

## Effect of Haloxylon plantation age on soil carbon and nitrogen stocks: management implications for arid land restoration

Morteza Saberi<sup>1\*</sup>, Mohammad Reza Dahmardeh Ghaleno<sup>1</sup>, Vahid Karimian<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Nature Engineering Department, Faculty of Natural Resources, Yasouj University, Yasouj, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction

The Iranian plateau, especially in arid and semi-arid regions, has sensitive and fragile conditions due to its specific climatic characteristics. In these regions, soil erosion and desertification are among the most important factors that severely threaten water and soil resources. In such conditions, the restoration of degraded rangelands through revegetation with compatible species such as *Haloxylon* spp. can play an effective role in reducing soil erosion, improving soil quality, and increasing carbon and nitrogen stocks. Due to its high resistance to drought and salinity, this species is one of the key options for stabilizing mobile sands and restoring desert ecosystems in Iran. In addition to its ecological role, the establishment of *Haloxylon* not only helps increase soil organic carbon content and reduce atmospheric carbon dioxide but also can strengthen the livelihoods of local communities by improving soil conditions and providing economic opportunities. However, the dynamics of carbon and nitrogen stocks over time and with increasing plantation age are still not fully understood and require careful scientific investigation. Therefore, the present study aimed to investigate the effect of *Haloxylon* plantation age on soil carbon and nitrogen stocks in arid regions, to provide a basis for the optimal management of dryland restoration and the development of carbon sequestration schemes by explaining the relationships between soil properties and vegetation age.

#### Materials and Methods

This study aimed to evaluate the effect of *Haloxylon* plantation age on soil carbon and nitrogen stocks in drylands, in three areas located in the Merak area of Birjand County (South Khorasan Province). The study areas included two *Haloxylon* plantations with ages of 34 and 26 years and a control area without *Haloxylon* cultivation, which was located about 10 km northeast of Birjand City. The altitude of the area varies between 1610 and 1810 meters above sea level, and its climate is arid desert. Sampling operations were carried out in June 2024 using a systematic random method. In each area, six replicates were collected from three soil depths (0–15, 15–30, and 30–45 cm), and a total of 54 soil samples were used for physical and chemical analyses. Physicochemical properties, including pH, electrical conductivity, porosity, bulk density, organic carbon, and total nitrogen, were measured, and soil carbon and nitrogen stocks were also determined. After checking for normality and homogeneity of variances, the resulting data were analyzed using a factorial design and one-way analysis of variance (ANOVA) in SPSS software. In addition, the relationships between variables were examined using Pearson's correlation coefficient in R software.

#### Results and Discussion

The results of the analysis of variance showed that the effects of both area (plantation age) and soil depth on physicochemical properties, including pH, electrical conductivity, bulk density, organic carbon, and total nitrogen, were statistically significant ( $p < 0.01$ ). Comparison of means showed that with increasing age of the *Haloxylon* plantation, pH decreased slightly, and electrical conductivity was higher in the 26-year-old site. The decrease in bulk density and increase in soil porosity indicated improved soil structure and greater activity of roots and soil organisms. One-way analysis of variance of carbon and nitrogen stocks at each depth showed that these variables were significantly higher in the 34- and 26-year-old *Haloxylon* plantation sites than in the control area. The age of *Haloxylon* planting had a significant effect on soil carbon and nitrogen accumulation, and this effect varied by soil depth. In the 0–15 cm layer, the highest carbon stocks were observed in the 26-year-old site ( $4.46 \text{ t ha}^{-1}$ ), while in the 15–30 and 30–45 cm layers, the 34-year-old site exhibited the highest stocks ( $5.78$  and  $3.35 \text{ t ha}^{-1}$ , respectively), indicating the role of vegetation growth stage and microbial activity in organic matter accumulation and

stabilization, and highlighting the importance of long-term management and drought-resistant species in enhancing soil nutrient storage capacity. Principal component analysis (PCA) and correlation coefficients also showed that organic carbon, total nitrogen, and nutrient stocks are co-directional and correlated with each other, while bulk density has an inverse relationship. These findings emphasize that over time, Haloxylon cultivation improves the physical and chemical quality of the soil and increases the nutrient storage capacity and environmental sustainability of the soil in the drylands of the Merak region of Birjand County.

### Conclusion

The findings of this study indicate that the age of Haloxylon plantation plays a decisive role in improving soil quality and increasing carbon and nitrogen stocks in the drylands of Birjand County. Over time, the gradual accumulation of carbon and nitrogen in the surface and subsurface soil layers increased, and bulk density decreased, indicating improved soil structure, increased porosity, and higher activity of roots and soil microorganisms. Principal component analysis and correlation coefficients confirmed that increased soil organic matter is the main driver of the simultaneous increase in carbon and nitrogen stocks, and that the surface layers show the greatest sensitivity to management changes. These results indicate that long-term Haloxylon plantation can enhance soil ecological processes, including carbon and nitrogen cycling, and increase the environmental sustainability of drylands. From a management perspective, the results of the study indicate selecting appropriate areas for Haloxylon plantation and continuously monitoring the age of vegetation cover can help increase soil fertility and improve nutrient storage capacity. Therefore, Haloxylon plantation is not only a soil restoration strategy, but with proper management, it plays an important role in the sustainable development of drylands.

**Keywords:** Soil physicochemical properties, Soil fertility, Soil organic matter, Land rehabilitation, Arid ecosystem management

**Article Type:** Research Article

### Acknowledgement

The authors would like to acknowledge the financial support of the University of Zabol (Grant code: IR-UOZ-GR-8721) for conducting 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 datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

### Authors' contribution

**Morteza Saberi:** Writing - original draft preparation; **Mohammad Reza Dahmardeh Ghaleno:** Resources, Software, Manuscript editing; **Vahid Karimian:** Formal analysis and investigation

\*Corresponding Author, E-mail: Morteza Saberi, Mortezasaberi@uoz.ac.ir

**Citation:** Saberi, M., Dahmardeh, M. R., & Karimian, V. (2026). Effect of Haloxylon Plantation Age on Soil Carbon and Nitrogen Stocks: Management Implications for Arid Land Restoration. *Water and Soil Management and Modeling*, 6 (1), 287-302

doi: 10.22098/mmws.2025.18631.1706

Received: 21 October 2025, Received in revised form: 04 November 2025, Accepted: 16 November 2025, Published online: 21 March 2026

*Water and Soil Management and Modeling*, Year 2026, Vol. 6, No. 1, pp. 287-302

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





## تأثیر سن تاغ کاری بر ذخایر کربن و نیتروژن خاک: پیامدهای مدیریتی برای احیای اراضی خشک

مرتضی صابری<sup>۱\*</sup>، محمدرضا دهمرده قلعه نو<sup>۱</sup>، وحید کریمیان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

### چکیده

اراضی خشک و نیمه خشک ایران به دلیل محدودیت منابع آب و شرایط اقلیمی حساس، در معرض فرسایش خاک و کاهش حاصل خیزی قرار دارند. استفاده از گونه‌های مقاوم مانند زرد تاغ (*Haloxylon persicum*) برای تثبیت خاک و بهبود کیفیت آن، به‌ویژه از نظر ذخایر کربن و نیتروژن، اهمیت اکولوژیکی و مدیریتی دارد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر سن تاغ کاری بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و ذخایر کربن و نیتروژن در شهرستان بیرجند انجام شد. بدین منظور، سه منطقه شامل دو تاغ‌زار با قدمت‌های ۳۴ و ۲۶ سال و یک منطقه شاهد (فاقد تاغ کاری) مورد بررسی قرار گرفتند. در هر سایت، با استفاده از روش نمونه‌برداری تصادفی سیستماتیک تعداد ۶ نمونه خاک از سه عمق صفر تا ۱۵، ۱۵ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۴۵ سانتی‌متر برداشت شد. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه، برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی شامل pH، EC، وزن مخصوص ظاهری، تخلخل، کربن آلی و نیتروژن کل و همچنین تعیین ذخایر کربن و نیتروژن خاک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. سن تاغ کاری اثر قابل توجهی بر تجمع کربن و نیتروژن خاک دارد و این اثر بسته به عمق متفاوت است، در عمق ۰-۱۵ سانتی‌متر بیش‌ترین ذخایر کربن در سایت ۲۶ ساله (۴/۴۶) و در عمق‌های ۱۵-۳۰ و ۳۰-۴۵ سانتی‌متر در سایت ۳۴ ساله (۵/۷۸ و ۳/۳۵) مشاهده شد، که نشان‌دهنده نقش مرحله رشد پوشش و فعالیت میکروبی در تجمع و تثبیت مواد آلی است و اهمیت مدیریت طولانی‌مدت و گونه‌های مقاوم به خشکی برای افزایش ظرفیت ذخیره عناصر غذایی را برجسته می‌کند. کاهش وزن مخصوص و افزایش تخلخل نشان‌دهنده بهبود ساختار خاک و فعالیت بیشتر ریشه‌ها و میکروارگانیسم‌ها است. تحلیل مؤلفه‌های اصلی و همبستگی‌ها نشان داد که کربن آلی و نیتروژن کل هم‌جهت بوده و همبستگی بالایی با ذخایر عناصر غذایی دارند، در حالی که تراکم خاک رابطه معکوس با آن‌ها دارد. یافته‌ها تأکید می‌کنند که تاغ کاری بلندمدت موجب بهبود کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک، تقویت چرخه کربن و نیتروژن و افزایش پایداری اکولوژیکی اراضی خشک می‌شود. از منظر مدیریتی، انتخاب مناطق مناسب و پایش مستمر سن پوشش گیاهی، کلید ارتقای حاصل خیزی خاک و ظرفیت ذخیره عناصر غذایی و تضمین موفقیت برنامه‌های احیای اراضی خشک است.

**واژه‌های کلیدی:** ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، حاصل خیزی خاک، مواد آلی خاک، احیای اراضی، مدیریت اکوسیستم خشک

### نوع مقاله: پژوهشی

\*مستول مکاتبات، پست الکترونیکی: مرتضی صابری، Mortezasaberi@uoaz.ac.ir

**استناد:** صابری، مرتضی، دهمرده قلعه نو، محمدرضا، و کریمیان، وحید (۱۴۰۵). تأثیر سن تاغ کاری بر ذخایر کربن و نیتروژن خاک: پیامدهای مدیریتی برای احیای اراضی خشک. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۶(۱)، ۲۸۷-۳۰۲.

doi: 10.22098/mmws.2025.18631.1706

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶ شماره ۱، صفحه ۲۸۷ تا ۳۰۲

© نویسنده‌گان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



## ۱- مقدمه

افزایش روزافزون غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو به‌ویژه دی‌اکسیدکربن یکی از اصلی‌ترین چالش‌های محیط زیستی قرن حاضر است و به‌عنوان مهم‌ترین عامل پدیده گرمایش جهانی شناخته می‌شود، به‌طوری‌که حدود نیمی از سهم گرمایش زمین ناشی از این گاز است (Zellweger et al., 2022). فعالیت‌های انسانی از قبیل تخریب مراتع، تغییر کاربری اراضی، گسترش کشاورزی و توسعه زیرساخت‌ها از مهم‌ترین محرک‌های افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن و از دست رفتن منابع کربن به‌شمار می‌روند (Godde et al., 2020; Bargali et al., 2022). این تغییرات نه تنها باعث کاهش حدود ۳۰ درصدی ذخایر کربن در مراتع خشک و نیمه‌خشک جهان شده‌اند (Manral et al., 2022; Bisht et al., 2023)؛ بلکه با تهدید تنوع زیستی، پایداری و عملکرد این اکوسیستم‌ها را نیز به خطر انداخته‌اند (Hua et al., 2022). مراتع در میان زیست‌بوم‌های خشکی، نقش کلیدی در چرخه جهانی کربن دارند (Challenge et al., 2022). توان ترسیب کربن در این اکوسیستم‌ها به عواملی همچون ترکیب گونه‌ای، نوع خاک، شرایط اکولوژیک و شیوه‌های مدیریتی وابسته است (Saber et al., 2025a). از سوی دیگر، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که گونه‌های بومی مقاوم به خشکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، توان بالایی در تثبیت کربن داشته و می‌توانند در پایداری اکولوژیکی مراتع نقش آفرین باشند (Saber et al., 2025b). در این میان، احیای پوشش گیاهی و جنگل‌کاری با گونه‌های سازگار با شرایط خشک، از جمله راهکارهای مؤثر برای افزایش ذخیره کربن و نیتروژن خاک و کاهش اثرات تغییر اقلیم به‌شمار می‌روند (Ordibehesht et al., 2024; Tessema, 2020). نتایج مطالعات مختلف نشان داده است که پوشش‌های گیاهی احیاشده در مناطق خشک عملکرد پایداری در جذب و ذخیره کربن دارند و موجب بهبود کیفیت خاک و افزایش بهره‌وری اکوسیستم می‌شوند (Gao et al., 2024; Li et al., 2023). برای نمونه، در استان گلستان، مقدار کل ترسیب کربن در مراتع چپر قویمه ۳/۴۸۹ کیلوگرم در مترمربع گزارش شده است (Asgari and Alinejad, 2024). در حالی‌که در استان قم نیز تفاوت معنی‌داری میان گونه‌های تاغ و گز از نظر خصوصیات شیمیایی خاک مشاهده شده و گونه گز دارای مقادیر بالاتری از عناصر غذایی بوده است (Ordibehesht et al., 2024). افزون بر این، مطالعه‌ای در استان فارس نشان داد که گونه بادام کوهی (*Amygdalus scoparia*) نسبت به افدرا (*Ephedra procera*) توانایی بالاتری در ذخیره‌سازی کربن در اندام‌های هوایی و زیرزمینی دارد و این تفاوت به نوع خاک و عمق آن وابسته است (Karimpour et al., 2025). بیش‌ترین تراکم کربن آلی در اراضی احیاشده مشاهده شده است،

که نشان‌دهنده پتانسیل بالای بازسازی اکولوژیکی برای بازیابی ذخایر کربن است (Bhan et al., 2025). هم‌چنین گزارش شده است که گونه‌های *Tamarix chinensis* در مناطق فوق‌العاده خشک ظرفیت بالایی برای ذخیره کربن دارند (Li et al., 2023). سن و مرحله رشد گیاه از عوامل کلیدی در تعیین میزان ترسیب کربن در زی‌توده و خاک به‌شمار می‌روند (Han et al., 2017; Powers and Marín-Spiotta, 2017). در کنار این عامل، استفاده از ترکیب چندگونه‌ای از گونه‌های بومی و غیربومی نیز می‌تواند با افزایش تنوع عملکردی و پایداری اکوسیستم، به بهبود ذخایر کربن خاک و پایداری بلندمدت آن کمک کند (Bazgir et al., 2020). با وجود مطالعات گسترده در زمینه تأثیر گونه‌های گیاهی بر ذخیره و ترسیب کربن، بررسی اثر توالی سنی گیاهان و نقش آن در پویایی ترسیب کربن هنوز محدود است.

Liu et al. (2018) نشان دادند که جنگل‌کاری در مناطق خشک و نیمه‌خشک موجب افزایش چشم‌گیر ذخایر کربن آلی خاک (SOC) و نیتروژن کل (TN) می‌شود، به‌ویژه در زمین‌های بایر که بیش‌ترین اثرگذاری را دارند. آن‌ها هم‌چنین گزارش کردند که نوع درخت کاشته‌شده و کاربری قبلی زمین عوامل تعیین‌کننده تغییرات این ذخایر هستند، در حالی‌که سن جنگل تأثیر قابل‌توجهی ندارد و بیش‌ترین افزایش پس از کاشت گونه‌های پهن‌برگ خزان‌دار مشاهده شده است (Alazmani et al., 2021). با بررسی توده‌های دست‌کاشت توسکای بیلاقی گزارش کردند که بیش‌ترین مقادیر نیتروژن کل و کربن ترسیب‌شده در توده‌های ۳۵ ساله و کم‌ترین مقادیر در توده‌های ۲۵ ساله مشاهده شد. این یافته‌ها بیانگر نقش افزایش سن رویشگاه در بهبود ویژگی‌های زیستی و شیمیایی خاک و ارتقای ظرفیت ذخیره کربن است. Zhu et al. (2023) گزارش کردند که جنگل‌کاری بلندمدت در فلات آلتا موجب افزایش قابل‌توجه کربن آلی خاک (SOC) و کربن معدنی خاک (SIC) نسبت به زمین‌های سنی متحرک شده است. نتایج نشان داد که ذخایر کربن خاک طی ۵ تا ۴۶ سال به‌صورت تدریجی افزایش می‌یابد، با این حال، این افزایش با کاهش محتوای آب در اعماق خاک (SWC) و افزایش کسری آب خاک (SWD) همراه است، که بیانگر وجود رابطه منفی بین ذخایر کربن و آب خاک در عمق است. Youet al. (2024) گزارش کردند که در صحرای مو اوس، جنگل‌کاری با گونه *Caragana korshinskii* به‌عنوان روشی مؤثر برای تثبیت ماسه‌های روان، موجب افزایش قابل‌توجه ذخایر کربن آلی خاک (SOC) و نیتروژن کل خاک (STN) شده است. پس از ۷۰ سال، مقادیر SOC و STN به ترتیب ۵/۵ و ۲/۷ برابر بیش از تپه‌های ماسه‌ای متحرک گزارش شده و این افزایش عمدتاً در لایه‌ی سطحی خاک (۰-۱۰ سانتی‌متر) متمرکز است، که بیانگر

مدیریت بهینه احیای اراضی خشک و توسعه طرح‌های ترسیب کربن فراهم آورد.

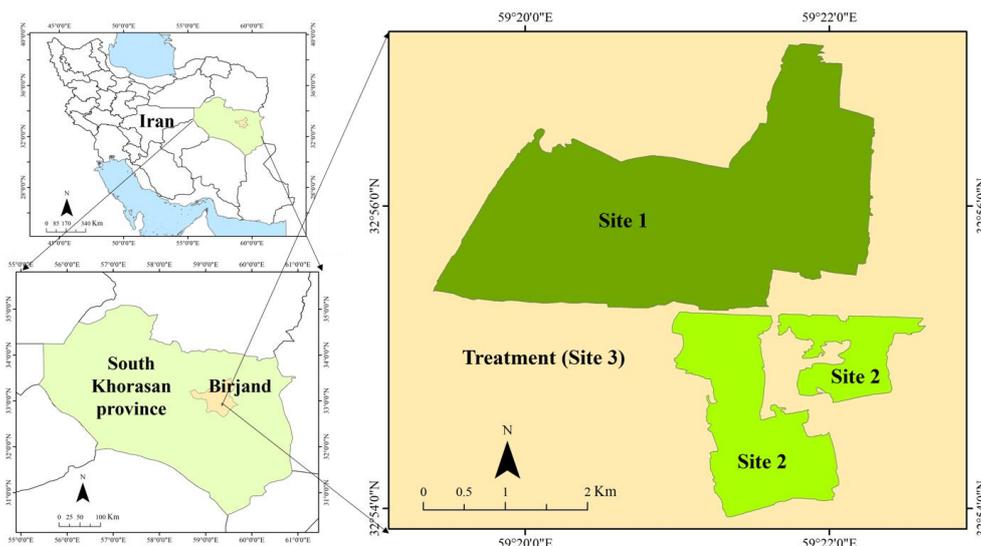
## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در استان خراسان جنوبی و در شهرستان بیرجند واقع شده است. این ناحیه در فاصله‌ای حدود ۱۰ کیلومتر در جهت شمال شرقی شهر بیرجند قرار دارد و از نظر موقعیت جغرافیایی بین عرض‌های ۳۲ درجه و ۵۳ دقیقه و ۲۴ ثانیه تا ۳۲ درجه و ۵۷ دقیقه عرض شمالی و طول‌های ۵۹ درجه و ۱۹ دقیقه و ۱۲ ثانیه تا ۵۹ درجه و ۲۲ دقیقه و ۳۷ ثانیه طول شرقی گسترده شده است (شکل ۱). سه سایت در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند: سایت اول تاغ کاری ۳۴ ساله (کاشت سال ۱۳۷۰) با گونه غالب *Haloxylon persicum* و پوشش متراکم‌تر، که در آن گونه‌های دیگری چون عجوه (*Salsola arbuscula*)، درمنه (*Artemisia sieberi*) نیز مشاهده می‌شوند. سایت دوم تاغ کاری ۲۶ ساله (کاشت سال ۱۳۷۸) با گونه غالب *Haloxylon persicum* و سایت سوم منطقه‌ای بدون تاغ کاری است که پوشش طبیعی پراکنده‌ای از گونه‌هایی نظیر عجوه (*Salsola arbuscula*)، درمنه (*Artemisia sieberi*) و کاهوی خاردار (*Lactuca serriola*) به صورت پراکنده و محدود در سطح منطقه مشاهده می‌شوند. معیارهای انتخاب منطقه شاهد شامل شباهت در شرایط توپوگرافی (ارتفاع، شیب و جهت شیب)، بافت خاک و شرایط اقلیمی (میانگین بارندگی و دما) با مناطق تاغ کاری شده بود، به گونه‌ای که تنها تفاوت عمده میان سایت‌ها، وجود یا عدم وجود تاغ کاری و سن آن‌ها باشد. خاک منطقه عمدتاً دارای بافت شنی لوم بوده و پوشش گیاهی غالب، گونه‌های مقاوم به خشکی بیابانی است. مساحت سایت تاغ کاری شماره یک حدود ۸۲۰ هکتار برآورد شده و مجموع مساحت پهنه‌های مربوط به سایت شماره دو نیز ۳۱۳/۵ هکتار است. ارتفاع منطقه بین ۱۶۱۰ تا ۱۸۱۰ متر از سطح دریا متغیر است (Sabaghzade et al., 2017). اقلیم منطقه گرم و خشک بوده و میانگین بارندگی سالانه آن حدود ۱۵۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه حدود ۱۷ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد است (ایستگاه سینوپتیک بیرجند، دوره آماری ۳۰ ساله).

تجمع مواد آلی و فعالیت زیستی بیش‌تر در این بخش است. با وجود همبستگی مثبت میان SOC و STN، نرخ انباشت نیتروژن کم‌تر از کربن است، که احتمالاً در بلندمدت محدودیت نیتروژن و کاهش انباشت مواد آلی را به دنبال دارد. این مطالعات نشان می‌دهند که سن رویشگاه، نوع اکوسیستم و شرایط محلی خاک و آب، همگی از عوامل کلیدی تعیین‌کننده ذخایر کربن و نیتروژن خاک هستند. از این رو، این متغیرها باید در طراحی و تحلیل مطالعات احیای اراضی خشک به طور جامع مورد توجه قرار گیرند.

فلات ایران، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل ویژگی‌های اقلیمی خاص خود دارای شرایط حساس و شکننده است. در این مناطق، فرسایش خاک و بیابان‌زایی از مهم‌ترین عواملی هستند که منابع آب و خاک را به شدت تهدید می‌کنند (Ebrahimi and Saberi, 2022). در چنین شرایطی، احیای مراتع تخریب‌شده از طریق جنگل کاری با گونه‌های سازگار مانند جنس تاغ (*Haloxylon spp.*) می‌تواند نقشی مؤثر در کاهش فرسایش خاک، بهبود کیفیت خاک و افزایش ذخایر کربن و نیتروژن ایفا کند. این گونه، به دلیل مقاومت بالا در برابر خشکی و شوری، از گزینه‌های کلیدی برای تثبیت شن‌های روان و بازسازی اکوسیستم‌های بیابانی ایران است. علاوه بر نقش اکولوژیکی، استقرار تاغ نه تنها به افزایش محتوای کربن آلی خاک و کاهش دی‌اکسید کربن اتمسفری کمک می‌کند، بلکه از طریق بهبود شرایط خاک و فراهم آوردن فرصت‌های اقتصادی، می‌تواند به تقویت معیشت جوامع محلی نیز منجر شود (Linders et al., 2021; Eschen et al., 2020). نیتروژن نیز به عنوان یکی از عناصر اصلی چرخه مواد آلی خاک، نقشی اساسی در رشد گیاهان، تجزیه مواد آلی و تنظیم تعادل کربن-نیتروژن ایفا می‌کند. ارتباط نزدیک بین چرخه‌های کربن و نیتروژن موجب می‌شود که تغییرات در ذخایر یکی از آن‌ها به طور مستقیم بر دیگری اثرگذار باشد، به‌ویژه در اکوسیستم‌های خشک که نیتروژن اغلب عامل محدودکننده است (Shen et al., 2025). با این حال، پویایی ذخایر کربن و نیتروژن در طول زمان و با افزایش سن تاغ کاری هنوز به طور کامل روشن نیست و نیاز به بررسی علمی دقیق دارد. از این رو، مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر سن تاغ کاری بر ذخایر کربن و نیتروژن خاک در مناطق خشک انجام شد تا با تبیین روابط بین ویژگی‌های خاک و سن پوشش گیاهی بتواند مبنایی برای



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان و کشور (سایت ۱: تاغ کاری ۳۴ ساله، سایت ۲: تاغ کاری ۲۶ ساله و سایت ۳: منطقه بدون تاغ کاری)

Figure 1. Location of the study area within the province and the country (Site 1: 34-year-old Haloxylon plantation; Site 2: 26-year-old Haloxylon plantation; Site 3: unplanted area).

نیتروژن کل به ترتیب با روش اکسیداسیون دی کرومات والکی و بلاک و روش کج‌دال (Kamali et al., 2022) اندازه‌گیری شدند. پس از محاسبه کربن آلی خاک، میزان ذخیره کربن و نیتروژن در خاک بر اساس روابط ۱ و ۲ محاسبه شد (MacDicken, 1997).

$$CP = BD \times SOC \times D \times 10 \quad (1)$$

$$NP = BD \times TN \times D \times 10 \quad (2)$$

CP1 و NP2 به ترتیب میزان ذخیره کربن آلی و نیتروژن کل خاک (Mg/ha)، TN3 و SOC4 به ترتیب غلظت کربن آلی و نیتروژن کل خاک ( $g \text{ kg}^{-1}$ )، BD5 وزن مخصوص ظاهری خاک (Mg  $m^{-3}$ ) و D6 عمق نمونه‌برداری (m) است. برای بیان میزان کربن ذخیره‌ای در واحد سطح و عمق مشخص باید جرم مخصوص ظاهری اندازه‌گیری شود. یکی از پارامترهای مهم برآورد ظرفیت ذخیره کربن خاک وزن مخصوص ظاهری است که با استفاده از روش کلوخه تعیین شد (Shahbazi et al., 2024).

### ۳-۲- تجزیه و تحلیل داده‌ها

پس از انجام آنالیزهای آزمایشگاهی بر روی نمونه‌ها، نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov) بررسی شد تا فرض توزیع نرمال داده‌ها برای آزمون‌های پارامتریک ارزیابی شود. سپس همگنی واریانس‌ها با آزمون لوین (Levene) بررسی شد تا برابری

### ۲-۲- نمونه‌برداری خاک

به منظور بررسی تأثیر سن تاغ کاری بر ذخایر کربن و نیتروژن خاک، مطالعه حاضر در سه منطقه تاغ کاری با قدمت‌های ۳۴ و ۲۶ سال و یک منطقه شاهد بدون تاغ کاری در مجاورت این سایت‌ها در منطقه مرک شهرستان بیرجند (استان خراسان جنوبی) انجام شد. عملیات نمونه‌برداری در خردادماه ۱۴۰۴ و به روش تصادفی سیستماتیک صورت گرفت. در هر منطقه، شش نقطه به عنوان تکرار برای نمونه‌برداری خاک در نظر گرفته شد. در هر تکرار، نمونه‌ها از سه عمق صفر تا ۱۵، ۱۵ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۴۵ سانتی‌متر پس از کنار زدن پوشش سطحی (لاشبرگ و مواد آلی درشت) برداشت شد. انتخاب عمق‌های نمونه‌برداری بر اساس مطالعات مشابه در اراضی خشک و نیمه‌خشک انجام شد که نشان داده‌اند تغییرات اصلی کربن و نیتروژن خاک در این عمق‌ها رخ می‌دهد (You et al., 2024). نمونه‌های برداشت‌شده از هر عمق به صورت جداگانه در کیسه‌های پلاستیکی نگهداری و به آزمایشگاه منتقل شدند. در مجموع، ۵۴ نمونه خاک (۳ منطقه  $\times$  ۶ عمق  $\times$  تکرار) برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده قرار گرفت (Bailey et al., 2021). مشخصه‌های خاک شامل اسیدیته خاک به روش عصاره‌گیری اشباع و pH متر، هدایت الکتریکی با عصاره گل اشباع و EC متر، تخلخل به صورت غیرمستقیم و از روی چگالی ظاهری و چگالی حقیقی خاک اندازه‌گیری شد (Chen et al., 2022). کربن آلی و

4 - Soil Organic Carbon

5 - Bulk Density

6 - Depth

1 - Carbon Pool

2 - Nitrogen Pool

3 - Total Nitrogen

جدول ۱ نتایج تجزیه واریانس اثرات اصلی و متقابل منطقه و عمق را بر ویژگی‌های مختلف خاک در سایت‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که اثر منطقه بر تمامی متغیرهای اندازه‌گیری شده شامل pH، هدایت الکتریکی، تخلخل، وزن مخصوص ظاهری، کربن آلی و نیتروژن کل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بوده است. همچنین، اثر عمق خاک بر تمام ویژگی‌ها نیز از نظر آماری معنی‌دار گزارش شد، به طوری که تغییرات عمق سبب تغییرات قابل توجهی در خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک شد. اثر متقابل منطقه و عمق نیز برای تمامی متغیرها در سطح احتمال یک درصد آماری معنی‌دار بود که نشان‌دهنده وابستگی رفتار این ویژگی‌ها به شرایط مکانی و عمقی متفاوت خاک است. این نتایج بیانگر ناهمگنی قابل توجه خاک در مناطق و عمق‌های مختلف بوده و اهمیت در نظر گرفتن هر دو عامل در مطالعات حاصل خیزی و مدیریت خاک را تأیید می‌کند.

واریانس میان گروه‌ها به‌عنوان پیش‌شرط اجرای ANOVA مورد تأیید قرار گیرد (Blanca Mena et al., 2021). تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از آزمون فاکتوریل و تجزیه واریانس یکطرفه (ANOVA) انجام گرفت. روابط بین پارامترهای مورد مطالعه با استفاده از تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) و ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شد که فرضیات آن شامل نرمال بودن داده‌ها و وجود رابطه‌ی خطی میان متغیرها است. تمامی تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ و R نسخه ۴.۳.۱ انجام گرفت (Abdel-Fattah et al., 2021).

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک در سایت‌های مختلف و اعماق مختلف خاک

جدول ۱- تجزیه واریانس اثرات اصلی منطقه و عمق و اثر متقابل آن‌ها در سایت‌های مورد مطالعه  
Table 1. Analysis of variance for the main effects of site and depth and their interaction in the studied sites.

Source	Dependent Variable	df	Mean Square	F	
area	pH	2	0.07	45.25**	
	EC	2	0.82	816.8**	
	Porosity	2	300.0	144.6**	
	Bulk Density	2	0.13	239.7**	
	OC	2	0.07	474.1**	
	TN	2	0.003	330.7**	
	depth	pH	2	0.029	18.2**
		EC	2	0.026	26.04**
		Porosity	2	289.9	139.7**
		Bulk Density	2	0.011	19.7**
OC		2	0.021	143.8**	
TN		2	0.001	98.3**	
area* depth	pH	4	0.02	16.86**	
	EC	4	0.21	212.2**	
	Porosity	4	150.4	72.5**	
	Bulk Density	4	0.03	65.4**	
	OC	4	0.02	184.7**	
	TN	4	0.00	133.5**	
	Error	pH	45	0.002	-
		EC	45	0.001	-
Porosity		45	2.07	-	
Bulk Density		45	0.001	-	
OC		45	0.000	-	
TN		45	8.667	-	

\*\* , indicate significance at the 1% probability levels.

مناطق بوده است. همچنین مقادیر کربن آلی و نیتروژن کل در سایت ۳۴ ساله افزایش نشان داده است که بیانگر بهبود حاصل خیزی خاک و تجمع تدریجی مواد آلی در اثر پوشش گیاهی پایدار و تجزیه بقایای گیاهی است. در مقابل، چگالی ظاهری با افزایش سن منطقه تاغکاری کاهش یافته است، که نشان‌دهنده بهبود ساختار خاک و افزایش تخلخل در نتیجه فعالیت ریشه‌ها و ارگانوسم‌های خاک‌زی است. به‌طور کلی، این نتایج نشان می‌دهند

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد که ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک در مناطق با سنین تاغ‌کاری متفاوت و در عمق‌های مورد بررسی تفاوت قابل توجهی دارند. مقدار pH در محدوده نسبتاً کمیایی (۷/۸۳ تا ۸/۱۲) قرار دارد و در مناطق قدیمی‌تر (سایت ۳۴ ساله) اندکی کاهش یافته است که می‌تواند ناشی از تجمع مواد آلی و فعالیت‌های میکروبی بیشتر باشد. هدایت الکتریکی (EC) در سایت ۲۶ ساله به‌طور معنی‌داری بالاتر از سایر

احتمالاً ناشی از تجمع املاح محلول و کم تر بودن مواد آلی و فعالیت میکروبی است (Renella., 2020). افزایش تدریجی کربن آلی و نیتروژن کل در لایه های سطحی خاک با گذر زمان و افزایش سن تاغ کاری نشان دهنده نقش حیاتی پوشش گیاهی پایدار در ارتقای تجمع مواد آلی و فعال سازی فرآیندهای میکروبی خاک است، که منجر به بهبود ظرفیت ذخیره عناصر غذایی و تقویت چرخه های بیوشیمیایی می شود. همزمان، افزایش تخلخل و کاهش وزن مخصوص ظاهری در سایت های قدیمی تر بیانگر بهبود ساختار فیزیکی خاک، افزایش تهویه و نفوذپذیری آب و ارتقای پایداری مکانیکی و زیست محیطی خاک است. این مجموعه تغییرات فیزیکی و بیوشیمیایی نشان می دهد که مدیریت بلندمدت پوشش گیاهی نه تنها عملکرد زیستی خاک را تقویت می کند، بلکه ظرفیت اکوسیستم برای ترسیب و ذخیره کربن و نیتروژن را نیز افزایش می دهد و اهمیت استراتژیک تاغ کاری در بازسازی اراضی خشک و ارتقای خدمات اکوسیستمی را برجسته می سازد (Syano et al., 2023; Qiu et al., 2022)

که با گذشت زمان، کیفیت خاک از نظر شیمیایی و فیزیکی بهبود یافته و پایداری زیست محیطی خاک در سایت ۳۴ ساله بیش تر است (جدول ۲). نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل منطقه و عمق بر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک، از جمله pH، هدایت الکتریکی، کربن آلی، نیتروژن کل و تخلخل، به طور معنادار مشاهده شد. این یافته ها نشان دهنده ناهمگنی شدید خاک در سطوح مکانی و عمقی مختلف است و بر اهمیت همزمان بررسی عوامل مکانی و عمقی در مطالعات حاصل خیزی و مدیریت خاک تأکید دارد. کاهش نسبی pH در سایت های قدیمی تر با افزایش سن تاغ کاری، می تواند ناشی از تجمع تدریجی مواد آلی و فعالیت میکروبی بیش تر در لایه سطحی خاک باشد. این روند همسو با مطالعات پیشین در مناطق خشک است که نشان می دهد افزایش سن پوشش گیاهی می تواند منجر به اسیدی شدن نسبی خاک و تحریک فعالیت های بیولوژیکی شود (Mao et al., 2024; Zhang et al., 2023). هدایت الکتریکی در سایت ۲۶ ساله به طور قابل توجهی بالاتر بود، که

جدول ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل منطقه و عمق بر خصوصیات مورد مطالعه

Table 2. Comparison of the mean interaction effects of site and soil depth on the studied parameters

Site	depth	pH	EC (dSm <sup>-1</sup> )	Porosity (%)	Bulk Density (gcm <sup>-3</sup> )	OC (%)	TN (%)
Control area	0-15	8.07±0.04 <sup>abc</sup>	1.72±0.02 <sup>ef</sup>	32±1.0 <sup>d</sup>	1.24±0.01 <sup>a</sup>	0.12±0.0 <sup>d</sup>	0.013±0.0 <sup>d</sup>
	15-30	8.04±0.06 <sup>bc</sup>	1.68±0.02 <sup>f</sup>	27.3±2.0 <sup>e</sup>	1.26±0.02 <sup>a</sup>	0.10±0.0 <sup>de</sup>	0.010±0.0 <sup>d</sup>
	30-45	8.12±0.03 <sup>a</sup>	1.66±0.04 <sup>f</sup>	22.6±1.5 <sup>f</sup>	1.28±0.01 <sup>a</sup>	0.09±0.01 <sup>e</sup>	0.010±0.0 <sup>d</sup>
26-year	0-15	8.0±0.02 <sup>c</sup>	2.35±0.03 <sup>a</sup>	41±0.5 <sup>b</sup>	1.07±0.04 <sup>c</sup>	0.27±0.01 <sup>b</sup>	0.046±0.0 <sup>b</sup>
	15-30	8.10±0.02 <sup>ab</sup>	2.23±0.03 <sup>b</sup>	38±1.0 <sup>c</sup>	1.11±0.02 <sup>b</sup>	0.20±0.01 <sup>c</sup>	0.024±0.0 <sup>c</sup>
	30-45	8.04±0.01 <sup>bc</sup>	2.17±0.04 <sup>c</sup>	30.6±1.5 <sup>d</sup>	1.15±0.01 <sup>b</sup>	0.12±0.01 <sup>d</sup>	0.013±0.0 <sup>d</sup>
34-year	0-15	7.83±0.02 <sup>d</sup>	1.83±0.03 <sup>d</sup>	45±1.1 <sup>a</sup>	0.96±0.01 <sup>e</sup>	0.27±0.01 <sup>b</sup>	0.047±0.0 <sup>b</sup>
	15-30	7.89±0.05 <sup>d</sup>	1.75±0.03 <sup>e</sup>	37.6±1.5 <sup>c</sup>	1.02±0.02 <sup>d</sup>	0.37±0.01 <sup>a</sup>	0.064±0.0 <sup>a</sup>
	30-45	8.0±0.04 <sup>c</sup>	1.75±0.02 <sup>e</sup>	31±1.7 <sup>d</sup>	1.06±0.01 <sup>cd</sup>	0.21±0.02 <sup>c</sup>	0.029±0.0 <sup>c</sup>

Different letters in each row indicate a significant difference (p<0.05).

در سطح احتمال یک درصد معنی دار است (جدول ۳). این امر بیانگر تأثیر قابل توجه سن تاغ کاری بر بهبود وضعیت حاصل خیزی و کیفیت خاک در مناطق خشک است.

### ۳-۲- اثر سن تاغ کاری بر ذخایر کربن و نیتروژن خاک

تجزیه واریانس ذخایر کربن (CP) و نیتروژن (NP) خاک در عمق ۰ تا ۱۵ سانتی متر نشان داد که تفاوت بین سایت های مورد مطالعه از نظر هر دو ویژگی

جدول ۳- تجزیه واریانس ذخایر کربن و نیتروژن خاک در عمق ۰-۱۵ سانتی متر سایت های مورد مطالعه

Table 3. Analysis of variance of soil carbon and nitrogen stocks at the 0-15 cm depth among the study sites

Soil Properties		df	Mean Square	F
CP	Between Groups	2	3.50	46.37**
	Within Groups	15	0.07	
NP	Between Groups	2	0.21	103.66**
	Within Groups	15	0.00	

\*\* , indicate significance at the 1% probability levels.

۳/۹۱ و ۰/۶۹ تن در هکتار را دارا بود. منطقه شاهد کم ترین مقادیر ذخیره کربن (۲/۳۷ تن در هکتار) و نیتروژن (۰/۲۵ تن در هکتار) را داشت. این الگو نشان می دهد که در مرحله میانی رشد پوشش

با توجه به مقایسه میانگین ها (جدول ۴)، در لایه سطحی خاک سایت ۲۶ ساله بالاترین ذخیره کربن (۴/۴۶ تن در هکتار) و نیتروژن (۰/۷۴) را نشان داد، در حالی که سایت ۳۴ ساله به ترتیب

تاغ، سرعت تجزیه بقایای گیاهی و فعالیت میکروبی خاک بالاتر است، که منجر به تجمع سریع مواد آلی و عناصر غذایی در لایه سطحی می‌شود. به‌طور خاص، این افزایش در سایت ۲۶ ساله را می‌توان به مرحلهٔ اوج پویایی اکوسیستم پس از استقرار پایدار پوشش تاغ نسبت داد، که در آن بازگشت مواد آلی به خاک و فعالیت میکروبی در بالاترین سطح خود قرار دارد و باعث بهبود ظرفیت ذخیرهٔ کربن و نیتروژن در سطح خاک می‌شود. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین مبنی بر تأثیر مثبت افزایش سن پوشش گیاهی بر ترسیب کربن و نیتروژن (Yang et al., 2024;

نتایج تحلیل واریانس در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر نشان داد که تفاوت میانگین ذخایر کربن و نیتروژن خاک بین سایت‌های تاغ کاری ۳۴ ساله، ۲۶ ساله و منطقه شاهد از نظر آماری معنی‌دار است ( $p < 0.05$ ). این یافته بیانگر آن است که سن تاغ کاری و

جدول ۴- مقایسهٔ میانگین ذخایر کربن و نیتروژن خاک در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متر مناطق مورد مطالعه

Table 4. Comparison of mean soil carbon and nitrogen stocks at the 0–15 cm depth among the study areas

Soil Properties	Study areas		
	Control area	26-year	34-year
CP (t ha <sup>-1</sup> )	2.37±0.09 <sup>c</sup>	4.46±0.4 <sup>a</sup>	3.91±0.1 <sup>b</sup>
NP (t ha <sup>-1</sup> )	0.25±0.02 <sup>b</sup>	0.74±0.01 <sup>a</sup>	0.69±0.07 <sup>a</sup>

Different letters in each row indicate a significant difference ( $p < 0.05$ ).

تیمارهای اعمال‌شده تأثیر قابل‌توجهی بر افزایش تجمع کربن و نیتروژن در خاک دارند و اختلاف مشاهده‌شده میان میانگین‌ها ناشی از عوامل واقعی بوده و تصادفی نیست (جدول ۵).

نتایج تحلیل واریانس در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر نشان داد که تفاوت میانگین ذخایر کربن و نیتروژن خاک بین سایت‌های تاغ کاری ۳۴ ساله، ۲۶ ساله و منطقه شاهد از نظر آماری معنی‌دار است ( $p < 0.05$ ). این یافته بیانگر آن است که سن تاغ کاری و

جدول ۵- تجزیهٔ واریانس ذخایر کربن و نیتروژن خاک در عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متر سایت‌های مورد مطالعه

Table 5. Analysis of variance for soil carbon and nitrogen stocks at the 15–30 cm depth among the study sites

Soil Properties		df	Mean Square	F
CP	Between Groups	2	10.69	167.6**
	Within Groups	15	0.06	
NP	Between Groups	2	0.50	594.9**
	Within Groups	15	0.00	

\*\* , indicate significance at the 1% probability levels.

جدول ۶ نشان‌دهندهٔ مقایسهٔ میانگین ذخایر کربن (CP) نیتروژن خاک (NP) در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر در سایت‌های مورد مطالعه است. نتایج نشان می‌دهد که ذخایر کربن و نیتروژن خاک در سایت ۳۴ ساله (۵/۷۸، ۰/۹۸) به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از سایت ۲۶ ساله

نتایج آنالیز واریانس نشان می‌دهد که تفاوت میانگین ذخایر کربن (CP) و نیتروژن (NP) خاک در عمق ۳۰ تا ۴۵ سانتی‌متر بین سایت‌های ۳۴ ساله، ۲۶ ساله و منطقه شاهد معنادار است ( $p < 0.01$ ). این نتایج تأیید می‌کند که سن سایت و تیمارهای

جدول ۶- مقایسهٔ میانگین ذخایر کربن و نیتروژن خاک در عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متر مناطق مورد مطالعه

Table 6. Comparison of mean soil carbon and nitrogen stocks at the 15–30 cm depth among the study sites

Soil Properties	Study areas		
	Control area	26-year	34-year
CP (t ha <sup>-1</sup> )	2.04±0.1 <sup>c</sup>	3.46±0.2 <sup>b</sup>	5.78±0.3 <sup>a</sup>
NP (t ha <sup>-1</sup> )	0.19±0.02 <sup>c</sup>	0.40±0.04 <sup>b</sup>	0.98±0.01 <sup>a</sup>

Different letters in each row indicate a significant difference ( $p < 0.05$ ).

اعمال‌شده تأثیر قابل‌توجهی بر تجمع کربن و نیتروژن خاک در لایه‌های زیرین دارند و اختلافات مشاهده‌شده بین سایت‌ها تصادفی نیست (جدول ۷).

نتایج آنالیز واریانس نشان می‌دهد که تفاوت میانگین ذخایر کربن (CP) و نیتروژن (NP) خاک در عمق ۳۰ تا ۴۵ سانتی‌متر بین سایت‌های ۳۴ ساله، ۲۶ ساله و منطقه شاهد معنادار است ( $p < 0.01$ ). این نتایج تأیید می‌کند که سن سایت و تیمارهای

جدول ۷- تجزیه واریانس ذخایر کربن و نیتروژن خاک در عمق ۳۰-۴۵ سانتی متر سایت های مورد مطالعه

Soil Properties		df	Mean Square	F
CP	Between Groups	2	1.97	41.88**
	Within Groups	15	0.04	
NP	Between Groups	2	0.06	28.92**
	Within Groups	15	0.00	

\*\* , indicate significance at the 1% probability levels.

(You et al., 2024; Song et al., 2025; Han et al., 2017). این یافته ها با مطالعات قبلی همسو است که نشان می دهند سن پوشش گیاهی و مرحله رشد آن، هم بر ظرفیت ترسیب کربن و نیتروژن در سطح خاک و هم در عمق تأثیرگذار است، اما فرآیندهای ذخیره سازی در عمق طولانی تر مستلزم پوشش گیاهی پایدار و طول عمر بیش تر است (Li et al., 2023; Ordibehesht et al., 2024; Yu et al., 2024). مطالعات پیشین نشان می دهند که سن پوشش گیاهی تأثیر قابل توجهی بر تجمع کربن و نیتروژن خاک دارد؛ برای نمونه، توده های ۳۵ ساله دست کاشت توسکای بیلاقی بیش ترین مقادیر نیتروژن کل و کربن ترسیب شده را در خاک نشان دادند، در حالی که توده های ۲۵ ساله کم ترین مقادیر را داشتند (Alazmani et al., 2021). علاوه بر این، تحلیل روابط بین کربن آلی، نیتروژن کل، تخلخل و وزن مخصوص ظاهری نشان داد که بهبود فیزیکی شیمیایی خاک، افزایش تهویه و ساختار بهینه، و فعالیت میکروبی همزمان، نقش اساسی در افزایش ظرفیت ذخیره عناصر غذایی دارند (Bhattacharyya et al., 2021). در مجموع، این نتایج نشان می دهند که مدیریت طولانی مدت پوشش گیاهی نه تنها باعث افزایش ذخایر کربن و نیتروژن در لایه های سطحی می شود، بلکه به تدریج ظرفیت ذخیره این عناصر در لایه های زیرین را نیز افزایش می دهد. این الگوی عمقی-مکانی ذخایر عناصر غذایی، اهمیت انتخاب گونه های مقاوم به خشکی، مدیریت سن پوشش گیاهی و حفظ ثبات اکوسیستم در احیای اراضی خشک را برجسته می کند (Muche et al., 2025; Gui et al., 2023).

جدول ۸ مقایسه میانگین ذخایر کربن و نیتروژن خاک در عمق ۳۰ تا ۴۵ سانتی متر را در سه منطقه مورد مطالعه نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که سایت ۳۴ ساله بیش ترین ذخایر کربن (۳/۳۵) و نیتروژن (۰/۴۶) را دارد و به طور معنی دار بالاتر از سایت ۲۶ ساله و منطقه شاهد است. با توجه به نتایج سن سایت تاغکاری اثر قابل توجهی بر بهبود ذخایر کربن و نیتروژن خاک در لایه های زیرین دارند.

سن پوشش گیاهی و مدیریت طولانی مدت تاغکاری از عوامل کلیدی تعیین کننده ظرفیت خاک در ذخیره کربن و نیتروژن هستند و تأثیر قابل توجهی بر فرآیندهای تجمع مواد آلی و فعالیت میکروبی دارند. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که اثر سن تاغکاری بر ذخایر کربن و نیتروژن خاک به طور قابل توجهی وابسته به عمق خاک است. در لایه سطحی (۰-۱۵ سانتی متر)، بیش ترین ذخیره کربن و نیتروژن در سایت های ۲۶ ساله مشاهده شد، در حالی که در لایه های زیرین (۳۰-۱۵ و ۴۵-۳۰ سانتی متر) سایت ۳۴ ساله مقادیر بالاتری را نشان داد. این الگو منعکس کننده تعامل پیچیده بین ورودی مواد آلی از پوشش گیاهی، فعالیت میکروبی و انتقال عناصر غذایی در خاک است. در سایت های جوان تر، تجزیه سریع تر بقایای گیاهی و فعالیت بالاتر میکروبی در لایه سطحی منجر به تجمع سریع کربن و نیتروژن می شود، اما پوشش گیاهی هنوز فرصت کافی برای نفوذ و انتقال تدریجی مواد مغذی به لایه های زیرین نداشته است. در مقابل، در سایت های قدیمی تر، تثبیت طولانی مدت مواد آلی و توسعه شبکه ریشه های عمیق، ذخیره کربن و نیتروژن را در لایه های عمیق تر خاک افزایش می دهد

جدول ۸- مقایسه میانگین ذخایر کربن و نیتروژن خاک در عمق ۳۰-۴۵ سانتی متر مناطق مورد مطالعه

Soil Properties	Study areas		
	Control area	26-year	34-year
CP (t ha <sup>-1</sup> )	1.78±0.08 <sup>b</sup>	2.19±0.2 <sup>b</sup>	3.35±0.2 <sup>a</sup>
NP (t ha <sup>-1</sup> )	0.19±0.02 <sup>b</sup>	0.23±0.06 <sup>b</sup>	0.46±0.04 <sup>a</sup>

Different letters in each row indicate a significant difference (p<0.05).

تاغکاری و با تاغکاری با سنین متفاوت را به وضوح از یکدیگر تفکیک کند، در حالی که محور دوم با ۱۳/۱ درصد از واریانس کل، تغییرات جزئی تر را نشان داد (جدول ۹). مطابق شکل ۲ نتایج

### ۳-۳- همبستگی بین پارامترهای مورد مطالعه

نتایج PCA نیز نشان داد که محور اول بیش ترین سهم (۷۰/۱۵ درصد) را در توضیح تغییرات داده ها دارد و توانست منطقه بدون

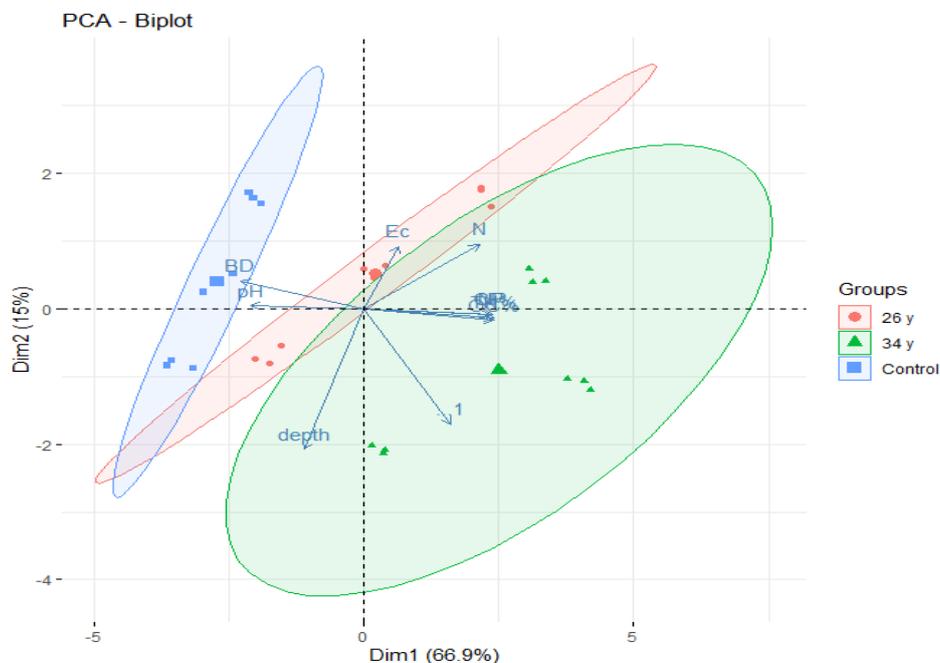
ضعیف‌تری با سایر ویژگی‌ها دارد، در حالی که هدایت الکتریکی بیش‌تر در جهت منطقه و تا حدی عمق تغییر می‌کند، که بیانگر تأثیر شرایط محیطی و تجمع املاح در سطوح پایین‌تر خاک است. به‌طور کلی، پراکنش متغیرها در فضای PCA نشان می‌دهد که افزایش سن تاغ کاری با بهبود قابل توجه ویژگی‌های شیمیایی خاک (افزایش کربن آلی خاک، نیتروژن، ذخیره کربن و نیتروژن) و کاهش وزن مخصوص ظاهری همراه است. این الگو بیانگر نقش مثبت و تدریجی تاغ کاری در بازسازی خاک و افزایش ظرفیت ذخیره عناصر غذایی در اراضی خشک منطقه مرک بیرجند است.

تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان داد، ویژگی‌هایی مانند کربن آلی، نیتروژن کل، ذخیره کربن و ذخیره نیتروژن در یک خوشه قرار گرفته‌اند و همبستگی مثبت و قوی با یکدیگر نشان می‌دهند. این هم‌جهتی بیانگر تأثیر مشترک فرایندهای حاصل از افزایش سن تاغ کاری بر بهبود کیفیت خاک از طریق افزایش مواد آلی و چرخه عناصر غذایی است. در مقابل، وزن مخصوص ظاهری در جهت مخالف این متغیرها واقع شده است که نشان‌دهنده رابطه معکوس میان تراکم خاک و مقدار مواد آلی، نیتروژن و کربن ذخیره شده است. متغیر pH نیز در زاویه‌ای نسبتاً مستقل قرار گرفته و ارتباط

جدول ۹- نتایج تجزیه به مولفه‌های اصلی بر ویژگی‌های خاک

Table 9. Results of principal component analysis on soil properties

Axis	Eigen Value	Percent of Variance
1	6.31	70.15
2	1.18	13.10



شکل ۲- پراکنش متغیرهای خاک در تجزیه به مولفه‌های اصلی (PCA)

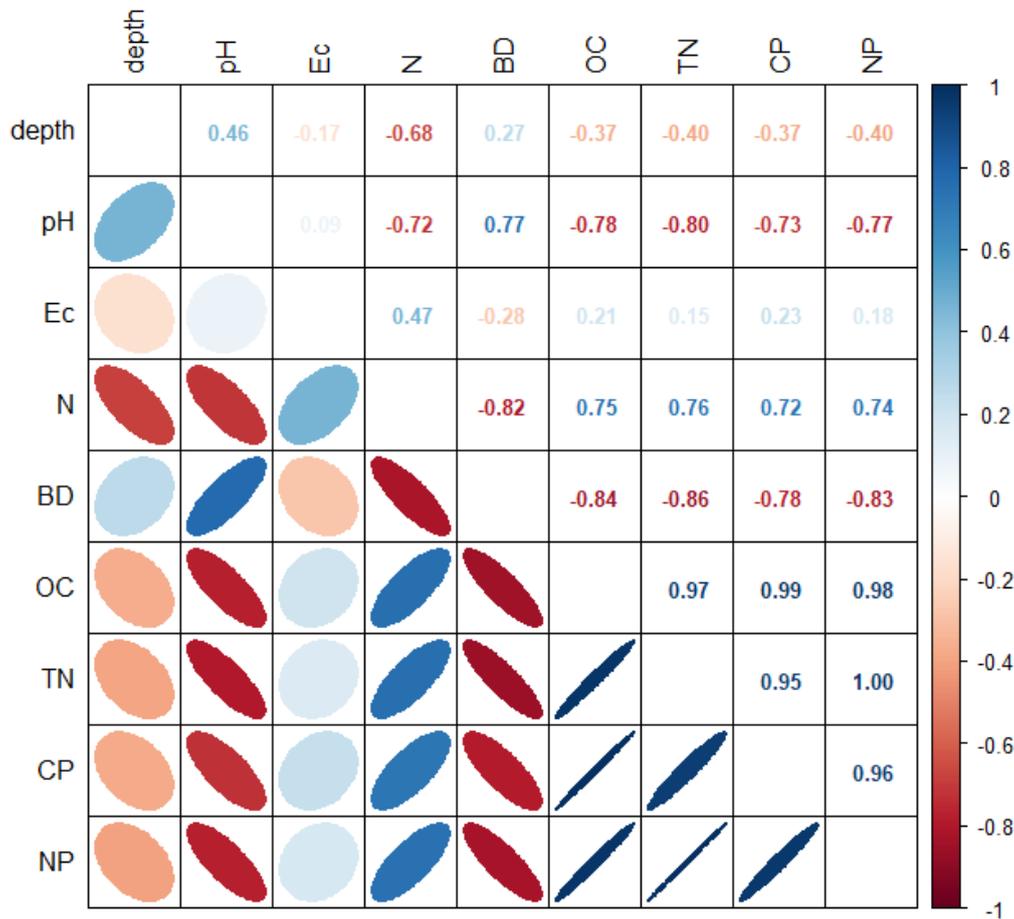
Figure 2. Distribution of soil variables in the principal component analysis (PCA)

معکوس افزایش تراکم خاک بر توانایی ذخیره عناصر غذایی است. از سوی دیگر، همبستگی بسیار بالای بین OC، TN، CP و NP بیش از ۰/۹۵ نشان می‌دهد که تغییرات این متغیرها هم‌جهت و به‌طور همزمان تحت تأثیر میزان مواد آلی خاک هستند. این نتایج تأکید می‌کنند که تاغ کاری با افزایش مواد آلی و بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک، نقش مهمی در افزایش ظرفیت ذخیره کربن و نیتروژن خاک ایفا می‌کند و کیفیت خاک در لایه‌های سطحی بیش‌ترین حساسیت را نسبت به تغییرات مدیریتی دارد (شکل ۳). تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان داد که کربن آلی، نیتروژن

نتایج ضرایب همبستگی نشان می‌دهد که بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک روابط معنادار و قابل تفسیر وجود دارد. متغیر عمق خاک با اغلب خصوصیات از جمله نیتروژن (N)، کربن آلی (OC)، نیتروژن کل (TN)، ذخیره کربن (CP) و ذخیره نیتروژن (NP) همبستگی منفی دارد که نشان‌دهنده کاهش غلظت این عناصر با افزایش عمق خاک است؛ پدیده‌ای که معمولاً به دلیل تجمع بیش‌تر مواد آلی و فعالیت میکروبی در لایه‌های سطحی رخ می‌دهد. بین وزن مخصوص ظاهری و کربن آلی، نیتروژن کل و ذخایر کربن و نیتروژن، همبستگی منفی قوی مشاهده شد که بیانگر تأثیر

نیتروزن در سایت‌های تاغ‌کاری با سن متفاوت تأیید می‌کند، و به‌طور مستقیم با پایداری اکوسیستم و عملکرد بلندمدت خاک در مناطق خشک مرتبط است (Gui et al., 2023; Muche et al., 2025).

کل و تخلخل با یکدیگر همبستگی مثبت و با وزن مخصوص ظاهری همبستگی منفی دارند، که این تعامل پیچیده میان ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نقش اثرات متقابل منطقه و عمق را در بهبود کیفیت خاک و افزایش ظرفیت ذخیره کربن و



شکل ۳- نقشه حرارتی همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های مورد مطالعه (depth: عمق، pH: اسیدیته، EC: هدایت الکتریکی، N: تخلخل، BD: وزن مخصوص ظاهری، OC: کربن آلی، TN: نیتروزن کل، CP: ذخیره کربن، NP: ذخیره نیتروزن)

Figure 3. Heatmap of Pearson correlations among the studied characteristics (depth: depth, pH: acidity, EC: electrical conductivity, N: porosity, BD: bulk density, OC: organic carbon, TN: total nitrogen, CP: carbon storage, NP: nitrogen storage)

سایت‌های ۳۴ ساله بیش‌ترین ذخایر را نشان دادند که به تثبیت طولانی‌مدت مواد آلی و توسعه شبکه ریشه‌های عمیق مرتبط است (Muche et al., 2025). این الگوی عمقی-زمانی، فرضیه پژوهش مبنی بر اثر مستقیم سن پوشش گیاهی و طول عمر تاغ‌کاری بر ظرفیت ذخیره کربن و نیتروزن خاک را تأیید می‌کند. بر اساس این نتایج، توصیه می‌شود در برنامه‌های احیای اراضی خشک از گونه‌های بومی مقاوم به خشکی استفاده شود و مدیریت طولانی‌مدت پوشش گیاهی اعمال شود تا هم ذخیره عناصر غذایی در لایه‌های سطحی و هم تثبیت کربن و نیتروزن در لایه‌های عمیق بهینه شود. علاوه بر این، پایش منظم ویژگی‌های

#### ۴- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر سن تاغ‌کاری و عمق خاک بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و ذخایر کربن و نیتروزن در اراضی خشک انجام شد. یافته‌ها نشان داد که سن پوشش گیاهی و تعامل آن با عمق خاک نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود کیفیت خاک، تجمع مواد آلی و فعال‌سازی فعالیت میکروبی دارند. در لایه سطحی (۱۵-۰ سانتی‌متر)، بیش‌ترین ذخایر کربن و نیتروزن در سایت‌های ۲۶ ساله مشاهده شد که ناشی از تجزیه سریع‌تر بقایای گیاهی و فعالیت بالاتر میکروبی است (Bhattacharyya et al., 2021)، در حالی که در لایه‌های زیرین (۱۵-۳۰ و ۳۰-۴۵ سانتی‌متر)،

محمدرضا دهمرده قلعه نو: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛

وحید کریمیان: مفهوم سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله

### منابع

- اردیبهشت، مریم، شیروانی، انوشیروان، متینی زاده، محمد، روانبخش، هومن، توکلی نکو، حسین. (۱۴۰۲). بررسی فاکتورهای شیمیایی، اندوخته کربن آلی خاک و شاخص‌های تنوع زیستی گیاهی برای دو گونه تاغ و گز در استان قم. *تحقیقات حمایت و حفاظت جنگلها و مراتع ایران*، ۲۱ (۲)، ۲۶۷-۲۸۲. doi: 10.22092/ijfrpr.2023.362667.1585
- عسگری، حمیدرضا؛ علی‌نژاد، محمد (۱۴۰۳). تحلیل مکانی و مدل سازی ترسیب کربن گیاه Atriplex در مراتع چپر قویمه استان گلستان. *حفاظت زیست بوم گیاهان*، ۱۲ (۲۴)، ۳۵-۴۶. <http://pec.gonbad.ac.ir/article-1-926-en.html>
- صباغ زاده، سحر، زارع، محمد، مختاری، محمدحسین، افخم الشعراء، محمدرضا. (۱۳۹۵). برآورد بیوماس بالای سطح زمین در گیاه تاغ با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی (مطالعه موردی: مرک، بیرجند). *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۲۳ (۴)، ۸۴۳-۸۵۵. doi: 10.22092/ijrdr.2017.109517
- صابری، مرتضی، خطیبی، رسول، کریمیان، وحید. (۱۴۰۴). بررسی اثر شدت چرای دام بر ترسیب کربن و نیتروژن خاک و پیامدهای زیست محیطی در مراتع سراسرو، خاش. *مخاطرات محیط طبیعی*، (در حال انتشار). doi: 10.22111/jneh.2025.52908.2134
- صابری، مرتضی، کریمیان، وحید، شهریاری، علیرضا. (۱۴۰۴). ارزیابی تنوع فلورستیک و ذخیره سازی کربن در خاک و بیوماس گونه‌های غالب مرتعی و نقش آن‌ها در پایداری اکولوژیکی. *جغرافیا و پایداری محیط*، (در حال انتشار). doi: 10.22126/ges.2025.12694.2907
- الازمنی، مظاهر، حجتی، سید، محمد، واعظ موسوی، سید، محمد، تفضلی، محیا. (۱۴۰۴). تأثیر سن توده دست کاشت توسکا بیلاقی بر ترسیب کربن خاک. *پژوهش و توسعه جنگل*، ۷ (۲)، ۲۷۹-۲۹۲. doi: 10.30466/jfrd.2021.121058

### References

- Abdel-Fattah, M. K., Mohamed, E. S., Wagdi, E. M., Shahin, S. A., Aldosari, A. A., Lasaponara, R., & Alnaimy, M. A. (2021). Quantitative evaluation of soil quality using Principal Component Analysis: The case study of El-Fayoum depression Egypt. *Sustainability*, 13(4), 1824. doi: 10.3390/su13041824
- Alazmani, M., Hojati, S. M., Waez-Mousavi, S. M., & Tafazoli, M. (2021). Effect of alder plantation age on soil carbon sequestration. *Forest Research and Development*, 7(2), 279-291. doi: 10.30466/jfrd.2021.121058 [In Persian]
- Asgari, H. R., & Alinejad, M. (2024). Spatial analysis and modeling of carbon sequestration by Atriplex plants in Chaparquimeh rangelands,

فیزیکوشیمیایی خاک و ذخایر عناصر غذایی در عمق‌های مختلف می‌تواند به بهبود تصمیم‌گیری مدیریتی، افزایش پایداری اکوسیستم و ارتقای خدمات اکوسیستمی در مناطق خشک کمک کند. نتایج حاضر اهمیت سن پوشش گیاهی، مدیریت طولانی مدت و انتخاب گونه‌های مناسب را در بازسازی و تقویت عملکرد اکوسیستم‌های خشک برجسته می‌سازد. از محدودیت‌های پژوهش حاضر می‌توان به بازه محدود سنی تاغ کاری‌ها، عدم بررسی مستقیم فعالیت میکروبی اشاره کرد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، نقش جوامع میکروبی، تغییرات فصلی و تأثیر مدیریت چرا و آبیاری بر پایداری ذخایر کربن و نیتروژن مورد بررسی قرار گیرد تا راهکارهای کاربردی تری برای احیای پایدار مناطق خشک ارائه شود

### سیاسگزاری

بدین وسیله از حمایت مالی دانشگاه زابل (IR-UOZ-) Grant code: GR-8721) برای انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

### تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی 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

**مرتضی صابری:** مفهوم سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله؛

- Golestan Province. *Journal of Plant Ecosystem Conservation*, 12(24), 35-46. <http://pec.gonbad.ac.ir/article-1-926-en.html>. [In Persian]
- Bailey, T., Robinson, N., Farrell, M., Macdonald, B., Weaver, T., Antille, D. L., Chin, A., & Brackin, R. (2021). Storage of soil samples leads to over-representation of the contribution of nitrate to plant-available nitrogen. *Soil Research*, 60(1), 22-32. doi: 10.1071/SR21013
- Bargali, S. S., Shahi, C., Bargali, K., Negi, B., & Khatri, K. (2022). Energy and monetary efficiencies at the different altitudinal agroecosystems in central himalaya, India. *Heliyon* 8 (11), e11500. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11500

- Bazgir, M., Omidipour, R., Heydari, M., Zainali, N., Hamidi, M., & Dey, D. C. (2020). Prioritizing woody species for the rehabilitation of arid lands in western Iran based on soil properties and carbon sequestration. *Journal of Arid Land*, 12(4), 640-652. doi: 10.1007/s40333-020-0013-x
- Bhan, M., Misher, C., Hiremath, A., & Vanak, A. T. (2025). Restoration maintains high soil carbon stocks in Asia's largest tropical grassland. *Ecological Applications*, 35(5), e70073. doi: 10.1002/eap.70073
- Bhattacharyya, R., Rabbi, S. M., Zhang, Y., Young, I. M., Jones, A. R., Dennis, P. G., & Dalal, R. C. (2021). Soil organic carbon is significantly associated with the pore geometry, microbial diversity and enzyme activity of the macro-aggregates under different land uses. *Science of the Total Environment*, 778, 146286. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146286
- Bisht, S., Rawat, G. S., Bargali, S. S., Rawat, Y. S., & Mehta, A. (2023). Forest vegetation response to anthropogenic pressures: a case study from askot wildlife sanctuary, Western himalaya. *Environment Dev. Sustain.* 1–25. doi: 10.1007/s10668-023-03130-2
- Blanca Mena, M. J., Alarcón Postigo, R., Arnau Gras, J., Bono Cabré, R., & Bendayan, R. (2017). Non-normal data: Is ANOVA still a valid option. *Psicothema*, 2017, vol. 29, num. 4, p. 552-557. <https://hdl.handle.net/2445/122126>
- Challenge, S., Egeru, A., & Nyombi, K. (2022). Soil carbon and nitrogen stocks in traditionally managed rangeland biomes in Karamoja sub-region, Uganda. *African Crop Science Journal*, 30(1), 127–140. doi: 10.4314/acsj.v30is1.10S
- Chen, L., T. Baoyin, & F. Xia, 2022. Grassland management strategies influence soil C, N, and P sequestration through shifting plant community composition in semi-arid grasslands of northern China. *Journal of Ecological Indicator*, 34: 1-12. doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108470
- Ebrahimi, M. Saberi, M. 2022. The relationship between succession and reclamation of desertified areas in artificial forests of Calligonum spp. in an arid desert of southeastern Iran. *Frontiers in Environmental Science*, 10. doi: 10.3389/fenvs.2022.901962
- Eschen, R., Bekele, K., Mbaabu, P. R., Kilawe, C. J., & Eckert, S. (2021). *Prosopis juliflora* management and grassland restoration in Baringo County, Kenya: Opportunities for soil carbon sequestration and local livelihoods. *Journal of applied ecology*, 58(6), 1302-1313. doi: 10.1111/1365-2664.13854
- Gao, F., Zhou, J., Jiang, H., Yang, W., & Wang, G. (2024). Assessing the true value of ecological restoration in mining areas: An input-output approach based on ecosystem service valuation. *Ecological Indicators*, 166, 112591. doi: 10.1016/j.ecolind.2024.112591
- Godde, C. M., de Boer, I. J. M., Ermgassen, E. Z., Herrero, M., van Middelaar, C. E., Muller, A., Roos, E., Schader, C., Smith, P., Zanten, H. H. E., & Garnett, T. (2020). Soil carbon sequestration in grazing systems: Managing expectations. *Climatic Change*, 161(3), 385–391. doi: 10.1007/s10584-020-02673-8
- Gui, W., You, Y., Yang, F., & Zhang, M. (2023). Soil bulk density and matric potential regulate soil CO2 emissions by altering pore characteristics and water content. *Land*, 12(9), 1646. doi: 10.3390/land12091646
- Han, X., Zhao, F., Tong, X., Deng, J., Yang, G., Chen, L., & Kang, D. (2017). Understanding soil carbon sequestration following the afforestation of former arable land by physical fractionation. *Catena*, 150, 317-327. doi: 10.1016/j.catena.2016.11.027
- Hua, F., Bruijnzeel, L. A., Meli, P., Martin, P. A., Zhang, J., Nakagawa, S., et al. (2022). The biodiversity and ecosystem service contributions and trade-offs of forest restoration approaches. *Science*, 376 (6595), 839–844. doi: 10.1126/science.Abl4649
- Kamali, N., Sadeghipour, A., Souri, M., & Mastinu, M. (2022). Variations in soil biological and biochemical indicators under different grazing intensities and seasonal changes. *Land*, 11, 1537. doi: 10.3390/land11091537
- Karimpour, Z., Sadeghi, H., & Hosseini, S. (2025). Impacts of Using Amygdalus Scoparia and Ephedra Procera on Carbon Storage at Dryland Regions. *Desert*, 30(1), 67-80. doi: 10.22059/jdesert.2025.103478
- Li, L., Zayiti, A., & He, X. (2023). Evaluating the stand structure, carbon sequestration, oxygen release function, and carbon sink value of three artificial shrubs alongside the tarim desert highway. *Forests*, 14(11), 2137. doi: 10.3390/f14112137
- Linders, T. E. W., Bekele, K., Schaffner, U., Allan, E., Alamirew, T., Choge, S. K., Eckert, S., Haji, J., Muturi, G., Mbaabu, P. R., Shiferaw, H., & Eschen, R. (2020). The impact of invasive species on social-ecological systems: Relating supply and use of selected provisioning ecosystem services. *Ecosystem Services*, 41, 10105. doi: 10.1016/j.ecoser.2019.101055
- Liu, X., Yang, T., Wang, Q., Huang, F., & Li, L. (2018). Dynamics of soil carbon and nitrogen stocks after afforestation in arid and semi-arid regions: A meta-analysis. *Sci Total Environ.* 2018 Mar 15;618:1658-1664. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.009
- Lu, Q., Ma, H., Zhou, Y., Liu, J., & Shen, Y. (2023). Restoration of soil quality of degraded grassland can be accelerated by reseeding in an arid area of

- Northwest China. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1101295. doi: 10.3389/fpls.2023.1101295
- MacDicken, K. G. (1997). A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Winrock International Institute for Agricultural Development, Forest Carbon Monitoring Program.
- Manral, V., Bargali, K., Bargali, S. S., Jhariya, M. K., & Padalia, K. (2022). Relationships between soil and microbial biomass properties and annual flux of nutrients in central himalaya forests, *India. Land Degradation Dev.* 33 (12), 2014– 2025. doi: 10.1002/ldr.4283
- Mao, L., Miao, Y., Ge, Y., Wei, S., Yang, X., Li, S., Si, L., Guo, Y, P & Quandahor, P. (2024). Effects of different afforestation years on soil moisture and nutrient content in Maxian Mountain of the Loess Plateau. *Scientific Reports*, 14(1), 16194. doi: 10.1038/s41598-024-66408-z3
- Muche, M., Yemata, G., Molla, E., Adnew, W., & Muasya, A. M. (2025). Soil nutrients, carbon and nitrogen stocks dynamics following exclosure in the North-eastern highlands of Ethiopia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(5), 573. doi.org/10.1007/s10661-025-14025-2
- Ordibehesht, M., Shirvany, A., Matinizadeh, M., Ravanbakhsh, H., & Tavakolineko, H. (2024). Evaluation of the chemical factors, Carbon storage and biodiversity indicators in two species of *Haloxylon ammodendron* and *Tamarix hispida* in Qom province. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 21(2), 282-267. doi: 10.22092/ijfrpr.2023.362667.1585 [In Persian]
- Powers, J. S., & Marin-Spiotta, E. (2017). Ecosystem processes and biogeochemical cycles in secondary tropical forest succession. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48, 497-519. doi: 10.1146/annurev-ecolsys-110316-022944
- Qinfei, B., Yuhai, B., Yantong, Y., Jie, Y., Yanqi, W., & Jie, W. (2024). Effects of different vegetation restoration models on soil nutrients in the water level fluctuation zone of a large reservoir. *Ecological Indicators*, 169, 112955. doi: 10.1016/j.ecolind.2024.112955
- Qiu, D., Xu, R., Wu, C., Mu, X., Zhao, G., & Gao, P. (2022). Vegetation restoration improves soil hydrological properties by regulating soil physicochemical properties in the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 609, 127730. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.127730
- Renella, G. (2020). Evolution of physico-chemical properties, microbial biomass and microbial activity of an urban soil after de-sealing. *Agriculture*, 10(12), 596. doi: 10.3390/agriculture10120596
- Sabaghzade, S., Zare, M., Mokhtari, M. H. & Afkham olshoara, M. (2017). Estimating of above ground biomass of *Haloxylon* using satellite based vegetation indices (Case study: Marak, Birjand). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 23(4), 843-855. doi: 10.22092/ijrdr.2017.109517 [In Persian]
- Saberi, M., Khatibi, R. and Karimian, V. (2025)b. Investigation of the Effect of Livestock Grazing Intensity on Soil Carbon and Nitrogen Sequestration and Environmental Implications in the Sarsaru Rangelands, *Khash. Journal of Natural Environmental Hazards*, In press. doi: 10.22111/jneh.2025.52908.2134 [In Persian]
- Saberi, M., karimian, V., & Shahriari, A. (2025)a. Evaluation of floristic diversity and carbon storage in soil and biomass of dominant rangeland species and their role in ecological sustainability. *Geography and Environmental Sustainability*, In press. doi: 10.22126/ges.2025.12694.2907 [In Persian]
- Shahbazi, K., Marzi, M., Mohammadi, M. H., Asadi, H., Fathi-Gardelidani, A., Hashemi-Nasab Zavareh, K. S., Tolouei, R., Beheshti, M., Avizhgan, A., & Cheraghi, M. (2024). Soil analysis methods: Sampling, chemical and physical methods (1074 pages)
- Shen, H., Huang, Y., Lin, X., Dai, Z., Zhao, H., Su, W. Q., & Xu, J. (2025). Recoupling of Soil Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Cycles along a 30 Year Fire Chronosequence in Boreal Forests of China. *Environmental Science & Technology*, 59(9), 4432-4443. doi: 10.1021/acs.est.4c08790
- Song, X., Yang, L., Nong, H., Lyu, S., & Wang, J. (2025). Depth-Dependent Impacts of Long-Term Vegetation Restoration on Soil Carbon Stability and C/N Stoichiometry in Subtropical Plantations. *Forests*, 16(1), 108. doi: 10.3390/f16010108
- Syano, N. M., Nyangito, M. M., Kironchi, G., & Wasonga, O. V. (2023). Agroforestry practices impacts on soil properties in the drylands of Eastern Kenya. *Trees, Forests and People*, 14, 100437. doi: 10.1016/j.tfp.2023.100437
- Tessema, B., Sommer, R., Piikki, K., Soderstrom, M., Namirembe, S., Notenbaert, A., et al. (2020). Potential for soil organic carbon sequestration in grasslands in east african countries: A review. *Grassl. Sci.* 66, 135–144. doi:10.1111/grs.12267
- Uselman, S. M., Davison, J., Baughman, O. W., Sullivan, B. W., Miller, W. W., & Leger, E. A. (2018). Restoring dryland old fields with native shrubs and grasses: Does facilitation and seed source matter?. *Plos one*, 13(10), e0205760. doi: 10.1371/journal.pone.0205760
- Yang, R., Chen, S., Zhao, W., & Song, S. (2024). Response of soil inorganic nitrogen dynamics to planting age and vegetation type in artificial sand-fixing land. *Ecosphere*, 15(6), e4869. doi: 10.1002/ecs2.4869
- You, Y., Li, W., Chen, Y., Zhang, Q., & Zhang, K. (2024). Soil carbon and nitrogen accumulation during long-term natural vegetation restoration

- following agricultural abandonment in Qingling Mountains. *Ecological Engineering*, 201, 107212. doi: 10.1016/j.ecoleng.2024.107212
- Yu, S., Yang, J., Norghauer, J. M., Yang, J., Yang, B., Zhang, H., & Li, X. (2024). Soil Carbon and Nitrogen Stocks and Their Influencing Factors in Different-Aged Stands of Sand-Fixing *Caragana korshinskii* in the Mu Us Desert of Northwest China. *Forests*, 15(6), 1018. doi: 10.3390/f15061018
- Zellweger, F., Flack-Prain, S., Footring, J., Wilebore, B., & Willis, K. J. (2022). Carbon storage and sequestration rates of trees inside and outside forests in Great Britain. *Environmental Research Letters*, 17(7), 074004. doi:10.1088/1748-9326/ac7cc7
- Zhang, Y., Feng, T., Wang, L., Wang, X., Wei, T., & Wang, P. (2023). Effects of long-term vegetation restoration on soil physicochemical properties mainly achieved by the coupling contributions of biological synusia to the Loess Plateau. *Ecological Indicators*, 152, 110353. doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110353
- Zhu, X., Si, J., He, X., Jia, B., Zhou, D., Wang, C., Qin, J., & Liu, Z. (2024). Effects of long-term afforestation on soil water and carbon in the Alxa Plateau. *Frontiers in Plant Science*, 14, 127310. doi: 10.3389/fpls.2023.1273108