



19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴ تا ۱۳ آذر ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



مدل سازی پیش بینی کننده دینامیک ذخیره سازی کربن منطقه ای در پاسخ به تغییرات

کاربری/پوشش زمین: تحلیلی مبتنی بر مدل InVEST

امیرحسین معصومی تبار زنجانی^{۱*}، مهران میثاقی^۲، محمدصادق عسکری^۳، ستاره امانی فر^۴

۱- دانشجوی دکترا دانشگاه زنجان؛ گروه علوم و مهندسی خاک * Masoumi.tabar@znu.ac.ir

۲- دانشجوی دکترا دانشگاه زنجان؛ گروه علوم و مهندسی خاک

۳- دانشیار دانشگاه زنجان؛ گروه علوم و مهندسی خاک

۴- دانشیار دانشگاه زنجان؛ گروه علوم و مهندسی خاک

چکیده

تغییرات کاربری و پوشش زمین (LULC)^۱ به عنوان عاملی کلیدی در دینامیک ذخیره سازی کربن، نقش حیاتی در تعادل اکولوژیکی و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای ایفا می کند. این مطالعه با هدف ارزیابی و پیش بینی تغییرات ذخیره کربن در منطقه روستای سهرین (غرب استان زنجان، ایران) بر اساس مدل InVEST انجام شد. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم نیمه خشک و کاربری های غالب مرتع، کشاورزی، باغ، مناطق احداثی، منابع آب و اراضی بایر است. داده های کربن آلی خاک^۲ (SOC)، زیست توده روی زمینی^۳ (AGC)، زیرزمینی^۴ (UGC) و بقایا^۵ (DOC) از طریق نمونه برداری میدانی تعیین گردید. نتایج نشان داد که کاربری مرتع با بیشترین تراکم کربن، مخزن اصلی کربن منطقه است، در حالی که مناطق احداثی فاقد ذخیره کربن هستند. مدل سازی سناریوهای آینده (تا سال ۲۰۵۰) با استفاده از ابزار Generate scenario در InVEST، افزایش مساحت مناطق احداثی از ۵۰ به ۶۱ هکتار و اراضی بایر از ۱۳۵۸ به ۱۶۳۰ هکتار را پیش بینی کرد. این تغییرات منجر به کاهش ۶۰۰۰ تن ذخیره کربن در مخزن خاک شد که عمدتاً ناشی از تبدیل مراتع و اراضی کشاورزی به کاربری های شهری و بایر است. یافته ها تأکید می کنند که سیاست های حفاظتی مانند کاهش شهرنشینی و احیای مراتع می تواند ذخیره کربن را حفظ کند. این مطالعه مرجعی برای مدیریت پایدار زمین در مناطق نیمه خشک ارائه می دهد و بر اهمیت ادغام مدل های فضایی در سیاست گذاری های زیست محیطی تأکید دارد.

واژگان کلیدی: ذخیره سازی کربن، تغییرات کاربری، تغییرات پوشش زمین، مدل InVEST، تنوع زیستی

¹ Land use /land cover

² Soil organic carbon

³ Above ground carbon

⁴ Underground carbon

⁵ Dead organic carbon

مقدمه

اکوسیستم‌های زمینی نقش اساسی در حفظ تعادل زیست‌محیطی و ارائه خدمات اکوسیستمی (Ecosystem Services) دارند که شامل منافع ملموس و ناملموس مانند تولید غذا، تصفیه آب، تنظیم اقلیم، و حفظ تنوع زیستی است (Reid et al., 2005). با این حال، فعالیت‌های انسانی نظیر تغییر کاربری و پوشش زمین (LULC)، شهرنشینی سریع، جنگل‌زدایی، و کشاورزی ناپایدار، ساختار و عملکرد این اکوسیستم‌ها را به شدت تحت تأثیر قرار داده و منجر به کاهش ظرفیت آن‌ها برای ارائه خدمات حیاتی شده است (Chen et al., 2019; Vallet et al., 2018). در این میان، تغییرات در کاربری و پوشش زمین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مخرب اکولوژیکی، به‌طور مستقیم بر چرخه‌های بیوژئوشیمیایی، کیفیت خاک، ساختار چشم‌انداز و عملکرد منابع طبیعی تأثیر گذاشته است. این تغییرات، به‌ویژه در زیست‌بوم‌های مرتعی و کشاورزی، نه تنها تنوع زیستی را تهدید می‌کنند بلکه به کاهش ذخیره کربن و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای به جو منجر می‌شوند (Zamboni et al., 2018; Zhang et al., 2019). مراتع و خاک‌های غنی از ماده آلی، به‌عنوان مهم‌ترین مخازن طبیعی کربن، در اثر تبدیل به اراضی کشاورزی یا مناطق شهری، مقدار زیادی از کربن تثبیت‌شده را آزاد می‌کنند و بدین ترتیب به تشدید گرمایش جهانی دامن می‌زنند (Nelson et al., 2010; Sharp et al., 2018). بررسی‌های جهانی حاکی از آن است که تغییرات LULC مسئول حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد از کل انتشار کربن جهانی هستن (Yao et al., 2016). رشد سریع شهرنشینی، به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تغییرات LULC، موجب کاهش پوشش گیاهی، افزایش جزایر گرمایی، و اختلال در فرآیندهای اکوهیدرولوژیکی نظیر نفوذ و تبخیر و تعرق می‌شود (Gao et al., 2020; Langerwisch et al., 2017). همزمان، فعالیت‌های کشاورزی ناپایدار، گسترش زمین‌های زراعی، و شیوه‌های نادرست بهره‌برداری از منابع، فشار مضاعفی بر منابع طبیعی وارد کرده‌اند و باعث کاهش عملکرد کربن‌گیری و تشدید انتشار گازهای گلخانه‌ای شده‌اند. به‌عنوان مثال، مطالعه‌ای در منطقه جارائولا (پاکستان) تغییرات قابل توجهی در میزان ذخیره کربن ناشی از کشاورزی و شهرنشینی گزارش کرده است (Yasin et al., 2024). علاوه بر تغییرات مستقیم انسانی، نوسانات اقلیمی شامل افزایش دما، تغییر الگوهای بارش و بروز خشکسالی‌های طولانی‌مدت نیز بر عملکرد اکوسیستم‌ها و ظرفیت آن‌ها در جذب و ذخیره کربن اثرگذار هستند (Bai et al., 2019; Ma et al., 2021). این پدیده‌ها نه تنها فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی خاک را تغییر می‌دهند، بلکه از طریق تأثیرگذاری بر پوشش گیاهی و شرایط رطوبتی، فرآیندهای جذب CO₂ و ترسیب آن را نیز مختل می‌سازند (Suescún et al., 2019). اثرات ترکیبی تغییرات اقلیمی و تغییرات LULC اغلب شدت یافته و پاسخ اکوسیستم‌ها را پیچیده‌تر می‌کند (Fu et al., 2017). در این میان، ابزارهای مدل‌سازی فضایی و پیش‌بینی تغییرات، نظیر InVEST، CA-Markov و مدل‌های ترکیبی با یادگیری ماشین مانند PLUS و FLUS، امکان شبیه‌سازی دینامیک LULC و تخمین دقیق تغییرات ذخیره کربن را فراهم کرده‌اند (Liang et al., 2017). مدل InVEST با توانایی در ترکیب داده‌های مکانی و سناریوهای مدیریتی، به پژوهشگران و سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا پیامدهای ناشی از تغییرات در استفاده از زمین را در چارچوب خدمات اکوسیستمی از جمله ذخیره‌سازی کربن، کمی‌سازی کرده و برای توسعه پایدار تصمیم‌گیری آگاهانه‌تری داشته باشند (Sharp et al., 2018). این مدل‌ها، در کنار ابزارهایی مانند GIS و RS، چشم‌اندازهای قدرتمندی برای تحلیل اثرات بلندمدت تغییرات انسانی و اقلیمی بر ذخیره‌سازی کربن تحت سناریوهای مختلف توسعه پیش‌بینی کنند. در مطالعات متعددی با استفاده از ابزارهای مدل‌سازی، مانند InVEST، میزان تأثیر تغییرات کاربری زمین بر ذخیره‌سازی کربن بررسی شده است. به‌عنوان نمونه، در منطقه حفاظت‌شده ساریسکا در هند، استفاده از مدل InVEST نشان داد که فعالیت‌های انسانی مانند قطع غیرمجاز درختان منجر به کاهش قابل توجهی در ذخیره کربن شده است (Yang et al., 2024). کاهش ذخیره کربن ناشی از تغییرات کاربری و پوشش زمین (LULC) در مناطق حساس اکولوژیکی، به‌طور فزاینده‌ای در مطالعات اخیر مستند شده است. تحقیقات نشان می‌دهد که تغییرات در شیوه‌های مدیریت زمین در طول دو دهه گذشته، به‌طور قابل توجهی قابلیت‌های ذخیره کربن طبیعی را به خطر انداخته است و این امر، فوریت تدوین استراتژی‌های مدیریت پایدار برای کاهش این تلفات را برجسته می‌کند (Wang et al., 2024). همچنین، در ساحل شاندونگ (چین)، مدل InVEST نشان داد که گسترش زمین‌های ساخته‌شده منجر به کاهش ۱۰۶×۴۷،۹۶ Mg کربن شده است، در حالی که سناریوهای حفاظتی می‌تواند ذخیره را افزایش دهد (Zheng & Zheng, 2023). در گالیسیا (اسپانیا)، نقشه‌برداری فضایی با Sentinel-2 و InVEST تأکید کرد که پوشش‌های جنگلی بیش از ۵۰ درصد کربن را ذخیره می‌کنند

(García-Ontiyuelo et al., 2024). در این زمینه، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و مدل‌سازی دینامیک فضایی-زمانی ذخیره‌سازی کربن در پاسخ به تغییرات کاربری و پوشش زمین، از مدل InVEST به‌عنوان ابزاری علمی و سیاست‌محور استفاده می‌کند. تمرکز اصلی این مطالعه بر سناریوهای ناشی از توسعه شهری، تخریب زیست‌بوم‌ها و فعالیت‌های کشاورزی در مقیاس منطقه‌ای است تا بتواند با تکیه بر روش‌های مبتنی بر داده و مدل‌سازی، به درک بهتری از چگونگی تأثیر تغییرات انسانی بر چرخه کربن و خدمات اکوسیستمی دست یابد. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند برای سیاست‌گذاری، مدیریت سرزمین، و توسعه راهکارهای کاهش تغییرات اقلیمی و حفظ منابع طبیعی مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در منطقه روستای سهرین واقع در غرب استان زنجان انجام شده است و به منظور مدل‌سازی میزان ذخیره کربن در اثر تغییر کاربری اراضی مرتعی به سایر کاربری‌های رایج در منطقه مورد مطالعه قرار گرفت. قالب کاربری‌ها و پوشش‌های منطقه شامل کاربری‌های مرتع، کشاورزی، باغ، مناطق شهری و انسان‌ساز، منابع آب و اراضی بایر بود. منطقه مورد نظر در حد فاصل طول جغرافیایی ۴۸°۲۵'۷ تا ۴۸°۲۴'۲۷ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶°۵۱'۵۵ تا ۳۶°۵۲'۴۶ شمالی قرار دارد که مساحت کل منطقه ۱۶۰۰۰ هکتار می‌باشد. بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی فرودگاه زنجان، منطقه مورد مطالعه دارای متوسط بارندگی ۲۸۲ میلی‌متر در سال و متوسط درجه حرارت سالانه ۱۱ درجه سلسیوس بوده و دارای اقلیم نیمه‌خشک است. این منطقه به‌عنوان نمونه‌ای از اکوسیستم‌های نیمه‌خشک ایران، تحت تأثیر فشارهای انسانی مانند گسترش شهرنشینی و کشاورزی ناپایدار و همچنین تغییرات اقلیمی مانند کاهش بارش قرار دارد.

منابع داده

برای ایجاد یک مجموعه داده‌های لازم برای اجرای مدل، بخشی از اطلاعات لازم از طریق نمونه‌برداری‌های میدانی و بخشی از اطلاعات از طریق استفاده از پایگاه‌های معتبر داده جمع‌آوری گردید. روش نمونه‌برداری مطابق با روش توصیف‌شده توسط Hamidi Nehrani و همکاران (۲۰۲۰) است (Nehrani et al., 2020). نمونه‌های خاک پس از خشک شدن در هوا از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و برای نمونه‌های گیاهی بلافاصله بعد از ورود به آزمایشگاه توزین شدند. برای اندازه‌گیری میزان کربن آلی از نمونه‌های خاک و گیاهی استفاده شد. میزان کربن آلی خاک از طریق روش والکی بلک (Walkley & Black, 1934) و کربن آلی موجود بر روی زمین و زیرزمین و کربن آلی موجود در بقایا از طریق محاسبات مدل مبتنی بر کاربرد معادلات عمومی سنجش کربن اندازه‌گیری شد (Aalde et al., 2006) (Aalde et al., 2006).

مقدار ترسیب کربن در طول زمان برای یک پیکسل معین x برابر است با :

$$C_i = C_i \text{ above} + C_i \text{ below} + C_i \text{ soil} + C_i \text{ dead} \quad (1)$$

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i \quad (2)$$

در فرمول‌های ۱ و ۲، نشان‌دهنده نوع کاربری زمین، C_i تراکم کربن کل خاک و موجودات زنده در نوع زمین i ، C_i -above چگالی کربن موجودات روی‌زمینی در کاربری نوع i ، C_i -below چگالی کربن موجودات زیرزمینی در کاربری نوع i ، C_i -soil چگالی کربن ماده آلی خاک در طبقه i زمین در عمق ۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر (در این مطالعه) است. همچنین، C_{total} کل ذخیره کربن، S_i مساحت کل کاربری زمین نوع i ، و n تعداد کل انواع کاربری زمین را نشان می‌دهد. از آنجا که به دست آوردن داده‌های کربن آلی مرده دشوار است و تأثیر آن بر ذخیره کلی کربن بسیار اندک است، این مطالعه فعلی تأثیر این بخش بر ذخیره کربن را در نظر نمی‌گیرد (Lai et al., 2016) داده‌های مربوط به شرایط آب و هوایی و اقلیمی از طریق سایت TerraClimate ۲۰۲۴ استفاده شد و با داده‌های ایستگاه فرودگاه زنجان اعتبارسنجی شد. به منظور استخراج یک نقشه کاربری و پوشش اراضی پایه از پایگاه داده World Cover Map ماهواره پوشش

اراضی Sentinel-2 برنامه فضایی اروپا استفاده گردید. محاسبه میزان کربن ذخیره شده و یا ترسیب شده در کاربری های مختلف از مدل InVEST (Integrated Valuation Ecosystem Service Trade-off) نسخه ۳,۱۴,۱ Workbench به کار گرفته شده. برای شبیه سازی و ایجاد یک نقشه کاربری مبتنی بر سناریوهای مختلف، از ابزار generate scenario موجود در مدل InVEST و نرم افزار ArcGIS نسخه ۱۰,۸ استفاده گردید. این روش مشابه مطالعات خارجی مانند (García-Ontiyuelo et al., 2024) است که از Sentinel-2 برای نقشه برداری فضایی استفاده کرده اند.

نتایج و بحث

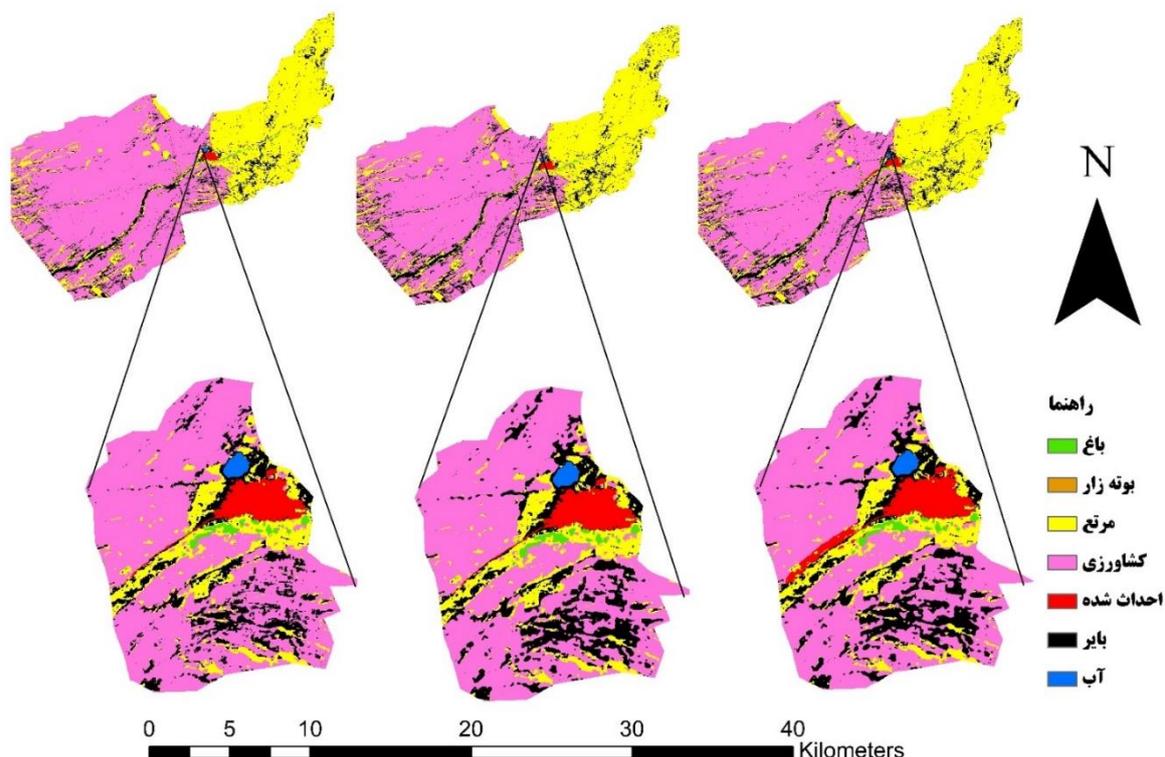
تحلیل داده های کاربری و پوشش زمین (LULC) نشان داد که منطقه سهرین طی سناریوهای پیش بینی شده تا سال ۲۰۵۰ تغییرات قابل توجهی را تجربه خواهد کرد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که تراکم کربن در انواع کاربری زمین تفاوت قابل توجهی دارد (جدول ۱).

جدول ۱. نتایج آزمایشگاهی تجزیه کربن آلی

کاربری	کربن آلی خاک SOC	کربن زیست توده روی زمین AGC	کربن زیست توده زیر زمین UGC	کربن زیست توده بقایا DOC
مرتع	۷۵,۸۴	۳,۸	۲,۷۲	۰
کشاورزی	۴۶,۰۸	۳	۱	۰
باغ	۶۰	۴	۶,۷	۰
بایر	۶۸,۳۱	۰,۵	۰,۲	۰
مناطق احدثی	۰	۰	۰	۰
آب سطحی	۰	۰	۰	۰

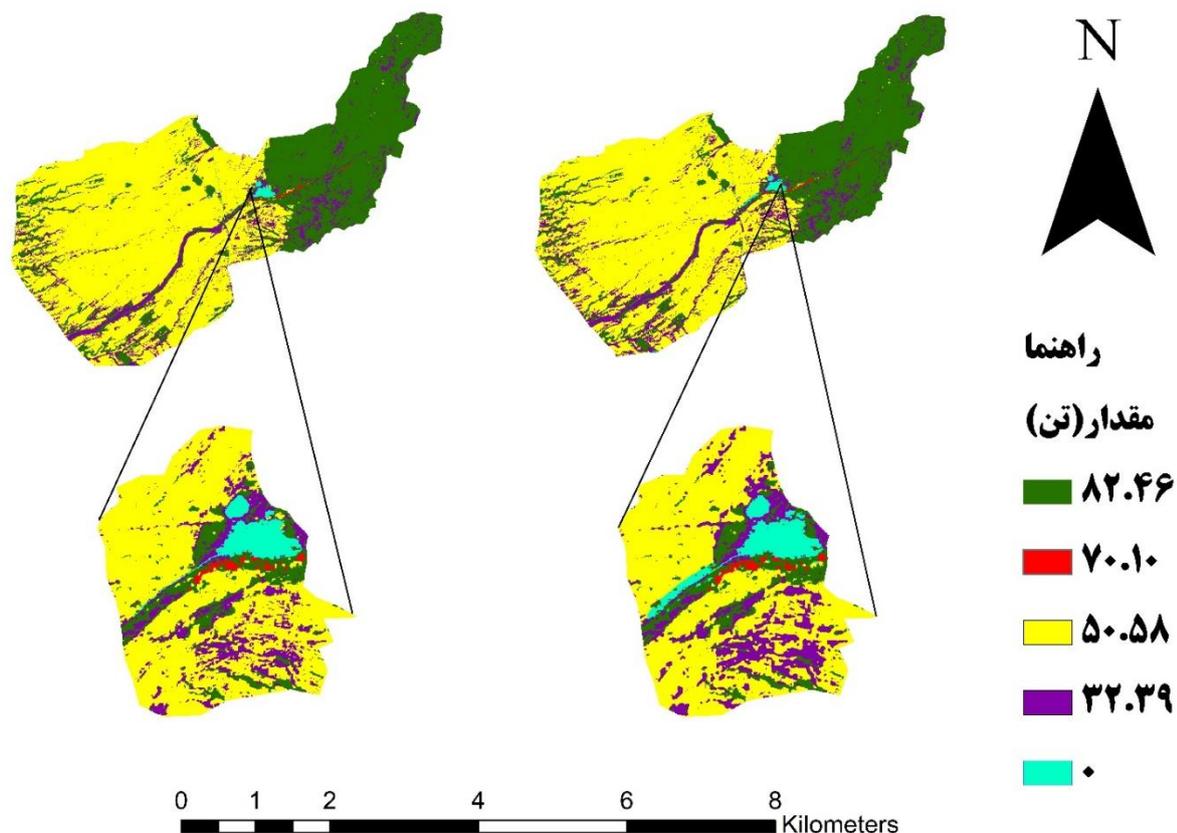
SOC: Soil organic carbon, AGC: Above ground carbon, UGC: Underground carbon, DOC: Dead organic carbon

مراعات با ۷۵,۸۴ تن/هکتار کربن آلی خاک (SOC)، ۳,۸ تن/هکتار کربن زیست توده روی زمینی (AGC) و ۲,۷۲ تن/هکتار کربن زیست توده زیرزمینی (UGC) به عنوان اصلی ترین مخزن کربن عمل می کنند. باغ ها و زمین های کشاورزی نیز نقش متوسطی در ذخیره کربن دارند، در حالی که مناطق احدثی و آب سطحی فاقد ذخیره کربن هستند (Aalde et al., 2006; García-Ontiyuelo et al., 2024). این یافته ها نشان می دهد که کاربری های مرتعی و کشاورزی با تراکم بالا، مهم ترین مخازن کربن در منطقه هستند و تبدیل آن ها به اراضی با تراکم کربن پایین، کاهش قابل توجه ذخیره کربن را موجب می شود. بر اساس مدل InVEST، مساحت مناطق احدثی از ۵۰ هکتار به ۶۱ هکتار و اراضی بایر از ۱۳۵۸ به ۱۶۳۰ هکتار افزایش خواهد یافت، در حالی که مساحت مراعات و زمین های کشاورزی کاهش می یابد. این تغییرات عمدتاً ناشی از توسعه شهری، گسترش اراضی بایر و محدودیت های اقلیمی مانند کاهش بارش در اراضی دیم است (شکل ۱). این الگو مشابه یافته های (García-Ontiyuelo et al., 2024; Zheng & Zheng, 2023) در ساحل شاندونگ و و همکاران (۲۰۲۴) در گالیسیا است که کاهش زمین های کشاورزی و افزایش اراضی شهری و بایر را گزارش کرده اند.



شکل ۱- نقشه تغییرات کاربری/پوشش رازی: چپ: نقشه فعلی منطقه (۲۰۲۵)، وسط: نقشه تغییرات کاربری/پوشش رازی رها شده بایر (۲۰۵۰)، نقشه تغییرات کاربری/پوشش رازی احداث شده (۲۰۵۰)

پیش‌بینی‌های سناریویی مدل نشان داد که بدون مداخله حفاظتی، تا سال ۲۰۵۰ کل ذخیره کربن منطقه حدود ۶۰۰۰ تن یک کاهش خواهد یافت. این کاهش عمدتاً ناشی از تبدیل مراتع و زمین‌های کشاورزی به اراضی بایر و مناطق احداثی است که با افزایش فشار انسانی و تغییرات اقلیمی مرتبط است ((Bai et al., 2019); (Ma et al., 2021)). کاهش ذخیره کربن در نواحی مرتعی، با تراکم بالای SOC، اهمیت حفاظتی این کاربری‌ها را برجسته می‌کند و نیاز به مدیریت پایدار را تأکید می‌نماید. نقشه‌های فضایی تولیدشده با InVEST نشان داد که مناطق با ذخیره کربن بالا عمدتاً در مراتع و زمین‌های کشاورزی متمرکز هستند، در حالی که اراضی بایر و مناطق احداثی ذخیره کربن اندکی دارند (شکل ۲). تا سال ۲۰۵۰، کاهش ذخیره کربن به‌ویژه در نواحی مرتعی مشهود است و با گسترش اراضی بایر و احداثی همراه می‌باشد. این توزیع فضایی نشان می‌دهد که تغییرات LULC به‌طور مستقیم ظرفیت اکوسیستم‌ها در ذخیره کربن را کاهش می‌دهد و حساسیت اکوسیستم‌های نیمه‌خشک مانند سهرین را در برابر تغییرات محیطی افزایش می‌دهد. (Fu et al., 2017; Yasin et al., 2024) مدل‌سازی سناریوهای آینده با ابزار generate scenario در InVEST نشان داد که روند کاهش ذخیره کربن بدون مداخله مدیریتی ادامه خواهد یافت. افزایش ۳۰ درصدی مساحت اراضی بایر و ۲۲ درصدی مناطق احداثی تا سال ۲۰۵۰، کاهش ۶۰۰۰ تنی ذخیره کربن را به دنبال دارد. این الگو با سناریوی طبیعی (NT) در (Zheng & Zheng, 2023) همخوانی دارد. با این حال، سناریوهای حفاظتی مانند کاهش ۲۰ درصد تبدیل مراتع به کاربری‌های شهری می‌تواند این روند را کاهش دهد و حتی منجر به افزایش نسبی ذخیره کربن شود، مشابه سناریوی اولویت اکولوژیکی (EP) در مطالعات لیانگ وهمکاران (۲۰۲۱). (Liang et al., 2021).



شکل 2- نقشه تغییرات کاربری/پوشش راضی چپ: نقشه فعلی منطقه (۲۰۲۵)، وسط: نقشه تغییرات کاربری/پوشش راضی شده بایر (۲۰۵۰)، نقشه تغییرات کاربری/پوشش راضی احداث شده (۲۰۵۰)

این یافته‌ها اهمیت اعمال سیاست‌های حفاظتی و مدیریت پایدار زمین را نشان می‌دهد. حفظ و احیای مراتع، کاهش فشار ناشی از شهرنشینی و مدیریت هوشمند اراضی بایر می‌تواند ظرفیت ذخیره کربن منطقه را افزایش دهد و خدمات اکوسیستمی حیاتی مانند تنظیم اقلیم و حفظ تنوع زیستی را تضمین کند. نتایج این مطالعه با پژوهش‌های جهانی هم‌راستا است Bai و همکاران (۲۰۱۹) و Ma و همکاران (۲۰۲۰) نشان داده‌اند که تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌های طولانی‌مدت موجب کاهش عملکرد اکوسیستم‌ها و ظرفیت ذخیره کربن می‌شوند. مطالعات Liang و همکاران (2021b) نیز نشان دادند که سناریوهای حفاظتی می‌توانند کاهش ذخیره کربن را به حداقل برسانند (Liang et al., 2021). در منطقه سهرین، ترکیب فشارهای انسانی و اقلیمی باعث حساسیت بالای اکوسیستم‌ها شده و ضرورت اقدامات مدیریتی محلی و هدفمند را برجسته می‌سازد. مدل InVEST با استفاده از داده‌های میدانی و داده‌های TerraClimate اعتبارسنجی شد و دقت قابل توجهی در تخمین ذخیره کربن نشان داد. با این حال، عدم نظر گرفتن کربن مرده (DOC) و وابستگی به داده‌های ماهواره‌ای ممکن است تخمین‌ها را کمی محافظه‌کارانه کند (García-Ontiyuelo et al., 2024; Lai et al., 2016). این محدودیت اهمیت ترکیب داده‌های میدانی و ماهواره‌ای برای افزایش دقت مدل‌ها را نشان می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهد که سیاست‌های حفاظتی مانند کاهش تبدیل مراتع به مناطق شهری، احیای پوشش گیاهی و مدیریت هوشمند اراضی بایر می‌تواند تعادل کربن را حفظ کند. تمرکز بر مدیریت پایدار مراتع و کاهش فشارهای شهری، نه تنها ظرفیت ذخیره کربن را افزایش می‌دهد، بلکه موجب حفظ خدمات اکوسیستمی حیاتی و کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی می‌شود. این نتایج می‌تواند به سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان منطقه‌ای در تدوین راهکارهای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفظ منابع طبیعی کمک کند (Nelson et al., 2010; Sharp et al., 2018)

نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان داد که تغییرات کاربری و پوشش زمین (LULC) در منطقه سهرین تأثیر قابل توجهی بر ذخیره‌سازی کربن دارد. نتایج مدل‌سازی با استفاده از InVEST پیش‌بینی کرد که بدون مداخله مدیریتی، تا سال ۲۰۵۰ حدود ۶۰۰۰ تن کربن از دست خواهد رفت، که عمدتاً ناشی از تبدیل مراتع و زمین‌های کشاورزی به اراضی بایر و مناطق احداثی است. مراتع با تراکم بالای کربن آلی خاک، نقش اصلی در حفظ ذخیره کربن منطقه دارند و کاهش آن‌ها می‌تواند پیامدهای منفی قابل توجهی برای خدمات اکوسیستمی و تعادل اقلیمی منطقه ایجاد کند. تحلیل سناریوهای آینده نشان داد که اعمال سیاست‌های حفاظتی و مدیریت پایدار زمین، از جمله کاهش تبدیل مراتع به اراضی شهری، احیای پوشش گیاهی و مدیریت هوشمند اراضی بایر، می‌تواند روند کاهش ذخیره کربن را کاهش داده و حتی بهبود دهد. یافته‌ها همچنین تأکید می‌کنند که ادغام داده‌های میدانی و مدل‌های فضایی مانند InVEST، ابزاری قدرتمند برای برنامه‌ریزی منطقه‌ای و سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی است. به طور کلی، این مطالعه مرجعی برای مدیریت پایدار زمین در مناطق نیمه‌خشک ایران ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که اقدامات حفاظتی هدفمند و برنامه‌ریزی استراتژیک می‌تواند ظرفیت ذخیره کربن را حفظ کرده و اثرات منفی تغییرات اقلیمی و انسانی را کاهش دهد. مطالعات آینده می‌توانند با سناریوهای چندگانه و داده‌های دقیق‌تر، دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش دهند و راهکارهای مدیریتی بهینه‌تری ارائه کنند.

منابع

1. Aalde, H., Gonzalez, P., Gytarsky, M., Krug, T., Kurz, W. A., Lasco, R. D., Martino, D. L., Mcconkey, B. G., Ogle, S., & Paustian, K. (2006). Generic methodologies applicable to multiple land-use categories. *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*, 4, 1-59 .
2. Bai, Y., Ochuodho, T. O., & Yang, J. (2019). Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA. *Ecological Indicators*, 102, 51-64 .
3. Chen, W., Chi, G., & Li, J. (2019). The spatial association of ecosystem services with land use and land cover change at the county level in China, 1995–2015. *Science of the Total Environment*, 669, 459-470 .
4. Fu, Q., Li, B., Hou, Y., Bi, X., & Zhang, X. (2017). Effects of land use and climate change on ecosystem services in Central Asia's arid regions: a case study in Altay Prefecture, China. *Science of the Total Environment*, 607, 633-646 .
5. Gao, F., He, B., Xue, S., & Li, Y. (2020). Impact of landscape pattern change on runoff processes in catchment area of the Ulungur River Basin. *Water Supply*, 20(3), 1046-1058 .
6. García-Ontiyuelo, M., Acuña-Alonso, C., Valero, E., & Álvarez, X. (2024). Geospatial mapping of carbon estimates for forested areas using the InVEST model and Sentinel-2: A case study in Galicia (NW Spain). *Science of the Total Environment*, 922, 171297 .
7. Lai, L., Huang, X., Yang, H., Chuai, X., Zhang, M., Zhong, T., Chen, Z., Chen, Y., Wang, X., & Thompson, J. R. (2016). Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010. *Science Advances*, 2(11), e1601063 .
8. Langerwisch, F., Václavík, T., von Bloh, W., Vetter, T., & Thonicke, K. (2017). Combined effects of climate and land-use change on the provision of ecosystem services in rice agro-ecosystems. *Environmental Research Letters*, 13(1), 015003 .
9. Liang, J., Zhong, M., Zeng, G., Chen, G., Hua, S., Li, X., Yuan, Y., Wu, H., & Gao, X. (2017). Risk management for optimal land use planning integrating ecosystem services values: A case study in Changsha, Middle China. *Science of the Total Environment*, 579, 1675-1682 .
10. 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 .
11. 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 .
12. Nehrani, S. H., Askari, M. S., Saadat, S., Delavar, M. A., Taheri, M., & Holden, N. M. (2020). Quantification of soil quality under semi-arid agriculture in the northwest of Iran. *Ecological Indicators*, 108, 105770 .

13. Nelson, E., Sander, H., Hawthorne, P., Conte, M., Ennaanay, D., Wolny, S., Manson, S., & Polasky, S. (2010). Projecting global land-use change and its effect on ecosystem service provision and biodiversity with simple models. *PLoS one*, 5(12), e14327 .
14. Reid, W. V., Mooney, H. A., Cropper, A., Capistrano, D., Carpenter, S. R., Chopra, K., Dasgupta, P., Dietz, T., Duraiappah, A. K., & Hassan, R. (2005). *Ecosystems and human well-being-Synthesis: A report of the Millennium Ecosystem Assessment*. Island Press .
15. Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., Arkema, K., Bernhardt, J., & Bierbower, W. (2018). InVEST 3.6. 0 User's Guide. Collaborative Publication by The Natural Capital Project, Stanford University, the University of Minnesota, The Nature Conservancy, and the World Wildlife Fund. In *The Nature Conservancy, and the World Wildlife Fund*. Stanford University Stanford, CA .
16. Suescún, D., León, J. D., Villegas, J. C., García-Leoz, V., Correa-Londoño, G. A., & Flórez, C. P. (2019). ENSO and rainfall seasonality affect nutrient exchange in tropical mountain forests. *Ecohydrology*, 12(2), e2056 .
17. Vallet, A., Locatelli, B., Levrel, H., Wunder, S., Seppelt, R., Scholes, R. J., & Oszwald, J. (2018). Relationships between ecosystem services: comparing methods for assessing tradeoffs and synergies. *Ecological Economics*, 150, 96-106 .
18. Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38 .
19. Wang, Y., Liu, J., Zhang, L., Xue, Z., & Yang, Y. (2024). Projecting the response of carbon sink potential to land use/land cover change in ecologically fragile regions. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1380868 .
20. Yang, S., Li, L., Zhu, R., Luo, C., Lu, X., Sun, M., & Xu, B. (2024). Assessing land-use changes and carbon storage: A case study of the Jialing River Basin, China. *Scientific Reports*, 14(1), 15984 .
21. Yao, L., Yang, L., Chen, J., Wang, X., Xue, L., Li, W., Sui, X., Wen, L., Chi, J., & Zhu, Y. (2016). Characteristics of carbonaceous aerosols: Impact of biomass burning and secondary formation in summertime in a rural area of the North China Plain. *Science of the Total Environment*, 557, 520-530 .
22. Yasin, I., Ahmad, N., Amin, S., Sattar, N., & Hashmat, A. (2024). Does agriculture, forests, and energy consumption foster the carbon emissions and ecological footprint? fresh evidence from BRICS economies. *Environment, Development and Sustainability*, 1-21 .
23. Zambon, I., Cerdà, A., Gambella, F., Egidi, G., & Salvati, L. (2019). Industrial sprawl and residential housing: Exploring the interplay between local development and land-use change in the Valencian Community, Spain. *Land*, 8(10), 143 .
24. Zhang, Q., Song, C., & Chen, X. (2018). Effects of China's payment for ecosystem services programs on cropland abandonment: A case study in Tiantangzhai Township, Anhui, China. *Land use policy*, 73, 239-248 .
25. Zheng, H., & Zheng, H. (2023). Assessment and prediction of carbon storage based on land use/land cover dynamics in the coastal area of Shandong Province. *Ecological Indicators*, 153, 110474 .

Predictive Modeling of Regional Carbon Storage Dynamics in Response to Land Use/Cover Changes:**An Analysis Based on the InVEST Model**

Amir Hossein Masoumi Tabar Zanjani^{1*}, Mehran Misaghi², Mohammad Sadegh Askari³, Setareh Amanifar⁴

1- PhD Student, University of Zanjan. Department of Soil Science and Engineering * Masoumi.tabar@znu.ac.ir

2- PhD Student, University of Zanjan; Department of Soil Science and Engineering

3- Associate Professor, University of Zanjan, Department of Soil Science and Engineering

4 -Associate Professor, University of Zanjan, Department of Soil Science and Engineering

Abstract

Land use and land cover changes (LULC) are a key factor in carbon storage dynamics, playing a vital role in ecological balance and the reduction of greenhouse gas emissions. This study aimed to assess and predict changes in carbon storage in the Sohrein village area (western Zanjan province, Iran) using the InVEST model. The study area is characterized by a semi-arid climate, with dominant land uses including rangeland, agriculture, orchards, built-up areas, water bodies, and barren lands. Data for soil organic carbon (SOC), aboveground biomass (AGC), belowground biomass (UGC), and dead organic carbon (DOC) were determined through field sampling and laboratory analysis. The results showed that rangelands, with the highest carbon density, serve as the primary carbon sink in the region, while built-up areas and water surfaces have no carbon storage capacity. Future scenario modeling (until 2050) using the generate scenario tool in InVEST predicted an increase in the area of built-up lands from 50 to 61 hectares and barren lands from 1,358 to 1,630 hectares. These changes resulted in a 6,000-ton reduction in soil carbon stocks, primarily due to the conversion of rangelands and agricultural areas to urban and barren uses. The findings emphasize that conservation policies, such as controlling urbanization and restoring rangelands, can preserve carbon stocks. This study provides a valuable reference for sustainable land management in semi-arid regions and highlights the importance of integrating spatial models into environmental policymaking.

Keywords: Carbon storage, land use change, land cover change, InVEST model, biodiversity.