Z. A., Rahman, M. T., Al Faisal, A., & Afroz, F. (2022). Investigating drivers impacting vegetation carbon sequestration capacity on the terrestrial environment in 127 Chinese cities. *Environmental and Sustainability Indicators*, 16, 100213.

Wei, L., Zhou, L., Sun, D., Yuan, B., & Hu, F. (2022). Evaluating the impact of urban expansion on the habitat quality and constructing ecological security patterns: A case study of Jiziwan in the Yellow River Basin, China. *Ecological Indicators*, 145, 109544.

Wei, Z., Xu, Z., Qiao, T., Wang, S., Ishwaran, N., & Yang, M. (2023). Habitats change of Tibetan antelope and its influencing factors on the North Tibetan Plateau from 2020 to 2050. *Global Ecology and Conservation*, 43, e02462.

Xu, C., Zhang, Q., Yu, Q., Wang, J., Wang, F., Qiu, S., ... & Zhao, J. (2023). Effects of land use/cover change on carbon storage between 2000 and 2040 in the Yellow River Basin, China. *Ecological Indicators*, 151, 110345.

Yang, J., Zhang, D. G., & Chen, J. G. (2020). Analysis on spatial-temporal variation of habitat quality in China based on land use change. *Grass Land Turf*, 40, 36-42.

Yan, S., Wang, X., Cai, Y., Li, C., Yan, R., Cui, G., & Yang, Z. (2018). An integrated investigation of spatiotemporal habitat quality dynamics and driving forces in the upper basin of Miyun Reservoir, North China. *Sustainability*, 10 (12), 4625.

Yang, Y. (2021). Evolution of habitat quality and association with land-use changes in mountainous areas: A case study of the Taihang Mountains in Hebei Province, China. *Ecological Indicators*, 129, 107967.

Zarandian, A., Baral, H., Stork, N. E., Ling, M. A., Yavari, A. R., Jafari, H. R., & Amirnejad, H. (2017). Modeling of ecosystem services informs spatial planning in lands adjacent to the Sarvelat and Javaherdasht protected area in northern Iran. *Land Use Policy*, 61, 487-500.

Zarandian, A., Yavari, A., Jafari, H., & Amirnejad, H. (2016). Modeling of Land Cover Change Impacts on Habitat Quality of a Forested Landscape in the Sarvelat and Javaherdasht. Environmental Researches, *6* (12), 183-194. (in Persian)

Zhai, T., Zhang, D., & Zhao, C. (2021). How to optimize ecological compensation to alleviate environmental injustice in different cities in the Yellow River Basin? A case of integrating ecosystem service supply, demand and flow. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103341.

Zhang, H., Zhang, C., Hu, T., Zhang, M., Ren, X., & Hou, L. (2020). Exploration of roadway factors and habitat quality using InVEST. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 87, 102551.

Zhang, S., Zhou, Y., Yu, R., Xu, X., Xu, M., Li, G., ... & Yang, Y. (2022). China's biodiversity conservation in the process of implementing the sustainable development goals (SDGs). *Journal of Cleaner Production*, 338, 130595.

Zhao, A., Zhang, A., Liu, J., Feng, L., & Zhao, Y. (2019). Assessing the effects of drought and "Grain for Green" Program on vegetation dynamics in China's Loess Plateau from 2000 to 2014. *Catena*, 175, 446-455.

Zhou, L., Dang, X., Mu, H., Wang, B., & Wang, S. (2021). Cities are going uphill: Slope gradient analysis of urban expansion and its driving factors in China. *Science of the Total Environment*, 775, 145836.

Zhu, E., Deng, J., Zhou, M., Gan, M., Jiang, R., Wang, K., & Shahtahmassebi, A. (2019). Carbon emissions induced by land-use and land-cover change from 1970 to 2010 in Zhejiang, China. *Science of the Total Environment*, 646, 930-939.

Zhu, L., Song, R., Sun, S., Li, Y., & Hu, K. (2022). Land use/land cover change and its impact on ecosystem carbon storage in coastal areas of China from 1980 to 2050. *Ecological Indicators*, 142, 109178.