



Determining carbon storage content at different pools under various land uses in Miandoab region using remotely-sensed data and InVEST model

Bahman Veisi Nabikandi¹ | Farzin Shahbazi²

1. Corresponding Author, Landscape Architecture Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: bahmanveisi1400@ms.tabrizu.ac.ir

2. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: shahbazi@tabrizu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 02 June 2024

Received in revised form 02

August 2024

Accepted 08 August 2024

Published online 31 August

2024

Keywords:

Carbon storage,

Ecosystem services,

InVEST model,

Land use/Land cover,

Miandoab county.

ABSTRACT

Ecological spaces play a crucial role in addressing climate change and global warming with focusing on storing and capturing CO₂ from atmosphere. Consequently, quantifying and monitoring carbon storage content is the main step to toward achieving sustainable development goals. The main objective of this study is to develop a precise model for calculating carbon storage content at four pools i.e., aboveground carbon (AGC), belowground carbon (BGC), soil organic carbon (SOC) and dead organic carbon (DOC) under different land uses. For this, a site with an area extent about 243204 ha was selected from Miandoab region (West Azerbaijan Province) by the fact that it represents various land uses. Since application of integrated remotely-sensed data and novel technologies facilitates predictions as well as increases the modeling accuracy, the Google Earth Engine (GEE) platform and the InVEST model were implemented in preparing land use/land cover (LULC) maps and then carbon storage content. The prediction for 2023 showed that the total carbon storage in the aforementioned region would be approximately 11.52×10^6 ton. In addition, the detailed evaluations illustrated that the highest carbon storage content related to SOC and AGC as expected. A possible reason is that living mass is located on the surface. In terms of different land-uses without paying attention to their areas in themselves, the highest carbon storage content was for pasture, followed by tree cover, agriculture, urban area, water bodies and barren. Finally, it is concluded that applying the respective remote sensing data integrating with a suitable technique uncovers the impact of LULC changes on carbon storage with success.

Cite this article: Veisi Nabikandi, B., & Shahbazi, F. (2024). Determining carbon storage content at different pools under various land uses in Miandoab region using remotely-sensed data and InVEST model. *Journal of Natural Environment*, 77 (2), 241-253. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2024.377051.2677>



تعیین محتوی ذخیره کربن در مخزن های مختلف تحت کاربری های متفاوت در منطقه میاندوآب با استفاده از دورسنجی و مدل InVEST

بهمن ویسی نبی کندی^۱ | فرزین شهبازی^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: bahmanveisi1400@ms.tabrizu.ac.ir

۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: shahbazi@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	فضاهای اکولوژیک نقش اساسی در نمایش تغییر اقلیم و گرمایش جهانی با تأکید بر ذخیره و جذب CO ₂ از جو دارند. در نتیجه، کمی سازی و رصد محتوی کربن ذخیره شده گام اصلی در راستای رسیدن به اهداف توسعه پایدار می باشند. هدف اصلی این مطالعه، توسعه مدل دقیق برای محاسبه محتوی کربن ذخیره شده در چهار مخزن مختلف شامل زیست توده زنده بالای زمین (AGC)، زیست توده زنده زیر زمین (BGC)، کربن آلی خاک (SOC) و مواد آلی مرده (DOC) تحت کاربری های مختلف می باشد. بدین منظور، سایتی به مساحت تقریبی ۲۴۳۲۰۴ هکتار از منطقه میاندوآب واقع در استان آذربایجان غربی به دلیل داشتن کاربری های مختلف انتخاب گردید. با توجه به اینکه کاربرد تلفیقی داده های دورسنجی و فناوری های نوین ضمن تسهیل در پیش بینی ها دقت مدل سازی را نیز افزایش می دهد، بنابراین در این تحقیق سامانه تحت وب گوگل ارث انجین (GEE) و مدل InVEST برای تهیه نقشه کاربری و پوشش اراضی (LULC) و همچنین پیش بینی محتوی ذخیره کربن آلی مورد استفاده قرار گرفت. پیش بینی ها نشان داد که در سال ۲۰۲۳ حدود ۱۱/۵۲×۱۰ ^۶ تن کربن در محدوده مورد مطالعه ذخیره شده است. بررسی های تفصیلی نشان داد که بیشترین مقدار ذخیره کربن مربوط به مخزن SOC و سپس AGC می باشد و دلیل اصلی آن هم به فعالیت اغلب موجودات زنده در سطح خاک برمی گردد. از نظر کاربری های مختلف موجود در منطقه مورد مطالعه بدون مد نظر قرار دادن مساحت هر کدام از کاربری های موجود، بیشترین مقدار ذخیره کربن آلی مربوط به کاربری مرتع و سپس پوشش درختی، کشاورزی، مناطق شهری، پهنه های آبی و اراضی بایر است. در نهایت می توان نتیجه گرفت که کاربرد داده های دورسنجی و تلفیق آن ها با فناوری های مناسب، تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر محتوی ذخیره کربن را نیز با موفقیت آشکار می نماید.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۱۲	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۸	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰	
کلیدواژه ها: خدمات اکوسیستم، ذخیره کربن، شهرستان میاندوآب، کاربری اراضی، مدل InVEST	

استناد: ویسی نبی کندی، بهمن؛ و شهبازی، فرزین (۱۴۰۳). تعیین محتوی ذخیره کربن در مخزن های مختلف تحت کاربری های متفاوت در منطقه میاندوآب با استفاده از دورسنجی و مدل InVEST. محیط زیست طبیعی، ۷۷ (۲)، ۲۴۱-۲۵۳.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2024.377051.2677>



مقدمه

امروزه تغییر اقلیم و به دنبال آن گرمایش جهانی به یکی از مهم‌ترین تهدیدات محیط‌زیستی در جهان تبدیل شده است (Hassan and Nile, 2021). علی‌رغم افزایش تعهدات و اهداف برای مقابله با این چالش، سیاست‌های کنونی جهان را در مسیر گرمایش جهانی ۲/۷ درجه سلسیوس در پایان قرن اخیر قرار می‌دهند (Lenton et al., 2023; Tracker, 2021). در واقع امروزه جهان پیامدهای تغییرات اقلیمی را تجربه می‌کند که اثرات نامطلوبی بر معیشت، سلامت، اقتصاد و اکوسیستم‌ها وارد کرده است (Koech et al., 2020). انتشار مداوم گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسید کربن (CO₂) همگام با افزایش فعالیت‌های صنعتی و جمعیتی، به‌عنوان یکی از عوامل اصلی گرمایش جهانی شناخته شده است (Islam et al., 2020). به‌عبارتی دیگر، تخریب فضا‌های اکولوژیک همچون جنگل‌زدایی، تغییر کاربری اراضی و گسترش شهرنشینی، گرمایش جهانی را با سرعت هشداردهنده‌ای تسریع می‌کنند (Buditama et al., 2021). ترسیب کربن^۱ در اکوسیستم‌های مختلف زمین موجب کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم و متعاقباً افزایش بهبود خدمات اکوسیستم می‌گردد. بنابراین، تعیین محتوی ذخیره کربن^۲ مخزن‌های مختلف تحت کاربری‌های متفاوت در مدیریت فضا‌های اکولوژیک و توسعه کشاورزی پایدار مهم است (Li et al., 2023).

فضاهای اکولوژیک با جذب CO₂ و ترسیب کربن به‌عنوان مخازن کربن عمل نموده و نقش مهمی در کاهش گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کنند. این فضاها می‌توانند میلیاردها تن CO₂ را جذب و در مخزن‌های کربن ذخیره کنند. اکوسیستم‌های زمینی کربن بیشتری را در مقایسه با جو ذخیره می‌کنند و هوا را از غلظت بیش از حد CO₂ تمیز نگه می‌دارد (Eggleston et al., 2006). تحقیقات نشان داده است که کاربری‌های مختلف توانایی متفاوتی در فرآیند ذخیره کربن دارند. به‌عنوان مثال، جنگل‌های جوان در مقایسه با جنگل‌های قدیمی توانایی و ظرفیت بیشتری در ذخیره کربن دارند (Deng et al., 2011). در واقع، نوع کاربری و پوشش اراضی^۳ (LULC) و تغییرات آن، فرآیند جذب و ترسیب کربن را مختل کرده و منجر به انتشار مقدار قابل توجهی CO₂ در جو می‌شود. بنابراین، مدیریت و نظارت بر منظر و کاربری اراضی مختلف در ارزیابی تغییرات خدمات اکوسیستم مانند ذخیره و ترسیب کربن در راستای رسیدن به توسعه پایدار ضروری است (Koko et al., 2020; Wang et al., 2022). بدین منظور استفاده از داده‌های دورسنجی و تلفیق آن‌ها با فناوری‌های جدید و مناسب تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر محتوی ذخیره کربن را نیز با موفقیت آشکار می‌نماید (Babbar et al., 2021).

به‌طور کلی تخمین و پیش‌بینی ذخیره‌سازی کربن از دیرباز موضوع مهمی بوده است که نگرانی مشترکی برای محیط‌زیست و توسعه پایدار داشته است (Steger et al., 2019). پیش‌بینی محتوای ذخیره کربن عمدتاً براساس تحقیقات میدانی و آزمایشگاهی در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای صورت می‌گیرد (Wu et al., 2019). از آنجا که کشورهای در حال توسعه از یک طرف با کمبود اطلاعات و داده‌های غیرقابل دسترس مواجه هستند و از طرف دیگر چنین اقدامی نیاز به صرف زمان و هزینه بیشتر می‌باشد، بنابراین کاربرد داده‌های دورسنجی در مدل‌سازی پیش‌بینی ذخایر کربن می‌تواند مفید باشد (Imran and Din, 2021). در سال‌های اخیر، استفاده از سامانه تحت وب گوگل ارث انجین^۴ (GEE) همراه با ابزارهای برنامه‌نویسی کاربرپسند و الگوریتم‌های یادگیری ماشین^۵ (ML)، پیشرفت‌هایی در مدل‌سازی و پیش‌بینی‌ها حاصل کرده است (Abdi, 2020; Feizizadeh et al., 2021). سامانه مذکور از الگوریتم‌های متنوعی جهت طبقه‌بندی پیکسل‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای استفاده کرده و نقشه‌های LULC با دسته‌بندی متنوعی را در طول زمان و مکان تهیه می‌کنند (Yao et al., 2022). بررسی‌های منابع نشان می‌دهد که مدل ارزش‌گذاری یکپارچه خدمات اکوسیستم و مبادلات (InVEST) همراه با داده‌های دورسنجی برای پیش‌بینی محتوی ذخیره کربن به‌وفور مورد استفاده قرار گرفته است.

به‌طور کلی محتوی ذخیره کربن در چهار مخزن موجود در سطح زمین قابل کمی‌سازی می‌باشد (Sil et al., 2017) و مدل

¹Carbon Sequestration

²Carbon Storage

³Land Use/Land Cover

⁴Google Earth Engine

⁵Machine Learning

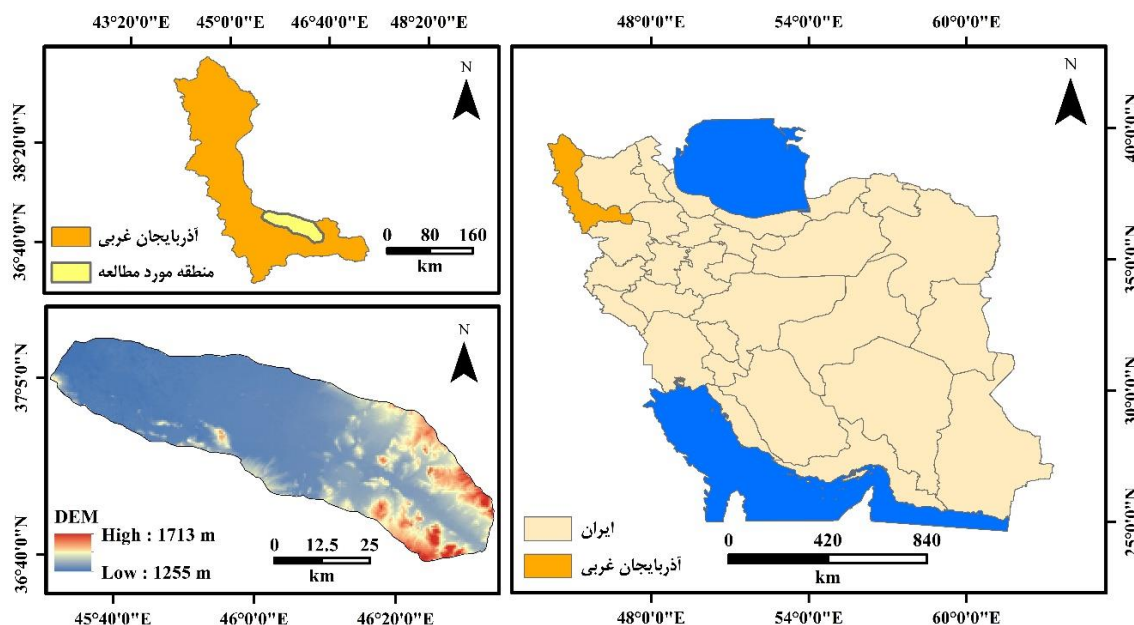
کربن InVEST می‌تواند آن را در مخازن زیست‌توده زنده بالای زمین (AGC)، زیست‌توده زنده زیر زمین (BGC)، کربن آلی خاک (SOC) و مواد آلی مرده (DOC) براساس داده‌های LULC شبیه‌سازی کند (Zhao et al., 2018). علی‌رغم اینکه فرآیند ترسیب و انتشار کربن به‌طور قطع در مدل مذکور مد نظر قرار نگرفته است، ولی مدل InVEST می‌تواند به‌طور قابل اعتمادی محتوی کربن ذخیره شده را پیش‌بینی کند. یکی از مزایای مدل مذکور این است که اجرای آن به داده‌های ورودی کمتری نیاز داشته و خروجی‌های متنوعی نیز در مقایسه با سایر مدل‌ها ارائه نموده و به‌طور گسترده برای تعیین کمیت خدمات اکوسیستم استفاده می‌شود (Jiang et al., 2017). ارزیابی محتوی ذخیره کربن با استفاده از مدل مذکور در مناطق مختلفی از جهان مانند مراکش (Rachid et al., 2024)، هندوستان (Babbar et al., 2021) و بریتانیا (Grafius et al., 2016) انجام شده است. در ایران نیز چنین ارزیابی‌هایی طی چندین پژوهش صورت گرفته است (Zarandian et al., 2018; Lahiji et al., 2020; Sadat et al., 2020; Adelisardou et al., 2022; Kohestani et al., 2023) که بیشتر مربوط به شمال کشور و حوزه‌های آبخیز بوده است. انجام تحقیق در مناطق مهم کشاورزی و شهری شهرستان میاندوآب که دارای تنوع زیادی به‌لحاظ کاربری اراضی می‌باشد بیش از پیش محسوس بوده و با این روش می‌توان محتوی ذخیره کربن تحت کاربری‌های مختلف را برای چهار مخزن AGC، BGC، SOC و DOC تعیین نمود.

بررسی منابع نشان می‌دهد که اغلب تحقیقات در مقیاس جهانی مربوط به حوزه‌های آبخیز و مناطق حفاظت‌شده بوده و ندرتاً شامل مطالعات در محدوده‌های شهری است (Von Thaden et al., 2024) که این موضوع در ایران به‌طور چشم‌گیرتری مشاهده می‌شود. علاوه بر این، اغلب تحقیقات انجام شده با استفاده از مدل InVEST تأثیر تغییرات کاربری و پوشش اراضی را بر ذخیره و ترسیب کربن ارزیابی کرده و تفاوت بین مخزن‌های کربن و کاربری‌های مختلف به‌طور همزمان مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. بنابراین، به‌طور ویژه، هدف اصلی این تحقیق را می‌توان به کاربرد مدل کربن InVEST در تعیین محتوی ذخیره کربن چهار مخزن AGC، BGC، SOC و DOC تحت کاربری‌های مناطق شهری، کشاورزی، پوشش درختی، مرتع، اراضی بایر و پهنه‌های آبی واقع در شهرستان میاندوآب نسبت داد که تاکنون مطالعه‌ای در این سطح در منطقه مذکور انجام نگرفته است و نوآوری این تحقیق محسوب می‌شود.

روش‌شناسی پژوهش

محدوده مورد مطالعه: این منطقه در محدوده‌ای از اراضی شهرستان میاندوآب با وسعتی حدود ۲۴۳۲/۰۴ کیلومتر مربع (km²) انجام گرفته است. از نظر مختصات جغرافیایی، محدوده مورد مطالعه در طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۳۰ دقیقه و ۳۶ ثانیه تا ۴۶ درجه و ۳۳ دقیقه و ۳۶ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۸ دقیقه و ۲۴ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۱۰ دقیقه و ۱۲ ثانیه شمالی و در استان آذربایجان غربی واقع شده است (شکل ۱). به‌دلیل مجاورت محدوده مورد مطالعه با دریاچه ارومیه و رودخانه‌های زربینه‌رود و سیمینه‌رود، ویژگی توپوگرافی و اقلیمی منحصر به‌فردی به این منطقه بخشیده و از نظر کاربری اراضی نیز دارای تنوع زیادی می‌باشد. یکی از دلایل انتخاب محدوده مورد مطالعه برای انجام این تحقیق آن است که اراضی مذکور به‌دلیل نزدیکی به دریاچه ارومیه و دو رودخانه مهم مجاور آن دارای پتانسیل بالای زیستی و اکولوژیک می‌باشد و ممکن است نزدیکی آن‌ها به محدوده مورد مطالعه به‌دلیل خشکسالی و تغییرات اقلیمی اخیر و بروز آلودگی‌های احتمالی چالش‌هایی را ایجاد کند. دلیل بعدی انتخاب محدوده مورد مطالعه به رشد جمعیت و گسترش فعالیت‌های انسانی برمی‌گردد که این اراضی به‌دلیل دارا بودن خاک و شرایط اقلیمی مناسب به‌عنوان یک منطقه توسعه‌یافته شناخته شده و اغلب مساحت آن را اراضی ناشی از فعالیت‌های انسانی^۶ مانند اراضی کشاورزی و مناطق شهری اشغال کرده است (Alemohammad et al., 2024). بنابراین، محدوده مورد مطالعه به‌عنوان یک اکوسیستم آسیب‌پذیر شناخته شده و در این تحقیق سعی می‌شود تا محتوی ذخیره کربن در مخزن‌های مختلف تحت کاربری‌های متفاوت تعیین گردد.

^۶Anthropogenic Activities



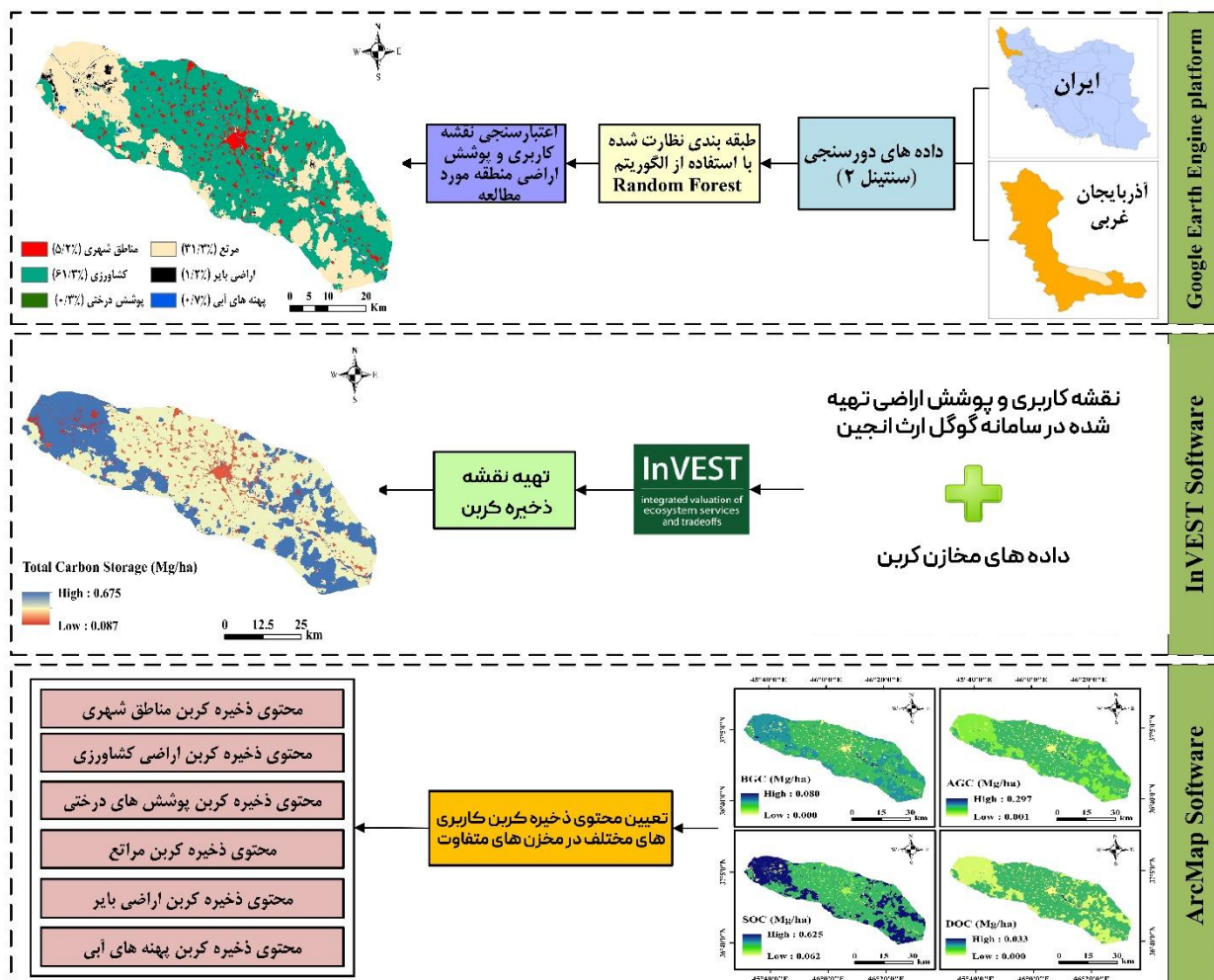
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه در ایران و استان آذربایجان غربی

نمودار جریان‌ی تحقیق: شکل ۲ نمودار جریان‌ی تحقیق را نشان می‌دهد که به کمک آن تجسم فرآیند به زبان ساده تسهیل می‌گردد. در گام اول این تحقیق با استفاده از داده‌های دورسنجی نقشه LULC منطقه مورد مطالعه برای سال ۲۰۲۳ تهیه می‌شود. در گام دوم با بکارگیری مدل InVEST نقشه کل ذخیره کربن با استفاده از LULC تهیه شده از گام قبلی و داده‌های مورد نیاز مستخرج از مطالعات مشابه پیش‌بینی می‌شود. در گام نهایی، محتوی کربن ذخیره شده تحت هر یک از کاربری‌های موجود (مناطق شهری، کشاورزی، پوشش درختی، مرتع، اراضی بایر و پهناهای آبی) برای هر چهار مخزن کربن (AGC, BGC, SOC و DOC) در کل منطقه محاسبه شد. به‌طور خلاصه با انجام این تحقیق می‌توان به نقش تلفیق داده‌های دورسنجی و فناوری‌های نوین در تعیین خدمات اکوسیستم اشاره نمود.

جمع‌آوری داده‌ها: به‌منظور تهیه نقشه LULC ابتدا داده‌های ماهواره سنتینل-۲ مربوط به سال ۲۰۲۳ در GEE تهیه شد. دلیل اصلی استفاده از تصویر ماهواره سنتینل-۲ این است که تصویر مذکور مشتمل بر تصاویر چندطیفی است و مشاهداتی با وضوح بالا از سطح زمین ارائه می‌دهد. داده‌ها از طریق مرکز دسترسی باز کوپرنیک (<https://scihub.copernicus.eu>) با استفاده از GEE قابل دسترس هستند. با توجه به رویکرد اصلی این تحقیق که تمرکز آن بر روی تعیین محتوی کربن در چهار مخزن تحت کاربری‌های مختلف می‌باشد، بنابراین تصویر سنتینل-۲ مربوط به سال ۲۰۲۳ که تمامی محدوده مورد مطالعه را پوشش می‌دهد، تهیه شد. دلیل اصلی تهیه یک تصویر آن است که نیازی به تحلیل سری‌های زمانی و پیش‌بینی یا پس‌بینی نبوده است. همچنین، دلیل اصلی انتخاب تصویر مربوطه برای فصل تابستان نیز به پوشش ابرناکی آن برمی‌گردد که در این تحقیق نقشه با پوشش ابرناکی کمتر از ۵ درصد و پوشش گیاهی با وضوح بهتر در راستای ارزیابی و طبقه‌بندی دقیق‌تر برای فصل تابستان سال ۲۰۲۳ حاصل شد.

تهیه نقشه کاربری و پوشش اراضی: به‌منظور تهیه نقشه LULC مربوط به سال ۲۰۲۳ با استفاده از تصویر تهیه شده به‌عنوان پایه، از روش نمونه‌برداری نظارت شده و الگوریتم جنگل تصادفی^۷ (RF) در طبقه‌بندی استفاده شد. RF به‌عنوان یکی از الگوریتم‌های ML می‌تواند نقشه‌های قابل اعتماد و مؤثری را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در GEE ایجاد کند (Choubin *et al.*, 2019). این الگوریتم یکی از پرکاربردترین روش‌ها جهت ایجاد LULC معرفی شده است (Kalacska *et al.*, 2020) که در تحقیق حاضر نیز مورد استفاده قرار گرفته است. نقشه‌های LULC تهیه شده با روش RF در استخراج اطلاعات ارزشمند به‌منظور بررسی‌های تغییرات محیطی، برنامه‌ریزی و رشد شهری، پویایی پوشش گیاهی و سایر کاربردها به‌وفور مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

⁷Random Forest



شکل ۲- نمودار کلی جریان تحقیق

متقابلاً تلفیق اطلاعات مستخرج از تصاویر با فناوری‌های نوین تجزیه و تحلیل پیشرفته، موجب تسهیل در آمایش سرزمین و مدیریت پایدار منابع می‌گردد (Zhao *et al.*, 2024). براساس پیشنهاد Floreano و de Moraes (۲۰۲۱) مبنی بر طبقه‌بندی کلی‌تر، انواع کاربری اراضی در این تحقیق به شش دسته اصلی شامل مناطق شهری، کشاورزی، پوشش درختی، مرتع، اراضی بایر و پهناهای آبی طبقه‌بندی گردید.

اعتبارسنجی نقشه کاربری و پوشش اراضی: ارزیابی صحت و دقت نقشه LULC مستلزم مقایسه نقشه طبقه‌بندی شده با نقشه‌ها و داده‌های واقعی زمینی مانند گوگل ارث است (Tilahun and Teferie, 2015). این مقایسه یک ارزیابی دقیق از عملکرد طبقه‌بندی را با برجسته کردن مناطق درست و اشتباه بین دو مجموعه داده ارائه می‌کند. بدین منظور از سه معیار دقت کلی^۸، دقت کاربر^۹ و ضریب کاپا^{۱۰} در تجزیه و تحلیل‌ها استفاده گردید (Waikhom *et al.*, 2023). بدیهی است که هر کدام از موارد مذکور برای ارزیابی دقت نتایج طبقه‌بندی LULC ضروری می‌باشد و اطلاعات کامل‌تری در مورد عملکرد الگوریتم طبقه‌بندی ارائه می‌کند (Patel *et al.*, 2024). رابطه‌های ۱ تا ۳ نحوه محاسبه هر سه معیار مذکور را نشان می‌دهد (Congalton and Green, 2019):

⁸Overall Accuracy

⁹User Accuracy

¹⁰Kappa Coefficient

$$\text{Overall Accuracy} = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^r n_{ii} \quad 1$$

$$\text{Kappa Coefficient} = \frac{n \sum_{i=1}^r n_{ii} - \sum_{i=1}^r n_{i+n+1}}{n^2 - \sum_{i=1}^r n_{irow} n_{icolumn}} \quad 2$$

$$\text{User Accuracy} = \frac{n_{ii}}{n_{irow}} \quad 3$$

که در روابط مذکور، N تعداد کل پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی شده در نقشه واقعی، r تعداد کلاس‌های کاربری اراضی و n_{ii} اعضای قطری ماتریس درهم‌ریختگی، n تعداد کل پیکسل‌های صحیح، n_{irow} مجموع عناصر سطر نام و $n_{icolumn}$ مجموع عناصر ستون نام می‌باشد.

کاربرد مدل کربن InVEST: در این تحقیق به منظور تهیه نقشه‌های ذخیره کربن در مخازن مختلف تحت کاربری‌های متفاوت که به نوعی اشاره به بررسی‌های خدمات اکوسیستم در محدوده مورد مطالعه می‌باشد، از مدل کربن InVEST استفاده گردید. علی‌رغم وجود طیف وسیعی از فناوری‌های نقشه‌برداری مانند InFOREST یا CITYgreen، در این تحقیق از مدل کربن InVEST استفاده گردید که دلیل اصلی آن را می‌توان به مزیت بالای آن در تجزیه و تحلیل خدمات اکوسیستم با استفاده از تعداد داده‌های ورودی محدود نسبت داد (Rachid et al., 2024) که به تصمیم‌گیران راهکار مشخصی از نحوه مطالعات خدمات اکوسیستم می‌دهد (Li et al., 2021). با این وجود، توجه به این نکته ضروری است که تجزیه و تحلیل داده‌ها و پردازش نهایی نیاز به کاربرد یک تکنیک سیستماتیک مبتنی بر GIS دارد. تعیین محتوی ذخیره کربن در سال ۲۰۲۳ در منطقه مورد مطالعه نیاز به تجزیه و تحلیل محتوی کربن در حداقل یکی از چهار مخزن AGC، BGC، SOC و DOC دارد که از رابطه‌های ۴ و ۵ استفاده گردید (Jiang et al., 2017):

$$C = AGC + BGC + SOC + DOC \quad 4$$

$$C_{total} = \sum_{k=1}^n A_k \times C_k, (k = 1, 2, \dots, n) \quad 5$$

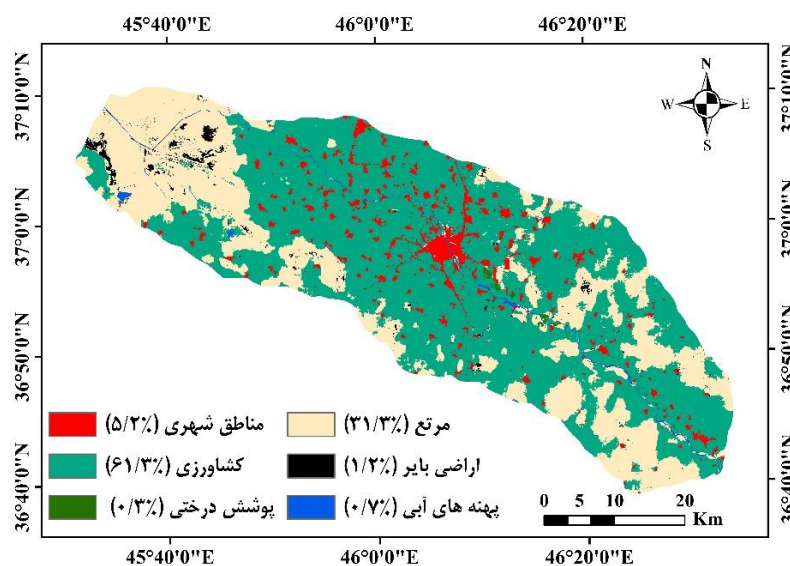
که در آن، C_k مقدار کل ذخیره کربن در واحد سطح هر نوع کاربری زمین، A_k مساحت هر نوع کاربری زمین و C_{total} محتوی کل ذخیره کربن در هر LULC است (Li et al., 2021). داده‌های ورودی مخازن کربن برای هر مخزن را می‌توان از مطالعات میدانی، استخراج شده از متاآنالیز بر روی انواع زیستگاه‌ها یا مناطق خاص و یا در منابع علمی منتشر شده یافت. در این تحقیق به دلیل عدم دسترسی به داده‌های مخزن کربن مربوط به محدوده مورد مطالعه، از میانگین میزان ذخیره کربن کاربری‌های مختلف با تمرکز بر پژوهش‌های صورت گرفته در ایران و جهان به دلیل اقلیم و عرض جغرافیایی مشابه استفاده شد (Ma et al., 2019; Sadat et al., 2020; Li et al., 2021; Adelisardou et al., 2022; Wang et al., 2022) که مقادیر آن‌ها در جدول ۱ تنظیم شده است. لازم به ذکر است که هیچ تحقیقی که منحصراً به ظرفیت مخازن کربن در منطقه میان‌دوآب پرداخته باشد در دسترس نیست و ورودی‌های استفاده شده در این پژوهش بر روی مطالعات قبلی که دارای ویژگی‌های اقلیمی و عرض جغرافیایی مشابه است، متکی است. روندی که در پژوهش Rachid و همکاران (۲۰۲۴) نیز برای مراکش استفاده شده است.

جدول ۱- چگالی کربن هر نوع پوشش زمین مورد استفاده در مدل InVEST (بر حسب مگاگرم بر هکتار)

نوع کاربری و پوشش اراضی	کربن بالای زمین (AGC)	کربن زیر زمین (BGC)	کربن آلی خاک (SOC)	کربن مرده (DOC)
مناطق شهری	۰/۱۰	۰/۰۰	۱۴/۷۷	۰/۰۰
کشاورزی	۳/۶۲	۲/۶۱	۳۴/۲۴	۰/۵۰
پوشش‌های درختی	۲۹/۶۷	۷/۹۵	۲۶/۳۴	۳/۲۸
مرتع	۱/۶۴	۳/۲۸	۶۲/۴۸	۰/۰۷
اراضی بایر	۰/۶۱	۰/۴۷	۷/۷۰	۰/۰۰
پهنه‌های آبی	۰/۸۴	۵/۹۸	۶/۲۵	۰/۰۰

یافته‌های پژوهش

نقشه کاربری و پوشش اراضی: نقشه LULC تهیه شده برای سال ۲۰۲۳ با استفاده از الگوریتم RF در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که محدوده مورد مطالعه به‌عنوان یک منطقه توسعه یافته محسوب می‌شود که کاربری کشاورزی بخش بزرگی از آن را شامل می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که مساحت اراضی کشاورزی حدود ۱۴۹۱/۲۵ کیلومترمربع می‌باشد و ۶۱/۳ درصد از کل وسعت منطقه را به‌خود اختصاص می‌دهد. در مرتبه بعدی نیز کاربری‌های مرتع با ۷۶۱/۹۵ کیلومترمربع (۳۱/۳ درصد) و مناطق شهری با ۱۲۷/۳۴ کیلومترمربع (۵/۲ درصد) از لحاظ مساحت تعیین شدند که اغلب در قسمت‌های مرکزی محدوده مورد مطالعه شامل شهرستان میاندوآب و روستاهای مجاور قرار دارند. اراضی بایر، پهنه‌های آبی و پوشش‌های درختی نیز به ترتیب با ۲۹/۷۰، ۱۵/۹۸ و ۵/۸۳ کیلومترمربع و در مجموع کم‌تر از ۵ درصد وسعت منطقه را به‌خود اختصاص دادند.

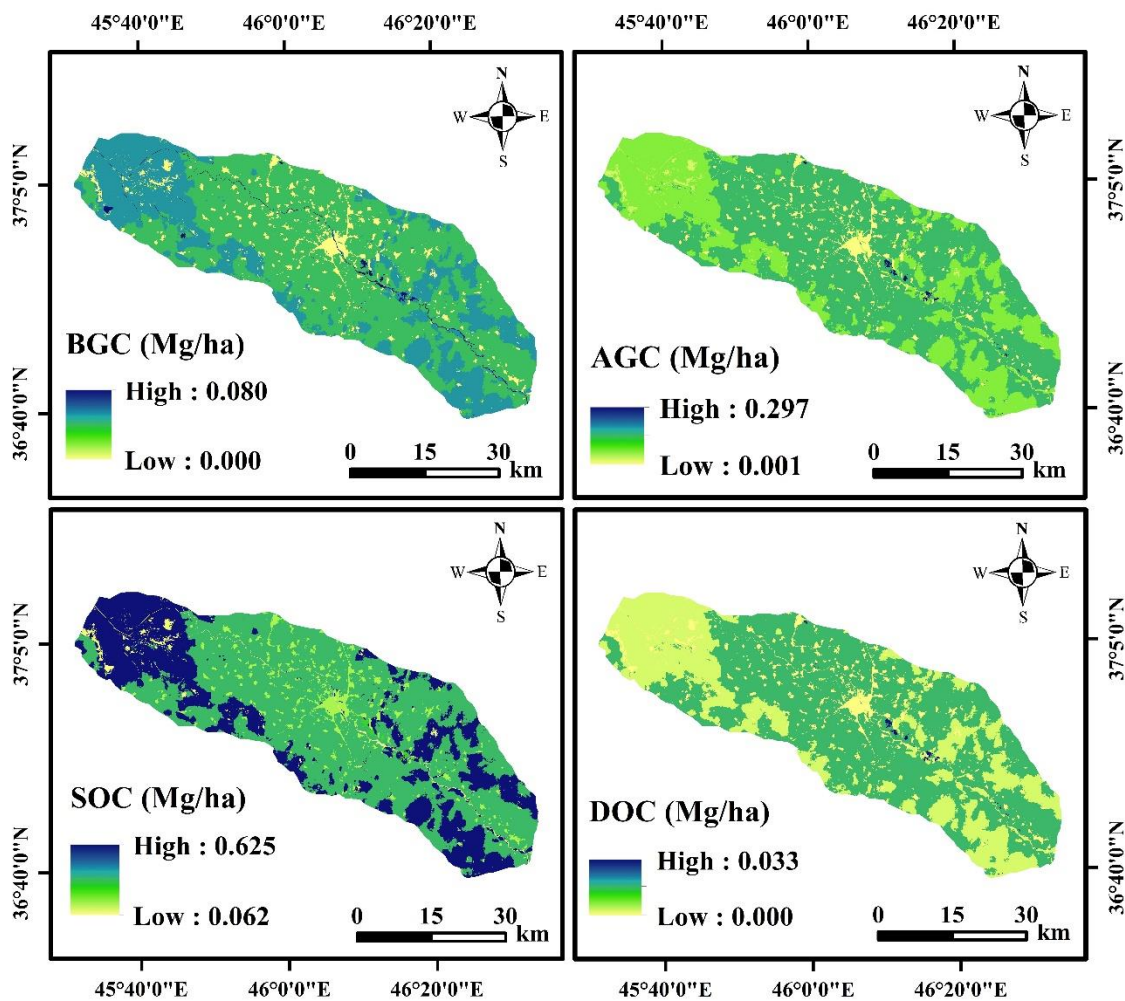


ارزیابی دقت نقشه کاربری و پوشش اراضی: طبقه‌بندی دقیق نقشه LULC برای توسعه و ارزیابی دقیق مدل کربن InVEST ضروری است. جهت ارزیابی دقت نقشه LULC حاصل از GEE، ۴۷۶ نمونه انتخاب شد. تعداد نمونه‌های برداشت شده از کل منطقه برای هر کدام از کاربری‌های موجود متناسب با مساحت پهنه آنها متفاوت می‌باشد که در جدول ۲ نشان داده شده است. شاخص کاپا و دقت کلی نقشه نهایی LULC به ترتیب ۰/۸۶ و ۸۸٪ به دست آمد که نشان‌دهنده نوع دقیق از طبقه‌بندی می‌باشد. دقت کلی طبقه‌بندی با مقادیر بزرگ‌تر از ۸۵٪ نشان می‌دهد که طبقه‌بندی بسیار دقیق بوده است (Kafy et al., 2023). بررسی‌های جزئی نتایج تحقیق نیز حاکی از آن است که طبقه‌بندی اراضی با کاربری‌های مناطق شهری و کشاورزی به ترتیب با ۰/۹۲ و ۰/۹۰ بالاترین دقت را داشتند ولی اراضی بایر و پهنه‌های آبی به ترتیب با ۰/۸۵ و ۰/۸۲ کم‌ترین دقت را به‌خود اختصاص دادند.

جدول ۲- ارزیابی دقت نقشه کاربری و پوشش اراضی تهیه شده براساس کاربری‌های مختلف موجود در منطقه مورد مطالعه

نوع کاربری و پوشش اراضی	مناطق شهری	کشاورزی	پوشش‌های درختی	مرتع	اراضی بایر	پهنه‌های آبی	مجموع	دقت کاربر
مناطق شهری	۸۳	۱	۴	۰	۲	۰	۹۰	۰/۹۲
کشاورزی	۴	۱۰۷	۷	۰	۰	۰	۱۱۸	۰/۹۰
پوشش‌های درختی	۰	۲	۴۴	۱	۳	۰	۵۰	۰/۸۸
مرتع	۳	۵	۰	۷۶	۰	۱	۸۵	۰/۸۹
اراضی بایر	۲	۵	۱	۰	۶۰	۲	۷۰	۰/۸۵
پهنه‌های آبی	۲	۴	۳	۰	۲	۵۲	۶۳	۰/۸۲
مجموع	۹۴	۱۲۴	۵۹	۷۷	۶۷	۵۵	۴۷۶	دقت شاخص کلی ۰/۸۸

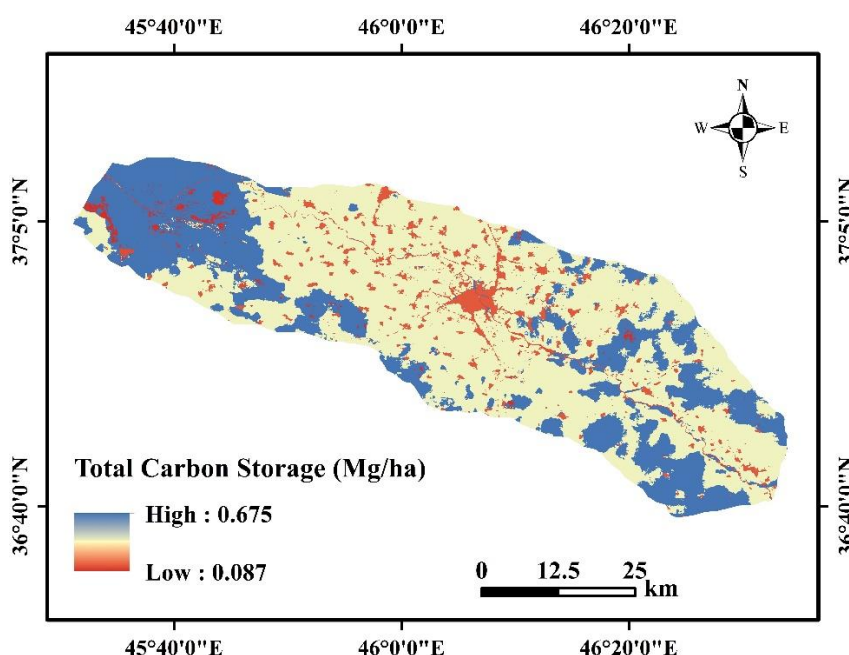
پیش‌بینی محتوی ذخیره کربن: در مرحله اول مقدار کربن ذخیره شده برای هرکدام از مخازن موجود (SOC, BGC, AGC) و (DOC) محاسبه و نتایج نشان داد که بیشترین محتوی ذخیره کربن برای SOC با ۱۰۱۰۲۶۰۹ مگاگرم و سپس AGC, BGC و DOC است که به ترتیب دارای ۶۸۶۴۹۰، ۶۵۴۶۹۴ و ۸۱۸۰۵ مگاگرم کربن است (شکل ۴). با توجه به اینکه پوشش غالب منطقه مورد مطالعه شامل کاربری‌های کشاورزی و مرتع است و ظرفیت بالایی در جذب کربن دارند، بنابراین کسب نتیجه مذکور منطقی است.



شکل ۴- پراکنش مکانی محتوی ذخیره کربن برای چهار مخزن در منطقه مورد مطالعه

در مرحله بعدی این تحقیق، محتوی ذخیره کل کربن با استفاده از مدل کربن InVEST در سراسر منطقه مورد مطالعه براساس هر یک از کاربری‌های اراضی مستخرج از نقشه LULC محاسبه و پراکنش مکانی آن‌ها در شکل ۵ نمایش داده شد. بر این اساس، همان‌طور که انتظار می‌رفت قسمت‌های مرکزی منطقه مورد مطالعه که عمدتاً مشتمل بر مناطق شهری (شهرستان میاندوآب) بوده و تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار دارد دارای کمترین مقدار ذخیره کربن است. به‌طور کلی کاربرد مدل مذکور، مقدار محتوی کل کربن ذخیره شده سراسر منطقه مورد مطالعه را حدود ۱۱/۵۲ میلیون تن پیش‌بینی می‌کند.

در نهایت، به تفکیک هر یک از کاربری‌های موجود در محدوده مورد مطالعه محتوی کربن تعیین گردید که نتایج آن در جدول ۳ خلاصه شده است. بر این اساس، بیشترین مقدار جذب کربن مربوط به کاربری کشاورزی (۶۱۰۹۵۵۱ مگاگرم) و سپس مرتع (۵۱۴۰۵۶۵ مگاگرم) می‌باشد. ارزش کل ذخیره کربن کاربری پوشش‌های درختی ناچیز می‌باشد که دلیل اصلی این یافته را می‌توان به پایین بودن مساحت کاربری پوشش درختی نسبت داد. اراضی بایر و پهناهای آبی نیز به‌ترتیب با ۲۶۰۶۵ و ۲۰۸۷۹ مگاگرم ذخیره کربن دارای کمترین ارزش در جذب کربن در محدوده مورد مطالعه می‌باشد.



شکل ۵- پراکنش مکانی محتوی کربن کل ذخیره شده در محدوده مورد مطالعه

جدول ۳- مقادیر ذخیره کربن در چهار مخزن تحت کاربری‌های مختلف (بر حسب Mg)

ذخیره کل کربن	کربن مرده (DOC)	کربن آلی خاک (SOC)	کربن زیر زمین (BGC)	کربن بالای زمین (AGC)	نوع کاربری و پوشش اراضی
۱۸۹،۳۵۹/۰۲	۰/۰۰	۱۸۸،۰۸۵/۵۴	۰/۰۰	۱،۲۷۳/۴۸	مناطق شهری
۶،۱۰۹،۵۵۱/۶۹	۷۴،۵۶۱/۲۸	۵،۱۰۵،۹۵۶/۸۲	۳۸۹،۲۰۹/۸۹	۵۳۹،۸۲۳/۷۰	کشاورزی
۳۹،۱۸۰/۰۷	۱،۹۱۱/۲۲	۱۵،۳۴۸/۰۵	۴۶۳۲/۳۹	۱۷،۲۸۸/۴۱	پوشش‌های درختی
۵،۱۴۰،۵۶۵/۲۹	۵،۳۳۳/۳۴	۴،۷۶۰،۳۷۵/۲۰	۲۴۹،۹۰۴/۴۷	۱۲۴،۹۵۲/۲۸	مرتع
۲۶،۰۶۵/۹۷	۰/۰۰	۲۲،۸۵۹/۶۸	۱،۳۹۵/۳۳	۱،۸۱۰/۹۶	اراضی بایر
۲۰،۸۷۹/۲۱	۰/۰۰	۹،۹۸۴/۴۷	۹،۵۵۲/۸۴	۱،۳۴۱/۹۰	پهناهای آبی
۱۱،۵۲۵،۶۰۰/۹۰	۸۱،۸۰۵/۸۴	۱۰،۱۰۲،۶۰۹/۸۰	۶۵۴،۶۹۴/۵۶	۶۸۶،۴۹۰/۷۳	مجموع

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تعیین محتوی ذخیره کربن در منطقه میان‌دوآب واقع در استان آذربایجان غربی و تحلیلی جامع از محتوی ذخیره کربن در چهار مخزن AGC، BGC، SOC و DOC تحت شش نوع کاربری مختلف مرتع، پوشش درختی، کشاورزی، مناطق شهری، پهنه‌های آبی و اراضی بایر انجام گرفت. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد سامانه تحت وب گوگل ارث انجین (GEE) دقت زیادی در تهیه نقشه LULC محدوده مورد مطالعه دارد و هم‌راستایی بیشتری با نتایج تحقیقات Feizizadeh و همکاران (۲۰۲۳) دارد. همچنین براساس نتایج، مشاهده می‌شود که مدل کربن InVEST نیز با موفقیت و قابلیت زیادی برای پیش‌بینی محتوی کربن آلی ذخیره شده در چهار مخزن مذکور دارد و مؤید تحقیقات انجام گرفته توسط Li و همکاران (۲۰۲۱) در شهرستان هویزینگ چین است که مؤثر بودن مدل InVEST در مقیاس محلی و حتی بزرگ‌تر جهت پیش‌بینی محتوی کربن در چهار مخزن را نشان می‌دهد. نتایج تحقیق حاضر که مقدار کربن ذخیره شده در مخزن SOC را حدود ۸۷/۷ درصد به‌عنوان بیشترین مخزن در بین سایر مخازن معرفی کرده است با یافته‌های Li و همکاران (۲۰۲۱) در چین مطابقت دارد. یکی از دلایل اصلی این یافته نیز آن است که اقلیم و عرض جغرافیایی در محتوی کربن ذخیره شده تأثیر زیادی دارد. نقش تغییر اقلیم در مدیریت کربن خاک به‌طور مفصل توسط Lal (۲۰۱۳) گزارش شده است. همچنین، این تحقیق بر نقش مهم فناوری دورسنجی و سیستم اطلاعات جغرافیایی در پایش ذخیره کربن چهار مخزن تحت کاربری‌های مختلف را به‌ویژه در مناطقی که با کمبود داده مواجه هستند، تأکید می‌کند. تلفیق داده‌های دورسنجی با نتایج مدل کربن InVEST به‌عنوان یک رویکرد نوین در تجزیه و تحلیل خدمات اکوسیستم نشان داده می‌شود. بنابراین می‌توان اذعان داشت که استفاده از فناوری‌های نوین و داده‌های با دقت بالاتر مانند ماهواره سنتینل می‌تواند محتوی کربن ذخیره شده در اکوسیستم را با احتمال دقیق‌تری پیش‌بینی کند. دلیل اصلی این یافته را می‌توان به مقادیر صحت‌یابی و شاخص کاپا در تهیه نقشه LULC منطقه مورد مطالعه مربوط به سال ۲۰۲۳ نسبت داد. یکی از مزایای انجام این تحقیق آن است که راهکاری برای انجام مطالعات مشابه بدون صرف هزینه و زمان زیاد را به روی متخصصین و کاربران مختلف باز کرده تا در آینده بتوانند اقدامات مهمی در پایش کربن ذخیره شده تحت کاربری‌های مختلف و متعاقباً بررسی اثرات تغییر اقلیم در ترسیب کربن داشته باشند. به‌عنوان مثال Jha و همکاران (۲۰۱۲) با پایش تغییرات کربن خاک تحت کاربری‌های مختلف کشاورزی، جنگل و باغبانی در کشور هندوستان به اهمیت مخزن‌های کربن بر اهمیت شیوه‌های مدیریت توسعه پایدار محیط‌زیستی اشاره داشتند. در پایان می‌توان نتیجه گرفت که خروجی‌های مدل‌های ایجاد شده با استفاده از داده‌های منطقه‌ای را به مقیاس‌های ناحیه‌ای و ملی تعمیم داده تا با صرف هزینه‌های کم‌تر برنامه‌ریزی استفاده بهینه از اراضی در راستای توسعه کشاورزی پایدار فراهم گردد.

References

- Abdi, A.M., 2020. Land cover and land use classification performance of machine learning algorithms in a boreal landscape using Sentinel-2 data. *GIS Science & Remote Sensing* 57, 1-20.
- Adelisdardou, 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, 5929-5944.
- Alemohammad, S., Nasehi, S., Alemohammad, A.A., Ramezani Mehrian, M., Farhadi, R., 2024. Spatial analysis of urban sprawling with an emphasis on ecological infrastructure integrity (Case study: Miandoab City). *Environmental Energy and Economic Research* 8, 1-16.
- Babbar, D., Arendran, 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, e123333.
- Buditama, G., Saiya, H.G., Putri, N.P., 2021. Effects of climate change on dryland agriculture vegetation index in Nangapanda, East Nusa Tenggara. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 716, e012013.
- Choubin, B., Rahmati, O., Soleimani, F., Alilou, H., Moradi, E., Alamdari, N., 2019. Regional groundwater potential analysis using classification and regression trees. In *Spatial modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences* pp. 485-498.

- Congalton, R.G., Green, K., 2019. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. CRC press.
- Deng, S., Shi, Y., Jin, Y., Wang, L., 2011. A GIS-based approach for quantifying and mapping carbon sink and stock values of forest ecosystem: A case study. *Energy Procedia* 5, 1535-1545.
- Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K., 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- Feizizadeh, B., Mohammadzade Alajujeh, K., Lakes, T., Blaschke, T., Omarzadeh, D., 2021. A comparison of the integrated fuzzy object-based deep learning approach and three machine learning techniques for land use/cover change monitoring and environmental impacts assessment. *GIScience & Remote Sensing* 58, 1543-1570.
- Feizizadeh, B., Omarzadeh, D., Kazemi Garajeh, M., Lakes, T., Blaschke, T., 2023. Machine learning data-driven approaches for land use/cover mapping and trend analysis using Google Earth Engine. *Journal of Environmental Planning and Management* 66, 665-697.
- Floreano, I.X., de Moraes, L.A.F., 2021. Land use/land cover (LULC) analysis (2009–2019) with Google Earth Engine and 2030 prediction using Markov-CA in the Rondônia State, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment* 193, 239.
- Grafius, D.R., Corstanje, R., Warren, P.H., Evans, K.L., Hancock, S., Harris, J.A., 2016. The impact of land use/land cover scale on modelling urban ecosystem services. *Landscape Ecology* 31, 1509-1522.
- Hassan, W.H., Nile, B.K., 2021. Climate change and predicting future temperature in Iraq using CanESM2 and HadCM3 modeling. *Modeling Earth Systems and Environment* 7, 737-748.
- 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, 756.
- Islam, R., Islam, M.M., Islam, M.N., Islam, M.N., Sen, S., Faisal, R.K., 2020. Climate change adaptation strategies: a prospect toward crop modelling and food security management. *Modeling Earth Systems and Environment* 6, 769-777.
- Jha, P., De, A., Lakaria, B.L., Biswas, A.K., Singh, M., Reddy, K.S., Rao, A.S., 2012. Soil carbon pools, mineralization and fluxes associated with land use change in Vertisols of Central India. *National Academy Science Letters* 35, 475-483.
- Jiang, W., Deng, Y., Tang, Z., Lei, X., Chen, Z., 2017. Modelling the potential impacts of urban ecosystem changes on carbon storage under different scenarios by linking the CLUE-S and the InVEST models. *Ecological Modelling* 345, 30-40.
- Kafy, A.A., Saha, M., Fattah, M.A., Rahman, M.T., Duti, B.M., Rahaman, Z.A., Bakshi, A., Kalaivani, S., Rahaman, S.N., Sattar, G.S., 2023. Integrating forest cover change and carbon storage dynamics: Leveraging Google Earth Engine and InVEST model to inform conservation in hilly regions. *Ecological Indicators* 152, e110374.
- Kalacska, M., Lucanus, O., Sousa, L., Arroyo-Mora, J.P., 2020. High-resolution surface water classifications of the Xingu River, Brazil, pre and post operationalization of the Belo Monte Hydropower Complex. *Data* 5, 75.
- Koeh, G., Makokha, G.O., Mundia, C.N., 2020. Climate change vulnerability assessment using a GIS modelling approach in ASAL ecosystem: a case study of Upper Ewaso Nyiro basin, Kenya. *Modeling Earth Systems and Environment* 6, 479-498.
- Kohestani, N., Rastgar, S., Heydari, G., Jouibary, S.S., Amirnejad, H., 2023. Spatiotemporal modeling of the value of carbon sequestration under changing land use/land cover using InVEST model: a case study of Nour-rud Watershed, Northern Iran. *Environment, Development and Sustainability* 26, 14477-14505.
- Koko, A.F., Yue, W., Abubakar, G.A., Hamed, R., Alabsi, A.A.N., 2020. Monitoring and predicting spatio-temporal land use/land cover changes in Zaria City, Nigeria, through an integrated cellular automata and markov chain model (CA-Markov). *Sustainability* 12, e10452.
- Lahiji, R.N., Dinan, N.M., Liaghati, H., Ghaffarzadeh, H., Vafaeinejad, A., 2020. Scenario-based estimation of catchment carbon storage: Linking multi-objective land allocation with InVEST model in a mixed agriculture-forest landscape. *Frontiers of Earth Science* 14, 637-646.
- Lal, R., 2013. Soil carbon management and climate change. *Carbon Management* 4, 439-462.
- Lenton, T.M., Xu, C., Abrams, J.F., Ghadiali, A., Loriani, S., Sakschewski, B., Scheffer, M., 2023. Quantifying the human cost of global warming. *Nature Sustainability* 6, 1237-1247.
- Li, G., Cheng, G., Liu, G., Chen, C., He, Y., 2023. Simulating the Land Use and Carbon Storage for

- Nature-Based Solutions (NbS) under Multi-Scenarios in the Three Gorges Reservoir Area: Integration of Remote Sensing Data and the RF–Markov–CA–InVEST Model. *Remote Sensing* 15, e5100.
- Li, K., Cao, J., Adamowski, J.F., Biswas, A., Zhou, J., Liu, Y., 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, e100641.
- Ma, T., Li, X., Bai, J., Ding, S., Zhou, F., Cui, B., 2019. Four decades' dynamics of coastal blue carbon storage driven by land use/land cover transformation under natural and anthropogenic processes in the Yellow River Delta, China. *Science of the Total Environment* 655, 741-750.
- Patel, A., Vyas, D., Chaudhari, N., Patel, R., Patel, K., Mehta, D., 2024. Novel approach for the LULC change detection using GIS & Google Earth Engine through spatiotemporal analysis to evaluate the urbanization growth of Ahmedabad city. *Results in Engineering* 21, e101788.
- Rachid, L., Elmostafa, A., Mehdi, M., Hassan, R., 2024. Assessing Carbon Storage and Sequestration Benefits of Urban Greening in Nador City, Morocco, Utilizing GIS and the InVEST Model. *Sustainable Futures* 7, e100171.
- 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.
- Sil, A., Fonseca, F., Gonçalves, J., Honrado, J., Marta-Pedroso, C., Alonso, J., Ramos, M., Azevedo, J. C., 2017. Analysing carbon sequestration and storage dynamics in a changing mountain landscape in Portugal: insights for management and planning. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management* 13, 82-104.
- Steger, K., Fiener, P., Marvin-DiPasquale, M., Viers, J.H., Smart, D.R., 2019. Human-induced and natural carbon storage in floodplains of the Central Valley of California. *Science of the Total Environment* 651, 851-858.
- Tilahun, A., Teferie, B., 2015. Accuracy assessment of land use land cover classification using Google Earth. *American Journal of Environmental Protection* 4, 193-198.
- Tracker, C.A., 2021. Warming projections global update. Climate Analytics and New Climate Institute: Berlin, Germany.
- Von Thaden, J.J., Lithgow, D., Revollo-Fernández, D.A., Salazar-Vargas, M.D.P., Rodríguez de los Santos, A., 2024. The Effects of Implementing Three Climate-Smart Practices with an Integrated Landscape Approach on Functional Connectivity and Carbon Storage. *Land* 13, 389.
- Waikhom, S.I., Yadav, V., Azamathulla, H.M., Solanki, N., 2023. Impact assessment of land use/land cover changes on surface runoff characteristics in the Shetrunji River Basin using the SWAT model. *Water Practice & Technology* 18, 1221-1232.
- Wang, N., Chen, X., Zhang, Z., Pang, J., 2022. Spatiotemporal dynamics and driving factors of county-level carbon storage in the Loess Plateau: A case study in Qingcheng County, China. *Ecological Indicators* 144, e109460.
- Wu, X., Liu, S., Zhao, S., Hou, X., Xu, J., Dong, S., Liu, G., 2019. Quantification and driving force analysis of ecosystem services supply, demand and balance in China. *Science of the Total Environment* 652, 1375-1386.
- Yao, J., Wu, J., Xiao, C., Zhang, Z., Li, J., 2022. The classification method study of crops remote sensing with deep learning, machine learning, and Google Earth engine. *Remote Sensing* 14, e2758.
- Zarandian, A., Badamfirouz, J., Musazadeh, R., Rahmati, A., Azimi, S.B., 2018. Scenario modeling for spatial-temporal change detection of carbon storage and sequestration in a forested landscape in Northern Iran. *Environmental Monitoring and Assessment* 190, e474.
- Zhao, Z., Islam, F., Waseem, L.A., Tariq, A., Nawaz, M., Islam, I.U., Bibi, T., Rehman, N.U., Ahmad, W., Aslam, R.W., Reza, D., Hatamleh, W.A., 2024. Comparison of three machine learning algorithms using google earth engine for land use land cover classification. *Rangeland Ecology & Management* 92, 129-137.
- Zhao, Z., Liu, G., Mou, N., Xie, Y., Xu, Z., Li, Y., 2018. Assessment of carbon storage and its influencing factors in Qinghai-Tibet Plateau. *Sustainability* 10, e1864.