نشریه علمی
علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

Vol. 19, No. 69, Summer 2025
سال نوزدهم- شماره ۶۹- تابستان ۱۴۰۴

Evaluation of the Effect of Topography on Carbon Sequestration in the Kojur Watershed

Halime Joloro[1], Ghasem Ali Dianati Tilaki•[2], Hadi Memarian[3], Yahya Kooch[4]

Received: 2025/09/02, Revised: 2025/09/25, Accepted: 2025/10/12, Published: 2025/10/13
https://doi.org/10.22034/19.69.6

Extended Abstract

Introduction

Carbon is a crucial element in the global biogeochemical cycle, regulating ecological processes and influencing the Earth's climate. It is stored in various ecosystem components, including vegetation, litter, and soil, with soil organic carbon forming the largest terrestrial reservoir. This pool not only mitigates atmospheric CO_2 but also supports soil fertility, biodiversity, and long-term ecosystem stability. Carbon distribution and sequestration are controlled by multiple environmental factors, among which topography—including elevation, slope, and aspect plays a key role. Topographic variations affect microclimatic conditions such as temperature, soil moisture, and solar radiation, thereby influencing vegetation growth, litter decomposition, and soil carbon dynamics. While many studies have focused on the effects of land use and vegetation type, the impact of topographic variables on the spatial heterogeneity of carbon remains underexplored. The Kojur watershed in Mazandaran Province, northern Iran, offers a representative case study due to its complex terrain, Hyrcanian forests, and diverse land uses, resulting in high carbon storage potential. This study aims to quantify the effects of elevation and slope on carbon sequestration in both soil and vegetation, and to identify spatial patterns of carbon storage. The findings provide insights for sustainable resource management and support strategies for climate change mitigation in topographically diverse landscapes.

Materials and Methods

This study was conducted in the Kojur watershed, Mazandaran Province, northern Iran, covering 432.85 km². The watershed exhibits diverse topography, with elevation ranging from 135 to 3,432 m above sea level and an average slope of 22.3°. A high-resolution digital elevation model (DEM, 12.5 m) was used to derive elevation, slope, and aspect. Processing and hydrological corrections were conducted in ArcGIS to improve accuracy and eliminate surface depressions. Carbon storage was assessed in four pools: aboveground biomass, belowground biomass, litter, and soil. Soil samples were systematically collected from multiple locations to a depth of 30 cm, representing the active layer of organic carbon. Laboratory analyses were carried out using standardized dry combustion methods. Vegetation biomass was harvested, dried, weighed, and analyzed to estimate carbon

1.Ph. D. Student of Range Sciences, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran
2. Associate Professor, Department of Range Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran, Tel. (Fax): +981144998123, *Corresponding author: dianatig@modares.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Iran
4. Associate Professor, Department of Range Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

[DOI: 10.22034.19.69.6]

content. These datasets were integrated into the InVEST Carbon Storage and Sequestration model to generate spatially explicit estimates of carbon distribution. To explore the role of topography, statistical analyses were performed. Correlation analysis quantified the relationships between carbon storage and topographic factors, while geographically weighted regression (GWR) was applied to account for spatial heterogeneity. Unlike global regression models, GWR captures locally varying relationships, making it possible to identify areas where elevation and slope exert the greatest influence on carbon storage. This approach not only improved spatial prediction but also provided a basis for developing management strategies tailored to the ecological characteristics of the watershed.

Results and Discussion

Topographic analysis revealed distinct patterns in the spatial distribution of carbon storage within the watershed. Elevations between 1,750 and 2,150 m, along with moderate slopes of 5–12°, were associated with the highest carbon storage across all pools, including aboveground and belowground biomass, litter, and soil. These conditions likely provide favorable microclimatic factors, such as optimal temperature, sufficient soil moisture, and dense vegetation, enhancing carbon sequestration. Beyond these ranges, particularly at higher elevations and steeper slopes, carbon storage declined due to reduced vegetation, lower biological activity, and limited soil fertility. Correlation analysis indicated that slope had a stronger influence on carbon accumulation than elevation, showing a moderate positive relationship, whereas elevation effects were weak and inconsistent. This highlights that slope-mediated processes such as soil depth variability, water retention, and root distribution play a more critical role in carbon dynamics than altitude alone. Geographically weighted regression (GWR) demonstrated spatial heterogeneity in topographic influence on carbon sequestration. Standardized residuals were mostly within acceptable ranges, indicating good model performance, although some localized areas showed higher residuals, reflecting unmeasured environmental or anthropogenic factors such as land-use change, grazing, or microclimatic variations. These findings underscore the importance of considering local topography in carbon assessments and suggest that management strategies should address fine-scale differences to optimize carbon storage and strengthen ecosystem resilience.

Conclusion

The findings of this study highlight the central role of topographic factors in shaping spatial patterns of carbon storage within the Kojur watershed. Among the examined variables, slope exerted a stronger and more consistent influence on carbon sequestration than elevation. Maximum carbon accumulation occurred at moderate elevations and slopes, where favorable conditions such as adequate soil depth, water availability, and vegetation density enhanced carbon storage. These results suggest that slope-driven processes should be prioritized in spatial assessments of carbon dynamics. The application of geographically weighted regression (GWR) proved effective in capturing local variations in topographic influence. By addressing spatial heterogeneity, GWR identified both areas of high reliability and zones with elevated residuals, pointing to potential impacts of unmeasured factors, including land use, microclimatic variability, or anthropogenic disturbance. Such findings emphasize the importance of incorporating spatially explicit modeling techniques into carbon research and management. From a practical perspective, combining detailed topographic data with advanced spatial models provides a strong framework for predicting carbon distribution. This approach supports the identification of high-potential sequestration areas, thereby informing conservation planning and sustainable resource management. Moreover, recognition of areas with high residuals highlights opportunities for targeted research and model refinement, ultimately improving the reliability of carbon management strategies under changing climate conditions.

Keywords: *Carbon sequestration, Correlation index. Slope gradient*

Article Type: Research Article

[DOI: 10.22034.19.69.6]

Acknowledgement

The authors express their gratitude to all those who contributed to the success of this research.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The data and results used in this research will be available through correspondence with the corresponding author.

Authors' contribution

Halime Joloro: Sampling and laboratory analysis, writing - initial draft, performing software analyses.

Ghasem Ali Dianati Tilaki: Sampling, correction and editing, supervision, methodology.

Hadi Memarian: Software, methodology.

Yahya Kooch: Writing , correction and editing.

Citation: Joloro H, Dianati Tilaki Gh A, Memarian H, Kooch Y. Evaluation of the effect of topography on carbon sequestration in the Kojur watershed. Jwmseir 2025; 19 (69): 95-113

Iran-Watershed Management Science & Engineering, Year 2025, Vol 19, No 69, PP 95-113

Publisher: Watershed Management Society of Iran

[DOI: 10.22034.19.69.6]

ارزیابی اثر توپوگرافی بر ترسیب کربن در حوزه آبخیز کجور

حلیمه جلورو[۱]، قاسمعلی دیانتی تیلکی[۲]، هادی معماریان[۳]، یحیی کوچ[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱، تاریخ داوری:۱۴۰۴/۰۷/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۰، تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۰۷/۲۱
https://doi.org/10.22034/19.69.6

چکیده

ترسیب کربن در بوم‌سازگان‌های جنگلی و مراتع نقش حیاتی در کاهش اثرات تغییرات اقلیمی، حفظ تعادل بوم‌سازگان و افزایش پایداری محیط‌زیست دارد. هدف این مطالعه بررسی توزیع مکانی ذخیره کربن در حوزه آبخیز کجور و ارزیابی نقش ویژگی‌های توپوگرافی، شامل ارتفاع و شیب، در کنترل میزان ترسیب کربن بود. در این پژوهش از داده‌های مدل رقومی ارتفاع (DEM) و تحلیل توپوگرافی برای استخراج ارتفاع، شیب و جهت شیب استفاده شد و داده‌های ترسیب کربن با بهره‌گیری از مدل Carbon Storage and Sequestration در نرم‌افزار InVEST به دست آمد. نمونه‌برداری میدانی خاک و اندام گیاهی به منظور تعیین میزان کربن ذخیره شده در هر کلاس کاربری زمین انجام شد. برای تحلیل اثرات مکانی متغیرهای توپوگرافی، ماتریس همبستگی و مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) به کار گرفته شد. نتایج نشان داد بیشترین ذخیره کربن کل و اجزای آن در ارتفاع ۱۷۵۰–۲۱۵۰ متر و شیب‌های متوسط ۵–۱۲ درجه رخ می‌دهد، در حالی که شیب‌های بسیار تند و ارتفاعات بالاتر ظرفیت کمتری برای ترسیب کربن داشتند. تحلیل همبستگی نشان داد که شیب زمین تأثیر مثبت و متوسط (r = 0.48) و ارتفاع تأثیر ضعیف (r = -0.05) بر میزان ترسیب کربن دارد. مدل GWR توانست تغییرات مکانی ترسیب کربن را به‌خوبی شناسایی کند و مناطق با بیشترین پتانسیل ذخیره کربن را مشخص سازد. یافته‌ها تأکید می‌کنند که ترکیب داده‌های توپوگرافی با مدل‌های مکانی ابزار مؤثری برای برنامه‌ریزی حفاظت از منابع طبیعی، مدیریت پایدار جنگل‌ها و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی فراهم می‌آورد و می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک و مدیریت مناطق حساس اکوسیستمی مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژه: *ترسیب کربن، شاخص همبستگی، شیب دامنه*

نوع مقاله: پژوهشی

استناد: حلیمه جلورو، قاسمعلی دیانتی تیلکی، هادی معماریان، یحیی کوچ. ارزیابی اثر توپوگرافی بر ترسیب کربن در حوزه آبخیز کجور. علوم ومهندسی آبخیزداری ایران. ۱٤۰٤؛ ۱۹(٦۹): ۹۵– ۱۱۳
علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱٤۰٤، دوره ۱۹، شماره ٦۸، صفحه ۹۵–۱۱۳

ناشر: انجمن آبخیزداری ایران

۱– دانشجوی دکتری، علوم و مهندسی مرتع، مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
۲– دانشیار، گروه مرتع داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران و مسئول مکاتبات Email: dianatig@modares.ac.ir
۳– دانشیار، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
٤– دانشیار، گروه مرتع داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

مقدمه

کربن در بخش‌های مختلف بوم‌سازگان‌های طبیعی شامل خاک و زی‌توده گیاهی ترسیب می‌شود. در میان این بخش‌ها، خاک به‌عنوان بزرگ‌ترین مخزن کربن زمینی شناخته شده و حدود ۱۵۰۰ گیگاتن کربن آلی را در خود ذخیره کرده است، در حالی که زی‌توده گیاهی (بالا و زیرزمینی) نیز سهم قابل توجهی در چرخه کربن دارد [۱۲]. هر ساله بیش از ۱۰۰ بیلیون تن کربن در مقیاس جهانی ترسیب می‌شود و این فرآیند تحت تأثیر عوامل مختلف محیطی و فیزیوگرافیک قرار دارد [۱۲].

میزان و الگوی ترسیب کربن نه‌تنها تحت تأثیر کاربری و پوشش اراضی قرار دارد، بلکه به‌شدت به شرایط محیطی و فیزیوگرافیک وابسته است [۲۰]. از میان این عوامل، ویژگی‌های توپوگرافی شامل ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت جغرافیایی به‌عنوان متغیرهای کلیدی مطرح هستند که می‌توانند از طریق تغییر در شرایط رطوبتی، دما، شدت تابش و حاصل‌خیزی خاک، بر الگوهای مکانی ترسیب کربن تأثیرگذار باشند [۳۸].

ویژگی‌های توپوگرافی می‌توانند از طریق تغییر در دما، رطوبت، شدت تابش، فرسایش و حاصل‌خیزی خاک، الگوهای مکانی ذخیره کربن را دگرگون سازند. پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که در ارتفاعات بالاتر به‌دلیل کاهش دما و افزایش رطوبت، میزان ذخیره کربن در خاک و پوشش گیاهی افزایش می‌یابد [۲۳]. در مقابل، شیب‌های تند با افزایش فرسایش و کاهش عمق خاک، ظرفیت کمتری برای ترسیب کربن دارند. علاوه بر این، جهت جغرافیایی با تغییر در میزان تابش خورشیدی و شرایط رطوبتی، تفاوت معناداری در الگوهای ترسیب کربن میان دامنه‌های شمالی و جنوبی ایجاد می‌کند. همچنین، جهت جغرافیایی با تغییر الگوهای تابش خورشید و رطوبت خاک، منجر به تفاوت‌های قابل‌توجهی در ظرفیت ترسیب کربن بین دامنه‌های شمالی و جنوبی می‌شود [۳٤]؛ از جمله در پژوهشی Rotich و همکاران [۲۸] به بررسی اثرات ارتفاع و عمق خاک بر ذخایر کربن آلی خاک و ذخایر نیتروژن کل در جنگل شرقی کوه کنیا پرداختند؛ نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که SOCS[1] و TNS[2] با افزایش ارتفاع به طور قابل توجهی افزایش یافتند ($p < 0.05$)، که روند زیر را نشان می‌دهد: جنگل‌های پایینی < جنگل‌های میانی < جنگل‌های بالایی.

در پژوهشی دیگر در ایران جانجانی و همکاران [۱٤] اثرات جهت جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا بر فرآیند ترسیب کربن پوشش گیاهی مجاور شهر تهران را بررسی کردند. نتایج نشان داد که جهت دامنه، شیب و ارتفاع از سطح دریا رابطه مستقیمی با میزان ترسیب کربن پوشش گیاهی دارد. جهت جغرافیایی غربی و شیب‌های کم بیشترین ترسیب کربن را نشان دادند، همچنین با افزایش ارتفاع بدون درنظرگرفتن عامل جهت و شیب مقدار کربن خاک به‌طور معنی‌داری روند کاهنده داشت. جعفریان و قربانی [۱۲] در سال ۱٤۰۱ به بررسی میزان کربن ترسیب شده در خاک مراتع تحت تأثیر عمق نمونه‌برداری از خاک و ارتفاع پرداختند. نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به عوامل تحت بررسی بر میزان ترسیب کربن خاک نشان داد که تنها عمق نمونه‌برداری بر میزان ترسیب کربن معنی‌دار بوده در سطح یک درصد و اثر ارتفاع نمونه‌برداری از خاک و اثر متقابل عمق نمونه‌برداری و ارتفاع بر میزان ترسیب کربن خاک بی‌معنی بود.

با وجود این، بخش عمده‌ای از پژوهش‌های مرتبط در ایران و جهان بیشتر بر تأثیر تغییر کاربری و پوشش اراضی بر ترسیب کربن متمرکز بوده‌اند و کمتر به نقش عوامل توپوگرافی و ارتباط آن‌ها با تغییرات فضایی کربن پرداخته شده است. این شکاف دانشی به‌ویژه در مقیاس حوزه‌های آبخیز که دارای تنوع ارتفاعی و شیب‌های متفاوت هستند، محسوس است. مشخص کردن اینکه هر بخش از منطقه دارای چه مقدار شیب و ارتفاع است می‌تواند راه‌گشای بسیاری از مطالعات در زمینه علوم طبیعی باشد [۳۷]. آگاهی و دانش در مورد توزیع منابع کربن و تغییرات آن برای تشخیص مکانیزم‌های کنترلی چرخه جهانی کربن و پایداری میزان کربن فعلی در مدیریت این اراضی ارزشمند است؛ علاوه بر این، داشتن چنین دانش و اطلاعاتی برای برنامه‌ریزی سیاست‌های مختلف تغییر اقلیمی نیز بسیار مهم و سرنوشت‌ساز است. از طرف دیگر، مطالعه رابطه متغیرهای اقلیمی، محیطی، توپوگرافی و مواد مادری با میزان ذخیره کربن آلی در مناطق مختلف می‌تواند برای پیش‌بینی میزان کربن آلی خاک مفید باشد [۳].

در مطالعات اخیر مدل‌های فرآیندی مانند RothC و CENTURY برای شبیه‌سازی دینامیک کربن خاک و پوشش گیاهی به کار رفته‌اند که به داده‌های طولانی‌مدت اقلیمی و خاک‌شناسی نیاز دارند [۷ و ۹]. با این حال، در بسیاری از حوزه‌های آبخیز کوهستانی به دلیل محدودیت داده‌های بلندمدت و ناهمگونی زیاد شرایط اکولوژیکی، استفاده از این مدل‌ها با چالش‌های جدی همراه است [۳۰]. در مقابل، مدل InVEST[3] با اتکا به داده‌های مکانی کاربری/پوشش اراضی و جداول کربن، امکان برآورد سریع و انعطاف‌پذیر ذخیره کربن را فراهم می‌سازد و قابلیت تلفیق با محیط GIS را دارد [٤۱]. علاوه بر این، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که واسنجی مدل InVESTبا داده‌های محلی می‌تواند دقت برآوردهای کربن را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد [۲۵]. بنابراین در پژوهش حاضر، مدل InVESTبه عنوان ابزار اصلی انتخاب شد و نتایج آن با روش‌های آماری فضایی (GWR) تلفیق شد تا اثرات مکانی عوامل توپوگرافی بر ترسیب کربن بررسی شود.

در همین راستا حوزه آبخیز کجور در استان مازندران، به‌دلیل برخورداری از جنگل‌ها و مراتع ارزشمند هیرکانی، توپوگرافی متنوع و کاربری‌های مختلف انسانی، یکی از مناطق حساس و استراتژیک از نظر خدمات اکوسیستمی و ذخیره کربن محسوب می‌شود. با توجه

1. soil organic Carbon Stocks
2. Total Nitrogen Stocks
3. Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs

[DOI: 10.22034.19.69.6]

به موارد مطرح شده، هدف از پژوهش حاضر، بررسی چگونگی تأثیر ارتفاع و جهت‌گیری شیب‌ها بر میزان ترسیب کربن در خاک و پوشش گیاهی حوزه آبخیز کجور و شناسایی نواحی با ظرفیت بالای ذخیره کربن است. شناخت تأثیر ارتفاع، شیب و جهت جغرافیایی بر فرآیند ترسیب کربن در این حوزه می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت پایدار منابع طبیعی، حفاظت از جنگل‌ها و کاهش اثرات تغییر اقلیم فراهم کند.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مطالعاتی

حوزه آبخیز کجور با مساحت ٤٢٣/٨٥ کیلومترمربع در شهرستان‌های نور و نوشهر، استان مازندران کشور ایران قرارگرفته است (شکل ۱). از نظر موقعیت جغرافیایی بین ″٣٨ ′٠٧ °٥١ تا ″٢٢ ′٥٠ °٥١ طول شرقی و ″١٢ ′٣٣ °٣٦ تا ″٣٥ ′١٣ °٣٦ عرض شمالی واقع شده است. متوسط بارندگی سالیانه حوزه ٤٥٦/٢ میلی‌متر و میانگین سالانه تبخیر و تعرق واقعی کل حوزه ٣٦٠ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه ۹/۷ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است. متوسط ارتفاع حوزه ۱۷۸۹ متر و متوسط شیب حوزه ۲۲/۳ درصد است. این منطقه شامل طبقات مختلف کاربری زمین شامل جنگل، زراعت آبی، اراضی دیم، مرتع و اراضی مسکونی است که در دهه‌های گذشته بر اثر تغییر کاربری مناطق جنگلی به اراضی مسکونی و دیم تغییر پیدا کرده است. اقلیم محدوده مطالعاتی براساس روش آمبرژه مدیترانه‌ای تعیین شده است [۱۹].

متغیرهای توپوگرافی مورد بررسی

مدل رقومی ارتفاع (DEM): به منظور استخراج متغیرهای توپوگرافی (ارتفاع، شیب و جهت شیب)، ابتدا مدل رقومی ارتفاع با دقت ۱۲/۵ متر از پایگاه داده‌ی USGS (https://earthexplorer.usgs.gov) دانلود شد. سپس داده‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 وارد شد و به سیستم مختصات UTM منطقه مورد مطالعه تبدیل شدند. برای حذف خطاهای احتمالی، عملیات Fill به منظور تصحیح فرورفتگی‌ها (sink) بر روی DEM انجام شد [۲].

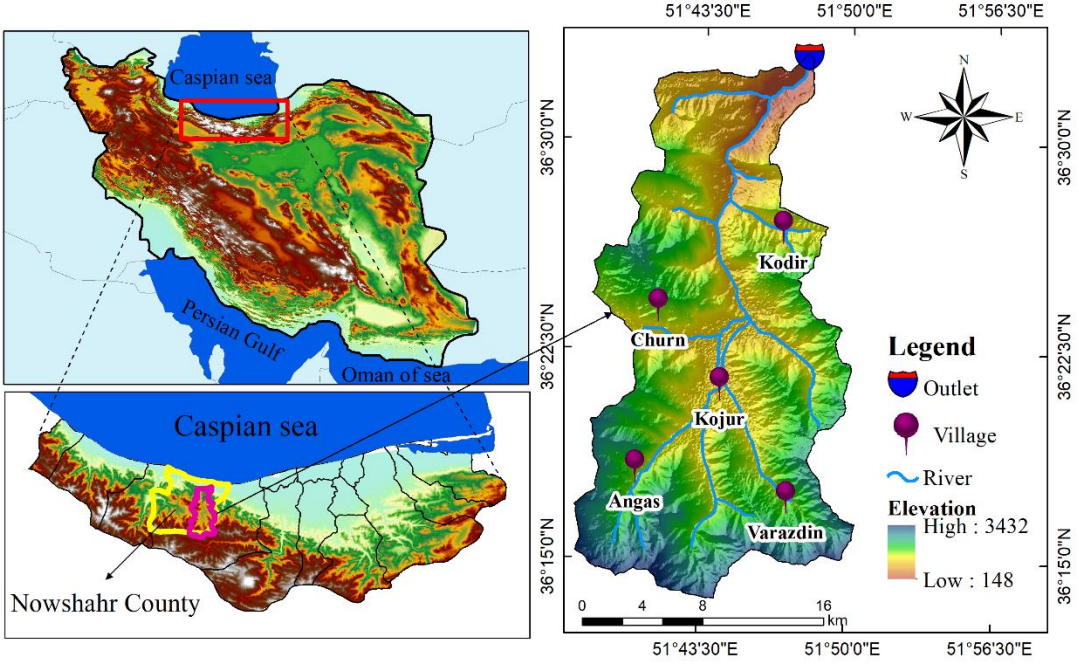
استخراج نقشه ارتفاع: نقشه ارتفاع منطقه مستقیماً از DEM تولید شد. مقادیر ارتفاع هر سلول بر حسب متر از سطح دریا مشخص و نقشه برای تحلیل رابطه با ترسیب کربن به کار گرفته شد.

استخراج نقشه شیب: به منظور محاسبه شیب، از ابزار Slope در ArcGIS استفاده شد. شیب برای هر سلول بر حسب درجه محاسبه شد و نقشه نهایی با تفکیک‌پذیری ۱۲/۵ متر آماده شد.

استخراج نقشه جهت شیب: جهت شیب نیز با استفاده از ابزار Aspect از روی DEM محاسبه شد. خروجی این فرایند زاویه شیب هر سلول (۰ تا ۳٦۰ درجه) را نسبت به شمال جغرافیایی نشان می‌دهد. این نقشه برای تحلیل اثرات جهت شیب بر ترسیب کربن مورد استفاده قرار گرفت.

نقشه کاربری اراضی

برای برآورد ذخیره و ترسیب کربن، نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲۳ به‌عنوان یکی از داده‌های اصلی ورودی مدل InVEST مورد



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز کجور

Fig 1. Geographical location of the Kojur watershed

[DOI: 10.22034.19.69.6]

استفاده قرار گرفت. این نقشه از پژوهش پیشین نویسندگان [۱۵] استخراج شد که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و روش‌های سنجش‌ازدور تهیه شده بود. در این پژوهش، نقشه مذکور وارد محیط نرم‌افزار ArcGIS شد و پس از کنترل کیفیت، بازطبقه‌بندی و اصلاح شد تا طبقه‌های مورد نیاز شامل جنگل، مرتع، کشاورزی و سایر کاربری‌ها به‌صورت مجزا مشخص شوند. این نقشه مبنای اصلی تحلیل‌های فضایی و محاسبه ذخیره کربن در کلاس‌های مختلف کاربری اراضی قرار گرفت.

مدل کربن InVEST

مدل InVEST شامل الگوریتم‌ها و ماژول‌های مختلف است و مطالعه حاضر از ماژول ذخیره‌سازی و جداسازی کربن برای ارزیابی میزان CS در حوزه آبخیز کجور استفاده شد [۳۵]. InVEST می‌تواند یک چارچوب جامع و علمی معتبر برای ارزیابی ذخیره کربن ارائه دهد [۴۰]. مدل InVEST ادغام شده با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) تغییرات فضایی ذخایر کربن را در بین طبقه‌های مختلف LULC مدل می‌کند [۱۷]. مدل برای انجام محاسبات لازم، اطلاعات کاربری اراضی را با داده‌های مربوط به موجودی ذخیره کربن در چهار مخزن اصلی ذخیره کربن که شامل زیتوده بالازمینی (اندام هوایی گیاهان)، زیتوده زیرزمینی (ریشه‌ها)، لاشبرگ و کربن آلی خاک که توسط کاربر تهیه می‌شود، تلفیق (رابطه ۱) و توزیع فضایی کمیت‌های موجودی و ترسیب را در پهنه سرزمین به صورت نقشه تولید می‌کند. در این پژوهش برای محاسبه میزان ذخیره کربن از InVEST 3.12.1 استفاده شده است.

$$C_{tot} = C_{above} + C_{below} + C_{dead} + C_{soil} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

در رابطه ۱، Ctot نشان دهنده کل ذخیره کربن (Mg C)، Cabove ذخیره کربن زیست توده بالای زمین (Mg C) ، Cbelow ذخیره کربن زیست توده زیرزمینی (Mg C) ، Cdead ذخیره کربن آلی مرده (Mg C)و Csoil ذخیره کربن خاک (Mg C) است. با توجه به کتاب راهنمای کاربر مدل InVEST ، چگالی کربن یک کاربری خاص در نظر گرفته شده است که ثابت است [۳۳]. داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل، نقشه‌های فعلی و آینده LULC و جدول بیوفیزیکی با فرمت CSV است که شامل ستون‌های ««C_above»، «C_below»، «C_soil»» و «C_dead» است.

نقشه ترسیب کربن با استفاده از InVEST

برای برآورد میزان ذخیره کربن در حوزه آبخیز کجور، مدل InVEST نسخه ۳,۱۲,۱به کار گرفته شد. این مدل با استفاده از داده‌های کاربری اراضی و موجودی کربن در چهار مخزن اصلی شامل: اندام هوایی گیاهان، ریشه‌ها، لاشبرگ و کربن خاک، نقشه‌های توزیع فضایی ذخیره کربن را تولید می‌کند. مقادیر موجودی کربن برای هر کاربری زمین از مطالعات میدانی و نمونه‌برداری خاک و گیاهان استخراج شد (شکل ۲). نمونه‌برداری خاک به روش نظام‌مند-تصادفی (روشی که با پوشش یکنواخت کل محدوده و کاهش سوگیری، امکان دستیابی به نمونه‌های نماینده را فراهم می‌کند) انجام شد [۲۱]، به صورتی که هر کاربری (جنگل، مرتع و کشاورزی) شامل ۲۰شبکه تصادفی و در هر شبکه ۳نمونه خاک تا عمق ۳۰ سانتی‌متر بود (به دلیل محدودیت‌های اجرایی (دسترسی دشوار به برخی نقاط، محدودیت زمانی و هزینه‌های بالای نمونه‌برداری آزمایشگاهی)، این تعداد به‌عنوان حداقل نماینده در نظر گرفته شد. برای کاهش احتمال سوگیری، از داده‌های مکمل سنجش از دور و داده‌های ثانویه موجود نیز در فرایند مدل‌سازی استفاده شد). اندازه‌گیری کربن‌آلی خاک به روش والکی- بالک و محاسبه وزن مخصوص ظاهری به روش کلوخه در آزمایشگاه صورت گرفت [۱۸].

برای تهیه لاشبرگ کاربری‌های مورد مطالعه، کل شاخ و برگ زیر تاج پوشش در کوادرات مشخص شده (۲۰ متر در ۲۰ متر کاربری جنگل و ۲ متر در ۲ متر کاربری‌های دیگر) جمع‌آوری و پس از خشک شدن توزین شدند [۱۵ و ۱۹]. با حفر پروفیل در ناحیه گسترش ریشه گیاه، ریشه‌های با قطر بیش از دو میلی‌متر از خاک جدا و پس از شستشو، نمونه‌ها خشک و وزن آن‌ها تعیین شد. جهت برآورد زیتوده بالای سطح نمونه‌های گیاهی در هر پلات کف بر شدند. در واقع جهت برآورد کربن زیتوده بالای سطح زمین شامل اندام هوایی گیاهان و زیتوده زیر زمین (ریشه) و لاشبرگ از روش اندازه‌گیری مستقیم (قطع و توزین) [۱۹] استفاده شد.

نمونه‌های اندام هوایی و ریشه گیاهان نیز در پلات‌های مشخص جمع‌آوری شدند. نمونه‌ها پس از خشک شدن وزن‌گیری شده و کربن آلی آن‌ها با روش احتراق در کوره الکتریکی تعیین شد [۱۹]. گونه‌های غالب هر کاربری در جدول ۱ ارائه شده است.

به منظور ارزیابی ذخیره کربن خاک، پس از تعیین میزان کربن آلی خاک با استفاده از روش والکی‌بلاک و جرم مخصوص ظاهری با روش کلوخه، از رابطه ۲ استفاده شد.

$$Cc = 10000 \times \%OC \times Pb \times E \quad \text{(رابطه ۲)}$$

که در این روابط، Cc میزان کربن ذخیره شده به ازای یک مترمربع، OC درصد کربن آلی، Pb جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) و E عمق نمونه خاک به سانتی‌متر است [۱۵].

این داده‌ها به عنوان ورودی مدل InVEST استفاده شدند تا میزان ذخیره و ترسیب کربن در سطح منطقه بر اساس کلاس‌های کاربری زمین مدل‌سازی و به صورت نقشه Raster نمایش داده شود. سپس تمام داده‌ها در قالب جدول فیش‌نت (Shapefile) با فیلدهای Carbon، Elevation، Slope و Aspect سازماندهی شدند. رکوردهایی که شامل مقادیر Null بودند حذف شدند تا دقت تحلیل همبستگی و رگرسیون مکانی افزایش یابد.

[DOI: 10.22034.19.69.6]

جدول ۱- گونه‌های غالب هر یک از کاربری‌های اراضی حوزه

Table 1. Dominant species of each land use in the basin

Forest جنگل	Rangeland مرتع	Agriculture کشاورزی	Rainfed farming اراضی دیم
Quercus macranthera	*Astragalus microcephalus*	*Oryza sativa*	*Triticum*
بلوط اوری	گون	برنج	گندم
Carpinus sp	*Acantholimon sp*	*Juglans*	*Hordeum vulgare*
ممرز	کلاه میرحسن	گردو	جو
Parrotia persica	*Bromus tomentellus*	*Prunus avium*	
انجیلی	علف پشمکی	گیلاس	
Fagus orientalis	*Perennial grasses*		
راش	چچم		
Carpinus orientalis	*Scariola orientalis*		
لور	گاو چاق کن		

شکل ۲- تصویر منطقه مورد مطالعه و نمونه‌برداری عرصه

Fig 2. Image of the study area and field sampling

تحلیل مکانی و همبستگی[1]

ماتریس همبستگی ابزاری آماری است که روابط خطی بین چند متغیر هم‌زمان را به صورت کمی نشان می‌دهد. هر سلول در ماتریس، ضریب همبستگی بین دو متغیر را ارائه می‌کند و مقدار آن بین ۱- تا ۱+ قرار دارد [۴-۱۸]:

- مقدار ۱+ نشان‌دهنده یک همبستگی مثبت کامل است (با افزایش یکی، دیگری نیز افزایش می‌یابد).
- مقدار ۱- نشان‌دهنده یک همبستگی منفی کامل است (با افزایش یکی، دیگری کاهش می‌یابد).
- مقدار ۰ نشان‌دهنده عدم وجود همبستگی خطی است.

برای بررسی روابط بین میزان ترسیب کربن و متغیرهای توپوگرافی شامل ارتفاع، درجه شیب و جهت شیب، تحلیل‌های مکانی و آماری انجام شد. این مرحله شامل دو بخش اصلی بود:

الف) تحلیل همبستگی

ماتریس همبستگی[2] برای سنجش روابط خطی بین ترسیب کربن و هر یک از متغیرهای توپوگرافی تهیه شد. نمودارهای پراکنش[3] برای هر زوج متغیر ترسیب کربن–ارتفاع، ترسیب کربن–شیب و ترسیب کربن–جهت شیب رسم شد تا الگوهای بصری رابطه مشخص شوند. این تحلیل‌ها به شناسایی روندهای مثبت یا منفی و شدت همبستگی بین متغیرها کمک کرد و امکان شناسایی الگوهای غیرتصادفی در داده‌ها فراهم شد [۱].

ب) تحلیل مکانی با رگرسیون وزنی جغرافیایی[4] (GWR)

برای درک تغییرات مکانی و محلی روابط بین ترسیب کربن و عوامل توپوگرافی، از رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) استفاده شد [۱۱]. در مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR)، انتخاب نوع تابع هسته[5] و پهنای باند[6] اهمیت زیادی در دقت نتایج دارد. در این پژوهش از تابع هسته گاوسی[7] استفاده شد که در بسیاری از مطالعات مشابه به دلیل هموارسازی مناسب داده‌های مکانی رایج است [۲۶]. پهنای باند به روش تطبیقی[8] تعیین شد تا تغییرات تراکم نقاط نمونه در سطح منطقه در نظر گرفته شود. معیار بهینه‌سازی پهنای باند،

1. Spatial Analysis and Correlation

2. Correlation Matrix
3. Scatter Plots
4. Geographically Weighted Regression
5. Kernel Function
6. Bandwidth
7. Gaussian kernel
8. Adaptive Bandwidth

[DOI: 10.22034.19.69.6]

حداقل کردن(AICc) Akaike Information Criterion corrected بود که شاخص استاندارد در انتخاب مدل بهینه محسوب می‌شود [۳۹]. بدین ترتیب، مدل نهایی GWR امکان بررسی ناهمگنی مکانی روابط بین متغیرهای توپوگرافی (ارتفاع و شیب) و میزان ترسیب کربن را فراهم ساخت. تفاوت GWR با رگرسیون خطی سنتی در این است که ضرایب رگرسیون به صورت محلی و بر اساس مختصات مکانی هر نقطه محاسبه می‌شوند، بنابراین امکان بررسی اثر متغیرها در مناطق مختلف وجود دارد [۳۶].

- مدل GWR به شکل رابطه ۳ تعریف شد:

رابطه ۳)

$$\mathrm{Carbon}_i = \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i).Elevation_i + \beta_2(u_i, v_i).Slope_i + \beta_3(u_i, v_i).Aspect_i + \epsilon_i$$

که در آن:

Carboni: میزان ترسیب کربن در نقطه i

Slopei: درجه شیب در نقطه i

Aspecti: جهت شیب در نقطه i

Elevationi: ارتفاع در نقطه i

εi: خطا هستند.

ضرایب رگرسیونی (β) به‌صورت محلی و برای هر نقطه محاسبه می‌شوند؛ بدین معنا که مقدار هر ضریب به مختصات مکانی(u_i, v_i) وابسته است و شدت و جهت اثر متغیر مستقل در همان نقطه را نشان می‌دهد. این ضرایب محلی با استفاده از روش حداقل مربعات وزنی و بر اساس ماتریس وزن مکانی حاصل از تابع هسته گاوسی و پهنای باند تطبیقی برآورد شدند.

خروجی مدل شامل نقشه ضرایب محلی برای هر متغیر و نقشه‌های باقیمانده‌ها (Residuals) بود که الگوهای مکانی روابط بین ترسیب کربن و توپوگرافی را نشان می‌دهد.

ضرایب GWR و ماتریس همبستگی با هم بررسی شدند تا اثر ارتفاع، درجه شیب و جهت شیب بر ترسیب کربن شناسایی شود. مناطق با اثر قوی یا ضعیف هر متغیر مشخص شدند و الگوهای مکانی ترسیب کربن در مناطق مختلف تحلیل شد. این تحلیل امکان ارائه توصیه‌های مکانی برای مدیریت کربن و حفظ منابع طبیعی را فراهم کرد.

نتایج

نتایج نقشه توپوگرافی

بر اساس نتایج بدست آمده (شکل ۳) ارتفاع منطقه مطالعه بین ۱۳۵تا ۳۴۳۲ متر از سطح دریا متغیر و میانگین ارتفاع برابر با ۱۹۳۳ متر است. بیشترین تمرکز ارتفاعات در مناطق جنگلی و جنوب (بالادست) حوزه آبخیز قرار دارد. شیب حوزه آبخیز کجور در محدوده صفر تا بیش از ۶۰ درجه تغییر می‌کند. نتایج نشان داد که بیشترین بخش از حوزه در کلاس‌های ۵–۱۲ درجه (۳۰ درصد) و ۱۲–۲۰ درجه (۳۰ درصد) قرار دارد. کمترین سهم مربوط به کلاس شیب بالاتر از ۶۰ درجه است که تنها ۰/۰۱ درصد از مساحت حوزه را شامل می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت حدود ۶۰ درصد از حوزه دارای شیب ملایم تا متوسط (۵–۲۰ درجه) است، در حالی که اراضی با شیب تندتر (بیش از ۳۰ درجه) مجموعاً کمتر از یک‌چهارم کل مساحت را تشکیل می‌دهند (جدول ۲). بیشترین جهت شیب به سمت شمال و شمال شرق (۱۹ درصد از کل حوزه) و شمال غربی (۱۵ درصد) بود.

جدول ۲- توزیع کلاس‌های شیب در حوزه آبخیز کجور

Table 2. Distribution of slope classes in the Kojur watershed

کلاس شیب(°)	مساحت (هکتار)	درصد از کل حوزه
(°) Slope class	Area (ha)	Percentage of total area
5–0	8023/36	18/54
12–5	13156/37	30/39
20–12	13189/54	30/47
30–20	3705/70	8/56
60–30	5206/31	12/03
>60	3/86	0/01

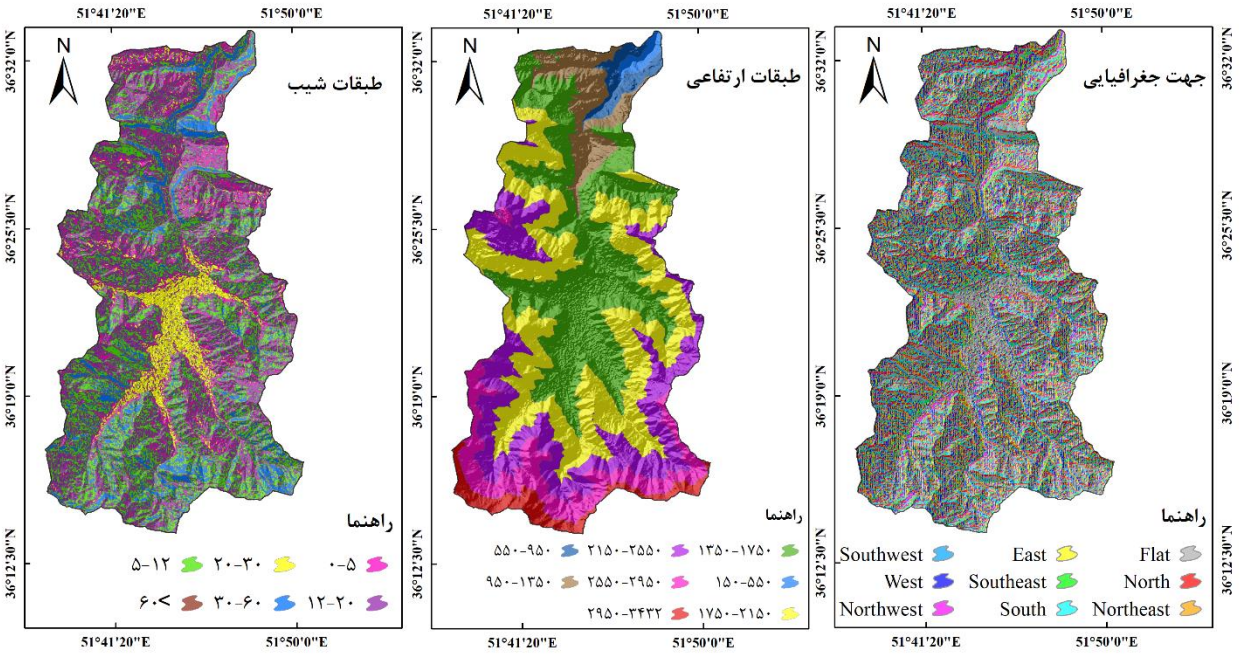
نقشه کاربری اراضی

نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز کجور در سال ۲۰۲۳ در شکل (٤) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کاربری جنگل و مرتع بخش عمده‌ای از سطح منطقه را پوشش داده‌اند. مساحت هر یک از کاربری‌ها در جدول (۳) ارائه شده است. بر اساس نتایج، بیشترین مساحت مربوط به جنگل (۲۰۹٦۸/۹۷ هکتار) و پس از آن مرتع (۱٦۹۷۰/۲٦ هکتار) است. کاربری‌های کشاورزی آبی و دیم به ترتیب ۳۰۱۹/٤٥ و ۱۸۵۱/۲۲ هکتار از سطح منطقه را شامل می‌شوند. کمترین سهم نیز مربوط به کاربری مسکونی با ٤۷٤/۹۸ هکتار است. این نتایج نشان می‌دهد که اراضی طبیعی (جنگل و مرتع) غالب‌ترین کاربری‌ها در حوزه بوده و نقش اصلی را در ذخیره کربن ایفا می‌کنند.

نقشه ترسیب کربن (InVEST)

بر اساس مدل Carbon Storage and Sequestration در بسته نرم‌افزاری InVEST، میزان ترسیب کربن محدوده مطالعاتی محاسبه و نقشه‌های توزیع مکانی آن تولید شد (شکل ۵). تحلیل ذخیره کربن در سطوح مختلف ارتفاع نشان داد که مقدار کل کربن با افزایش ارتفاع تا حدود ۱۷۵۰–۲۱۵۰ متر افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. بیشترین ذخیره کربن در طبقه ارتفاع ۱۷۵۰–۲۱۵۰ متر مشاهده شد که مجموع ذخیره کربن برابر با ۱۲٤٦۸۸۷/۹٤ تن

[DOI: 10.22034.19.69.6]



شکل ۳- نقشه شیب، جهت و ارتفاع حوزه آبخیز کجور

Fig 3. Map of slope, direction, and elevation of the Kojur watershed

جدول ۳- مساحت و نوع کاربری اراضی در حوزه آبخیز (۲۰۲۳)

Table 3. Area and type of landuse in the Waterdrshed (2023)

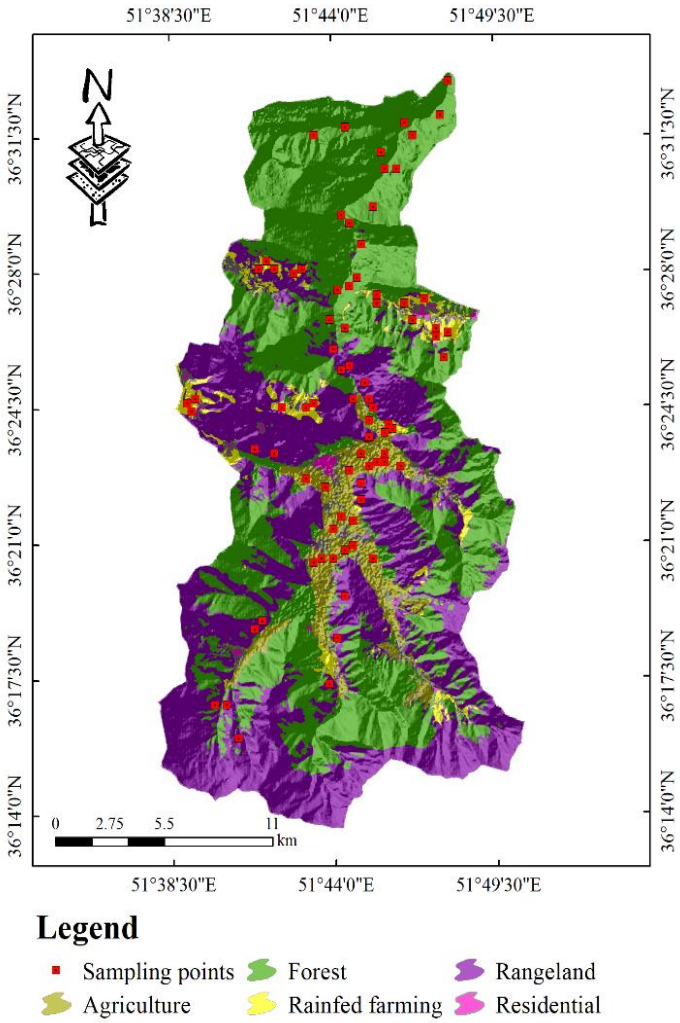
Row ردیف	landuse کاربری اراضی	Area (hec) مساحت (هکتار)
1	Agriculture کشاورزی	3019/45
2	Rainfed farming اراضی دیم	1851/22
3	Forest جنگل	20968/98
4	Rangeland مرتع	16970/26
5	Residential مسکونی	98/474

گزارش شد. بر اساس نتایج بدست آمده در اندام هوایی گیاهان[1] بیشترین ذخیره کربن در ارتفاع ۱۷۵۰–۲۱۵۰ متر (۶۲۱۷۰۵/۸۰ تن) مشاهده شده است. در اندام زیرزمینی[2] بیشترین ذخیره کربن در همان طبقه ارتفاع (۲۲۱۶۵۰/۲۱ تن) مشاهده شد. بیشترین کربن خاک[3] ذخیره در ۱۷۵۰–۲۱۵۰ متر (۶۴۷۴۲/۶۵ تن) بود و در لاشبرگ و مواد آلی مرده[4] بیشترین مقدار (۳۳۴۵۸۹/۲۵ تن) نیز در همین ارتفاع مشاهده شد. در ارتفاعات بالاتر از ۲۱۵۰ متر، ذخیره کربن کاهش قابل توجهی دارد، که به دلیل کاهش پوشش گیاهی و تراکم زیستی پایین‌تر است (جدول ٤).

تحلیل ذخیره کربن در طبقات شیب نشان داد که بیشترین ذخیره کربن در طبقه شیب ۱۲–۵ درجه (۱۲۷۳۳۱۷/۸۵ تن) رخ داده است. در شیب‌های کم (۰–۵ درجه) ذخیره کربن کل ۷۲۲۷۷/۴۰ تن بود، که عمدتاً ناشی از کربن اندام هوایی و زیرزمینی متوسط است. بیشترین ذخیره کربن در شیب‌های متوسط (۲۰–۱۲) حدود ۱۲۵۹۶۰۸ تن بود. در شیب‌های تند (۲۰–۳۰ و ۳۰–۶۰ درجه) کاهش ذخیره کربن مشاهده شد، که احتمالاً به دلیل تراکم پوشش

1. Aboveground biomass
2. Belowground biomass
3. Soil carbon pool
4. Dead organic carbon

[DOI: 10.22034.19.69.6]



شکل ٤- نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز کجور (۲۰۲۳)

Fig 4. Land use map of the Kajur watershed (2023)

جدول ٤- نتایج حاصل از تغییرات ترسیب کربن در طبقات ارتفاعی مختلف در منطقه مطالعاتی

Table 4. Results of changes in carbon sequestration in different elevation classes in the study area

طبقه ارتفاع (متر) Elevation class (m)	ذخیره کربن اندام هوایی (تن) Aboveground carbon storage (t)	ذخیره کربن اندام زیرزمینی (تن) Belowground carbon storage (t)	ذخیره کربن خاک (تن) Soil carbon storage (t)	ذخیره کربن لاشبرگ و مواد آلی مرده (تن) Litter & dead organic matter carbon storage (t)	کل ذخیره کربن (تن) Total carbon storage (t)
550–150	23094/51	8366/04	2295/17	12419/99	46175/71
950–550	53330/92	19314/97	5302/28	28678/12	106626/29
1350–950	152902/46	55367/13	15206/90	82215/46	305691/96
1750–1350	499938/14	186369/53	56677/44	293154/93	1036140/05
2150–1750	621705/80	221650/21	64742/65	334589/25	1242687/94
2550–2150	385410/44	136936/33	39701/69	205677/90	767726/37
2950–2550	186525/48	64566/74	20058/24	98430/95	369581/41
3432–2950	76596/82	26426/96	40365/99	26426/96	151671/00

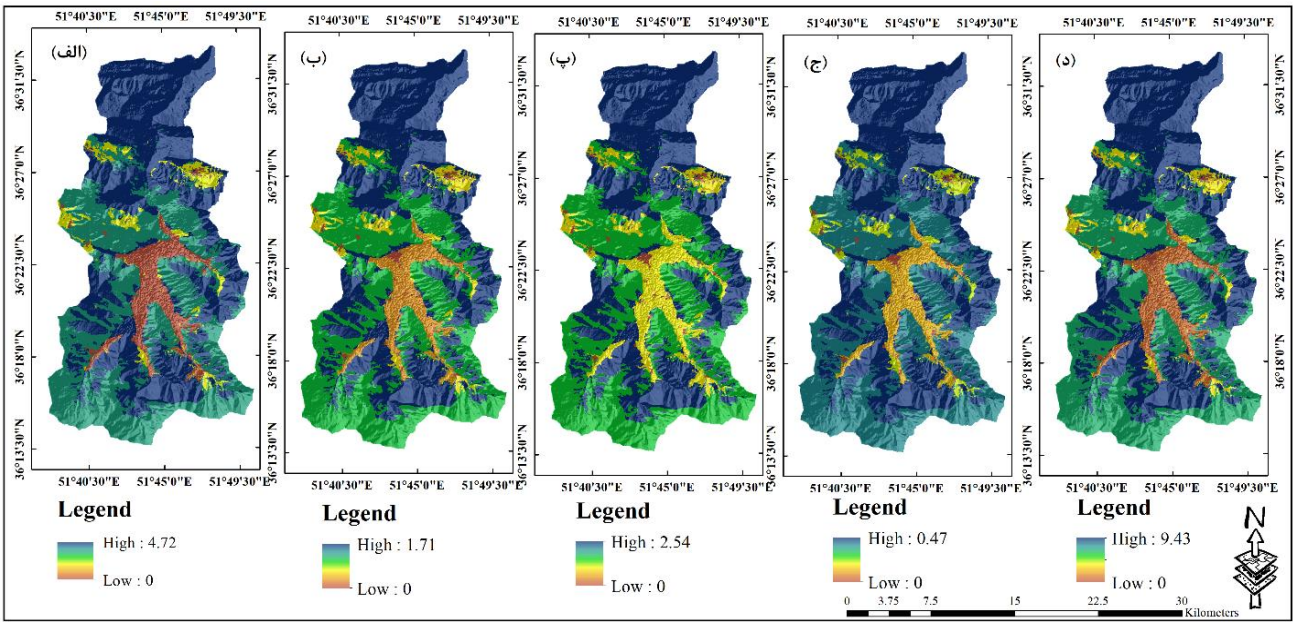
گیاهی کمتر و کاهش خاک حاصل‌خیز است. در شیب‌های بسیار تند (٦٠ <) ذخیره کربن بسیار کم (٤٠٤/٢ تن) بود که نشان‌دهنده شرایط محیط زیستی نامساعد برای تجمع کربن است. این نتایج نشان می‌دهد که شیب‌های متوسط بیشترین پتانسیل ذخیره کربن را دارند و شیب‌های بسیار کم یا بسیار زیاد اثر کمتری بر ذخیره کربن دارند (جدول ٥).

[DOI: 10.22034.19.69.6]

جدول ۵- نتایج حاصل از تغییرات ترسیب کربن در طبقات شیب مختلف در منطقه مطالعاتی

Table 5. Results of changes in carbon sequestration in different slope classes in the study area

طبقه شیب (°) Slope class (°)	ذخیره کربن اندام هوایی (تن) Aboveground carbon storage (t)	ذخیره کربن اندام زیرزمینی (تن) Belowground carbon storage (t)	ذخیره کربن خاک (تن) Soil carbon storage (t)	ذخیره کربن لاشبرگ و مواد آلی مرده (تن) Litter & dead organic matter carbon storage (t)	کل ذخیره کربن (تن) Total carbon storage (t)
5–0	356469/10	129260/71	38329/27	198218/31	722277/40
12–5	639684/16	226403/82	66358/87	340870/97	1273317/85
20–12	631944/65	223898/77	65894/24	337871/00	1259608/68
30–20	113105/80	47506/71	15178/39	80683/91	256474/81
60–30	258098/12	91855/52	26484/12	137780/01	514217/78
>60	202/75	72/39	20/68	108/38	404/20



شکل ۵- نقشه ترسیب کربن، الف: کربن بالای زمین (تن در هکتار)، ب: کربن زیر زمین (تن در هکتار)، پ: کربن مرده (تن در هکتار)، ج: کربن لاشبرگ (تن در هکتار)، د: کربن کل (تن در هکتار)

Fig 5. Carbon sequestration map, A: Aboveground carbon (tons per hectare), B: Belowground carbon (tons per hectare), C: Dead carbon (tons per hectare), C: Litter carbon (tons per hectare), D: Total carbon (tons per hectare)

تحلیل حساسیت ورودی‌های مدل InVEST

برای ارزیابی حساسیت مدل InVEST نسبت به ورودی‌های کلیدی، یک تحلیل حساسیت تک‌متغیره انجام شد. در این تحلیل، مقادیر مربوط به هر یک از چهار مخزن کربن (اندام هوایی، اندام زیرزمینی، کربن خاک و لاشبرگ) به‌صورت مستقل ±۱۰ درصد و ±۲۰ درصد تغییر داده شد و تأثیر آن بر کل ذخیره کربن حوزه محاسبه شد (جدول ٦). نتایج نشان داد که بیشترین پاسخ مدل به تغییرات در مقدار اندام هوایی بود (±۱۰درصد ⟶ تقریباً ٤,٩٤± درصد تغییر در کل ذخیره کربن)، در حالی که تغییرات در مقدار کربن خاک درصد تغییر کمتری در کل ذخیره به دنبال داشت (±۱۰ درصد ⟶ ≈±۰,٦۰ درصد). لازم به تأکید است که این تحلیل یک‌متغیره است.

نتایج تحلیل همبستگی

مطابق جدول ۷ نتایج همبستگی ارتفاع و ترسیب کربن بیانگر این بود که ضریب همبستگی r= -۰/۰۵ و بین جهت شیب و ترسیب کربن مقدار این ضریب برابر r= -۰/۰۱ است که این مقادیر نشان‌دهنده رابطه‌ای بسیار ضعیف و تقریباً صفر بین ارتفاع و جهت شیب با ترسیب‌کربن است. به عبارت دیگر، تغییرات ارتفاع و جهت شیب اثر قابل توجهی بر میزان ذخیره کربن ندارند. بررسی همبستگی شیب و ترسیب‌کربن حاکی از آن است که ضریب همبستگی r= ۰/٤۸ بوده که رابطه‌ای مثبت و در حد متوسط را نشان می‌دهد. این نتیجه بیان می‌کند که با افزایش شیب، میزان ترسیب کربن گرایش به افزایش دارد؛ این امر احتمالاً ناشی از آن است که در

[DOI: 10.22034.19.69.6]

جدول ٦- تحلیل حساسیت ورودی‌های کلیدی مدل InVEST نسبت به کل ذخیره کربن حوزه آبخیز کجور

Table 6. Sensitivity analysis of key inputs of the InVEST model to the total carbon stock of the Kojur watershed

ورودی تغییر یافته Changed input	مقدار تغییر Change	کل ذخیره کربن جدید (تن) New total carbon storage (t)	درصد تغییر نسبت به پایه Change relative to baseline (٪)
کربن اندام هوایی Aboveground carbon	+10%	4244396/86	+4/94
	-10%	3844495/94	-4/94
	+20%	4444347/31	+9/98
	-20%	3644545/49	-9/98
کربن اندام زیرزمینی Belowground carbon	+10%	4116346/19	+1/78
	-10%	3972546/61	-1/78
	+20%	4188245/98	+3/56
	-20%	3900646/82	-3/56
کربن خاک Soil carbon	+10%	4068881/44	+0/60
	-10%	4020011/36	-0/60
	+20%	4093316/47	+1/21
	-20%	3995576/33	-1/21
کربن لاشبرگ/مواد مرده Litter & dead organic matter carbon	+10%	4152605/76	+2/67
	-10%	3936287/04	-2/67
	+20%	4260765/11	+5/35
	-20%	3828127/69	-5/35

جدول ٧- ماتریس همبستگی بین متغیرهای توپوگرافی و ترسیب کربن

Table 7. Correlation matrix between topographic variables and carbon sequestration

متغیرها Variables	ارتفاع Elevation	شیب Slope	ترسیب کربن Carbon deposition	جهت شیب Aspect
ارتفاع Elevation	1	0.26	-0.05	-0.06
شیب Slope	0.26	1	0.48	0.04
ترسیب کربن Carbon deposition	-0.05	0.48	1	-0.01
جهت شیب Aspect	-0.06	0.04	-0.01	1

شیب‌های متوسط تا نسبتاً زیاد، تخریب انسانی کمتر بوده و پوشش گیاهی طبیعی‌تر حفظ شده است؛ عاملی که می‌تواند موجب افزایش ذخیره کربن شود. با این حال، این الگو الزاماً یک قاعده کلی نیست و بررسی‌های بیشتر با داده‌های پوشش گیاهی و فرسایش خاک برای تبیین دقیق‌تر این رابطه ضروری است.

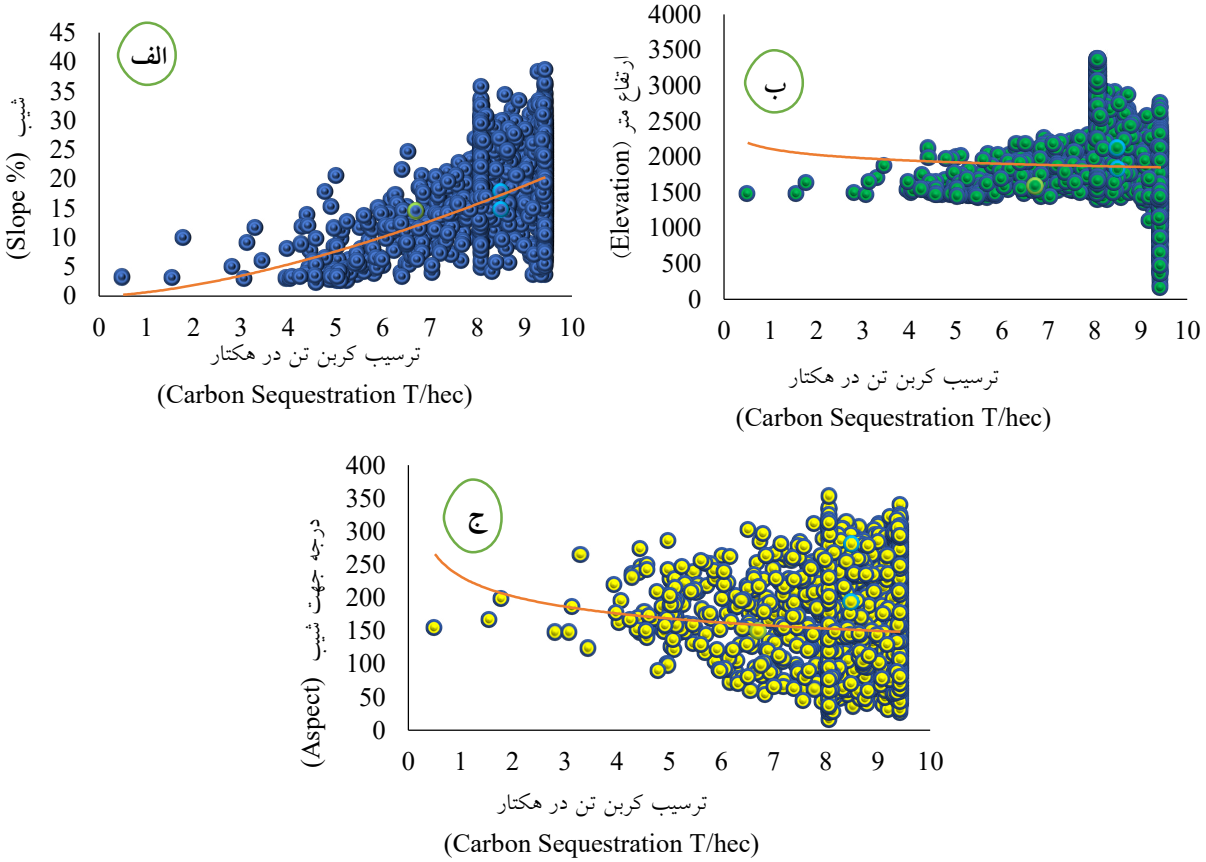
با توجه به ضریب همبستگی نسبتاً متوسط (٠/٤٨) بین شیب و ترسیب کربن سطحی، احتمال وجود روابط غیرخطی یا آستانه‌های اکولوژیکی در این رابطه مطرح است. هرچند در این مطالعه به دلیل محدودیت داده‌ها و تمرکز بر تحلیل‌های خطی، این روابط به‌طور مستقیم بررسی نشدند، اما پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی از مدل‌های غیرخطی مانند رگرسیون قطعه‌ای برای بررسی دقیق‌تر این ارتباط استفاده شود.

همچنین، همبستگی ارتفاع و شیب با ضریب r= ٠/٢٦ مشخص شد که گویای وجود رابطه‌ای مثبت اما ضعیف بین این دو متغیر است؛ بدین معنا که با افزایش ارتفاع، شیب تمایل اندکی به افزایش نشان می‌دهد. به طور کلی شیب زمین نقش مؤثرتری نسبت به ارتفاع در کنترل ترسیب کربن دارد، در حالی که ارتفاع اثر قابل توجهی بر ترسیب کربن نشان نمی‌دهد (شکل ٦).

در تحلیل مدل GWR، نتایج Local R^2 برای این مدل نشان داد که به‌طور متوسط، مقدار Local R^2 برابر با ٠/٣٣ بود. این مقادیر متغیر بودند و حداقل Local R^2 برابر با ٠/٠٠١٢ و حداکثر آن ٠/٧٥ گزارش شد. این نتایج نشان می‌دهد که مدل GWR به‌طور متوسط توانسته است تا حدود ٣٣ درصد از واریانس داده‌ها را توضیح دهد. همچنین، برخی از مناطق مدل توانسته‌اند تا ٧٤ درصد از واریانس را شبیه‌سازی کنند، در حالی که در برخی نقاط، مدل توانایی محدودی در توضیح واریانس داده‌ها داشته است.

نتایج تحلیل GWR نشان داد که مقدار باقی‌مانده‌های استانداردشده (StdResid) در منطقه مطالعه بین ٧/٩٥- تا ٦/٠٣ متغیر است. بر اساس طبقه‌بندی دستی در پنج کلاس، الگوی مکانی خطاها به‌خوبی قابل تفکیک شد. بخش عمده‌ای از نقاط در بازه ٠/٣٥- تا ٠/٤ قرار گرفتند که بیانگر برازش مناسب مدل در این محدوده‌ها است. این نواحی عمدتاً با رنگ سبز در نقشه (شماره ٧) مشخص شدند و

[DOI: 10.22034.19.69.6]



شکل ٦- الف: نمودار پراکنش ترسیب کربن و شیب، ب: نمودار پراکنش ترسیب کربن و ارتفاع، ج: نمودار پراکنش ترسیب کربن و جهت شیب

Fig 6. A: Carbon deposition and slope scatter diagram, B: Carbon deposition and elevation scatter diagram, C: Carbon deposition and slope direction scatter diagram

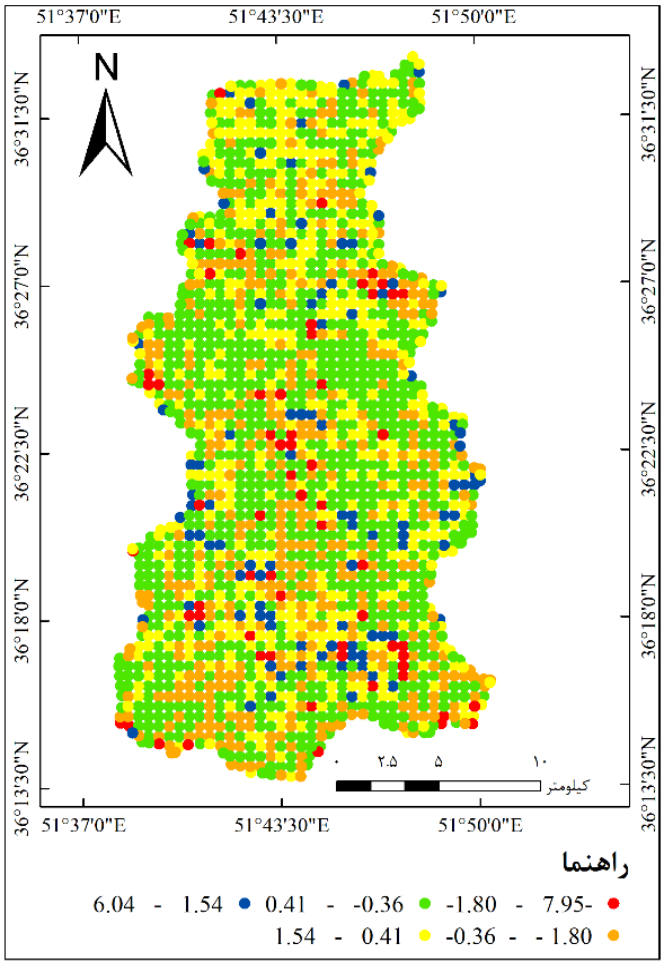
جدول ٨- آمار توصیفی باقیمانده‌های استاندارد شده مدل GWR

Table 7. Descriptive statistics of standardized residuals of the GWR model

شاخص	مقدار
تعداد نقاط (Count)	1869
میانگین (Mean)	0.068
حداقل (Minimum)	-7/95
حداکثر (Maximum)	6/038
انحراف معیار(Std. Dev)	1

نشان می‌دهند که مدل GWR توانسته تغییرات مکانی متغیر وابسته را به‌درستی پیش‌بینی کند. در مقابل، مقادیر باقیمانده‌های بزرگ منفی (بین ۷/۹۵- تا ۱/۸۰-) و مثبت (بین ٥٤/ ۱ تا ٦/۰۳) به‌ترتیب با رنگ‌های قرمز و آبی در نقشه مشخص شدند. این کلاس‌ها نمایانگر نقاط پرت و مناطقی هستند که مدل دقت کمتری در برآورد داشته است. وجود این نواحی می‌تواند ناشی از عوامل محلی (نظیر شرایط خاص اکولوژیکی، تغییرات کاربری اراضی یا ویژگی‌های خاکی) باشد که توسط متغیرهای ورودی مدل به‌طور کامل توضیح داده نشده‌اند. کلاس‌های میانی (نارنجی و زرد) نیز محدوده‌ای از باقی‌مانده‌های متوسط را نشان می‌دهند و حاکی از خطای نه‌چندان شدید مدل در این نقاط هستند. الگوی فضایی باقی‌مانده‌ها نشان می‌دهد که مدل GWR در بخش‌های مرکزی منطقه دقت بالاتری داشته و در حاشیه‌ها خطای پیش‌بینی افزایش یافته است. این الگو می‌تواند ناشی از تراکم بیشتر داده‌ها در مرکز، ناهمگنی فضایی بالاتر در حاشیه‌ها و اثرات مرزی مدل باشد. در نتیجه، نقاط حاشیه‌ای با شرایط خاص محلی ممکن است نیازمند متغیرهای تکمیلی یا تحلیل دقیق‌تر برای بهبود دقت مدل باشند.

[DOI: 10.22034.19.69.6]



شکل ۷: توزیع مکانی باقی‌مانده‌های استانداردشده مدل GWR

Fig 7. Spatial distribution of standardized residuals of the GWR model

بحث و نتیجه گیری

تحلیل مکانی ترسیب کربن با استفاده از مدل InVEST و داده‌های توپوگرافی نشان داد که ذخیره و ترسیب کربن در محدوده مطالعاتی عمدتاً تحت تأثیر ویژگی‌های شیب زمین قرار دارد. بیشترین ذخیره کربن کل و اجزای آن (اندام هوایی، اندام زیرزمینی، کربن خاک و لاشبرگ) در شیب‌های متوسط (۵–۱۲ درجه) مشاهده شد. این الگو می‌تواند ناشی از آن باشد که شیب‌های متوسط شرایط مناسبی برای تجمع خاک حاصل‌خیز، حفظ رطوبت و رشد پوشش گیاهی فراهم می‌کنند، در حالی که شیب‌های بسیار کم یا بسیار تند به ترتیب باعث کمبود زهکشی مناسب یا افزایش فرسایش خاک می‌شوند و ذخیره کربن را کاهش می‌دهند. این نتایج با مطالعات کوهستانی و همکاران [۱۷]، Sharp و همکاران [۳۱] و Kobler و همکاران [۱۶] همخوانی دارد.

در مورد ارتفاع، بیشترین ذخیره کربن در محدوده ۱۷۵۰–۲۱۵۰ متر مشاهده شد. این می‌تواند به دلیل شرایط زیست‌محیطی مناسب، تراکم پوشش گیاهی و فعالیت زیستی بالا در ارتفاعات متوسط باشد، همان‌طور که قربانی و همکاران [۱۰] گزارش کرده‌اند. با این حال، ضریب همبستگی بسیار پایین بین ارتفاع و ترسیب کربن (r= −۰/۰۵) نشان می‌دهد که در این محدوده مطالعاتی، ارتفاع اثر خطی قابل‌توجهی بر ترسیب کربن ندارد که این امر احتمالاً ناشی از تغییرات کم پوشش گیاهی و کاربری زمین با افزایش ارتفاع است. کاهش ذخیره کربن در ارتفاعات بالاتر نیز با یافته‌های Pan و همکاران [۲۷]، جعفریان و قربانی [۱۲]، Sarkar و همکاران [۲۹] و Wang و همکاران [۳۴] همخوانی دارد و عمدتاً به کاهش تراکم گیاهان و فعالیت زیستی نسبت داده می‌شود.

جهت شیب نیز تأثیر بسیار محدودی بر ترسیب کربن داشت (r = −۰/۰۵). این می‌تواند ناشی از آن باشد که تغییرات تابش و دما در جهت شیب در محدوده مطالعه برای ایجاد تفاوت قابل‌توجه در رشد گیاهان و تجمع کربن کافی نبوده است. همبستگی مثبت ضعیف بین ارتفاع و شیب (r= ۰/۲۶) نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع، شیب به طور اندکی افزایش می‌یابد، اما این اثر بر ترسیب کربن اهمیت چندانی ندارد این نتایج با مطالعات Thapliyal و همکاران [۳۲] همخوانی دارد.

در مجموع، ضریب همبستگی مثبت متوسط بین شیب و ترسیب کربن (r = ۰/۴۸) نشان داد که شیب زمین نقش مهم‌تری نسبت به ارتفاع (r = −۰/۰۵) و جهت شیب (r= −۰/۰۱) در کنترل تجمع و

[DOI: 10.22034.19.69.6]

ذخیره کربن دارد؛ در واقع شیب زمین عامل کلیدی در تعیین میزان ترسیب کربن است و ارتفاع و جهت شیب تأثیر خطی قابل توجهی ندارند. این یافته‌ها با مطالعات Zhang و همکاران [٤٢] و Gc و همکاران [٨] و Jakšić و همکاران [١٣] همخوانی دارد و نقش شیب زمین در افزایش ذخیره کربن را تأیید می‌کند.

مقدار متوسط Local R^2 معادل ٠/٣٣ نشان‌دهنده این است که مدل GWR به‌طور متوسط توانسته است حدود یک‌سوم از واریانس داده‌ها را مدل‌سازی کند. همچنین، برخی نقاط مدل توانسته‌اند ٧٤ درصد از واریانس داده‌ها را شبیه‌سازی کنند، در حالی که در برخی مناطق، مقدار Local R^2 به ٠/٠٠١٢ کاهش یافته است. این نشان‌دهنده این است که مدل در برخی مناطق قادر به توضیح واریانس به‌طور دقیق نبوده است. این نتایج ممکن است به‌دلیل پیچیدگی‌های محلی یا ویژگی‌های خاص داده‌ها باشد که مدل نتواسته به‌خوبی آن‌ها را در نظر بگیرد. این نتایج با یافته‌های Ma و همکاران [٢٤] همخوانی دارد که در مطالعه خود نشان دادند که مدل‌های GWR قادر به شبیه‌سازی دقیق داده‌ها در برخی مناطق هستند، در حالی که در مناطق دیگر با کاهش دقت مواجه می‌شوند.

تحلیل با استفاده از مدل (GWR) نشان داد که اثرات مکانی متغیرهای مستقل بر ترسیب کربن به صورت محلی متفاوت است و مدل توانسته عملکرد نسبتاً خوبی در پیش‌بینی ترسیب کربن داشته باشد [٢٢]. میانگین باقیمانده‌های استاندارد شده نزدیک صفر (Mean= ٠/٠٦٨) و انحراف معیار حدود یک، حاکی از عملکرد متعادل مدل است. با این حال، مقادیر حداقل و حداکثر باقیمانده‌ها (٧/٩٥- و ٦/٠٤) نشان می‌دهد که در برخی نقاط خاص، پیش‌بینی‌ها با خطای قابل توجه همراه بوده‌اند. این نقاط با خطای بالا می‌توانند به عنوان مناطق با عدم اطمینان مکانی بیشتر در تحلیل‌های آینده مورد توجه قرار گیرند.

مزیت مدل GWR نسبت به رگرسیون خطی سراسری در این است که ضرایب متغیرها را به صورت محلی تخمین می‌زند و اثرات فضایی متغیرهای مستقل بر ترسیب کربن را در هر نقطه از محدوده مطالعاتی بررسی می‌کند. بنابراین، مدل GWR قادر است تغییرات مکانی در اثرگذاری متغیرها را شناسایی کند و مناطق با تأثیر بالاتر یا کمتر هر متغیر را مشخص نماید. این ویژگی برای برنامه‌ریزی اکوسیستمی و مدیریت پایدار منابع طبیعی اهمیت دارد، زیرا می‌تواند مناطق با بیشترین پتانسیل ذخیره کربن را شناسایی و استراتژی‌های حفاظتی هدفمند طراحی کند [٥].

به طور کلی با توجه به نتایج این مطالعه و مقایسه با مطالعات پیشین، می‌توان نتیجه گرفت که شیب زمین نقش مؤثرتری نسبت به ارتفاع در کنترل ترسیب و ذخیره کربن دارد. مدل GWR توانسته اثرات مکانی متغیرهای مستقل را به خوبی شناسایی کند و نقاط با پیش‌بینی کمتر قابل اعتماد را مشخص نماید. ذخیره کربن بالا عمدتاً در ارتفاعات متوسط و شیب‌های متوسط رخ می‌دهد، که مشابه الگوهای گزارش شده در مطالعات قبلی است [٢٦ و ١٧]. نقاط با مقادیر بالای StdResid می‌توانند به عنوان مناطق هدف برای تحلیل‌های آینده و بهبود مدل در نظر گرفته شوند.

این یافته‌ها تأکید می‌کنند که تحلیل مکانی و استفاده از مدل‌های محلی مانند GWR ابزار مؤثری برای شناسایی مناطق با بالاترین پتانسیل ذخیره کربن و برنامه‌ریزی حفاظت اکوسیستم‌ها است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که ترکیب داده‌های توپوگرافی و مدل‌های مکانی می‌تواند بینش دقیق‌تری از پتانسیل ذخیره کربن ارائه دهد و در مدیریت پایدار منابع طبیعی و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی کاربرد داشته باشد [٦ و ٢٦].

با این حال، باید به محدودیت تعداد نمونه‌های برداشت‌شده (٢٠ نمونه برای هر کاربری) در این مطالعه اشاره شود. اگرچه این تعداد به‌منظور پوشش حداقلی ناهمگنی‌های اکولوژیکی منطقه انتخاب شد، اما در مقایسه با وسعت و پیچیدگی توپوگرافی حوضه، نسبتاً محدود محسوب می‌شود. این محدودیت عمدتاً ناشی از دشواری‌های دسترسی میدانی، محدودیت زمانی و هزینه‌های بالای آنالیز آزمایشگاهی بود. برای کاهش اثرات احتمالی ناشی از این محدودیت، از داده‌های مکمل سنجش از دور و اطلاعات ثانویه برای بهبود پوشش فضایی استفاده شد. با این وجود، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی با افزایش حجم نمونه‌برداری، دقت و قابلیت تعمیم نتایج ارتقا یابد.

سپاسگزاری

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از تمامی افرادی که در موفقیت این پژوهش سهم داشته‌اند، ابراز می‌کنند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچگونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

حلیمه جلورو: نمونه‌برداری و تحلیل آزمایشگاهی، نوشتن – پیش‌نویس اولیه، اجرای تحلیل‌های نرم‌افزاری

قاسم علی دیانتی تیلکی: نمونه‌برداری، اصلاح و ویرایش، نظارت، روش‌شناسی

هادی معماریان: نرم‌افزار، روش‌شناسی

یحیی کوچ: نگارش – اصلاح و ویرایش.

منابع مورد استفاده

[DOI: 10.22034.19.69.6]

1. An, Y., Wen, G., Fan, M., Zhao, P., Sun, J., He, M., ... & Zhang, Y. (2025). Towards sustainable urban development: decoding the spatiotemporal relationship between urban spatial structure and carbon emissions. Carbon Balance and Management, 20(1), 17. https://doi.org/10.1186/s13021-025-00304-5

2. Arundel, S. T., Phillips, L. A., Lowe, A. J., Bobinmyer, J., Mantey, K. S., Dunn, C. A., ... & Usery, E. L. (2015). Preparing The National Map for the 3D Elevation Program–products, process and research. Cartography and Geographic Information Science, 42(sup1), 40-53. https://doi.org/10.1080/15230406.2015.1057229

3. Azarnivand, H., Jenidi-Jafari, H., Zareh-Chahouki, M. A., Jafari, M., & Niko, Sh. (2010). Effects of livestock grazing on carbon and nitrogen storage in rangelands dominated by Artemisia sieberi in Semnan province. https://sid.ir/paper/136269/en

4. Chen, Y. (2015). A new methodology of spatial cross-correlation analysis. PloS one, 10(5), e0126158. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126158

5. de Asis López, F., Roca-Pardiñas, J., & Ordóñez, C. (2024). Regression analysis with spatially-varying coefficients using generalized additive models (GAMs). Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 255, 105254. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2024.105254

6. Dirnböck, T., Bahn, M., Diaz-Pines, E., Djukic, I., Englisch, M., Gartner, K., ... & Glatzel, S. (2025). High-resolution carbon cycling data from 2019 to 2021 measured at six Austrian long-term ecosystem research sites. Earth System Science Data, 17(2), 685-702. https://doi.org/10.5194/essd-17-685-2025

7. Filip, I. D., Peri, P. L., Banegas, N., Nasca, J., Sacido, M., Faverin, C., & Vibart, R. (2025). Predicting Soil Organic Carbon Stocks Under Native Forests and Grasslands in the Dry Chaco Region of Argentina. Sustainability, 17(11), 5012. https://doi.org/10.3390/su17115012

8. Gc, S., Kafle, G., Ayer, S., Khamcha, R., Poudel, S., Prabhakar, A., ... & Sapkota, T. (2025). Landscape-Level Assessment of Topographic Influences on Organic Carbon Storage in Forests of Far Western Nepal. Plant-Environment Interactions, 6(2), e70039. https://doi.org/10.1002/pei3.70039

9. Geremew, B., Tadesse, T., Bedadi, B., Gollany, H. T., Tesfaye, K., Aschalew, A., ... & Abera, W. (2024). Evaluation of RothC model for predicting soil organic carbon stock in north-west Ethiopia. Environmental Challenges, 15, 100909. https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100909

10. Ghorbani, A., Moameri, M., Abbasi Khalaki, M., Lazemi Zare, S., Baghaei, M., Hashemi Majd, K., ... & Bahrami, B. (2024). Investigating changes in carbon sequestration and some soil properties in the elevation gradient of rangelands in the north of Sablan, Iran. Water and Soil Management and Modeling, 4(1), 135-150. DOI: 10.22098/mmws.2023.12245.1218

11. Gonçalves, D. R. P., Mishra, U., Wills, S., & Gautam, S. (2021). Regional environmental controllers influence continental scale soil carbon stocks and future carbon dynamics. Scientific reports, 11(1), 6474. https://doi.org/10.1038/s41598-021-85992-y

12. Jafarian, Z., & Ghorbani, Zh. (2023). Predicting soil carbon sequestration in rangelands based on sampling depth and elevation using response surface methodology (RSM). Rangeland, 17(2), 179–194. http://rangelandsrm.ir/article-1-1129-en.html

13. Jakšić, S., Ninkov, J., Milić, S., Vasin, J., Živanov, M., Jakšić, D., & Komlen, V. (2021). Influence of slope gradient and aspect on soil organic carbon content in the region of Niš, Serbia. Sustainability, 13(15), 8332. https://doi.org/10.3390/su13158332

14. Janjani, N., Azizi, Z., Dehshiri, M. M., & Beikpour, Sh. (2022). Effects of aspect and elevation on carbon sequestration in vegetation near Tehran. Geographical Research Quarterly, 37(2), 213–219. http://georesearch.ir/article-1-1302-en.html

15. Joloro H, Dianati Tilaki GA, Memarian H, Kooch Y. Spatial–temporal assessment of land use changes and forest restoration on carbon sequestration using the InVEST model in Central Alborz, Iran. Modeling Earth Systems and Environment. 2025; 11(4):277. https://doi.org/10.1007/s40808-025-02452-6

16. Kobler, J., Zehetgruber, B., Dirnböck, T., Jandl, R., Mirtl, M., & Schindlbacher, A. (2019). Effects of aspect and altitude on carbon cycling processes in a temperate mountain forest catchment. Landscape Ecology, 34(2), 325-340. https://doi.org/10.1007/s10980-019-00769-z

17. Kohestani, N., Rastgar, S., Heydari, G., Jouibary, S. S., & Amirnejad, H. (2024). 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(6), 14477-14505. https://doi.org/10.1007/s10668-023-03203-2

18. Kooch Y, Sohrabzadeh Z (2024) Soil quality indicators are clearly plant species-specific: Implication for ecosystem management in a semi-arid landscape. Ecological Engineering 207: 107357. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107357.

19. Kooch, Y., Moghimian, N., Wirth, S., & Noghre, N. (2020). Effects of grazing management on leaf litter decomposition and soil microbial activities in northern Iranian rangeland. Geoderma, 361, 114100. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114100

[DOI: 10.22034.19.69.6]

and Management, https://doi.org/10.1016/j.rama.2020.04.002

30. Seitz, D., Dechow, R., Emde, D., Schneider, F., & Don, A. (2025). Improved Broad-Scale Modelling of Soil Organic Carbon Dynamics Following Land-Use Changes. European Journal of Soil Science, 76(4), e70159. https://doi.org/10.1111/ejss.70159

31. Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., Arkema, K., Bernhardt, J., Bierbower, W., ... & Wyatt, K. (2020). InVEST 3.9. 0. post72+ ug. ga7792a3 User′ s Guide. The Natural Capital Project.

32. Thapliyal, S., Sati, S. P., Singh, B., Rawat, D., Khanduri, V. P., Riyal, M. K., ... & Singh, N. (2024). Effect of altitudes and aspects on carbon sequestration potential of Quercus floribunda forests of Garhwal Himalayas. Trees, Forests and People, 18, 100690. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100690

33. Verma P, Siddiqui AR, Mourya NK, Devi AR (2024) Forest carbon sequestration mapping and economic quantification infusing MLPnn-Markov Chain and InVEST carbon model in askot wildlife sanctuary, Western Himalaya. Ecological Informatics 79: 102428. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102428

34. Wang, S., Han, W., & Yi, S. (2025). Afforestation species and slope as key drivers of soil carbon sequestration in plantations of the tropical-subtropical transition zone: A case study from Xishuangbanna, Southwest China. Journal of Forestry Research, 36(1), 1-14. https://doi.org/10.1007/s11676-025-01895-y

35. Xu J, Renaud FG, Barrett B (2021) Modelling land system evolution and dynamics of terrestrial carbon stocks in the Luanhe River Basin, China: a scenario analysis of trade-offs and synergies between sustainable development goals. Sustain. Sci 17:1323–1345. https://doi.org/10.1007/s11625-021-01004-y

36. Yang, C., Shen, F., Li, X., Cui, W., Zhang, L., Yang, L., & Zhou, C. (2025). Spatio-temporal mapping reveals changes in soil organic carbon stocks across the contiguous United States since 1955. Communications Earth & Environment, 6(1), 615. https://doi.org/10.1038/s43247-025-02605-6

37. Yousefi-Roshan, M. (2022). Training on creating topographic maps and digital elevation models in the course of map reading and cartography. Quarterly Journal of Research in Social Studies Education, 4(2), 67–91. https://sid.ir/paper/1030458/fa

38. Yousefi-Roshan, M., & Yousefi-Roshan, A. (2023). Training on creating elevation profiles, contour lines, slope, and aspect maps using DEM data. Quarterly Journal of Research in Social Studies Education, 5(3), 67–94. 10.48310/rsse.2024.15190.1172

39. Yu, S., Hu, X., Sheng, Y., & Zhao, C. (2025). Similarity and geographically weighted regression considering spatial scales of features space. Spatial Statistics, 67, 100897. https://doi.

20. Kumar, S., Prabhakar, M., Bhardwaj, D. R., Thakur, C. L., Kumar, J., & Sharma, P. (2024). Altitudinal and aspect-driven variations in soil carbon storage potential in sub-tropical Himalayan forest ecosystem: assisting nature to combat climate change. Environmental Monitoring and Assessment, 196(2), 126. https://doi.org/10.1007/s10661-024-12297-8

21. Lawrence, P. G., Roper, W., Morris, T. F., & Guillard, K. (2020). Guiding soil sampling strategies using classical and spatial statistics: A review. Agronomy Journal, 112(1), 493-510. https://doi.org/10.1002/agj2.20048

22. Lessani, M. N., & Li, Z. (2024). SGWR: similarity and geographically weighted regression. International Journal of Geographical Information Science, 38(7), 1232-1255. https://github.com/Lessani252/FastSGWR

23. Li, J., Yuan, J., Ciais, P., Kang, H., Freeman, C., Huang, Y., ... & Ding, W. (2025). Two decades of improved wetland carbon sequestration in northern mid-to-high latitudes are offset by tropical and southern declines. Nature Ecology & Evolution, 1-12. https://doi.org/10.1038/s41559-025-02809-1

24. Ma, W., Zhu, Y., Ou, D., Chen, Y., Shao, Y., Wang, N., ... & Li, H. (2025). Spatiotemporal Drivers of Urban Vegetation Carbon Sequestration in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration: A Remote Sensing-Based GWR-RF-SEM Framework Analysis. Remote Sensing, 17(12), 2110. https://doi.org/10.3390/rs17122110

25. Muga, G., Tiando, D. S., & Liu, C. (2025). Spatial relationship between carbon emissions and ecosystem service value based on land use: A case study of the Yellow River Basin. PloS one, 20(2), e0318855. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318855

26. O'Sullivan, D. (2003). Geographically weighted regression: the analysis of spatially varying relationships. Geographical analysis, 35(3), 272-275. 10.1353/geo.2003.0008

27. Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., ... & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. science, 333(6045), 988-993. DOI: 10.1126/science.1201609

28. Rotich, B., Szegi, T., Gelsleichter, Y. A., Fuchs, M., Ocansey, C. M., Phenson, J. N., ... & Csorba, Á. (2025). Variation in Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Stocks Across Elevation Gradients and Soil Depths in the Mount Kenya East Forest. Land, 14(6), 1217. https://doi.org/10.3390/land14061217

29. Sarkar, R., V. Corriher-Olson, C. Long & A. Somenahally, 2020. Challenges and Potentials for Soil Organic Carbon Sequestration in Forage and Grazing Systems. Rangeland Ecology

[DOI: 10.22034.19.69.6]

A multi-scenario simulation in Hohhot. Environmental and Sustainability Indicators, 26, 100655. https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100655

org/10.1016/j.spasta.2025.100897

40. Zhai, Y., Zhai, G., Chen, Y., Liu, J., 2024. Research on regional terrestrial carbon storage based on the pattern-process-function. Eco. Inform. 80, 102523. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102523

41. Zhang, M., Zhou, A., Cao, S., Yuan, Y., & Han, N. (2025). Multi-angle study on carbon stock variation and its driving factors in Pingshan County. Scientific Reports, 15(1), 9713. https://doi.org/10.1038/s41598-025-91610-y

42. Zhang, J., Cao, P., & Roosli, R. (2025). Assessing land use and carbon storage changes using PLUS and InVEST models:

[DOI: 10.22034.19.69.6]