

Investigating the relationship between functional diversity and carbon storage in the southern Zagros forests, Dehdz county, Khuzestan province

Iman Davoodi¹, Mostafa Moradi^{1*}, Reza Basiri¹, Pejman Tahmasebi Kohyani²

1. Department of Forestry and Cellulose Industries, Faculty of Natural Resources, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

2. Department of Rangeland management, Faculty of Natural Resources and Earth Science, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

* Corresponding author: moradi4@gmail.com

(Received: 14 March 2025

Revised: 17 July 2025

Accepted: 03 August 2025)

Extended Abstract

Introduction: In recent decades, concerns about climate change and unprecedented greenhouse gas emissions have highlighted the importance of carbon sequestration as a key tool for mitigating the negative effects of this phenomenon. Ecosystems, especially forests, capture atmospheric carbon through photosynthesis and store it in their tissues and soil. This process helps reduce atmospheric carbon levels and mitigate greenhouse gas emissions. However, the potential of ecosystems for carbon sequestration varies and is directly influenced by their functional diversity. Different species in more diverse forest ecosystems, perform different roles, such as nitrogen fixation, enhancing soil organic matter, and protecting the soil. Therefore, such ecosystems likely have a greater capacity to capture and conserve carbon. Understanding ecosystem services requires an understanding of functional diversity, which governs ecosystem processes through various components. Different plant species have different performance traits, resulting in varying abilities to absorb, store, and emit carbon. Thus, the relationship between functional diversity and carbon storage is important. This study aimed to evaluate the functional diversity and carbon storage of the *Quercus brantii* Lindl. forest in Dehdz city, Khuzestan Province.

Materials and methods: To study the correlation between different components of functional diversity and carbon storage, 16 plots were selected in a representative *Quercus brantii* forest in Dehdz, Khuzestan Province. The following parameters were measured to calculate community-weighted mean (CWM), functional divergence (FDvar), and functional dispersion (FDis) as indices of functional diversity: six plant traits (leaf nitrogen content, leaf phosphorus content, specific leaf area, plant height, wood specific gravity, and leaf dry matter content), total ecosystem carbon (TEC), aboveground biomass carbon (AGBC), aboveground litter carbon (ALC), and soil organic carbon (SOC). Principal component analysis (PCA) was used to identify the most important independent variables, which were then used in stepwise multiple linear regression analysis to determine which components best explain the variability in carbon storage.

Results and Discussion: The mean organic carbon amounts in TEC, AGBC, ALC, and SOC were 89.5, 11, 3, and 74.4 tons per hectare, respectively. The first PCA axis, explaining 41.9% of the variance, was characterized by the CWM of height, while the second axis, explaining 34.3% of the variance, was characterized by the CWM of specific leaf area. Results showed that litter carbon was predicted by functional divergence, while soil carbon was predicted by CWM. Both were related to the specific leaf area index, which had a negative association. In the study area, the CWM of leaf nitrogen and specific leaf area, as well as the FDvar related to specific leaf area, were identified as the most important factors for predicting carbon storage. The final model for biomass indicated that an increase in nitrogen content leads to an increase in carbon storage. Overall, significant effects of functional diversity on some plant traits such as leaf nitrogen content and specific leaf area were observed.

Conclusion: This study found that indices based on a single trait, such as CWM and FDvar, were more important for estimating carbon storage than the FDis index, which considers multiple traits. Additionally, the most important plant traits for carbon estimation were specific leaf area and leaf nitrogen content.

Keywords: Functional diversity, functional dispersion, organic carbon, biomass, community-weighted mean.

Citation: Davoodi, I., Moradi, M., Basiri, R., & Tahmasebi Kohyani, P. (2026). Investigating the relationship between functional diversity and carbon storage in the southern Zagros forests, Dehdz county, Khuzestan province. *Integrated Watershed Management*, 6(1), 126-146. doi= 10.22034/iwm.2025.2057984.1221

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



بررسی ارتباط تنوع عملکردی و ذخیره کربن جنگل‌های زاگرس جنوبی، شهرستان دهدز استان خوزستان

ایمان داوودی^۱، مصطفی مرادی^{۱*}، رضا بصیری^۱، پژمان طهماسبی کهیانی^۲

۱. گروه جنگلداری و صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

۲. گروه مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

*نویسنده مسئول: moradi4@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۸

چکیده مبسوط

مقدمه: در دهه‌های اخیر با افزایش نگرانی‌های جهانی در مورد تغییرات اقلیمی و انتشار بی‌سابقه گازهای گلخانه‌ای، اهمیت ذخیره‌سازی کربن به عنوان یکی از راه‌های اصلی کاهش تأثیرات منفی این پدیده بیش از پیش آشکار شده است. اکوسیستم‌ها به‌ویژه جنگل‌ها از طریق فتوسنتز، کربن را جذب کرده و در بافت‌های گیاهی و خاک ذخیره می‌کنند. این فرآیند به کاهش سطح کربن در اتمسفر و تعدیل اثرات گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند. با این حال توانایی اکوسیستم‌ها در ذخیره‌سازی کربن متفاوت بوده و به‌طور مستقیم تحت تأثیر تنوع عملکردی آنها است. اکوسیستم‌هایی که تنوع عملکردی بالایی دارند مانند جنگل‌ها که از گونه‌های مختلف گیاهی تشکیل شده و هر یک وظیفه خاصی مثل تثبیت نیتروژن، افزایش ماده آلی خاک و حفاظت از خاک را بر عهده دارند، ظرفیت بیشتری برای حفظ و افزایش ذخیره کربن دارند. بررسی تنوع عملکردی نقش مهمی در شناخت خدمات اکوسیستم دارد زیرا هر اکوسیستم دارای فرآیندی است که به‌وسیله مؤلفه‌های مختلف تنوع عملکردی اداره می‌گردند. از آنجایی که گونه‌های گیاهی مختلف دارای ویژگی‌های عملکردی متفاوتی هستند، در نتیجه در توانایی جذب، ذخیره و انتشار کربن عملکرد دارند. بنابراین بررسی ارتباط بین تنوع عملکردی و ذخیره کربن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این مطالعه با هدف شناخت عملکردی و ذخیره کربن منطقه جنگلی دهدز بلوط بلند با گونه غالب بلوط ایرانی در شهرستان دهدز استان خوزستان انجام گرفت.

مواد و روش‌ها: برای ارتباط بین مؤلفه‌های مختلف تنوع عملکردی و ذخیره کربن از ۱۶ قطعه نمونه در منطقه جنگلی معرف بلوط ایرانی در شهرستان دهدز استان خوزستان استفاده شد. شش ویژگی گیاهی شامل نیتروژن برگ، فسفر برگ، شاخص سطح ویژه برگ، ارتفاع گیاه، وزن مخصوص چوب و محتوای وزن خشک برگ و نیز ذخیره کربن کل، زیتوده، لاشبرگ و خاک در منطقه مورد مطالعه اندازه‌گیری شد تا شاخص میانگین وزنی، شاخص واگرایی عملکردی و شاخص پراکندگی عملکردی به عنوان شاخص‌های تنوع عملکردی محاسبه شوند. با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) مهمترین متغیرهای مستقل جهت ورود به تحلیل رگرسیون خطی چندگانه انتخاب شدند. در این مطالعه از رگرسیون خطی چندگانه به روش گام به گام استفاده شد تا مشخص شود که کدام مؤلفه تنوع عملکردی، ذخیره کربن را به بهترین وجه تبیین می‌کند.

نتایج و بحث: میانگین مقدار کربن آلی کل اکوسیستم، زیتوده، لاشبرگ و خاک به ترتیب ۸۹/۵، ۱۱، ۳ و ۷۴/۴ تن در هکتار به‌دست آمد. مهمترین ویژگی گیاهی بر روی محور اول PCA با واریانس ۴۱/۹ درصد، شاخص میانگین وزنی ارتفاع و بر روی محور دوم PCA با واریانس ۳۴/۳ درصد، شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ بود. نتایج نشان داد که بهترین متغیر برای پیش‌بینی کربن لاشبرگ، شاخص واگرایی سطح ویژه برگ می‌باشد. همچنین بهترین متغیر برای پیش‌بینی کربن خاک نیز شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ می‌باشد. شاخص میانگین وزنی نیتروژن برگ و شاخص سطح ویژه برگ و همچنین شاخص واگرایی مربوط به شاخص سطح ویژه برگ از مهمترین مؤلفه‌ها در برآورد ذخیره کربن در منطقه مورد مطالعه بودند. مدل پیش‌بینی شده نهایی برای زیتوده نشان داد که با افزایش میزان نیتروژن برگ، میزان ذخیره کربن در بخش زیتوده آن بیشتر می‌شود. بطورکلی اثرات معنی‌دار قوی شاخص‌های تنوع عملکردی روی برخی از ویژگی‌های گیاهی مثل میزان نیتروژن برگ و شاخص سطح ویژه برگ یافت شد.

نتیجه‌گیری: در این مطالعه نقش شاخص‌های مبتنی بر یک ویژگی مثل میانگین وزنی و شاخص واگرایی عملکردی در برآورد ذخیره کربن مهم‌تر تشخیص داده شد. همچنین شاخص پراکندگی مبتنی بر چند ویژگی که پراکنش ویژگی‌های گیاهی را در چند بعد نشان می‌دهد معنی‌دار نشد. از طرفی، شاخص ویژه سطح برگ و میزان نیتروژن برگ به عنوان مهمترین ویژگی‌های گیاهی مؤثر در برآورد کربن تعیین شدند.

واژه‌های کلیدی: تنوع عملکردی، شاخص پراکندگی، کربن آلی، زیتوده، شاخص میانگین وزنی.

استناد: داوودی، الف.، مرادی، م.، بصیری، ر.؛ و طهماسبی کهیانی، پ. (۱۴۰۵). بررسی ارتباط تنوع عملکردی و ذخیره کربن جنگل‌های زاگرس جنوبی، شهرستان دهدز استان خوزستان. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۱۶(۱)، ۱۴۶-۱۲۶.

حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وبسایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

در دهه‌های اخیر با افزایش نگرانی‌های جهانی در مورد تغییرات اقلیمی و انتشار بی‌سابقه گازهای گلخانه‌ای، اهمیت ذخیره‌سازی کربن به عنوان یکی از ابزارهای اصلی برای کاهش تأثیرات منفی این پدیده بیش از پیش آشکار شده است (Makarieva *et al.*, 2023). اکوسیستم‌های زمینی به‌ویژه جنگل‌ها از طریق فرآیند فتوسنتز، کربن را جذب کرده و در بافت‌های گیاهی و خاک ذخیره می‌کنند. این فرآیند به کاهش سطح کربن در اتمسفر و تعدیل اثرات گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند (Jagadesh *et al.*, 2024). با این حال توانایی اکوسیستم‌ها در ذخیره‌سازی کربن متفاوت بوده (Mirzaei *et al.*, 2016; Forogh Nasab *et al.*, 2020) و به‌طور مستقیم تحت تأثیر تنوع عملکردی، تنوع ساختاری (Alinejadi *et al.*, 2016)، جهت جغرافیایی (Karamian & Hosseini, 2015) و حتی فعالیت انسانی است (Parhizkar *et al.*, 2025). در اکوسیستم‌هایی که دارای یک گونه غالب هستند (مثل جنگل‌های زاگرس که گونه غالب آن بلوط ایرانی است)، ترسیب و ذخیره کربن به عواملی مثل قطر و سن درخت (Alinejadi *et al.*, 2016)، ارتفاع از سطح دریا (Sarvazad *et al.*, 2023) و دانه‌زاد یا شاخه‌زاد بودن درخت بستگی دارد (Mahdavi *et al.*, 2020). در اکوسیستم‌هایی که تنوع عملکرد بالاست، گیاهان با ویژگی متفاوت ممکن است بطور کارآمدتری از منابع استفاده کنند که این موضوع منجر به افزایش جذب کربن و پایداری بیشتر ذخیره کربن در برابر تغییرات اقلیمی می‌شود (Junttila *et al.*, 2023). بررسی ارتباط بین تنوع عملکردی و ذخیره کربن در چند بعد اهمیت دارد. این بررسی‌ها به بکارگیری استراتژی‌های مؤثرتر برای حفاظت از اکوسیستم‌های غنی از کربن و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کرده (Morecroft *et al.*, 2019) و موجب بهبود مدیریت منابع طبیعی و

حفظ تنوع زیستی شده و در نهایت می‌تواند منجر به افزایش جذب و ذخیره کربن شود (Imani *et al.*, 2016; Moradi & Moradi, 2024). سیاست‌گذاران می‌توانند با توجه به نتایج چنین تحقیقاتی، برنامه‌های حفاظتی و مدیریتی را تدوین کنند که هدف آنها حفظ یا افزایش تنوع عملکردی اکوسیستم‌ها به منظور افزایش ظرفیت ذخیره کربن و مقابله با تغییرات اقلیمی باشد (Chen *et al.*, 2023).

ویژگی‌های گیاهی نقش مهمی در ذخیره کربن ایفا می‌کنند. برخی از ویژگی‌های گیاهی مؤثر در ذخیره کربن شامل شاخص ویژه سطح برگ^۱ (SLA) با سرعت رشد و جذب کربن رابطه مستقیمی دارد، درحالی که گیاهان با شاخص ویژه سطح برگ پایین، کربن را در ساختارهای مقاوم‌تر مانند برگ‌های ضخیم‌تر ذخیره می‌کنند (Díaz *et al.*, 2007). میزان نیتروژن برگ^۲ (LNC) نیز یکی از شاخص‌های کلیدی در تعیین استراتژی‌های عملکردی گیاهان به شمار می‌رود، چرا که بر کارایی فتوسنتز تأثیرگذار است. گونه‌هایی با LNC بالا معمولاً دارای نرخ فتوسنتز بالاتر، رشد سریع‌تر، و چرخه زندگی کوتاه‌تری هستند، که با استراتژی مصرف‌گر منابع^۳ هم‌خوانی دارد. این گیاهان قادرند کربن بیشتری را از هوا جذب کرده و آن را با سرعت بیشتری به زیئوده تبدیل کنند (Mokany *et al.*, 2004; Wright *et al.*, 2008). در مقابل، گونه‌هایی با LNC پایین‌تر اغلب دارای رشد آهسته‌تر و صفات محافظه‌کارانه‌تری بوده که آن‌ها را در برابر محدودیت منابع مقاوم‌تر می‌سازد.

میزان نیتروژن برگ نیز بر کارایی فتوسنتز تأثیر می‌گذارد، بطوری‌که گیاهانی با نیتروژن بالاتر، کربن بیشتری را از هوا جذب می‌کنند و به سرعت به زیئوده تبدیل می‌کنند (Mokany *et al.*, 2008). میزان فسفر برگ^۴ (LPC) به توانایی گیاهان برای حفظ و استفاده بهینه از فسفر اشاره دارد. این شاخص می‌تواند نقش

3- resource-acquisitive

4- Leaf Phosphorus Content

1- Specific Leaf Area

2- Leaf Nitrogen Content

در حالی که تنوع گونه‌ای تنها به شمار گونه‌های موجود در یک زیستگاه اشاره دارد، تنوع عملکردی^۳ به تفاوت در ویژگی‌های عملکردی گونه‌ها می‌پردازد؛ ویژگی‌هایی که مستقیماً بر عملکردهای اکوسیستم مانند بهره‌وری، چرخه مواد غذایی، و ذخیره کربن اثر می‌گذارند. مفهوم تنوع عملکردی، ریشه در تلاش برای پیوند بین ویژگی‌های گیاهی و فرآیندهای بوم‌شناختی دارد (Diaz & Cabido, 2001) این مفهوم با دو فرضیه کلیدی همراه است: فرضیه تأثیر گونه‌های غالب^۴ تأکید دارد که گونه‌های غالب با ویژگی‌های خاص خود، بیشترین تأثیر را بر عملکرد اکوسیستم دارند. فرضیه مکملی^۵ بیان می‌کند که وجود طیف متنوعی از صفات عملکردی، بهره‌برداری کارآمدتری از منابع فراهم می‌کند (Diaz & Cabido, 2001).

برای سنجش تنوع عملکردی، شاخص‌های مختلفی توسعه یافته‌اند که می‌توان آن‌ها را به دو دسته کلی شاخص‌های تک‌بعدی و شاخص‌های یکنواختی تقسیم کرد. شاخص‌های تک‌بعدی مثل میانگین وزنی جامعه^۶ (CWM) و واگرایی عملکردی^۷ (FDiv) و شاخص‌های مربوط به گستره و یکنواختی صفات مثل پراکندگی عملکردی^۸ (FDis)، غنای عملکردی، یکنواختی عملکردی و شاخص Rao می‌باشد. در این مطالعه، تمرکز بر شاخص‌های CWM، FDiv و FDis بوده است. دلیل انتخاب این شاخص‌ها، تمرکز پژوهش بر نقش گونه‌های غالب از طریق CWM، پراکندگی کلی صفات (FDis)، و واگرایی ویژگی‌ها به سمت صفات خاص (FDiv) بوده است. شاخص‌های تنوع عملکردی، از ابزارهای ضروری برای درک نقش ویژگی‌های گیاهی در عملکرد و خدمات اکوسیستم هستند. این شاخص‌ها نه تنها تنوع گونه‌ها را در یک جامعه منعکس می‌کنند بلکه نشان می‌دهند که ویژگی‌های آنها چگونه به فرآیندهایی

مهمی در افزایش بهره‌وری فتوسنتزی داشته باشد که این موضوع منجر به افزایش جذب دی‌اکسید کربن و ذخیره کربن در زیتوده خواهد شد. گیاهانی که فسفر را بهتر تثبیت کنند توانایی بیشتری در تولید زیتوده دارند و در نتیجه کربن بیشتری را از طریق فتوسنتز ذخیره می‌کنند (Kvakić *et al.*, 2020). محتوای ماده خشک برگ^۱ (LDMC) بیان‌گر نسبت وزن خشک به وزن تازه برگ است و نقش مهمی در فرآیندهای بوم-شناختی و ذخیره کربن ایفا می‌کند. گیاهانی که محتوای ماده خشک برگ آنها بالا می‌باشد معمولاً برگ‌های مقاوم‌تر و بادوام‌تری دارند و سرعت تجزیه آنها کمتر است. این موضوع باعث می‌شود که کربن ذخیره شده در برگ‌ها برای مدت طولانی‌تری در زیتوده باقی بماند و به این ترتیب به افزایش ذخیره کربن در اکوسیستم کمک می‌کند (Pakeman *et al.*, 2011). همچنین گیاهانی با ارتفاع بیشتر توانایی بالاتری در جذب نور و تولید زیتوده دارند که این امر منجر به افزایش ظرفیت ذخیره کربن می‌کند (Freschet *et al.*, 2015). یکی دیگر از ویژگی‌های گیاهی وزن مخصوص چوب^۲ (WSG) می‌باشد که بطور مستقیم با توانایی ذخیره کربن مرتبط است. درختانی با وزن مخصوص چوب بالاتر معمولاً چگالی یا تراکم چوب بیشتری داشته و ذخیره کربن آنها در واحد حجم چوب بالاتر می‌باشد (Keerthika & Parthiban, 2022). این نوع درختان به دلیل داشتن چوب متراکم‌تر، مدت طولانی‌تری کربن را در ساختار خود نگه می‌دارند و مقاومت بیشتری در برابر تجزیه و پوسیدگی دارند که این موضوع باعث حفظ کربن در اکوسیستم به مدت طولانی‌تری می‌شود (Pati *et al.*, 2023).

درک ساختار و عملکرد جوامع گیاهی، نیازمند بررسی تنوع آن‌ها از منظرهای مختلف است. تنوع زیستی به‌طور کلی شامل تنوع گونه‌ای و عملکردی است.

5- Niche Complementarity
6- Community-Weighted Mean
7- Functional Divergence
8- Functional Dispersion

1- Leaf Dry Matter Content
2- Wood Specific Gravity
3- Functional diversity
4- Mass Ratio Hypothesis

کرد. Karami و همکاران (۲۰۲۲) در اکوسیستم جنگلی بلوط غرب به دنبال بررسی برتری شاخص‌های تنوع ساختاری بر شاخص‌های تنوع عملکردی در امتداد گرادیان خشکیدگی بلوط بودند. میزان ذخیره کربن در خاک با شاخص واگرایی عملکردی محتوای ماده خشک برگ و ارتفاع رابطه مثبت معنی‌داری نشان داد. Jafarian و همکاران (۲۰۱۸) نیز با مطالعه اثرات شدت چرای دام بر تغییرات شاخص‌های تنوع گونه‌ای و تنوع کارکردی گونه‌های گیاهی به این نتیجه رسیدند که شاخص چندوجهی محدب نسبت به افزایش شدت چرا تغییرات زیادی پیدا می‌کند در حالیکه شاخص غنای گونه‌ای تغییر کمی دارد. در مطالعه دیگری توسط Mansoori و همکاران (۲۰۱۳) به این نتایج رسیدند که تنوع عملکردی در مناطق خشک با چرای حیوانات افزایش داشته است. در خارج از کشور مطالعات متعددی در این زمینه انجام شده است. در پژوهشی در یک اکوسیستم جنگلی معتدله هیمالیا در هند، ویژگی‌هایی مانند میانگین وزنی ارتفاع، SLA، میزان فسفر و نیتروژن برگ، شاخص واگرایی ارتفاع، و محتوای ماده خشک برگ به‌عنوان مهم‌ترین مؤلفه‌های تعیین‌کننده ذخیره کربن کل اکوسیستم معرفی شدند؛ این ذخیره شامل کربن زیتوده هوایی، لایه لاشبرگ و خاک بوده است (Rawat et al., 2019). در مطالعه‌ای در جنگل‌های شمال تایلند میانگین وزنی شاخص ویژه سطح برگ با میزان ذخیره کربن خاک و کربن کل اکوسیستم همبستگی مثبت معنی‌داری نشان داد (Asanok et al., 2021). Moles و همکاران (۲۰۰۹) بیان کردند که دو ویژگی گیاهی مهم از تنه درخت به عنوان محل ذخیره کربن وزن مخصوص چوب و ارتفاع گیاه است. رابطه بین ذخیره کربن و تنوع عملکردی در اکوسیستم‌های جنگلی نیمه‌خشک آرژانتین مورد مطالعه قرار گرفت. میانگین وزنی و شاخص کمی واگرایی ارتفاع و وزن مخصوص چوب به عنوان

مانند ذخیره کربن کمک می‌کنند (Petchey & Gaston, 2006). سه شاخص رایج شامل شاخص میانگین وزنی جامعه (CWM)، معیاری از میانگین ویژگی‌های یک جامعه است که با توجه به فراوانی هر گونه وزن‌دهی می‌شود. این شاخص، نشان‌گر تأثیر گونه‌های غالب بر فرآیندهای کلی اکوسیستم مثل ذخیره کربن می‌باشد. شاخص واگرایی عملکردی (FDvar) نشان‌دهنده‌ی میزان پراکندگی یا برجسته شدن ویژگی‌های خاص در بین گونه‌ها است. این شاخص می‌تواند بر اساس یک ویژگی^۱ یا ترکیب چند ویژگی^۲ محاسبه شود، که هر کدام فرضیات متفاوتی را درباره توزیع صفات در جامعه دنبال می‌کنند (Mason et al., 2005). شاخص پراکندگی عملکردی (FDIs) متوسط فاصله گونه‌ها از مرکز ویژگی‌های جامعه و بیانگر گسترش صفات در جامعه است. این شاخص تنوع ویژگی‌ها و تأثیرات آن بر عملکرد بوم‌شناختی را مورد تأکید قرار می‌دهد (Laliberté & Legendre, 2010).

اطلاعات اندکی در خصوص نقش شاخص‌های تنوع عملکردی روی ذخیره کربن در اکوسیستم جنگلی در ایران (کربن درخت، لاشبرگ و خاک) وجود دارد. Tahmasebi و همکاران (۲۰۱۷) رابطه تنوع عملکردی و کربن ذخیره شده در کل اکوسیستم، خاک، لاشبرگ و زیتوده در چهار اکوسیستم شامل یک ناحیه در استان خوزستان و سه ناحیه دیگر در چهارمحال و بختیاری بررسی کردند. نتایج مطالعه آنها مشخص کرد که در اقلیم نیمه‌خشک منطقه‌ای از استان چهارمحال و بختیاری، شاخص واگرایی عملکردی شاخص سطح ویژه برگ (SLA) با میزان ذخیره کربن زیتوده و لاشبرگ، رابطه‌ی معکوس معنی‌داری نشان داد. در مقابل، در اقلیم گرم‌تر منطقه خوزستان، شاخص میانگین وزنی وزن مخصوص چوب (WSG) با میزان ذخیره کربن خاک رابطه مستقیم و معنی‌داری برقرار

شمال‌شرق استان خوزستان موسوم به بلوط‌بلند در شهرستان دهدز است. این منطقه بین طول‌های $۵۰^{\circ}۱۸'$ و $۵۰^{\circ}۲۸'$ شرقی و عرض‌های $۳۱^{\circ}۳۶'$ و $۳۱^{\circ}۴۴'$ شمالی و دامنه ارتفاعی حدود ۷۰۰ تا ۱۹۰۰ متر از سطح دریا با جهت غالب جنوب‌غربی قرار گرفته است (شکل ۱). خاک منطقه عمدتاً سیلتی رسی و دارای عمق کم و عمدتاً فاقد سنگریزه می‌باشد. اقلیم منطقه مدیترانه‌ای با بارندگی ۵۹۰ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت ۲۱ درجه سانتی‌گراد است (Tahmasebi et al., 2017) (شکل ۱). پوشش درختی غالب اشکوب بالای جنگل بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.) با فرم دانه‌زاد است و گونه بنه (*Pistacia atlantica* Desf.) به صورت پراکنده است. پوشش علفی و درختچه‌ای زیراشکوب شامل علف بام (*Bromus tectorum* L.)، گون شوشی (*Astragalus susianus* Boiss.)، دافنه (*Daphne mucronata* Royle.)، چمن پیازک‌دار (*Poa bulbosa* L.) و شبدر تماشایی (*Trifolium grandiflorum* Schreb.) می‌باشد.

روش نمونه‌برداری و تجزیه آزمایشگاهی

تعداد ۱۶ قطعه نمونه ۳۰ در ۳۰ متر برای مدل‌سازی کربن آلی کل اکوسیستم^۱ (TEC)، کربن زیتوده روی زمینی^۲ (AGBC)، کربن لاشبرگ^۳ (ALC) و ذخیره کربن آلی خاک^۴ (SOC) در نظر گرفته شدند. روش نمونه‌برداری به صورت انتخابی و نحوه انتخاب قطعات نمونه بر اساس جنگل‌گردشی و بررسی‌های میدانی صورت گرفت. بطوری‌که این نمونه‌ها مبین شرایط متنوع پوشش گیاهی منطقه باشند. زیتوده پوشش گیاهی علفی در اوایل فصل رویش، اوایل اردیبهشت ماه، در ۵ میکروقطعه نمونه چهار مترمربعی که در چهار گوشه و مرکز هر قطعه نمونه قرار داشتند (Tahmasebi et al., 2017) برداشت شد.

متغیرهای پیش‌بینی کننده ذخیره کربن زیتوده، لاشبرگ و کل اکوسیستم در ۱۶ رویشگاه از جنگل‌های نیمه‌خشک آرژانتین در مدل رگرسیون خطی چندگانه قرار گرفتند (Conti & Díaz, 2013). در مطالعه دیگری Yang و همکاران (۲۰۱۹) نقش تنوع عملکردی در ذخیره کربن پوشش گیاهی در در چین را مورد مطالعه قرار دادند. رابطه مثبت معنی‌داری بین شاخص میانگین وزنی ارتفاع و میزان ذخیره کربن کل، خاک، لاشبرگ و زیتوده به دست آمد. Zuo و همکاران (۲۰۱۶) همبستگی تنوع عملکردی و میزان ذخیره کربن در مراتع شنی مغولستان را مطالعه کردند. در این تحقیق، شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ به عنوان بهترین متغیر پیش‌بینی کننده کربن خاک معرفی شد. با توجه به اینکه گیاهان مختلف، ظرفیت متفاوتی در ذخیره و انتشار کربن دارند، بررسی ارتباط بین تنوع عملکردی مبتنی بر ویژگی گیاهان و ذخیره کربن در بخش‌های مختلف یک اکوسیستم مثل زیتوده، لاشبرگ و خاک دارای اهمیت است. از طرفی در مناطق جنگلی ایران این نوع مطالعه بسیار کم صورت گرفته است. بر این اساس هدف این تحقیق بررسی ارتباط بین شاخص‌های مختلف تنوع عملکردی و ذخیره کربن در سطوح مختلف در منطقه جنگلی دهدز واقع در شمال‌شرق استان خوزستان می‌باشد. همچنین این مطالعه به دنبال پاسخ به این سوال است که کدام ویژگی(های) گیاهی در پیش‌بینی ذخیره کربن این منطقه جنگلی مهم می‌باشد؟

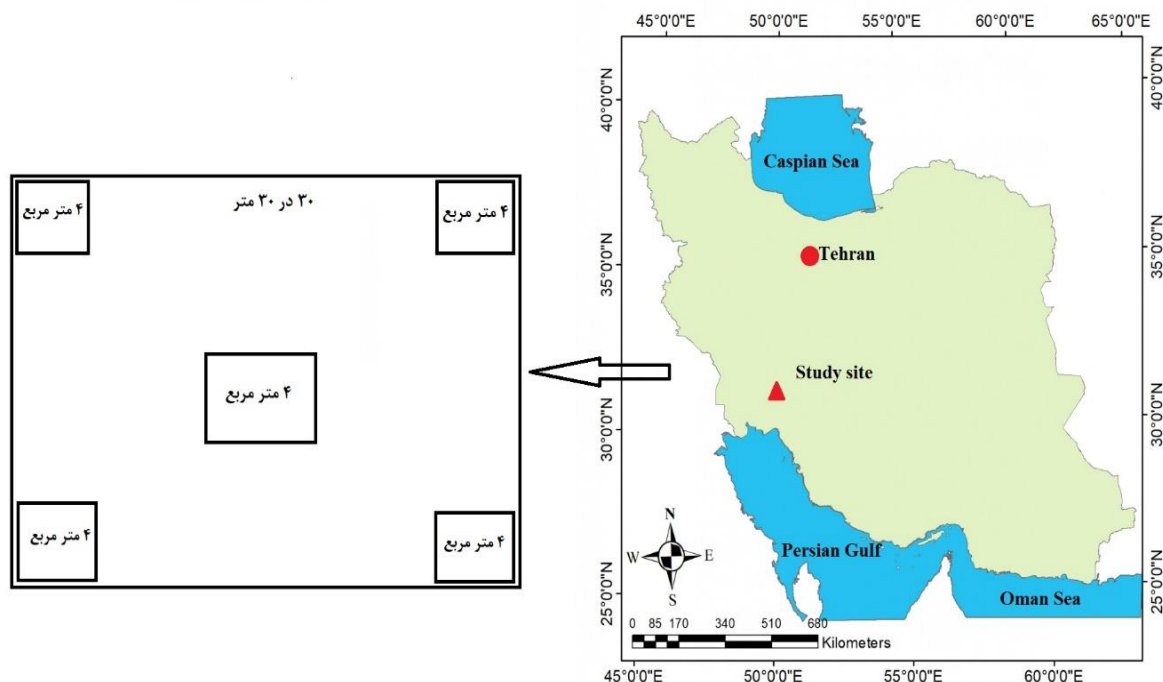
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با نام بلوط بلند از توابع شهر دهدز در استان خوزستان می‌باشد که بین دو سد کارون سه و چهار است. منطقه مورد مطالعه، کوهستانی بوده و شامل حدود ۵۰۰ هکتار از مناطق جنگلی واقع در

3- Aboveground Litter Carbon
4- Soil Organic Carbon

1- Total Ecosystem Carbon
2- Aboveground Biomass Carbon



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه جنگلی دهدز در استان خوزستان

Figure 1- Geographical location of Dehdz forest area in Khuzestan province

$$ABG = 0.2326x_Q^{2.079} \quad r^2 = 0.986 \quad (1)$$

$$ABG = 0.638x_p^{2.786} \quad r^2 = 0.93 \quad (2)$$

که در آن AGB: زیتوده خشک روی زمینی به کیلوگرم و XQ: قطر برابر سینه به سانتی‌متر و Xp: قطر تاج به متر است. درصد پوشش گیاهان علفی و درختچه‌ای در میکروقطعه نمونه‌های چهار مترمربعی تخمین زده شد. درصد پوشش گیاهان علفی و درختچه‌ای به صورت جداگانه در میکروقطعه‌های نمونه با مساحت چهار مترمربع تخمین زده شد. سپس برای هر نمونه، درصد پوشش کل با تجمع مقادیر جداگانه پوشش گیاهان علفی و درختچه‌ای محاسبه گردید. این تجمع بر اساس جمع ساده درصدها صورت گرفت/یا میانگین‌گیری وزنی (در صورت وجود). بدین ترتیب، داده‌های پوشش گیاهان علفی و درختچه‌ای به منظور تحلیل‌های بعدی در قالب پوشش کل گیاهی در نظر گرفته شدند. درصد پوشش گونه‌های درختی از طریق اندازه‌گیری دو قطر تاج عمود بر هم و محاسبه سطح تاج برای تک‌تک درختان و در سطح قطعات نمونه ۹۰۰ مترمربعی طبق رابطه (۳) انجام شد:

لاشبرگ‌ها (ریزچوب‌ها، شاخه‌های کوچک و برگ‌های افتاده) در پایان فصل رشد و اواخر مهرماه در همان میکروقطعات نمونه جمع‌آوری گردید (Palosuo *et al.*, 2005). وزن خشک پوشش گیاهی علفی از طریق برداشت کامل بخش علفی در سطح قطعات نمونه کوچک صورت گرفت. برای اندازه‌گیری زیتوده درختچه‌ها از روابط الومتریکی استفاده شد (Andrew *et al.*, 1979). در این روش، زیتوده بر اساس پارامترهای قابل اندازه‌گیری مانند قطر شاخه‌ها و ارتفاع برآورد می‌شود. این روابط به صورت مدل‌های ریاضی تعریف شده‌اند که به کمک آن‌ها وزن خشک درختچه برآورد می‌شود. در بخش درختی با توجه به اینکه تنها درختان بلوط و بنه در پلات‌های مورد بررسی وجود داشتند، از معادلات الومتریکی مربوط به این دو گونه استفاده شد. درختان بلوط ایرانی به فرم دانه‌زاد (حدود ۹۵ درصد) و تعداد کمی درختان بنه (حدود ۵ درصد) بودند. برای به‌دست آوردن زیتوده درختان بلوط ایرانی و بنه به ترتیب از روابط رگرسیونی آلومتریکی (۱) و (۲) استفاده شد (Sohrabi & Shirvani, 2012; Tahmasebi *et al.*, 2017):

$$Cover\% = \left(\frac{d_1-d_2}{2}\right)^2 \frac{\pi}{4} \quad (3)$$

d_1 و d_2 : دو قطر عمود بر هم تاج درخت و Cover: پوشش می‌باشد. برای تعیین درصد رطوبت اجزاء مختلف پوشش گیاهی و لاشبرگ، ابتدا نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و سپس با ترازو (دقت ۰/۰۱ گرم) وزن شد. اجزای علفی، درختچه‌ای، شاخه و برگ در درجه حرارت ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت (Tahmasebi et al., 2017) و دیسک‌های چوبی گرفته شده از تنه درختان (سه دیسک از ۱۲ پایه درختی) در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت در آون قرار داده شد تا کاملاً خشک شود و به وزن پایدار برسد، سپس وزن خشک کل برای تمام اجزای موردنظر به‌دست آمد (Sohrabi & Shirvani, 2012). برای اندازه‌گیری درصد کربن آلی نمونه‌ها نیز از روش احتراق در کوره الکتریکی استفاده شد. نمونه‌های خشک شده پس از توزین، به مدت ۴ ساعت در کوره الکتریکی با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و پس از خاکستر شدن کامل، دوباره توزین شدند. با تعیین وزن خاکستر و با در دست داشتن وزن اولیه و نسبت کربن آلی به مواد آلی (۵۴ درصد)، مقدار کربن آلی در اندام‌های مختلف درختان محاسبه و در نهایت ضریب تبدیل وزن خشک به کربن آلی این اندام‌ها محاسبه شدند (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). برای تعیین وزن مخصوص چوب، ابتدا با داشتن قطر یقه و قطر تنه در محل شروع تاج و با استفاده از فرمول Huber (۱۹۲۸) حجم تر تنه محاسبه شد. سپس از یک نمونه از چوب تنه (یک قطعه نمونه ۲ سانتی‌مترمکعبی از محل برش بدنه درخت) چگالی چوب اندازه‌گیری شد. از نسبت چگالی چوب به چگالی آب (۱ گرم بر سانتی‌مترمکعب) وزن مخصوص چوب به‌دست آمد. وزن خشک نمونه چوب از طریق قرار دادن در کوره با دمای ۱۰۱ تا ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا زمانی که به وزن پایدار برسد، به‌دست آمد (Williamson & Wiemann, 2010).

نمونه‌برداری خاک در میکروقطعات نمونه چهار مترمربعی با استفاده از آگر با قطر ۱۰ سانتی‌متر انجام شد. با توجه به کوهستانی بودن منطقه و عمق کم خاک، عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (Tahmasebi et al., 2017). نمونه‌های خاک آورده شده به آزمایشگاه در هوای آزاد خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد، جرم مخصوص ظاهری از طریق وزن خشک خاک در یک سیلندر فلزی به قطر ۴/۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر برحسب گرم بر سانتی‌مترمکعب و خشک کردن آن در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت در آزمایشگاه اندازه‌گیری و محاسبه شد. کل کربن آلی برحسب گرم بر کیلوگرم به روش والکی بلاک به‌دست آمد. ذخیره کربن بر اساس رابطه (۴) محاسبه شد،

$$SOC_s = SOC_c \times BD \times D/10 \quad (4)$$

در این معادله SOC_s مقدار ذخیره کربن آلی بر حسب تن بر هکتار، SOC_c میزان کربن آلی بر حسب گرم بر کیلوگرم، BD میانگین وزن مخصوص ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتی‌مترمکعب و D عمق نمونه‌برداری خاک بر حسب سانتی‌متر است (Deng et al., 2014). در نهایت مقدار کربن در چهار سطح به‌دست آمد:

$$TEC = AGBC + ALC + SOC_s \quad (5)$$

ویژگی‌های گیاهی

ویژگی‌های گیاهی مهم و کلیدی که با ذخیره کربن مرتبط هستند و برای کمی‌سازی شاخص‌های تنوع عملکردی در اکثر منابع استفاده شده‌اند انتخاب و مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند (Asanok et al., 2021; Díaz et al., 2007). این ویژگی‌های گیاهی شامل میزان نیتروژن برگ (LNC) و فسفر برگ (LPC) (میلی‌گرم بر گرم)، شاخص سطح ویژه برگ (SLA) (میلی‌متر مربع بر میلی‌گرم)، ارتفاع گیاه (H) (سانتی‌متر)، وزن مخصوص چوب (WSG) و محتوای ماده خشک برگ (LDMC) (میلی‌گرم) می‌باشد. ویژگی‌های گیاهی با روش Cornelissen و همکاران (۲۰۰۳) و Pérez-Harguindeguy و همکاران (۲۰۱۳) اندازه‌گیری

میزان فسفر برگ (LPC)، ارتفاع گیاه (H)، وزن خشک برگ (LDMC) و وزن مخصوص چوب (WSG) برآورد شدند. این ویژگی‌ها برای ۷۶ گونه گیاهی، از پایه‌های زنده موجود در هر پلات، با سه تکرار (ده پایه به‌ازای هر گونه در هر منطقه) و مطابق با دستورالعمل‌های استاندارد Cornelissen و همکاران (۲۰۰۳) و همچنین Pérez-Harguindeguy و همکاران (۲۰۱۳) اندازه‌گیری شدند.

پیش از محاسبه ماتریس فاصله عملکردی، کلیه ویژگی‌های عددی استاندارد شدند (میانگین صفر و انحراف معیار یک) تا اثر مقیاس متغیرها خنثی شود. مقادیر گم‌شده نیز در صورت وجود، با میانگین هر ویژگی جایگزین شدند. برای محاسبه فاصله بین گونه‌ها، از فاصله اقلیدسی^۱ استفاده شد، زیرا تمامی ویژگی‌های عملکردی مورد استفاده کمی و پیوسته بودند. شاخص واگرایی عملکردی (FDis) بر اساس ماتریس چندویژگی و به‌صورت ترکیبی محاسبه شد، نه برای هر ویژگی به‌صورت جداگانه. این روش به این دلیل انتخاب شد که استفاده از چند ویژگی عملکردی به‌صورت هم‌زمان، نمای دقیق‌تری از ساختار عملکردی اجتماعات گیاهی ارائه می‌دهد (Laliberté & Legendre, 2010).

علاوه بر شاخص‌های فوق، شاخص پراکندگی عملکردی (FDis) که نشان‌گر پراکنش گونه‌ها بر اساس فاصله در یک فضای چندبعدی است و ابعاد بیانگر ویژگی‌های مختلف گیاهی هستند، نیز محاسبه گردید (جدول ۱). این شاخص‌ها که از معروف‌ترین و کاربردی‌ترین شاخص‌های تنوع عملکردی بوده و در اکثر منابع استفاده شده است در ۱۶ قطعه نمونه محاسبه شدند (Asanok et al., 2021; Srouf et al., 2024).

شدند. اندازه‌گیری ویژگی‌های عملکردی برای ۷۶ گونه گیاهی انجام شده است. این اندازه‌گیری‌ها در پلات‌های مشخص‌شده در منطقه مورد مطالعه و بر اساس روش‌های استاندارد مرجع صورت گرفته‌اند. در هر گونه، حداقل یک پایه بالغ با ویژگی نماینده انتخاب شد. در صورت امکان، تکرارهای بیشتری نیز برای گونه‌های غالب انجام گرفت.

اندازه‌گیری شاخص‌های تنوع عملکردی

برای بررسی وابستگی بین مؤلفه‌های مختلف تنوع عملکردی و ذخیره کربن از روش Díaz و همکاران (۲۰۰۷) استفاده شد که در این روش، غالبیت و واگرایی ویژگی‌های کمی گیاهی مورد تأکید قرار دارد. غالبیت ویژگی عددی گیاهی از طریق شاخص میانگین وزنی جامعه (CMW) محاسبه شد (جدول ۱). واگرایی ویژگی کمی گیاهی با استفاده از شاخص واگرایی عملکردی (FDvar) بیان می‌شود (جدول ۱).

شاخص واگرایی عملکردی به دلیل تفسیر ساده‌تر (محدوده عددی شاخص بین ۰ تا ۱ می‌باشد) و بیان نابرابری عملکرد مختلف گیاهان انتخاب شد که در مجموع عملکرد بهتری را نسبت به دیگر شاخص‌ها نشان می‌دهد (Conti & Díaz, 2013). این شاخص‌ها با استفاده از نرم‌افزار FDiversity نسخه ۲۰۱۱ محاسبه شدند. برای محاسبه شاخص‌های تنوع عملکردی، از بسته آماری FDiversity در محیط نرم‌افزار R استفاده شد (Laliberté & Legendre, 2010). سه شاخص رایج شامل غنای عملکردی (FRic)، یکنواختی عملکردی (FEve) و واگرایی عملکردی (FDis) محاسبه شدند. این شاخص‌ها بر اساس شش ویژگی عملکردی کلیدی شامل شاخص سطح ویژه برگ (SLA)، میزان نیتروژن برگ (LNC)،

1- Euclidean distance

جدول ۱- شاخص‌های تنوع عملکردی مورد استفاده

Table 1- Used functional diversity indices

شاخص	رابطه	توضیحات	منبع
شاخص میانگین وزنی جامعه (CWM)	$CWM_X = \sum_{i=1}^s p_i \cdot x_i$	مبتنی بر یک ویژگی Based on single trait	Yang et al., (2019)
شاخص واگرایی عملکردی (FDvar)	$FD_{var} = 2/\pi \cdot \text{Arctan}(5V)$ $V = p_i \cdot (\ln x_i - (\sum_{i=1}^s p_i \cdot \ln x_i))^2$	مبتنی بر یک ویژگی Based on single trait	Mason et al., (2005)
شاخص پراکندگی عملکردی (FDIs)	$FDIs = \sum_{i=1}^s W_i Z_i$	مبتنی بر چند ویژگی Based on multiple traits	(Zuo et al., 2016)

p_i : پوشش نسبی گونه i ام، x_i : مقدار ویژگی X برای گونه i ام، W_i : درصد پوشش گونه i و Z_i : فاصله گونه i از مرکز هر بردار ویژگی

روش‌های آماری بکار گرفته شده

در این مطالعه شاخص‌های تنوع عملکرد (به عنوان متغیرهای مستقل) به تفکیک قطعات نمونه محاسبه شدند و سپس ارتباط آن‌ها با میزان کربن به دست آمده در کل اکوسیستم، کربن زیتوده روی زمینی، کربن لاشبرگ و ذخیره کربن آلی خاک (SOC_s) (به عنوان متغیرهای وابسته)، از طریق روش رگرسیون خطی چندگانه انجام گردید. نوع ارتباط خطی یا غیرخطی از طریق مشاهده اولیه پراکنش داده‌ها از طریق نمودار ابر نقاط مشخص شد. نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون Shapiro Wilk بررسی شد. سپس با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۱ (PCA) مهمترین متغیرهای مستقل جهت ورود به تحلیل رگرسیون خطی چندگانه انتخاب شدند. پیش از انجام تحلیل مؤلفه‌های اصلی، همه متغیرهای مستقل استاندارد شدند (میانگین صفر و انحراف معیار یک) تا اثر تفاوت مقیاس بین متغیرها حذف گردد. همچنین، نرمال بودن توزیع داده‌ها و عدم وجود داده پرت بررسی شد. تحلیل PCA با استفاده از نرم‌افزار R و بسته آماری FactoMineR انجام گرفت. بر اساس نتایج این تحلیل، متغیرهایی که دارای بار عاملی بالا در مؤلفه‌های اول بودند و بیشترین واریانس را تبیین می‌کردند، به عنوان مهم‌ترین متغیرهای

مستقل جهت ورود به مدل رگرسیون خطی چندگانه انتخاب شدند. معنی‌داری مؤلفه‌های PCA از طریق آماره عسای شکسته تعیین شد. هم‌خطی متغیرهای مستقل از طریق مقدار تورم واریانس^۲ (VIF) مورد بررسی قرار گرفت و متغیرهای دارای VIF کمتر از ۳ (Srouf et al., 2024) انتخاب شدند. تحلیل باقی‌مانده‌ها شامل ثبات واریانس بین خطاهای رگرسیون و متغیر وابسته، توزیع نرمال خطاهای رگرسیون و پراکنش تصادفی خطاهای رگرسیون و معیار Durbin-Watson جهت بررسی عدم خودهمبستگی بین خطاهای رگرسیون یا اصطلاحاً استقلال خطاهای رگرسیون مورد تحلیل اولیه قرار گرفتند. تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۱۹ و نرم‌افزار R نسخه ۴,۱,۱ انجام گردید.

نتایج

ویژگی‌های توصیفی و فرم رویشی گونه درختی غالب منطقه (بلوط ایرانی)

گونه بلوط ایرانی با فرم رویشی دانه‌زاد ۹۵ درصد پوشش درختی منطقه مورد مطالعه را تشکیل می‌دهد. اطلاعات کلی توصیفی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- آمار توصیفی گونه غالب منطقه (بلوط ایرانی)

Table 2- Descriptive statistics of dominant species in study area (*Quercus brantii*)

ارتفاع (m)		قطر برابر سینه (cm)		گونه
اشتباه معیار (m)	میانگین (m)	اشتباه معیار (cm)	میانگین (cm)	
0.8	6.5	3.7	22.6	بلوط ایرانی (<i>Quercus brantii</i>)
0.9	4.7	2.4	16.5	بنه (<i>Pistacia atlantica</i>)

لاشبرگ و ذخیره کربن آلی خاک در جدول ۳ آمده است. میانگین کربن آلی خاک ۱/۶۸ درصد و وزن مخصوص خاک ۱/۴۸ گرم بر سانتیمتر مکعب بدست آمد.

وضعیت کربن ذخیره در بخش‌های مختلف

نتایج گرفته شده از آمار توصیفی برای متغیرهای کربن آلی کل اکوسیستم، کربن زیتوده روی زمینی، کربن

جدول ۳- آمار توصیفی برای متغیرهای کربن آلی کل اکوسیستم (TEC)، کربن زیتوده روی زمینی (AGBC)، کربن لاشبرگ (LLC) و ذخیره کربن آلی خاک (SOC_s)

Table 3- Descriptive statistics for total ecosystem organic carbon (TEC), terrestrial organic carbon (AGBC), litter carbon (LLC) and soil organic carbon (SOC_c) variables

مؤلفه‌های کربن	حداقل (تن در هکتار)	حداکثر (تن در هکتار)	میانگین (تن در هکتار)	خطای معیار (تن در هکتار)
کربن آلی کل اکوسیستم (TEC)	71.7	111.9	88.4	15.1
کربن زیتوده روی زمینی (AGBC)	9.6	15.9	11.0	5.8
کربن لاشبرگ (ALC)	0.8	6.8	3.0	2.1
ذخیره کربن آلی خاک (SOC_s)	61.3	89.2	74.4	7.2

ارتفاع گیاه (H) (سانتی‌متر) و وزن مخصوص چوب (WSG) مشاهده شد.

جدول ۴- مقادیر همبستگی بین مقدار بار مؤلفه‌های اول و دوم PCA و ویژگی‌های گیاهی

Table 4- Correlation between the first and second principal components of PCA and traits

ویژگی گیاهی	محور اول (مقدار ویژه: 6.4)	محور دوم (مقدار ویژه: 5.0)
FDis H	0.756*	0.519
CWM H	-0.839*	-0.314
FDis LNC	0.810*	0.440
CWM LNC	0.817*	-0.033
FDis	0.818*	-0.467
CWM SLA	-0.334	0.913**
CWM WSG	0.140	-0.889**
FDvar SLA	-0.628	0.736*

مقادیر معنی‌دار در سطح خطای ۵٪ با علامت * و مقادیر در سطح

خطای ۱٪ با علامت ** نشان داده شده است

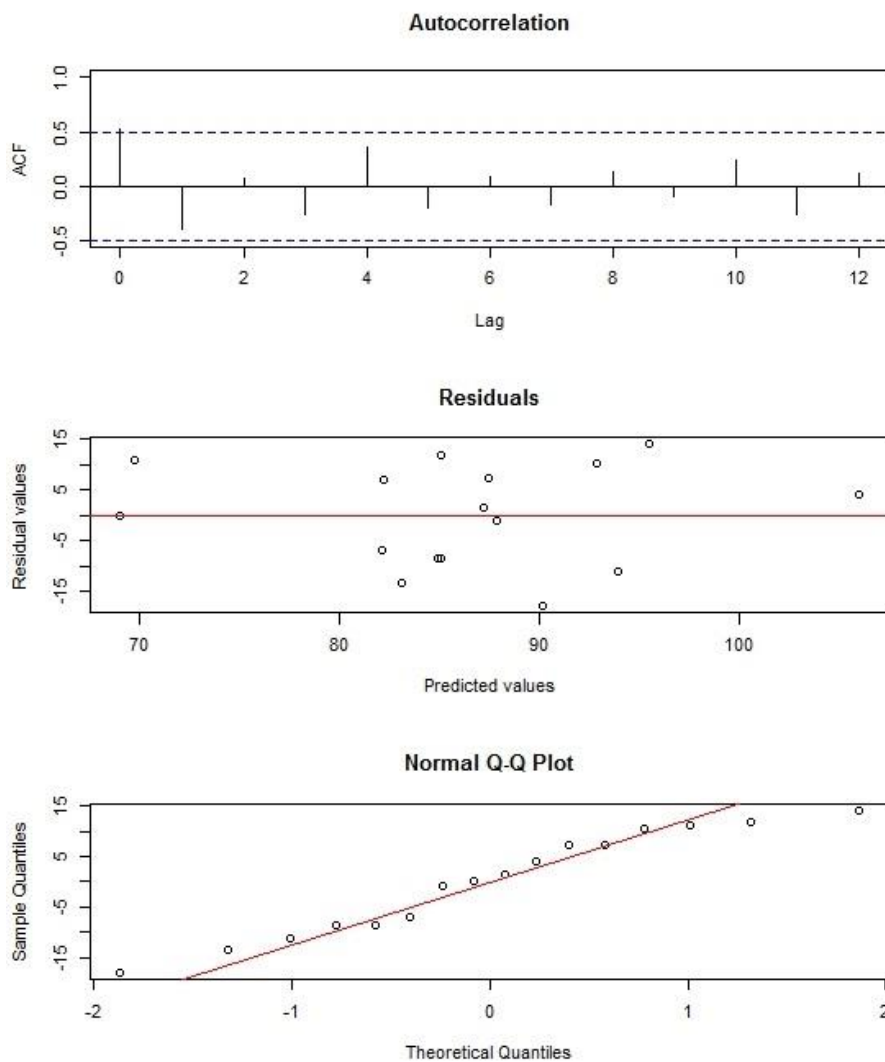
بر اساس جدول ۳ بیشترین و کمترین تغییرپذیری به ترتیب مربوط به متغیر کربن آلی کل و کربن لاشبرگ اکوسیستم بود.

ارتباط بین شاخص‌های تنوع عملکرد و کربن ذخیره

در ابتدا مهمترین ویژگی‌های گیاهی از طریق تحلیل PCA مورد بررسی گرفت. نتایج PCA نشان داد که مؤلفه‌های اول و دوم دارای بیشترین واریانس بوده (۴۱/۹ و ۳۴/۳ درصد) و با توجه به آماره عسای شکسته محاسبه شده تنها این دو مؤلفه معنی‌دار هستند ($P < 0.05$). در جدول ۴ همبستگی در سطوح خطای ۱ و ۵ درصد بین میزان نیتروژن برگ (LNC)، شاخص سطح ویژه برگ (SLA) (میلی‌متر مربع بر میلی‌گرم)،

چندگانه مورد ارزیابی قرار گرفت. خطی بودن رابطه بین ویژگی‌های گیاهی و متغیرهای کربن از طریق رسم نمودار باقی‌مانده در برابر مقادیر پیش‌بینی شده تأیید شد. نرمال بودن باقی‌مانده‌ها، ثبات واریانس و استقلال باقی‌مانده‌ها مورد بررسی و تأیید قرار گرفت (شکل ۲).

ویژگی‌های گیاهی و مقدار بار مولفه‌های اول و دوم PCA ارائه شده است. به منظور بررسی ارتباط بین ویژگی‌های گیاهی مهم و میزان کربن به‌دست آمده در کل اکوسیستم (TEC)، کربن زیتوده روی زمینی (AGBC)، کربن لاشبرگ (ALC) و ذخیره کربن آلی خاک (SOCs) پیش‌فرض‌های تحلیل رگرسیون خطی



شکل ۲- نمودار تحلیل باقی‌مانده برای مدل کربن به‌دست آمده در کل اکوسیستم (TEC)

Figure 2 - Residual analysis plots for Total Ecosystem Carbon Model (TEC)

رگرسیون خطی چندگانه بر پایه روش گام به گام انجام گرفت (جدول ۵). کربن ذخیره شده در بخش زیتوده روی زمینی (AGBC) به بهترین وجه توسط ویژگی گیاهی میانگین وزنی میزان نیتروژن برگ (CWM) (LNC) پیش‌بینی گردید. کربن ذخیره شده در لاشبرگ

تحلیل هم‌خطی برای ویژگی‌های با اهمیت گیاهی تشخیص داده شده در تحلیل PCA انجام شد. متغیرهای مستقل وارد شده به مدل بعد از تحلیل هم‌خطی در جدول ۴ نشان داده شده است.

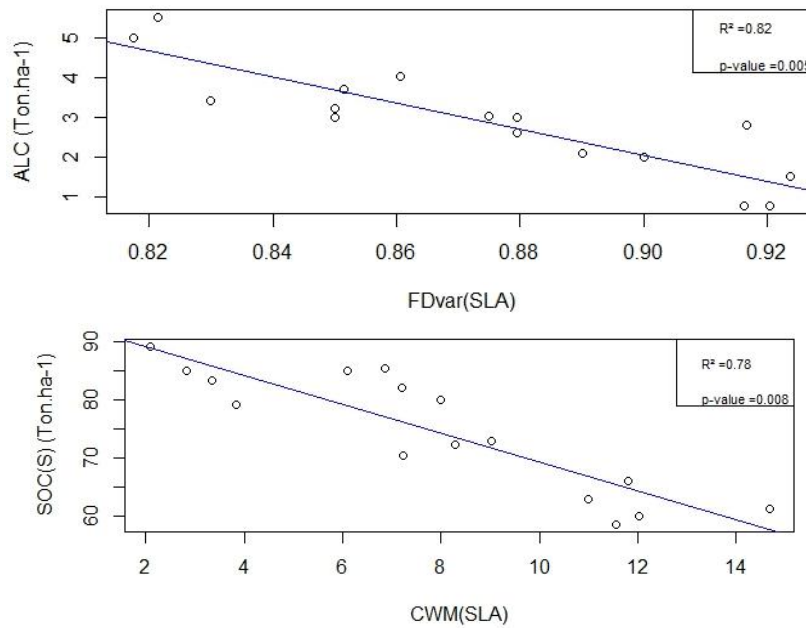
منفی پیش‌بینی شد. در نهایت کربن آلی کل اکوسیستم توسط شاخص واگرایی مربوط به ویژگی گیاهی شاخص سطح ویژه برگ (FDvar SLA) با وابستگی منفی پیش‌بینی شد (شکل‌های ۳ و ۴).

روی زمینی (ALC) از طریق شاخص واگرایی مربوط به ویژگی گیاهی سطح ویژه برگ (FDvar SLA) با وابستگی منفی پیش‌بینی شد. ذخیره کربن آلی خاک نیز از طریق شاخص میانگین وزنی مربوط به ویژگی گیاهی سطح ویژه برگ (CWM SLA) با وابستگی

جدول ۵- نتایج رگرسیون خطی چندگانه برای ارتباط بین ذخیره کربن کل اکوسیستم (TEC)، کربن زیتوده روی زمینی (AGBC)، کربن لاشبرگ (ALC)، ذخیره کربن آلی خاک (SOC_s) و شاخص‌های مختلف تنوع عملکرد در اکوسیستم جنگلی دهدز

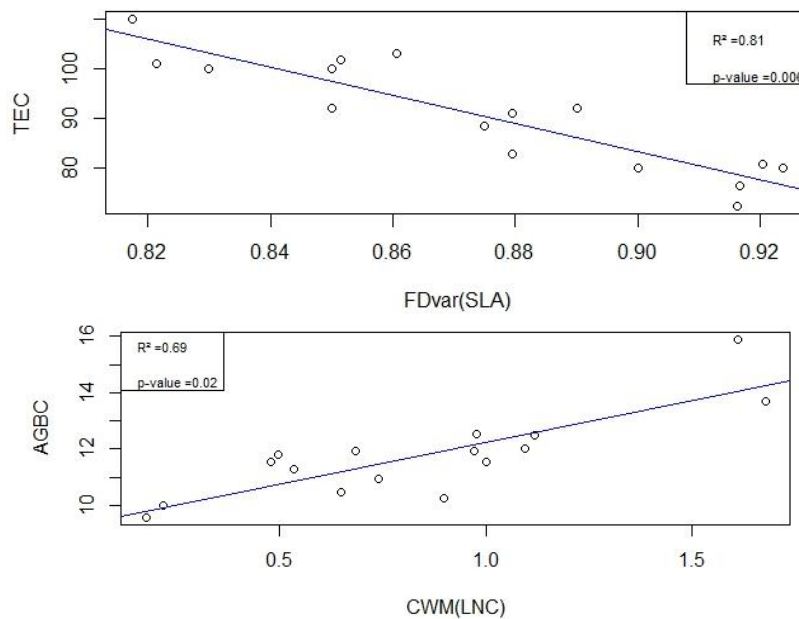
Table 5- Multiple linear regression results for the relationship between total ecosystem carbon storage (TEC), above-ground carbon (AGBC), above-ground litter carbon (ALC), soil organic carbon (SOC_s) and various functional diversity indices in Dehdz forest ecosystem

متغیرهای پاسخ	متغیرهای آماره	مدل نهایی	متغیرهای پیش‌بینی کننده و نوع وابستگی	ضریب تعیین	مقدار P
متغیر پاسخ وارد شده به مدل	دوربین واتسون		پیش‌بینی کننده و نوع وابستگی		
کربن آلی اکوسیستم (TEC)	CWM (LNC) FDvar (SLA) CWM (H)	$TEC = 341.7 - 288.1FD \text{ var}(SLA)$	مدل -FDvar (SLA)	0.81	0.006
کربن بیوماس روی زمینی (AGBC)	CWM (LNC) FDvar (SLA) FDis	$AGBC = 8.7 + 3.8CWM (LNC)$	مدل +CWM (LNC)	0.69	0.02
کربن لاشبرگ (ALC)	FDvar (SLA) CWM (H) FDis	$ALC = 41.9 - 44.1FD \text{ var}(SLA)$	مدل -FDvar (SLA)	0.82	0.005
ذخیره کربن آلی خاک (SOC_s)	FDvar (SLA) CWM (SLA) CWM (H)	$SOC_s = 92.2 - 2.3CWM (SLA)$	مدل -CWM (SLA)	0.78	0.008



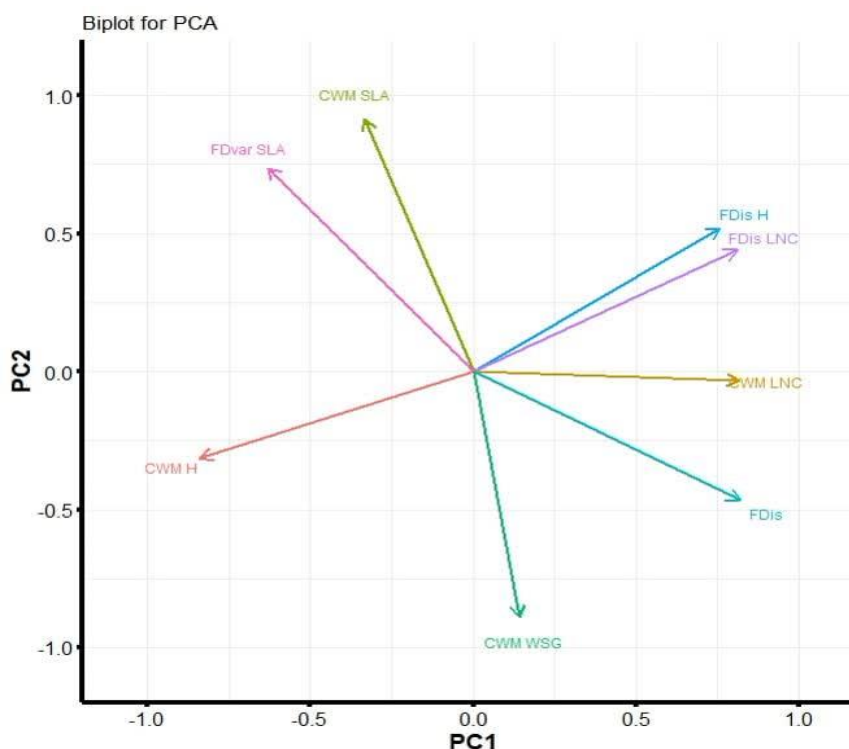
شکل ۴- تحلیل رگرسیون خطی ساده بین ذخیره کربن در لاشبرگ (ALC) و خاک (SOC_S) و شاخص‌های تنوع عملکردی. در اینجا فقط متغیرهایی که در تحلیل رگرسیون خطی چندگانه وارد شده‌اند نشان داده شدند.

Figure 3- Simple linear regression analysis between aboveground litter carbon storage (ALC) and soil organic carbon stock (SOC_S) and functional diversity indices. Only the variables included in the multiple linear regression analysis were shown.



شکل ۳- تحلیل رگرسیون خطی ساده بین ذخیره کربن در کل اکوسیستم (TEC) و زیتوده روی زمینی (AGBC) و شاخص‌های تنوع عملکردی. تنها متغیرهایی که در تحلیل رگرسیون خطی چندگانه وارد شده‌اند نشان داده شدند.

Figure 3- Simple linear regression analysis between total ecosystem carbon storage (TEC) and aboveground biomass carbon (AGBC) and functional diversity indices. Only the variables included in the multiple linear regression analysis were shown.



شکل ۵- نمودار دو پلاتی مربوط به همبستگی بین مقدار بار مولفه‌های اول و دوم PCA و ویژگی‌های گیاهی
Figure 5- Biplot for PCA correlation between the first and second principal components and plants traits

اقلیمی مختلف در میزان ذخیره کربن و پایداری درازمدت اکوسیستم می‌باشد.

امروزه علاوه بر محاسبه ذخیره کربن در یک اکوسیستم، تعیین تنوع عملکرد از شاخصه‌های بسیار مهم و ضروری در مطالعات ذخیره کربن در اکوسیستم‌های مختلف می‌باشد (Srouf *et al.*, 2024; Mokany & Roxburgh, 2008). در مطالعه حاضر وجود ارتباط خطی معنی‌دار بین شاخص‌های مختلف تنوع عملکرد و میزان ذخیره کربن در بخش‌های مختلف جامعه گیاهی یافت شد. وجود ارتباط خطی بین جنبه‌های مختلف تنوع عملکرد و ذخیره کربن در مطالعات متعددی به اثبات رسیده است (Srouf *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2019; Rawat *et al.*, 2019; Conti & Díaz, 2013).

نتایج این مطالعه نشان داد که مهمترین متغیر برای پیش‌بینی ذخیره کربن کل اکوسیستم، لاشبرگ روی زمینی و خاک یک ویژگی گیاهی و آن هم مرتبط با برگ یعنی شاخص سطح ویژه برگ می‌باشد. البته شاخص واگرایی سطح ویژه برگ برای پیش‌بینی ذخیره

بحث

میانگین ذخیره کربن کل، خاک و لاشبرگ در مطالعه حاضر ۸۹/۵، ۷۴/۴ و ۳ تن در هکتار به دست آمد. میانگین ذخیره کل کربن، خاک و لاشبرگ در مناطق مختلف جنگلی یاسوج با گونه غالب بلوط ایرانی ۱۵۹/۳، ۱۳۵/۶ و ۵/۸ تن در هکتار برآورد شده است (Askari *et al.*, 2021) که بیشتر از مطالعه حاضر می‌باشد. این موضوع به دلیل تراکم زیادتر درختان بلوط ایرانی در یاسوج و همچنین در نظر گرفتن هر دو فرم دانه‌زاد و شاخه‌زاد در مناطق مختلف یاسوج می‌باشد که منطقی می‌باشد. در برخی مطالعات دیگر در جنگل‌های خشک هند (Srinivas & Sundarapandian, 2019)، در جنگل‌های خشک اتیوپی (Abere *et al.*, 2017) و در جنگل‌های خشک کنیا (Leley *et al.*, 2022) میزان ذخیره کربن برآوردی‌شان کمتر از منطقه حاضر به دست آمد که نشان‌گر تأثیر مهم و موثر اکوسیستم جنگلی مناطق

کربن کل اکوسیستم و کربن لاشبرگ با وابستگی منفی، مهم تشخیص داده شد. هر چقدر شاخص واگرایی سطح ویژه برگ کمتر باشد به معنی آن است که تفاوت زیادی بین سطح ویژه برگ گونه‌های گیاهی اکوسیستم وجود ندارد. بدین معنی که نسبت مساحت برگ به وزن خشک آن در بین گونه‌های گیاهی موجود در اکوسیستم مشابه است و اکوسیستم بطور مشابهی از منابع استفاده کرده و همین موضوع باعث تولید مقدار زیاد مواد آلی مشابه و قابل تجزیه در لاشبرگ و کل اکوسیستم شده و در نتیجه منجر به افزایش عملکرد کلی اکوسیستم در ذخیره کربن شده است. در جوامع گیاهی خشک چین مقدار کربن ذخیره شده در زیتوده (ALC) و کل اکوسیستم (TEC) با میزان شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ، وابستگی منفی نشان داد که با نتایج این مطالعه کاملاً همسو می‌باشد (Yu *et al.*, 2024). همچنین در پژوهشی در مناطق جنگلی دارای اقلیم مرطوب، مقدار کربن ذخیره شده در زیتوده (ALC) و کل اکوسیستم (TEC) با میزان شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ وابستگی مثبت نشان داد که با نتایج مطالعه حاضر انطباق ندارد و دلیل احتمالی آن اقلیم مرطوب و بارندگی کافی است که مقدار سطح ویژه برگ را زیاد کرده و باعث افزایش کربن در لاشبرگ و کل اکوسیستم در کوتاه‌مدت شده است (Rawat *et al.*, 2019). از دلایل احتمالی دیگر این تفاوت مربوط به تنوع گونه‌ای و تنوع ساختار جنگل است. مطالعات مشخص کرده است که تنوع گونه‌ای یک عامل بسیار مهم در مطالعات مربوط به تنوع عملکرد و ذخیره کربن می‌باشد (Zaman *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023; Forogh Nasab *et al.*, 2021). همچنین وجود ساختار متنوع در جنگل نشان دهنده تنوع بیشتر گونه‌ای و ارتفاع متغیر درختان می‌باشد (Ouyang *et al.*, 2023) که چنین مسئله‌ای در جنگلهای بلوط زاگرس وجود ندارد. زیرا این جنگل‌ها عمدتاً خالص و یا تک‌اشکوبه هستند. ذخیره کربن در کل اکوسیستم و لاشبرگ روی زمینی با شاخص واگرایی سطح ویژه برگ ارتباط منفی

معنی‌داری را نشان داد. این موضوع برخلاف انتظار ما بود. Mason و همکاران (۲۰۰۵) بیان کردند که هرچه شاخص واگرایی بیشتر باشد اختلافات آشیان اکولوژیک بیشتر بوده و رقابت در چنین شرایطی کم شده و بیشترین استفاده از منابع غذایی اکوسیستم صورت می‌گیرد. دلیل اصلی وابستگی منفی شاخص واگرایی عملکردی به توزیع مقادیر عددی شاخص سطح ویژه برگ در قطعه نمونه‌های مورد بررسی مرتبط است که باعث واگرایی پایین در شاخص سطح ویژه برگ شده است. برخی مطالعات اثر منفی شاخص واگرایی روی ویژگی‌های مختلف یا ترکیبی از آنها را نشان داده است (Mokany *et al.*, 2008). برخی مطالعات نیز اثر مثبت شاخص واگرایی را نشان داده‌اند (Díaz *et al.*, 2007). این نتایج متضاد ممکن است ناشی از تحلیل‌های مختلف آماری باشد که بعضاً اهمیت استانداردسازی روش‌های آماری موردنیاز برای مطالعه عملکرد اکوسیستم در محیط‌های طبیعی و نیمه‌طبیعی مورد تأکید قرار گرفته است (Garnier & Navas, 2012). شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ بر میزان ذخیره کربن آلی خاک اثر منفی معنی‌داری ایجاد کرد. برخی از مطالعات اثر مثبت شاخص میانگین وزنی روی ویژگی‌های مختلف را نشان داده‌اند (Rawat *et al.*, 2013; Conti & Díaz, 2019; Zuo و همکاران ۲۰۱۶) ارتباط مثبتی بین شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ و میزان ذخیره کربن آلی خاک در علفزارهای ساحلی چین یافتند. یکی از دلایل تفاوت نتایج گرفته شده با مطالعه ما در نوع و ساختار پوشش گیاهی می‌باشد. در مناطق با پوشش علفی غالب، برگها مواد درون خود را سریع‌تر به خاک منتقل می‌کنند و باعث افزایش آبی کربن ذخیره در خاک می‌شوند درحالی که برگهای پوشش درختی غالب مناطق جنگلی به دلیل کم بودن فعالیت میکروبی دیرتر مواد را در خاک آزاد کرده و کربن ذخیره را به تدریج افزایش می‌دهند (Zuo *et al.*, 2016). نتایج مشابهی در مطالعه Rawat و همکاران (۲۰۱۹) به‌دست آمده است.

با دقت بهتری نسبت به شاخص‌های مبتنی بر یک ویژگی انجام دهند اما شاخص مبتنی بر چند ویژگی در هیچکدام از مدل‌های نهایی قرار نگرفت و شاخص‌های مبتنی بر یک ویژگی توانستند بهتر میزان تغییرات کربن ذخیره در بخش‌های مختلف اکوسیستم را توجیه کنند. هرچند که در برخی مطالعات به این موضوع اشاره شده است که برای توصیف ذخیره کربن هیچ محدودیتی در تعداد و ترکیب ویژگی‌های گیاهی وجود ندارد (Cornelissen *et al.*, 2003; Tahmasebi *et al.*, 2017). لذا پاسخ برخی سوالات هنوز به‌طور واضح روشن نیست.

نتیجه‌گیری کلی

ارتباط بین شاخص‌های تنوع عملکرد و شش ویژگی گیاهی در منطقه جنگلی بلوط‌بلند دهدز استان خوزستان مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه نقش شاخص‌های مبتنی بر یک ویژگی مثل میانگین وزنی و شاخص واگرایی عملکردی در برآورد ذخیره کربن مهم‌تر تشخیص داده شد. همچنین شاخص پراکندگی مبتنی بر چند ویژگی که پراکنش ویژگی‌های گیاهی را در چند بعد نشان می‌دهد معنی‌دار نشد. از طرفی مهمترین ویژگی‌های گیاهی موثر در برآورد کربن، شاخص ویژه سطح برگ و میزان نیتروژن برگ بودند. با آگاهی از چنین ویژگی‌هایی می‌توان نسبت به بهبود افزایش توان ترسیب و ذخیره کربن در اکوسیستم‌های جنگلی زاگرس اقدام کرد. به عبارت دیگر کارهای مدیریتی در جنگل‌های زاگرس مثل غنی‌سازی و یا قرق با هدف افزایش سطح ویژه برگ و همچنین افزایش مقدار ازت برگ، می‌تواند منجر به افزایش پتانسیل ترسیب کربن این جنگل‌ها نیز شود.

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت مالی دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان انجام شده است و بدین ترتیب از حامیان مالی این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

یکی از شاخص‌های مهم و تاثیرگذار بر پیش‌بینی ذخیره کربن آلی خاک، شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ می‌باشد (Rawat *et al.*, 2019; Sheng *et al.*, 2022). در مطالعه حاضر این شاخص بر میزان ذخیره کربن آلی خاک اثر منفی معنی‌داری ایجاد کرد. بالا بودن شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ باعث افزایش کمک به جذب کربن اتمسفری توسط برگ می‌شود. لذا هرچه تنوع گونه‌ای بیشتر باشد، جذب کربن نیز بیشتر صورت می‌گیرد؛ بنابراین تنوع گونه‌ای یکی از شاخص‌های مهم در افزایش کربن اتمسفر می‌باشد (Sheng *et al.*, 2022). اما وجود رابطه منفی معنی‌دار بین شاخص میانگین وزنی سطح ویژه برگ و ذخیره کربن آلی خاک در این مطالعه را شاید بتوان به خالص بودن جنگل و نبود تنوع گونه‌ای زیاد در لایه درختی نسبت داد.

بدون شک یکی از عوامل مهم و موثر در میزان ذخیره کربن، نیتروژن می‌باشد (Moradi *et al.*, 2017; Moradi & Ghasemi, 2021). شاخص میانگین وزنی میزان نیتروژن برگ برای پیش‌بینی کربن ذخیره شده در زیتوده روی زمینی اثر مثبت معنی‌داری را نشان داد. Mokany و همکاران (۲۰۰۸) نتایج مشابهی را گرفتند. Garnier و Navas (۲۰۰۴) ارتباط منفی وضعی بین شاخص میانگین وزنی میزان نیتروژن برگ و کربن ذخیره شده در زیتوده روی زمینی به‌دست آوردند. در زیتوده روی زمینی، یک ویژگی گیاهی مبتنی بر برگ روی ذخیره کربن تأثیر مثبت داشته است. برخی مطالعات اثر معنی‌دار و منفی شاخص تثبیت نیتروژن را در بخش زیتوده نشان داده‌اند (Zuo *et al.*, 2016). این موضوع ناشی از غالب بودن برخی از گونه‌های گیاهی در منطقه جنگلی مورد مطالعه مثل انواعی از گونه‌های گراس یکساله و چندساله می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان داد که هرچه تغییرات ویژگی‌های گیاهی جوامع بیشتر باشد میزان ذخیره کربن در بخش زیتوده روی زمینی آن بیشتر می‌شود. در مطالعه حاضر، انتظار بود تا شاخص‌های تنوع عملکرد مبتنی بر چند ویژگی پیش‌بینی ذخیره کربن را

References

- Abere, F., Belete, Y., Kefalew, A., & Soromessa, T. (2017). Carbon stock of Banja forest in Banja district, Amhara region, Ethiopia: An implication for climate change mitigation. *Journal of Sustainable Forestry*, 36(6), 604–622. <https://doi.org/10.1080/10549811.2017.1332646>
- Alinejadi, S., Basiri, R., Tahmasebi kohyani, P., Askari, Y., & Moradi, M. (2016). Estimation of biomass and carbon sequestration in various forms of *Quercus brantii* Lindl. stands in Balout Boland, Dehdez. *Iranian Journal of Forest*, 8(2), 129-139. (In Persian)
- Andrew, M., Noble, I., & Lange, R. (1979). A non-destructive method for estimating the weight of forage on shrubs. *The Rangeland Journal*, 1(3), 225. <https://doi.org/10.1071/RJ9790225>
- Asanok, L., Taweasuk, R., & Kamyao, T. (2021). Plant Functional Diversity Is Linked to Carbon Storage in Deciduous Dipterocarp Forest Edges in Northern Thailand. *Sustainability*, 13(20), 11416. <https://doi.org/10.3390/su132011416>
- Askari, Y., Iranmanesh, Y., & Pourhashemi, M. (2021). The economic value and comparison of carbon storage in different forest areas in Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad province. *Iranian journal of forest*, 13(2), 169-182. <https://doi.org/10.22034/ijf.2021.276293.1767> (In Persian)
- Chen, X., Taylor, A. R., Reich, P. B., Hisano, M., Chen, H. Y. H., & Chang, S. X. (2023). Tree diversity increases decadal forest soil carbon and nitrogen accrual. *Nature*, 618(7963), 94–101. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05941-9>
- Conti, G., & Díaz, S. (2013). Plant functional diversity and carbon storage – an empirical test in semi-arid forest ecosystems. *Journal of Ecology*, 101(1), 18–28. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12012>
- Cornelissen, J. H. C., Lavorel, S., Garnier, E., Díaz, S., Buchmann, N., Gurvich, D. E., Reich, P. B., Steege, H. T., Morgan, H. D., Heijden, M. G. A. V. D., Pausas, J. G., & Poorter, H. (2003). A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 51(4), 335. <https://doi.org/10.1071/BT02124>
- Deng, L., Liu, G.B., & Shangguan, Z.P. (2014). Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: a synthesis. *Global change biology*, 20, 3544–3556. <https://doi.org/10.1111/gcb.12508>
- Díaz, S., Lavorel, S., De Bello, F., Quétier, F., Grigulis, K., & Robson, T.M. (2007). Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 20684–20689. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704716104>
- Forogh Nasab, M., Moradi, M., Moradi, Gh., & Taghizadeh-Mehrjardi, R. (2021). Erratum to: Topsoil Carbon Stock and Soil Physicochemical Properties in Riparian Forests and Agricultural Lands of Southwestern Iran. *Eurasian Soil Science*, 54(3), 459–459. <https://doi.org/10.1134/S106422932130013>
- Freschet, G. T., Swart, E. M., & Cornelissen, J. H. C. (2015). Integrated plant phenotypic responses to contrasting above- and below-ground resources: Key roles of specific leaf area and root mass fraction. *New Phytologist*, 206(4), 1247–1260. <https://doi.org/10.1111/nph.13352>
- Garnier, E., & Navas, M.-L. (2011). A trait-based approach to comparative functional plant ecology: Concepts, methods and applications for agroecology. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(2), 365–399. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0036-y>
- Huber, F. (1928). *Forstliche Biometrie*. Jena: Gustav Fischer.
- Imani, F., Moradi, M., & Basiri, R. (2016). The Effect of *Prosopis juliflora* Afforestation on Soil Physicochemical Properties in Sand Dunes (Case study: Magran Shush. *Journal of Water and Soil Science*, 20(77), 173–184. <http://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.20.77.173>
- Jafarian, Z., Ahmadi, F., & Kargar, M. (2018). Effects of grazing intensities on functional diversity and species diversity indices in the Bolban Abad rangeland, Kurdistan province. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 24(4), 768–777.

- <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2017.114888>
8
- Jagadesh, M., Dash, M., Singh, S. K., Kumari, A., Garg, V. K., & Jaiswal, A. (2024). Carbon Sequestration Potential of Forests and Forest Soils and Their Role in Climate Change Mitigation. In H. Singh (Ed.), *Forests and Climate Change* (pp. 315–326). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-3905-9_16
- Junttila, V., Minunno, F., Peltoniemi, M., Forsius, M., Akujärvi, A., Ojanen, P., & Mäkelä, A. (2023). Quantification of forest carbon flux and stock uncertainties under climate change and their use in regionally explicit decision making: Case study in Finland. *Ambio*, 52(11), 1716–1733. <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01906-4>
- Karami, M., Sheykholeslami, A., Heydari, M., Nimvari, M. E., Omidipour, R., & Prevosto, B. (2022). Taxonomic and structural diversity indices predict soil carbon storage better than functional diversity indices along a dieback intensity gradient in semi-arid oak forests. *Trees*, 36(2), 537–551. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02227-3>
- Karamian, M. & Hosseini, V. (2015). Effect of Position and Slope Aspect on Organic Carbon, Total Nitrogen and Available Phosphorus in Forest Soils (Case Study: The Forest of Ilam Province, Dalab). *Journal of Water and Soil Science*, 19 (71), 109–117. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.71.109>
- Keerthika, A., Parthiban, & K. T. (2022). Wood-specific gravity and carbon proportion of multifunctional agroforestry trees in foothills of Nilgiris, Western Ghats, India. *Agroforest Syst* 96, 811–815. <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00742-x>
- Kvakić, M., Tzagkarakis, G., Pellerin, S., Ciais, P., Goll, D., Mollier, A., & Ringeval, B. (2020). Carbon and Phosphorus Allocation in Annual Plants: An Optimal Functioning Approach. *Frontiers in Plant Science*, 11, 149. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00149>
- Labiberté, E., & Legendre, P. (2010). A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. *Ecology*, 91(1), 299–305. <https://doi.org/10.1890/08-2244.1>
- Leley, N. C., Langat, D. K., Kisiwa, A. K., Maina, G. M., & Muga, M. O. (2022). Total Carbon Stock and Potential Carbon Sequestration Economic Value of Mukogodo Forest-Landscape Ecosystem in Drylands of Northern Kenya. *Open Journal of Forestry*, 12(01), 19–40. <https://doi.org/10.4236/ojf.2022.121002>
- Mahdavi, A., Saidi, S., Iranmanesh, Y., & Naderi, M. (2020). Biomass and carbon stocks in three types of Persian oak (*Quercus brantii* var. *persica*) of Zagros forests in a semi-arid area, Iran. *J. Arid Land* 12, 766–774 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40333-020-0027-4>
- Makarieva, A. M., Nefiodov, A. V., Rammig, A., & Nobre, A. D. (2023). Re-appraisal of the global climatic role of natural forests for improved climate projections and policies. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1150191. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1150191>
- Mansoori, Z., Tahmasebi, P., Saeedfar, M., & Shirmardi, H.A. (2013). Answer diversity of plant communities to grazing during the tilt-shift function is to protect the steppe and semi-steppe zones. *Journal of plant ecosystem conservation*, 1(3), 91–104. (In Persian)
- Mason, N. W. H., Mouillot, D., Lee, W. G., & Wilson, J. B. (2005). Functional richness, functional evenness and functional divergence: The primary components of functional diversity. *Oikos*, 111(1), Article 1. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2005.13886.x>
- Mirzaei, J., Moradi, M., & Seyedi, F. (2016). Carbon Sequestration in the Leaf, Litter and Soil of *Eucalyptus camaldulensis*, *Prosopis juliflora* and *Ziziphus spina-christi* Species. *Ecopersia*, 4(3), 1481–1491. <https://doi.org/10.18869/modares.Ecopersia.4.3.1481>
- Mokany, K., Ash, J., & Roxburgh, S. (2008). Functional identity is more important than diversity in influencing ecosystem

- processes in a temperate native grassland. *Journal of Ecology*, 96(5), Article 5. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2008.01395.x>
- Moles, A. T., Warton, D. I., Warman, L., Swenson, N. G., Laffan, S. W., Zanne, A. E., Pitman, A., Hemmings, F. A., & Leishman, M. R. (2009). Global patterns in plant height. *Journal of Ecology*, 97(5), 923–932. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01526.x>
- Moradi, M., Imani, F., Najji, H. R., Behbahani, S. M., Ahmadi, M. T. (2017). Variation in soil carbon stock and nutrient content in sand dunes after afforestation by *Prosopis juliflora* in the Khuzestan province (Iran). *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 10(3), 585–589. <https://doi.org/10.3832/for2137-010>
- Moradi, M., & Ghasemi, A. (2021). Carbon Stock Estimation of *Avicennia Marina* (Forssk.) Forest Soil in Bushehr Province. *Journal of Environmental Science and Technology*, 23(3), 183-193. <https://doi.org/10.30495/jest.2019.17972.2679>
- Moradi, M., & Moradi, G. (2024). Carbon Sequestration of Mediterranean Tree Species in the Zagros Forest of Iran. *ECOPERSIA*, 12(4), 351-361. <http://doi.org/10.22034/ECOPERSIA.12.4.351>
- Morecroft, M. D., Duffield, S., Harley, M., Pearce-Higgins, J. W., Stevens, N., Watts, O., & Whitaker, J. (2019). Measuring the success of climate change adaptation and mitigation in terrestrial ecosystems. *Science*, 366(6471), eaaw9256. <https://doi.org/10.1126/science.aaw925>
- Ouyang, S., Gou, M., Lei, P., Liu, Y., Chen, L., Deng, X., Zhao, Z., Zeng, Y., Hu, Y., Peng, C., & Xiang, W. (2023). Plant functional trait diversity and structural diversity co-underpin ecosystem multifunctionality in subtropical forests. *Forest Ecosystems*, 10, 100093. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2023.100093>
- Pakeman, R. J., Eastwood, A., & Scobie, A. (2011). Leaf dry matter content as a predictor of grassland litter decomposition: A test of the 'mass ratio hypothesis.' *Plant and Soil*, 342(1–2), 49–57. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0664-z>
- Palosuo, T., Liski, J., Trofymow, J. A., & Titus, B. D. (2005). Litter decomposition affected by climate and litter quality—Testing the Yasso model with litterbag data from the Canadian intersite decomposition experiment. *Ecological Modelling*, 189(1–2), 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.006>
- Pati, P. K., Kaushik, P., Khan, M. L., & Khare, P. K. (2023). Effect of habitat specific wood specific gravity on biomass and carbon stock of trees in tropical dry deciduous forest of central India. *Tropical Ecology*, 64(3), 519–531. <https://doi.org/10.1007/s42965-022-00279-1>
- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M. S., Cornwell, W. K., Craine, J. M., Gurvich, D. E., Urcelay, C., Veneklaas, E. J., Reich, P. B., Poorter, L., Wright, I. J., Ray, P., Enrico, L., Pausas, J. G., De Vos, A. C., ... Cornelissen, J. H. C. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 61(3), 167. <https://doi.org/10.1071/BT12225>
- Petchey, O. L., & Gaston, K. J. (2006). Functional diversity: Back to basics and looking forward. *Ecology Letters*, 9(6), 741–758. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00924.x>
- Rawat, M., Arunachalam, K., Arunachalam, A., Alatalo, J., & Pandey, R. (2019). Associations of plant functional diversity with carbon accumulation in a temperate forest ecosystem in the Indian Himalayas. *Ecological Indicators*, 98, 861–868. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.005>
- Sarvazad, A., Fallah, A., & Vadedi, A. A. (2023). Investigation the Effect of Dead Trees on the Trend of Changes in Soil Carbon Storage Across an Altitudinal Gradient of Western Quercus Forests (Case study: Qalajeh Forest). *Ecology of Iranian Forest*, 11(22), 142-150. <http://doi.org/10.61186/ifej.11.22.130>
- Sheng, Z., Du, J., Sun, B., Mao, J., Zhang, Y., Zhang, J., & Diao, Z. (2022). The Role of

- Plant Functional Diversity in Regulating Soil Organic Carbon Stocks under Different Grazing Intensities in Temperate Grassland, China. *Sustainability*, 14(8), 4376. <https://doi.org/10.3390/su14084376>
- Sohrabi, H., & Shirvani, A. (2012). Allometric equations for estimating standing biomass of Atlantic Pistache (*Pistacia atlantica* var. *mutica*) in Khojir National Park. *Iranian Journal of Forest*, 4(1), 55-64. (In Persian)
- Srinivas, K., & Sundarapandian, S. (2019). Biomass and carbon stocks of trees in tropical dry forest of East Godavari region, Andhra Pradesh, India. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 3(2), 114-122. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1522837>
- Strour, N., Thiffault, E., & Boucher, J.-F. (2024). Quantifying carbon stocks and functional diversity of roadside ecosystems – A case study in Quebec, Canada. *Urban Forestry & Urban Greening*, 91, 128163. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128163>
- Parhizkar, Z., Moradi M., Abarifazli, R. (2025). Effects of Recreational Activities on Carbon Stocks in the Arid Riparian Forest. *Eurasian Soil Science*, 58, 133. <https://doi.org/10.1134/S1064229325601441>
- Tahmasebi, P. (2015). The ecology of plant communities. Shahrekord University Press, 274p. (In Persian)
- Tahmasebi, P., Moradi, M., & Omidipour, R. (2017). Plant functional identity as the predictor of carbon storage in semi-arid ecosystems. *Plant Ecology & Diversity*, 10(2-3), Article 2-3. <https://doi.org/10.1080/17550874.2017.1355414>
- Wang, H., Ding, Y., Zhang, Y., Wang, J., Freedman, Z. B., Liu, P., Cong, W., Wang, J., Zang, R., & Liu, S. (2023). Evenness of soil organic carbon chemical components changes with tree species richness, composition and functional diversity across forests in China. *Global Change Biology*, 29(10), 2852-2864. <https://doi.org/10.1111/gcb.16653>
- Williamson, G. B., & Wiemann, M. C. (2010). Measuring wood specific gravity...Correctly. *American Journal of Botany*, 97(3), 519-524. <https://doi.org/10.3732/ajb.0900243>
- Wright, I. J., Reich, P.B., Westoby, M., Ackely D.D., et al. (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428(6985), 821-827. <https://doi.org/10.1038/nature02403>
- Yang, Y., Dou, Y., Cheng, H., & An, S. (2019). Plant functional diversity drives carbon storage following vegetation restoration in Loess Plateau, China. *Journal of Environmental Management*, 246, 668-678. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.054>
- Yu, G., Lv, Z., & Liu, B. (2024). Functional diversity and carbon storage of plant community elevation patterns and carbon accumulation mechanisms in desert shrubland of Yanqi Hola Mountain, China. *Ecological Indicators*, 158, 111379. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111379>
- Zaman, Md. R., Rahman, Md. S., Ahmed, S., & Zuidema, P. A. (2023). What drives carbon stocks in a mangrove forest? The role of stand structure, species diversity and functional traits. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 295, 108556. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108556>
- Zuo, X., Zhou, X., Lv, P., Zhao, X., Zhang, J., Wang, S., & Yue, X. (2016). Testing Associations of Plant Functional Diversity with Carbon and Nitrogen Storage along a Restoration Gradient of Sandy Grassland. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00189>