

Determining soil factors affecting soil organic carbon storage in rangeland and desert habitats of South Khorasan

Moslem Rostampour*¹, Samira Hossein Jafari², Reza yari³

1*-Corresponding author, Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management and Research Group on Future Studies in Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: rostampour@birjand.ac.ir

2- Assistant Professor, Department of Nature Engineering and Medicinal Plants, Faculty of Agriculture, University of Torbat Heydarieh, Torbat Heydarieh, Iran.

3-Assistant Professor, Khorasan-e-razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mashhad, Iran.

Received: 01/03/2025

Revised: 08/02/2025

Accepted: 08/24/2025

Published: 06/19/2026

Abstract

Background and objectives

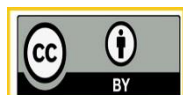
Iran has a high potential in carbon storage due to the large extent of rangelands. Rangeland ecosystems are atmospheric carbon sinks. Soil is an important source of carbon storage and it has been proved that carbon storage in soil is more than three times the storage in the atmosphere and vegetation. Knowing the amount of soil carbon sequestration and storage can be used as a useful and practical tool to better understand soil carbon cycle. Therefore, the purpose of this research is to investigate and determine the most important soil factors affecting the amount of soil carbon storage in Zirkouh and Ferdows habitats in South Khorasan with different plant types.

Methodology

The present research was carried out in South Khorasan province in rangeland habitats of Zirkouh, including *Artemisia sieberi*, *Zygophyllum eurypterum*, and *Tamarix stricta* plant types, and in the desert areas of Ferdows, including *Calligonum polygonoides*, *Seidlitzia rosmarinus*, *Stipagrostis pennata*, and *Zygophyllum eurypterum* types. In order to sample vegetation and soil, 60 4×4 m quadrats were randomly-systematically established in the representative area of each habitat, and the percentage of canopy cover and plant density in each plot were estimated. Then, 10 stands of each species were randomly selected. In the same plots, soil samples were taken to a depth of 70 cm below the plant canopy. Soil physical and chemical properties were determined in the laboratory. The correlation diagram (Pearson correlation coefficient) between environmental characteristics and carbon storage was drawn. First, ordinary multiple linear regression (OLS) analysis was used to examine the relationships, and the multiple collinearity between environmental characteristics and organic carbon storage was examined by the variance inflation factor (VIF) criterion. Since normality and multiple collinearity are assumptions of ordinary regression, two regression models: Partial Least Squares (PLS) and Principal Component Regression (PCR), were used in the present study.

Results

The results of descriptive statistics showed that in Zirkouh habitat, the highest and lowest changes in soil carbon storage are in *Tamarix stricta* habitat (Mean=20.77, SD=11.66) and *Artemisia*



habitat (Mean=13.83, SD=1.81), respectively. In Ferdows region, the highest and lowest changes in the amount of soil carbon storage were observed in *Calligonum polygonoides* (Mean=6.96, SD=1.57) and *Zygophyllum eurypterum* (Mean=5.36, SD=0.80) habitats, respectively. In Zirkouh habitat, carbon storage had a significant negative correlation with sand ($p \leq 0.05$) and a significant positive correlation with canopy cover percentage, N, P, silt, EC ($p \leq 0.01$), lime and K ($p \leq 0.05$). Interestingly, sand percentage had a significant negative correlation with all measured soil properties in this diagram. In Ferdows region, carbon storage had a significant negative correlation with gypsum and potassium ($p \leq 0.05$) and a significant positive correlation with N. In the present study, two models of partial least square regression (PLS) and principal component regression (PCR) were used. In PLS regression method as the best model, in Zirkouh habitat, the parameters such as sand, silt, phosphorus and canopy cover percentages remained as significant variables in the remaining model and among them, silt percentage had the most impact in predicting carbon storage. In Ferdows habitat, the parameters including organic carbon, silt, nitrogen, potassium and gypsum remained as significant variables in the model.

Conclusion

Investigating the effective factors on carbon storage can help managers and decision makers in choosing management methods and modifying existing methods in order to reduce atmospheric carbon density. The results of this research showed that among the two models of partial least square regression (PLS) and principal component regression (PCR), PLS model is the best model to determine the factors affecting carbon storage. There was a positive relationship between vegetation cover and soil nutrients (N, P, K) and carbon storage in the Zirkouh habitat, which emphasizes the role factors related to fertility in carbon storage. By implementing appropriate range management strategies—such as protection, improvement, and restoration of vegetation cover can increase soil organic carbon storage. This approach can help prevent air pollution, reduce vegetation degradation, and ultimately mitigate the harmful effects of climate change.

Keywords: Carbon storage, PLS model, Rangeland ecosystem, Regression, Soil properties

تعیین عوامل خاکی مؤثر بر میزان ذخیره کربن آلی خاک در رویشگاه‌های مرتعی و بیابانی خراسان جنوبی

مسلم رستم‌پور^{۱*}، سمیرا حسین جعفری^۲ و رضا یاری^۳

۱- * نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری و عضو گروه پژوهشی آینده پژوهی در علوم محیطی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، پست الکترونیک: rostampour@birjand.ac.ir

۲- استادیار، گروه مهندسی طبیعت و گیاهان دارویی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران

۳- استادیار پژوهشی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۰ تاریخ اصلاح نهایی: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۲ تاریخ چاپ: ۱۴۰۵/۰۳/۲۹

چکیده

سابقه و هدف

کشور ایران به دلیل وسعت زیاد مراتع، ظرفیت بالایی در ذخیره کربن آلی دارد. اکوسیستم‌های مرتعی ذخیره‌گاه کربن اتمسفر هستند. خاک منبعی مهم در ذخیره کربن بوده و محققان اثبات کرده‌اند که ذخیره کربن در خاک بیش از سه برابر ذخیره موجود در اتمسفر و پوشش گیاهیست. با توجه به اینکه اطلاع از میزان ذخیره کربن خاک می‌تواند بعنوان ابزاری مفید و کاربردی برای درک بهتر چرخه کربن خاک مورد استفاده قرار گیرد، از این رو، هدف از این پژوهش بررسی و تعیین مهمترین عوامل خاکی مؤثر بر میزان ذخیره کربن آلی خاک در دو رویشگاه زیرکوه و فردوس در خراسان جنوبی با تیپ‌های گیاهی متفاوت است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در استان خراسان جنوبی در رویشگاه‌های مرتعی درمنه‌زار شهرستان زیرکوه شامل تیپ‌های درمنه دشتی (*Artemisia sieberi*)، قیچ (*Zygophyllum eurypterum*) و گزدرختچه‌ای (*Tamarix stricta*) و نواحی بیابانی شهرستان فردوس شامل تیپ‌های اسکنبیل (*Calligonum polygonoides*)، اشنان (*Sedilizia rosmarinus*)، سبد (*Stipagrostis pennata*) و قیچ (*Zygophyllum eurypterum*) انجام شد. به منظور نمونه‌برداری از پوشش گیاهی و خاک، در منطقه معرف هر رویشگاه، ۶۰ کوادرات ۴×۴ متر به طور تصادفی-سیستماتیک مستقر شد و درصد تاج‌پوشش و تراکم گیاهی در هر پلات برآورد گردید. سپس از هر گونه ۱۰ پایه به صورتی تصادفی انتخاب شد. در همان پلات‌ها، در زیر تاج‌پوشش گیاه، نمونه خاک تا عمق ۷۰ سانتی‌متر برداشت شد. در آزمایشگاه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تعیین گردید. نمودار همبستگی (ضریب همبستگی پیرسون) بین خصوصیات محیطی و میزان ذخیره کربن ترسیم شد. ابتدا از تحلیل رگرسیون خطی چندگانه معمولی (OLS) برای بررسی روابط استفاده شد و هم‌خطی چندگانه بین خصوصیات محیطی و میزان ذخیره کربن آلی توسط معیار عامل تورم واریانس (VIF) بررسی شد. از آنجایی که نرمال بودن و عدم وجود هم‌خطی از پیش فرض‌های رگرسیون معمولی است، در این پژوهش از دو مدل رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) و رگرسیون مؤلفه‌های اصلی (PCR) استفاده شد.

یافته‌ها

نتایج آمار توصیفی نشان داد که در رویشگاه زیرکوه بیشترین و کمترین تغییرات میزان ذخیره کربن خاک به ترتیب در رویشگاه گز (Mean=20.77, SD=11.66) و درمنه دشتی (Mean=13.83, SD=1.81) می‌باشد. در منطقه فردوس بیشترین و کمترین تغییرات میزان ذخیره کربن خاک به ترتیب در رویشگاه اسکنبیل (Mean=6.96, SD=1.57) و قیچ (Mean=5.36, SD=0.80) مشاهده شد. در رویشگاه زیرکوه، ذخیره کربن با شن همبستگی منفی معنی‌دار ($p \leq 0.05$) و با درصد پوشش گیاهی، N، P، سیلت، EC ($p \leq 0.05$)، آهک و K ($p \leq 0.05$) همبستگی مثبت معنی‌داری داشت. نکته جالب اینکه درصد شن با تمامی صفات در این نمودار همبستگی منفی معنی‌دار داشت. در منطقه فردوس ذخیره کربن با گچ و پتاسیم همبستگی منفی معنی‌دار ($p \leq 0.05$) و با N همبستگی مثبت معنی‌دار

داشت. در این پژوهش از دو مدل رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) و رگرسیون مؤلفه‌های اصلی (PCR) استفاده شد. در روش رگرسیون PLS به عنوان بهترین مدل، در رویشگاه زیرکوه، پارامترهای درصد شن، سیلت، فسفر و درصد پوشش گیاهی به عنوان متغیرهای معنی‌دار در مدل باقی مانده و از بین آنها، درصد سیلت بیشترین تأثیر را در پیش‌بینی ذخیره کربن داشت. در رویشگاه فردوس پارامترهای درصد کربن آلی، سیلت، ازت، پتاسیم و گچ به عنوان متغیرهای معنی‌دار در مدل باقی ماندند.

نتیجه‌گیری

بررسی عوامل مؤثر بر میزان ذخیره کربن می‌تواند مدیران و تصمیم‌گیران را در انتخاب روش‌های مدیریتی و اصلاح روش‌های موجود در راستای کاهش تراکم کربن اتمسفری یاری نماید. نتایج این پژوهش نشان داد که از بین دو مدل رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) و رگرسیون مؤلفه‌های اصلی (PCR)، مدل PLS بهترین مدل برای تعیین عوامل مؤثر بر ذخیره کربن در این پژوهش است. رابطه مثبت بین میزان درصد پوشش گیاهی و عناصر غذایی خاک (N, P, K) و ذخیره کربن در رویشگاه زیرکوه برقرار بود که تأییدی بر نقش عوامل مربوط به حاصلخیزی در ذخیره کربن است. با مدیریت صحیح مراتع در جهت حفاظت، اصلاح و احیای پوشش گیاهی، می‌توان در راستای افزایش ذخیره کربن آلی خاک، مانع افزایش آلودگی هوا، تخریب پوشش گیاهی و در نهایت کاهش آثار زیانبار تغییر اقلیم شد.

واژه‌های کلیدی: اکوسیستم مرتعی، خصوصیات خاک، رگرسیون، ذخیره کربن، مدل PLS

مقدمه

گرمایش جهانی و تغییر اقلیم از مهمترین مشکلات جهانی است که توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده، به گونه‌ای که آنها همواره به دنبال روش‌هایی برای کاهش مقدار عناصر تشدیدکننده آن هستند (Tang, 2023). مراتع دارای قابلیت زیادی در ذخیره کربن آلی هستند، زیرا بیش از ۵۰ درصد مساحت اکوسیستم‌های خشکی را شامل می‌شوند، بنابراین ظرفیت مناسبی برای ذخیره کربن دارند (Asgari et al., 2023; Attaeian et al., 2021). در مقیاس جهانی مراتع سالانه حدود ۵۰۰ میلیون تن کربن را ترسیب می‌کنند. ذخیره کربن آنها ۱۰ درصد کل ذخایر کربن بیوماس و ۳۰ درصد کل کربن آلی خاک می‌باشد (Rastgar et al., 2018; Tang, 2023). در دهه‌های اخیر افزایش ذخیره کربن جهانی از طریق افزایش ذخیره یا ترسیب کربن در خاک‌ها بعنوان روشی مناسب برای کاهش دی‌اکسیدکربن اتمسفری بیان شده است (Faraji et al., 2019). در مراتع، ذخایر کربن آلی در خاک به دلیل تأثیر بر میزان تولید و زیتوده گیاهی، فاکتوری مؤثر در چرخه جهانی کربن و تعدیل شرایط اقلیمی بشمار می‌آید (Kamali and Mohammadian et al., 2020; Sadeghipour, 2020; Denboba, 2022). ترسیب کربن برآیند میزان ذخیره کربن

آلی طی مدت زمان مشخص است که از طریق فتوسنتز و جذب دی‌اکسیدکربن موجود در اتمسفر ابتدا در بافت‌های گیاهی و بعد در خاک به صورت هیدرات‌های کربن تجمع کرده و رسوب می‌کند (Abdi et al., 2008; Attaeian et al., 2023). کشور ایران به دلیل وسعت زیاد مراتع، ظرفیت بالایی در ذخیره کربن آلی دارد. اکوسیستم‌های مرتعی ذخیره‌گاه کربن اتمسفر هستند اما ظرفیت و اندازه این ذخیره‌گاه به نوع مرتع، اقلیم، خاک و مهمتر از همه به نوع مدیریت آن بستگی دارد (Faraji et al., 2019). از مهمترین عوامل مؤثر بر ذخیره کربن، می‌توان ویژگی‌های خاکی، پستی و بلندی و اقلیمی را ذکر نمود (Strickland et al., 2015; Faraji et al., 2019; Kamali and Sadeghipour, 2020). خاک منبعی مهم در ذخیره کربن بوده و محققان اثبات کرده‌اند که ذخیره کربن در خاک بیش از سه برابر ذخیره موجود در اتمسفر و پوشش گیاهیست. از سویی، ترسیب کربن در خاک از فرایندهای اصلی اکوسیستم‌ها بوده و اهمیت بالایی در فراهم نمودن خدماتی ازجمله تنظیم اقلیم، حاصلخیزی خاک و تولید غذا برای انسان دارد (Tan et al., 2014). افزایش مقدار کربن آلی خاک به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند به افزایش حاصلخیزی، افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک، تقویت تنوع زیستی، اصلاح ساختار خاک، کاهش فرسایش،

آنان تأثیر پارامترهایی از قبیل وزن مخصوص ظاهری، بافت و دیگر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را بر مقدار ذخیره کربن خاک بررسی نمودند. جمع‌بندی اطلاعات حاصل از مرور منابع نشان می‌دهد که در زمینه تأثیر عوامل خاکی بر میزان ترسیب کربن خاک در مناطق مختلف اقلیمی کشور مطالعات اندکی انجام شده است. با توجه به اینکه اطلاع از میزان ذخیره کربن خاک می‌تواند بعنوان ابزاری مفید و کاربردی برای درک بهتر چرخه کربن خاک مورد استفاده قرار گیرد (Faraji et al., 2019)، از این رو، هدف از این پژوهش بررسی و تعیین مهمترین عوامل خاکی مؤثر بر میزان ذخیره کربن آلی خاک در دو رویشگاه زیرکوه و فردوس در خراسان جنوبی با تیپ‌های گیاهی متفاوت است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در استان خراسان جنوبی در رویشگاه‌های مرتعی درمنه‌زار شهرستان زیرکوه شامل تیپ‌های درمنه دشتی (*Artemisia sieberi*)، قیج (*Zygophyllum*)، *eurypterum* و گزدرختچه‌ای (*Tamarix stricta*) و نواحی بیابانی شهرستان فردوس شامل تیپ‌های اسکنبیل (*Calligonum polygonoides*)، اشنان (*Sediltzia*)، سبد (*Stipagrostis pennata*) و قیج (*Zygophyllum eurypterum*) انجام شد (جدول ۱).

بهبود نفوذپذیری خاک و کاهش رواناب منجر شود (Rastgar et al., 2018). از این رو، توجه به عوامل مؤثر بر ذخیره کربن خاک در راستای مدیریت پایدار کربن خاک ضرورت دارد (Faraji et al., 2019). البته تاکنون تحقیقات مختلفی در ارتباط با تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل تغییر کاربری اراضی (Zandi et al., 2022)، چرای دام (Denboba, 2022; Attaeian et al., 2023; McDonald et al., 2023)، قرق (Asgari et al., 2021)، تبدیل مرتع به دیمزار و عملیات بیولوژیک (Rastgar et al., 2018) بر ذخیره و ترسیب کربن انجام شده است. Ghoreyshi و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه ظرفیت ترسیب کربن در مراتع خوی و ارتباط آن با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک دریافتند که درصد نیتروژن، جرم مخصوص ظاهری و آهک خاک به ترتیب از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر میزان کربن آلی خاک هستند. Moradi Shahgharie and Tahmasebi (۲۰۱۶) در ارزیابی میزان ترسیب کربن خاک در مراتع چهارمحال و بختیاری، به این نتیجه رسیدند که کربن خاک در مراتع نیمه استپی گندمی بیشتر از بوته‌زارها می‌باشد. Faraji و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی ذخیره کربن در مناطق اقلیمی مختلف و عوامل تأثیرگذار بر آن در کردستان به این نتیجه رسیدند که در هر منطقه اقلیمی عوامل مؤثر بر میزان ذخیره کربن متفاوت است. Pandey و همکاران (۲۰۱۰) و Ruiz-Sinoga و همکاران (۲۰۱۲) بیان نمودند که عوامل گوناگون محیطی و مدیریتی خاک بر روی ذخیره کربن آلی خاک تأثیرگذار است.

جدول ۱- خصوصیات جغرافیایی (طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا) رویشگاه‌های مورد مطالعه در استان خراسان جنوبی

Table 1- Geographical characteristics (latitude, longitude and elevation) of studied habitats in South Khorasan province, Iran

Vegetation type	Site	Latitude	Longitude	Rainfal (mm)	Elevation (m a.s.l)
<i>Artemisia sieberi</i> <i>Zygophyllum eurypterum</i> <i>Tamarix stricta</i>	Zirkouh	60° 03' 32"	33° 37' 40"	156.4	985
<i>Calligonum polygonoides</i> <i>Sediltzia rosmarinus</i> <i>Stipagrostis pennata</i> <i>Zygophyllum eurypterum</i>	Ferdows	58° 17' 22"	34° 01' 58"	95	1293

نمونه برداری از پوشش گیاهی و خاک

پس از بازدید از مناطق مورد مطالعه و شناسایی گونه‌های غالب، در بهار سال ۱۴۰۲ اقدام به نمونه برداری از خاک و پوشش گیاهی شد. بدین منظور، در منطقه معرف هر رویشگاه، ۶۰ کوادرات ۴×۴ متر به طور تصادفی-سیستماتیک مستقر شد و درصد تاج پوشش و تراکم گیاهی در هر پلات برآورد شد. سپس از هر گونه ۱۰ پایه به طور تصادفی انتخاب و در همان پلات‌ها، در زیر تاج پوشش گیاه، پروفیل خاک تا عمق ۷۰ سانتی متر حفر شد و نمونه خاک برداشت شده و به آزمایشگاه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند منتقل گردید. برای اندازه‌گیری درصد کربن آلی خاک از روش والکلی بلک استفاده شد. سپس با داشتن وزن مخصوص ظاهری خاک (به روش کلوخه)، میزان ذخیره کربن خاک با استفاده از رابطه ۱ ارزیابی شد.

$$Cc = 10000 \times \%OC \times BD \times E \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن:

Cc: میزان کربن ذخیره شده به ازای یک متر مربع، OC: مقدار کربن آلی خاک، BD: وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتیمتر مکعب) و E: عمق نمونه خاک به سانتیمتر می‌باشد. سایر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت خاک، درصد سنگ و سنگریزه، هدایت الکتریکی (EC)، قلیائیت (pH)، عناصر غذایی شامل ازت (N)، فسفر (P)، پتاسیم (K)، نسبت C/N، آهک (CaCO₃)، گچ (CaSO₄) و رطوبت اشباع به روش‌های مرسوم، در آزمایشگاه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند تعیین شد.

تجزیه و تحلیل آماری

پس از ثبت داده‌های خاک و پوشش گیاهی، نرمال بودن داده‌ها و احتمال وجود داده‌های پرت توسط آزمون شاپیرو-ویلک و نمودار جعبه‌ای مقادیر استاندارد شده بررسی شد. همچنین آمار توصیفی شامل میانگین و انحراف معیار برای تمامی متغیرها محاسبه شد. نمودار همبستگی (ضریب همبستگی پیرسون) بین خصوصیات محیطی و میزان ذخیره

کربن ترسیم گردید. ابتدا از تحلیل رگرسیون خطی چندگانه معمولی (OLS) برای بررسی روابط استفاده شد و هم‌خطی چندگانه بین خصوصیات محیطی و میزان ذخیره کربن آلی توسط معیار عامل تورم واریانس (VIF) بررسی شد. از آنجایی که نرمال بودن و عدم وجود هم‌خطی از پیش فرض‌های رگرسیون معمولی است، در این پژوهش از دو مدل رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) و رگرسیون مؤلفه‌های اصلی (PCR) استفاده شد. به منظور انتخاب بهترین مدل، از معیار خطای اعتبارسنجی متقابل (RMSE) استفاده شد. آزمون t تقریبی ضرایب رگرسیون براساس برآورد واریانس جک‌نایف انجام شد (Martens and Martens, 2000). کلیه تحلیل‌های آماری بوسیله نرم‌افزار R (version 4.3.2; R CoreTeam, 2023) و بسته‌های Agro (version 1.3.5; Shimizu G et al., 2023) و car (version pls(version 2.8.5; Liland et al., 2024) Fox, Weisberg, 2019 3.1.2.; انجام گردید.

نتایج

منطقه زیرکوه

نتایج آمار توصیفی داده‌های ذخیره کربن خاک، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، درصد پوشش گیاهی و تراکم گیاهی رویشگاه گونه‌های درمنه دشتی (*Artemisia*)، قیج (*Zygophyllum eurypterum*) و گز درختچه‌ای (*Tamarix stricta*) در جدول ۲ ارائه شده است. بیشترین تغییرات میزان ذخیره کربن در خاک رویشگاه گز (Mean=20.77, SD=11.66) و کمترین تغییرات در رویشگاه درمنه دشتی (Mean=13.83, SD=1.81) مشاهده شد. مقادیر VIF مربوط به هم‌خطی چندگانه بین خصوصیات محیطی و میزان ذخیره کربن آلی نشان می‌دهد که کربن آلی (OC)، شن، سیلت، C/N، گچ (CaSO₄)، وزن مخصوص ظاهری (BD)، درصد سنگ و سنگریزه، EC، P و pH مقداری بالاتر از ۵ دارند، ازاین‌رو میزان هم‌خطی چندگانه بین متغیرهای محیطی بسیار بالا است و برای انجام رگرسیون خطی چندگانه مناسب نیستند.

جدول ۲-آمار توصیفی (میانگین و انحراف معیار) و عامل تورم واریانس (VIF) داده‌های ذخیره کربن خاک، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، درصد پوشش گیاهی و تراکم گیاهی در منطقه زیرکوه

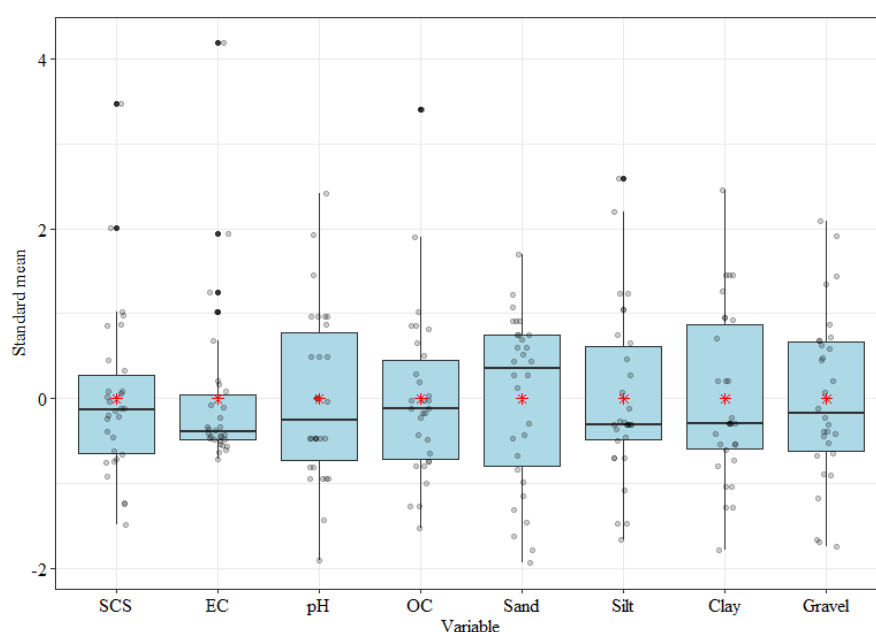
Table 2- Descriptive statistics (mean and standard deviation) and variance inflation factor (VIF) of soil carbon in the Zirkouh region storage data, soil physical and chemical properties, vegetation cover, and plant density

Variable	Artemisia		Tamarix		Zygophyllum		VIF
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	
SCS (ton/ha)	13.83	1.81	20.77	11.66	7.54	2.86	–
(dS/m) EC	0.46	0.14	1.84	1.32	0.40	0.08	5.78
pH	7.78	0.18	7.99	0.18	7.63	0.06	6.16
OC (%)	0.32	0.05	0.46	0.25	0.16	0.06	104.28
Sand (%)	60.58	11.86	59.75	15.30	73.13	4.01	21.23
Silt (%)	17.40	8.58	27.90	13.42	18.28	4.16	15.19
Clay (%)	22.03	6.55	12.35	5.50	8.60	5.24	2.51
Gravel (%)	50.99	17.49	43.32	12.84	22.43	14.13	6.03
N (%)	0.033	0.010	0.062	0.031	0.017	0.004	97.4
P (%)	24.24	11.28	25.00	2.35	10.36	4.67	5.48
K (%)	12.67	5.62	18.53	8.78	6.85	1.77	4.4
C/N	10.20	1.79	6.76	2.26	9.54	2.97	16.24
CaCO ₃ (%)	12.64	3.59	10.74	2.34	8.06	2.26	2.89
CaSO ₄ (%)	3.83	3.46	20.54	18.01	42.61	1.49	7.76
SP (%)	27.91	2.87	27.21	4.37	32.76	4.21	2.54
BD (gr/m ³)	1.44	0.07	1.53	0.08	1.57	0.07	6.37
Plant Cover (%)	23.60	8.68	36.84	3.72	16.04	4.79	4.92
Plant Density (%)	2040.63	343.61	1071.88	1103.19	1312.50	1065.97	2.41

SD: Standard Deviation, VIF: Variance Inflation Factors

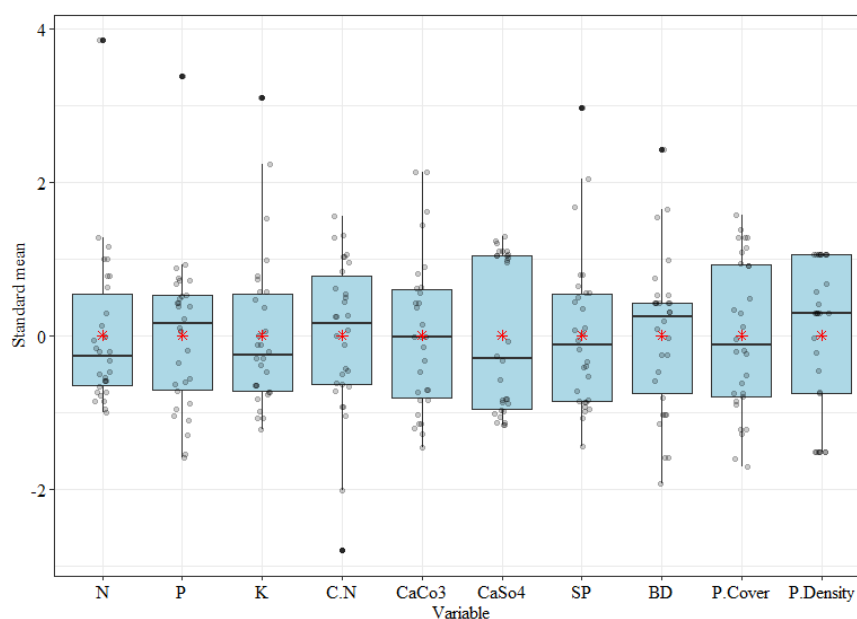
مخصوص ظاهری خاک دارای داده پرت هستند (شکل ۱). بیشترین تغییرات مربوط به EC و N و کمترین تغییرات مربوط به درصد شن، سنگ و سنگریزه، گچ، درصد پوشش گیاهی و تراکم است.

به‌منظور ارزیابی نرمال بودن داده‌های خصوصیات خاک و پوشش گیاهی از نمودار جعبه‌ای استفاده شد. نمودار جعبه‌ای مقادیر استاندارد کلیه خصوصیات مورد مطالعه نشان می‌دهد که داده‌های ذخیره کربن، هدایت الکتریکی (EC)، کربن آلی، سیلت، N، P، K، C/N، رطوبت اشباع و وزن



شکل ۱- نمودار جعبه‌ای میانگین استاندارد شده مقادیر ذخیره کربن خاک، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، درصد پوشش گیاهی و تراکم گیاهی در منطقه زیرکوه

Figure 1- Box plots of standardized mean values of Soil carbon deposition, soil physical and chemical properties, and vegetation percentage and plant density in the Zirkouh region
Abbreviations: SCS: Soil Carbon Storage, EC: Electrical Conductivity, OC: Organic Carbon

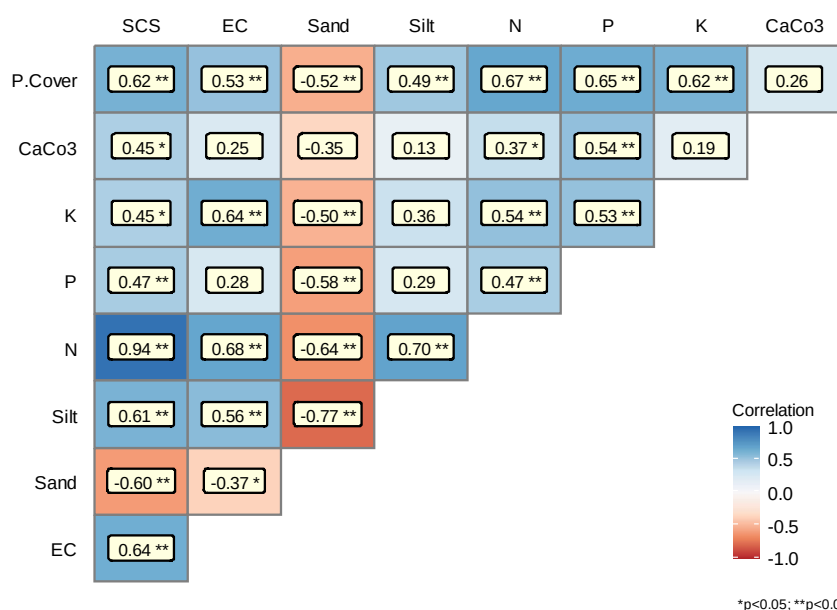


ادامه شکل ۱-

Continued from Figure-1
Abbreviations: C.N: Carbon to Nitrogen Ratio, SP: Saturation Percentage, BD: Bulk Density, P.Cover: Plant Cover, P.Density: Plant Density

ماتریس همبستگی بین ذخیره کربن با خصوصیات خاک تهیه شد. نمودار همبستگی خصوصیات که با ذخیره کربن همبستگی معنی داری دارند در شکل ۲ ارائه شده است. همانطور که نتایج نشان می دهد، ذخیره کربن با شن همبستگی منفی معنی دار ($p \leq 0.05$) و با درصد پوشش گیاهی، P، N،

سیلت و EC در سطح ۰/۰۱ و با آهک و K در سطح ۰/۰۵ همبستگی مثبت معنی دار ($p \leq 0.05$) دارد. نکته جالب اینکه درصد شن با تمامی صفات در این نمودار همبستگی منفی معنی دار دارد.



شکل ۲. نمودار همبستگی (ضریب همبستگی پیرسون) بین خصوصیات محیطی و میزان ذخیره کربن با بیشترین همبستگی (> 0.4) عوامل خاکی شامل آهک، K، P، N، سیلت، شن و EC و عوامل پوشش گیاهی شامل درصد پوشش گیاهی. رنگ آبی و قرمز به ترتیب نشان دهنده همبستگی مثبت و منفی است. ستاره ها نشان دهنده سطوح معنی داری است (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$)

Figure 2. Correlation chart (Pearson correlation coefficients) of environmental characteristics and SCS with highest correlation (> 0.4). Soil characteristics included CaCO₃, K, P, N, Silt, Sand and EC, and vegetation characteristics included plant cover. The blue and red colors indicate positive and negative correlations, respectively. Asterisks indicate the significance level (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$).

توضیح می دهد، در حالی که دو مؤلفه حدود ۹۳ درصد واریانس را تبیین می کند. برای تعیین تعداد بهینه مؤلفه ها، باید بین پیچیدگی مدل (تعداد مؤلفه ها) و RMSEP (ریشه میانگین مربعات خطای پیش بینی) تعادل برقرار شود. با افزایش مؤلفه ها از دو به سه، تفاوت محسوسی بین میزان خطا و درصد واریانس متغیرهای پیش بینی و پاسخ مشاهده نمی شود، از این رو تعداد دو مؤلفه، بهترین انتخاب است.

در این پژوهش از دو مدل رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) و رگرسیون مؤلفه های اصلی (PCR) استفاده شد. نتایج نشان می دهد که در مدل PLS، کمترین میزان خطای اعتبارسنجی متقابل (Cross Validation) زمانی رخ می دهد که از چهار مول مؤلفه استفاده شود (جدول ۳). همانطور که مشاهده می شود، اگر از یک مؤلفه استفاده شود، به تنهایی فقط ۳۵/۵۹ درصد از کل واریانس پیش بینی ها را

جدول ۳- ریشه میانگین مربعات خطای پیش‌بینی (RMSEP) مؤلفه‌های مختلف مدل PLS، به همراه درصد واریانس بیان شده توسط متغیرهای مستقل و وابسته در منطقه زیرکوه

Table 3- Root mean squared error of prediction (RMSEP) for different number of components of partial least squares (PLS) regression and variance explained in the predictors and the response variable in the Zirkouh region

Variable	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4
RMSEP	5.33	4.03	3.40	3.02
variance explained in the predictors (X)	35.59	50.33	62.13	71.79
variance explained in the response variable	76.69	93.04	97.27	98.43

نتایج نشان می‌دهد که در مدل PCR، کمترین میزان خطای اعتبارسنجی متقابل زمانی رخ می‌دهد که از چهار مؤلفه استفاده شود. همانطور که مشاهده می‌شود، اگر از یک مؤلفه استفاده شود، به تنهایی فقط ۵۳/۵۷ درصد از کل واریانس پیش‌بینی‌ها را توضیح می‌دهد، در حالی که چهار مؤلفه حدود ۷۵ درصد واریانس را تبیین می‌کند (جدول ۴). از این رو، تعداد چهار مؤلفه با کمترین خطا و بیشترین درصد واریانس، بهترین انتخاب است.

جدول ۴- ریشه میانگین مربعات خطای پیش‌بینی (RMSEP) مؤلفه‌های مختلف مدل PCR، به همراه درصد واریانس بیان شده توسط متغیرهای مستقل و وابسته در منطقه زیرکوه

Table 4- Root mean squared error of prediction (RMSEP) for different number of components of principal component regression (PCR) and variance explained in the predictors and the response variable in the Zirkouh region

Variable	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4
RMSEP	6.06	5.91	5.40	4.19
variance explained in the predictors (X)	37.08	55.43	67.78	75.09
variance explained in the response variable	56.57	66.51	76.23	89.35

تعداد بهینه مؤلفه‌های اصلی موجود در مدل PLS، ۲ مؤلفه و مدل PCR، ۴ مؤلفه است. در مدل PLS، عوامل مؤثر در دو مؤلفه اول، در مجموع ۹۳ درصد تغییرات ذخیره کربن را توضیح می‌دهند و در مدل PCR، عوامل مؤثر در چهار مؤلفه اول، در مجموع ۷۵ درصد تغییرات ذخیره کربن را نشان می‌دهند. خطای اعتبارسنجی متقابل (RMSE) به دست آمده از مدل PLS پایین‌تر از RMSE به دست آمده از مدل PCR است (جدول ۵)، بنابراین مدل PLS بهترین مدل برای تعیین عوامل مؤثر بر ذخیره کربن در این پژوهش است.

جدول ۵- آماره‌های اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) و رگرسیون مؤلفه‌های اصلی (PCR) در منطقه زیرکوه

Table 5- Partial least squares (PLS) and principal component regression (PCR) calibration statistics in the Zirkouh region

Model	RMSEcv	Rsquare
PCR	0.26	0.99
PLS	0.22	0.99

RMSEcv, root mean square error of cross-validation

آلی (OC)، فسفر (P)، هدایت الکتریکی (EC)، سیلت (Silt) و آهک (CaCO_3) است.

از این رو، فقط بارهای عاملی متغیرهای پیش‌بین با دو مؤلفه اول مدل PLS در جدول ۶ ارائه شد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، بیشترین بار عاملی به ترتیب متعلق به کربن

جدول ۶- نتایج تحلیل رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS): بارهای عاملی مؤلفه‌های اصلی بدست آمده از تحلیل

Table 6-Results of partial least squares (PLS) regression analysis: factor loadings of the principal components obtained from the analysis

Variable	Comp.1	Comp.2
EC	1.38	1.00
pH	0.34	0.42
OC	2.75	1.55
Sand	-0.72	-0.93
Silt	1.18	0.95
Clay	-0.39	0.23
N	-0.88	0.18
P	2.36	1.46
K	0.23	0.73
C/N	0.17	0.70
CaCO_3	1.02	0.08
CaSO_4	0.87	0.70
SP	0.57	-0.18
BD	-0.44	-0.46
Plant Cover	0.23	-0.37
Plant Density	0.88	0.97

و روش رگرسیون مؤلفه‌های اصلی بیشترین تعداد متغیر را در پیش‌بینی میزان ذخیره کربن به‌طور معنی‌دار تشخیص داد. همانطور که مشاهده می‌شود، در روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) به عنوان بهترین مدل، درصد شن (Sand)، سیلت (Silt)، فسفر (P) و درصد پوشش گیاهی (Plant Cover) به عنوان متغیرهای معنی‌دار در مدل باقی می‌مانند و از بین متغیرهای ذکر شده، درصد سیلت بیشترین تأثیر را در پیش‌بینی ذخیره کربن دارد (جدول ۷).

اگر هدف تعیین مؤثرترین عوامل است، ضرایب بارهای عاملی کافی است، اما اگر هدف پیش‌بینی میزان ذخیره کربن براساس خصوصیات مورد مطالعه باشد، معنی‌داری ضرایب رگرسیون نیز لازم می‌باشد. در این پژوهش، فقط مقدار t و سطح معنی‌داری (p) ضرایب رگرسیون معمولی (OLS)، رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) و رگرسیون مؤلفه‌های اصلی (PCR) استخراج شده براساس برآورد واریانس جک‌نایف گزارش شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، روش رگرسیون معمولی، کمترین تعداد متغیر

جدول ۷-مقادیر t و p.value مدل‌های رگرسیون (OLS، PCR و PLS) و ذخیره کربن به عنوان متغیر وابسته در منطقه زیرکوه

Table 7- t-test statistics and p values for the regression models (OLS, PCR, and PLS) with SCS as dependent variable in the Zirkouh region

Soil properties	OLS		PCR		PLS	
	t value	Pr(> t)	t value	Pr(> t)	t value	Pr(> t)
EC	-0.13	0.90	1.07	0.30	1.46	0.16
pH	0.94	0.37	1.46	0.16	1.55	0.13
OC	21.41	0.00***	1.99	0.06	1.18	0.25
Sand	-0.44	0.67	-2.09	0.05*	-2.04	0.05*
Gravel	0.08	0.94	1.15	0.26	1.77	0.09
Clay	NA	NA	2.67	0.01*	0.89	0.38
Silt	-0.17	0.87	2.94	0.01**	3.46	0.00**
N	0.40	0.70	1.81	0.08	1.87	0.07
P	0.04	0.97	2.80	0.01**	2.75	0.01*
K	0.56	0.59	2.15	0.04*	1.46	0.16
C.N	0.33	0.75	-1.13	0.27	-1.54	0.14
CaCO ₃	0.90	0.38	2.17	0.04*	1.12	0.27
CaSO ₄	0.50	0.62	-2.93	0.01**	-1.59	0.12
SP	-0.63	0.54	-1.09	0.28	-1.22	0.23
BD	4.56	0.00***	-2.39	0.02*	-1.55	0.13
Plant Cover	0.36	0.73	2.23	0.03*	2.22	0.03*
Plant Density	0.30	0.77	0.08	0.94	0.17	0.86

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

منطقه فردوس

نتایج آمار توصیفی داده‌های ذخیره کربن خاک، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، درصد پوشش گیاهی و تراکم گیاهی رویشگاه گونه‌های اسکنبیل (*Callygonum*)، اشنان (*Seidlitzia*)، سبد (*Stipagrostis*) و قیج (*Zygophyllum*) در جدول ۸ ارائه شده است. بیشترین تغییرات میزان ذخیره کربن در خاک رویشگاه اسکنبیل ($\text{Mean}=6.96, \text{SD}=1.57$) و کمترین تغییرات در رویشگاه قیج ($\text{Mean}=5.36, \text{SD}=0.80$) مشاهده شد. مقادیر VIF مربوط به هم‌خطی چندگانه بین خصوصیات محیطی و میزان ذخیره کربن آلی نشان می‌دهد که هدایت الکتریکی (EC)،

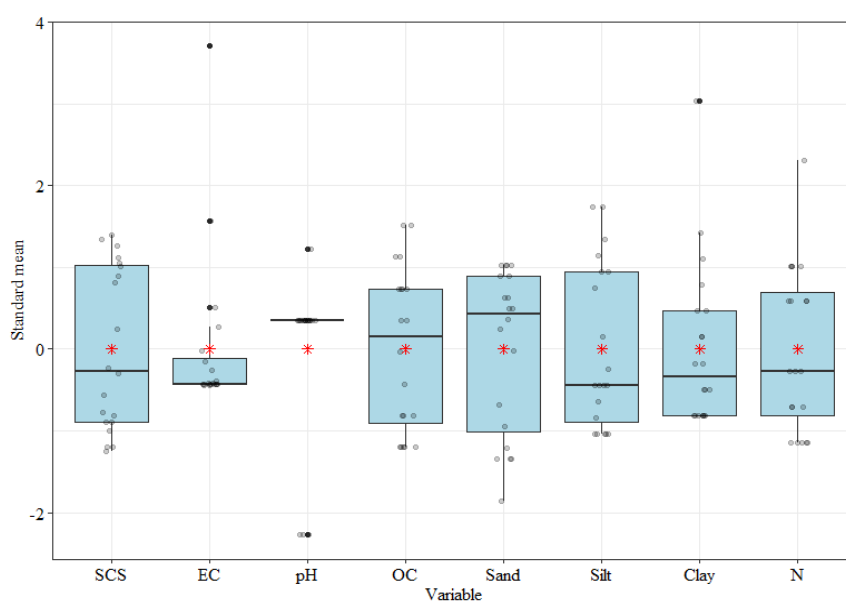
pH، کربن آلی (OC)، شن، سیلت، N، C/N، K، گچ (CaSO_4)، رطوبت اشباع (SP) و وزن مخصوص ظاهری (BD)، مقداری بالاتر از ۵ دارند، از این رو میزان هم‌خطی چندگانه بین متغیرهای محیطی بسیار بالا است و برای انجام رگرسیون خطی چندگانه مناسب نیستند. نمودار جعبه‌ای مقادیر استاندارد کلیه خصوصیات مورد مطالعه نشان می‌دهد که داده‌های هدایت الکتریکی (EC)، کربن آلی، سیلت، N، P، K، C/N، رطوبت اشباع و وزن مخصوص ظاهری خاک دارای داده پرت هستند (شکل ۳). بیشترین تغییرات مربوط به EC و N و کمترین تغییرات مربوط به درصد شن، سنگ و سنگریزه، گچ، درصد پوشش گیاهی و تراکم است.

جدول ۸- آمار توصیفی (میانگین و انحراف معیار) و عامل تورم واریانس (VIF) داده‌های ذخیره کربن خاک، خصوصیات فیزیکی و

شیمیایی خاک، درصد پوشش گیاهی و تراکم گیاهی در منطقه فردوس

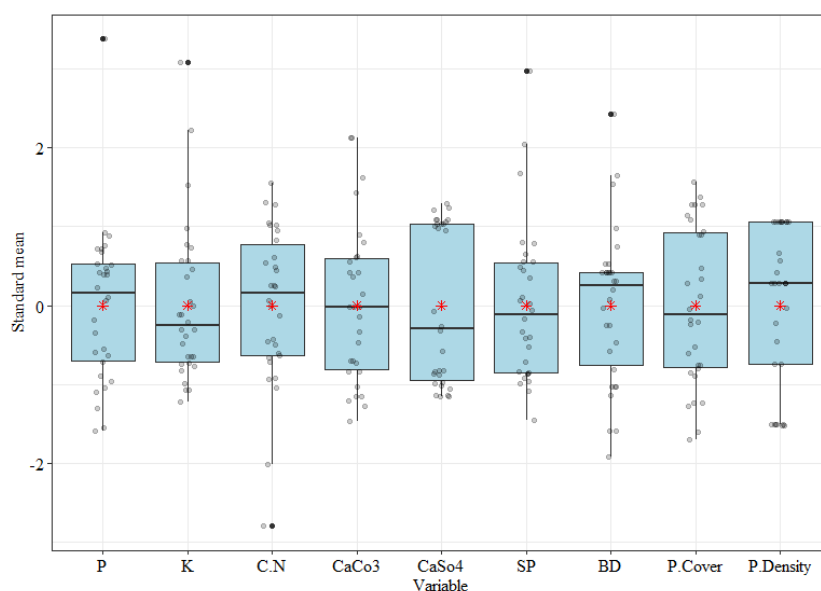
Table 8- Descriptive statistics (mean and standard deviation) and variance inflation factor (VIF) of soil carbon storage data, soil physical and chemical properties, vegetation cover, and plant density in the Ferdows region

Variable	<i>Calligonum polygonoides</i>		<i>Sedilizia rosmarinus</i>		<i>Stipagrostis pennata</i>		<i>Zygophyllum euryptherum</i>		VIF
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	
SCS	6.69	1.57	5.49	1.23	7.30	1.09	5.36	0.80	-
EC	1.07	0.05	19.39	17.52	1.14	0.09	2.52	1.97	221.55
pH	8.10	0.00	7.92	0.16	8.10	0.00	8.12	0.04	45.35
OC	0.12	0.03	0.12	0.03	0.14	0.02	0.11	0.02	333.81
Sand	95.60	0.89	65.60	12.12	88.00	5.10	72.40	14.52	262.93
Silt	2.40	0.89	21.20	8.32	7.60	4.34	18.80	9.44	144.45
Clay	2.00	0.00	13.20	7.56	4.40	1.67	8.80	5.76	3.21
N	0.012	0.003	0.010	0.002	0.012	0.002	0.009	0.001	342.41
P	5.27	0.92	5.03	1.03	5.45	0.71	5.51	0.67	3.71
K	0.62	0.08	2.14	1.19	0.64	0.07	0.87	0.41	135.82
C/N	10.61	2.52	11.94	0.48	11.77	0.26	11.95	0.75	186.5
CaCO ₃	11.00	2.24	11.50	2.24	11.50	2.24	11.00	2.24	3.19
CaSO ₄	0.88	0.06	2.81	0.46	0.82	0.09	1.30	0.67	101.76
SP	24.20	1.10	29.20	1.30	25.40	0.89	27.80	4.09	6.02
BD	1.78	0.03	1.59	0.04	1.75	0.06	1.66	0.08	11.45
Plant Cover	18.23	4.29	10.15	4.25	17.55	4.79	14.78	3.44	5.77
Plant Density	4687.40	2212.36	2000.00	964.20	10656.20	4540.08	19375.00	4819.39	11.09



شکل ۳- نمودار جعبه‌ای میانگین استاندارد شده مقادیر ذخیره کربن خاک، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، درصد پوشش گیاهی و تراکم گیاهی در منطقه فردوس

Figure 3. Box plots of standardized mean values of soil carbon deposition, soil physical and chemical properties, and vegetation percentage and plant density in Ferdows region
Abbreviations: SCS: Soil Carbon Storage, EC: Electrical Conductivity, OC: Organic Carbon

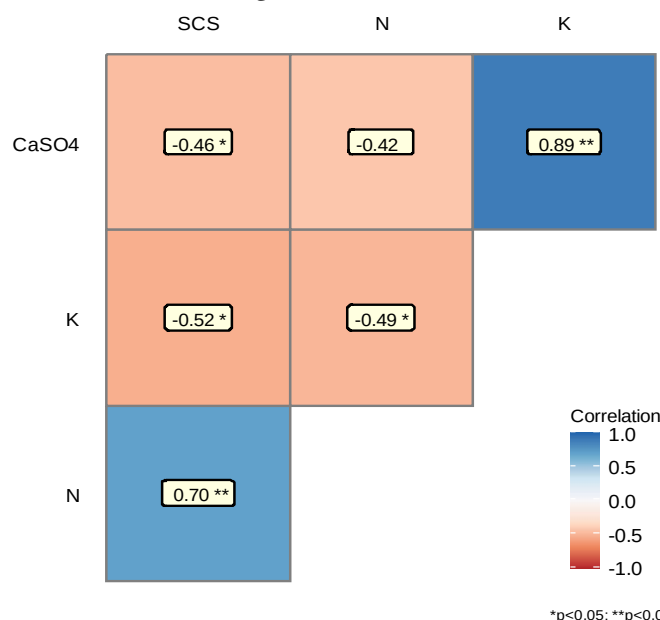


ادامه شکل ۳-

Continued from Figure 3
Abbreviations: C.N: Carbon to Nitrogen Ratio, SP: Saturation Percentage, BD: Bulk Density, P.Cover: Plant Cover, P.Density: Plant Density

همانطور که نتایج نشان می‌دهد، ذخیره کربن با گچ و پتاسیم همبستگی منفی معنی‌دار ($p \leq 0.05$) و با N همبستگی مثبت معنی‌دار دارد.

ماتریس همبستگی بین ذخیره کربن با خصوصیات خاک تهیه شد. نمودار همبستگی خصوصیات که با ذخیره کربن همبستگی معنی‌داری دارند در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴-نمودار همبستگی (ضریب همبستگی پیرسون) بین خصوصیات محیطی و میزان ذخیره کربن با بیشترین همبستگی (>0.4) عوامل خاکی شامل گچ (CaCO_4)، پتاسیم (K) و ازت (N) با ذخیره کربن (SCS) همبستگی است. رنگ آبی و قرمز به ترتیب نشان‌دهنده همبستگی مثبت و منفی است. ستاره‌ها نشان‌دهنده سطوح معنی‌داری است ($* p < 0.05$, $** p < 0.01$)

Figure 4. Correlation chart (Pearson correlation coefficients) of environmental characteristics and SCS with highest correlation (>0.4). Soil characteristics included CaCO_4 , K, N, and SCS. The blue and red colours indicate positive and negative correlations, respectively. Asterisks indicate the significance level ($* p < 0.05$, $ p < 0.01$).**

اینجا نیز با افزایش مؤلفه‌ها از دو به سه، تفاوت محسوسی بین میزان خطا و درصد واریانس متغیرهای پیش‌بین و پاسخ مشاهده نمی‌شود، از این رو تعداد دو مؤلفه، بهترین انتخاب است.

نتایج نشان می‌دهد که در مدل PLS، کمترین میزان خطای اعتبارسنجی متقابل زمانی رخ می‌دهد که از دو یا چهار مؤلفه استفاده شود (جدول ۹). همانطور که مشاهده می‌شود، دو مؤلفه حدود ۹۵ درصد واریانس را تبیین می‌کند. در

جدول ۹-ریشه میانگین مربعات خطای پیش‌بینی (RMSEP) مؤلفه‌های مختلف مدل PLS، به همراه درصد واریانس بیان شده توسط متغیرهای مستقل و وابسته در منطقه فردوس

Table 9. Root Mean Square Error of Prediction (RMSEP) of the various components of the PLS model, along with the percentage of variance explained by the independent and dependent variables in the Ferdows region

Variable	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4
RMSEP	2.33	1.11	1.32	1.06
variance explained in the predictors (X)	40.23	54.46	62.20	68.63
variance explained in the response variable	61.92	95.19	97.56	99.16

نتایج نشان می‌دهد که در مدل PCR کمترین میزان خطای اعتبارسنجی متقابل زمانی رخ می‌دهد که از چهار مؤلفه استفاده شود. همانطور که مشاهده می‌شود، چهار مؤلفه

حدود ۷۷ درصد واریانس را تبیین می‌کند (جدول ۱۰). از این رو، تعداد چهار مؤلفه با کمترین خطا و بیشترین درصد واریانس، بهترین انتخاب است.

جدول ۱۰- ریشه میانگین مربعات خطای پیش‌بینی (RMSEP) مؤلفه‌های مختلف مدل PCR، به همراه درصد واریانس بیان شده توسط متغیرهای مستقل و وابسته در منطقه فردوس

Table 10. Root Mean Square Error of Prediction (RMSEP) of the various components of the PCR model, along with the percentage of variance explained by the independent and dependent variables in Ferdows region

Variable	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4
RMSEP	2.79	2.92	1.76	1.32
variance explained in the predictors (X)	73.75	57.48	68.54	77.10
variance explained in the response variable	31.03	32.10	80.97	92.89

در منطقه فردوس نیز خطای اعتبارسنجی متقابل (RMSE) به دست آمده از مدل PLS پایین‌تر از RMSE به دست آمده از مدل PCR است (جدول ۱۱)، بنابراین مدل

PLS بهترین مدل برای تعیین عوامل مؤثر بر ذخیره کربن در این پژوهش است.

جدول ۱۱- آماره‌های اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) و رگرسیون مؤلفه‌های اصلی (PCR) در منطقه فردوس

Table 11. Validation statistics of partial least squares (PLS) and principal component regression (PCR) models in Ferdows region

Model	RMSE	Rsquare
PCR	0.66	0.99
PLS	0.58	0.99

RMSEcv, root mean square error of cross-validation

از این رو، فقط بارهای عاملی متغیرهای پیش‌بین با دو مؤلفه اول مدل PLS در جدول ۱۲ ارائه شد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، بیشترین بار عاملی به ترتیب متعلق به کربن آلی (OC)، ازت (N)، فسفر (P)، هدایت الکتریکی (EC)، سیلت (Silt) و آهک (CaCO₃) است. در روش PLS به عنوان بهترین مدل، براساس برآورد واریانس جک‌نایف، درصد کربن آلی (OC)، سیلت (Silt)، ازت (N)، پتاسیم (K) و گچ (CaSO₄) به عنوان متغیرهای معنی‌دار در مدل باقی می‌مانند (جدول ۱۳).

جدول ۱۲- نتایج تحلیل رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS): بارهای عاملی مؤلفه‌های اصلی بدست آمده از تحلیل

Table 12. Results of partial least squares (PLS) regression analysis: factor loadings of the principal components obtained from the analysis

Variable	Comp.1	Comp.2
EC	-0.25	-0.10
pH	0.11	-0.18
OC	0.59	1.55
Sand	0.24	0.05
Silt	-0.21	-0.04
Clay	-0.25	-0.06
N	0.44	0.92
P	0.23	0.48
K	-0.32	-0.28
C/N	0.16	0.70
CaCO ₃	0.11	0.40
CaSO ₄	-0.28	-0.13
SP	-0.23	-0.11
BD	0.28	0.26
Plant Cover	0.23	0.12
Plant Density	-0.09	-0.36

جدول ۱۳- مقادیر t و p.value مدل‌های رگرسیون (OLS، PCR و PLS) و ذخیره کرین به عنوان متغیر وابسته در منطقه فردوس

Table 13. t-test statistics and p values for the regression models (OLS, PCR, and PLS) with SCS as dependent variable in Ferdows region

Soil properties	OLS		PCR		PLS	
	t value	Pr(> t)	t value	Pr(> t)	t value	Pr(> t)
EC	-2.26	0.09	-1.15	0.26	-2.01	0.06
pH	-1.92	0.13	1.47	0.16	1.07	0.30
OC	0.05	0.96	0.56	0.58	2.26	0.04*
Sand	-5.34	0.00***	2.13	0.05*	-1.80	0.09
Silt	-2.13	0.10	-2.36	0.03*	2.17	0.04*
Clay	NA	NA	-1.63	0.12	-1.91	0.07
N	4.02	0.02*	0.99	0.33	2.21	0.04*
P	-0.61	0.57	0.15	0.88	1.03	0.32
K	2.18	0.09	-1.20	0.24	-2.81	0.01*
C.N	4.25	0.01*	-0.90	0.38	1.12	0.28
CaCO ₃	0.23	0.83	-0.43	0.67	0.60	0.56
CaSO ₄	-0.79	0.47	-1.79	0.09	-2.36	0.03*
SP	-0.34	0.75	-2.10	0.05*	-1.57	0.13
BD	9.24	0.00***	2.12	0.05*	1.55	0.14
Plant Cover	1.60	0.19	1.68	0.11	1.60	0.13
Plant Density	-0.51	0.63	-0.70	0.49	-0.83	0.41

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

بحث

در این پژوهش، میزان ذخیره کربن در هفت رویشگاه در دو منطقه خشک و بیابانی خراسان جنوبی بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که در کل ذخیره کربن در رویشگاه‌های شهرستان زیرکوه بیشتر از شهرستان فردوس است. بیشترین میزان ذخیره کربن در خاک رویشگاه *Tamarix stricta* مشاهده شد. حجم و بیوماس بالای *Tamarix stricta* نسبت به سایر گونه‌های بوته‌ای و درختچه‌ای مورد مطالعه در این منطقه، از دلایل احتمالی بالا بودن ذخیره کربن خاک است. نتایج این پژوهش نشان داد که رابطه معنی‌داری بین برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله اجزای بافت خاک با میزان ذخیره کربن خاک وجود دارد. نتایج سایر پژوهش‌ها نشان داده است که بین میزان کربن و ذرات ریز خاک رابطه مستقیم و معنی‌داری وجود دارد (*Bagherifam et al., 2013; Faraji et al., 2019*). از میان ویژگی‌های خاک، بافت بیشترین اثر را بر میزان کربن آلی خاک دارد (*Kamali and Sadeghipour, 2020*). بافت ریز خاک به دو طریق می‌تواند باعث افزایش میزان ذخیره کربن شود. اول اینکه با افزایش ذرات ریز خاک، قدرت تأمین و نگهداشت عناصر غذایی از قبیل نیتروژن، فسفر و پتاسیم بیشتر می‌شود که در نتیجه آن حاصلخیزی خاک افزایش می‌یابد (*Kashi et al., 2016*). از سوی دیگر، هنگام تشکیل خاکدانه، ذرات ریز خاک باعث حفاظت مواد آلی در برابر تجزیه شدن می‌شوند (*Faraji et al., 2019; Attaeian et al., 2023*). یادآوری می‌شود که خاک‌های دارای بافت ریز به دلیل اثرگذاری بر تجمع و الگوی معدنی شدن، بر میزان ذخیره خاک تأثیر گذاشته و در خاک‌های غنی‌تر، سازوکارهای فیزیکی و شیمیایی لازم برای حفاظت کربن خاک در برابر تجزیه را فراهم می‌کنند (*Pandey et al., 2010*). این در حالی است که خاک‌هایی با بافت درشت‌تر (درصد شن بیشتر) به علت درصد بالای معدنی شدن، دارای سازوکارهای ضعیف‌تری برای حفاظت از کربن هستند (*Singh et al., 2011*). نتایج نشان داد که نیتروژن هم در زیرکوه هم فردوس، از دیگر عوامل مهم تأثیرگذار بر ذخیره

کربن است و رابطه مستقیم با آن دارد. در این راستا، نتایج بسیاری از تحقیقات انجام شده نشان داد که نیتروژن یکی از مهمترین عوامل مؤثر بر میزان ذخیره کربن خاک است (*Ghoreyshi et al., 2013; Asgari et al., 2021*). نوع و تراکم پوشش گیاهی و سیستم ریشه‌ای گیاهان بر میزان نیتروژن خاک مؤثر بوده و می‌تواند باعث افزایش ازت و مواد آلی شود (*Polglace et al., 2013; Attaeian et al., 2023; Tang, 2023*). برای نمونه، گیاهان متعلق به تیره بقولات قابلیت بالایی در تثبیت ازت داشته و می‌توانند میزان ذخیره و ترسیب کربن خاک را افزایش دهند (*Faraji et al., 2019; McDonald et al., 2023*). اما در منطقه فردوس میزان کربن با پتاسیم رابطه منفی و معنی‌داری نشان داد. در کل در مراتع مناطق خشک کشور، به‌ویژه مراتع زیرکوه، پتاسیم به مراتب بیشتر از ازت و کربن است، در رویشگاه‌های منطقه فردوس، از آنجایی که میانگین و انحراف معیار پتاسیم نسبت به رویشگاه‌های منطقه زیرکوه خیلی کمتر است، می‌تواند دلیل احتمالی تناقض رابطه بین کربن با پتاسیم در این دو منطقه باشد. در این پژوهش، میزان کربن آلی با میزان آهک رابطه مثبت و با میزان گچ رابطه منفی داشت. میزان آهک نسبت به گچ در خاک هر دو منطقه بالا بود. آهک نسبت به گچ انحلال‌پذیری بسیار پایینی دارد و به مدت زیادی در خاک‌های مناطق خشک و بیابانی باقی می‌ماند (*Mahmoudi and Hakimian, 2019*). رابطه مثبت و معنی دار بین میزان کربن ذخیره شده و آهک توسط *Faraji* و همکاران (۲۰۱۹) گزارش شده است که در تأیید نتیجه بدست آمده در این تحقیق در منطقه زیرکوه است. دلیل این ارتباط مثبت می‌تواند ناشی از نقش مثبت آهک در بهبود ساختمان خاک، پایداری خاکدانه‌ها و تغذیه گیاه به علت وجود ترکیبات کلسیم و منیزیم باشد (*Jafari Haghighi, 2003; Asgari et al., 2021*). از دیگر یافته‌های حاصل از این پژوهش، وجود رابطه مثبت و معنی‌دار میزان ذخیره کربن با هدایت الکتریکی در منطقه زیرکوه بود. در ارتباط با هدایت الکتریکی می‌توان چنین بیان نمود که در اراضی با شوری بالاتر به دلیل انحلال مواد آلی مقادیر کربن خاک افزایش

(Marengo and Antezana-Vera, 2021).

بررسی عوامل مؤثر بر میزان ذخیره کربن می‌تواند مدیران و تصمیم‌گیران را در انتخاب روش‌های مدیریتی و اصلاح روش‌های موجود در راستای کاهش تراکم کربن اتمسفری یاری نماید. نتایج این پژوهش نشان داد که در رویشگاه زیرکوه بیشترین و کمترین تغییرات میزان ذخیره کربن خاک به ترتیب در رویشگاه گز و درمنه دشتی می‌باشد. در منطقه فردوس بیشترین و کمترین تغییرات میزان ذخیره کربن خاک به ترتیب در رویشگاه اسکنبیل و قیج مشاهده شد. از بین دو مدل رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) و رگرسیون مؤلفه‌های اصلی (PCR)، مدل PLS بهترین مدل برای تعیین عوامل مؤثر بر ذخیره کربن در این پژوهش معرفی گردید. رابطه مثبت بین میزان درصد پوشش گیاهی و عناصر غذایی خاک (N, P, K) و ذخیره کربن در رویشگاه زیرکوه برقرار بود که تأکیدی بر نقش عوامل مربوط به حاصلخیزی در ذخیره کربن است. با مدیریت صحیح مراتع در جهت حفاظت، اصلاح و احیای پوشش گیاهی، می‌توان در راستای افزایش ذخیره کربن آلی خاک، مانع افزایش آلودگی هوا، تخریب پوشش گیاهی و در نهایت آثار زیانبار تغییر اقلیم شد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از معاون محترم پژوهشی، فناوری و نوآوری دانشگاه بیرجند، دانشگاه تربت حیدریه و معاون محترم پژوهشی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی قدردانی می‌گردد.

می‌یابد (Kamali and Sadeghipour, 2020). این بحث با نتایج فردوس تناقض دارد. هدایت الکتریکی خاک (EC) مربوط به مواد مغذی موجود در محلول خاک است که می‌تواند تحت تأثیر مواد آلی خاک، بافت خاک، دما و میزان آب باشد. نتیجه پژوهش Kim و Park (۲۰۲۴) نشان داد هنگامی که ماده آلی به خاک اضافه شد، به دلیل یون‌های آزاد شده از ماده آلی، EC نیز افزایش یافت. پژوهش‌های متعدد دیگری نیز به این نتیجه اذعان کردند که ماده آلی خاک باعث افزایش محتوای مواد غذایی و در نهایت افزایش EC خاک می‌شود (Adak et al., 2014; Gondek et al., 2020; Sung et al., 2023). با وجود این، نتایج برخی از پژوهش‌ها نشان می‌دهد مواد آلی می‌تواند EC را به دلیل مواد غذایی و نمک موجود در مواد آلی افزایش دهد، با این حال، اثر ماده آلی خاک بر EC به‌طور کامل مطالعه نشده است (Kim and Park, 2024). نتایج برخی از پژوهش‌ها نیز اثر EC بر ماده آلی خاک را تأیید می‌کند (Rahimi et al., 2019; Juhos et al., 2000). در این پژوهش از رگرسیون مؤلفه‌های اصلی (PCR) و رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) استفاده شد. در مواردی مانند این پژوهش که هم‌خطی بین متغیرها زیاد بوده و از سویی نیاز به کاهش ابعاد داده‌ها و تعداد متغیرها است، PCR و PLS بهتر از رگرسیون معمولی (OLS) عمل می‌کند. ضمن اینکه در پژوهش‌های چندمتغیره که متغیرهای محیطی از واحدها و مقیاس‌های متفاوتی برخوردار هستند، رگرسیون‌های PCR و PLS، قبل از تحلیل، استانداردسازی و مقیاس‌بندی نیز انجام می‌دهند و از دقت بالاتری نسبت به OLS برخوردارند.

References

- Abdi, N., Arefi, M. and Zahedi-Amiri, G.H., 2008. Estimation of carbon storage in Astragalus rangelands of Markazi province (case study: Malmir rangeland in Shazand region). *Researches on Forest and Rangelands*, 15: 269-282.
- Adak, T., Singha, A., Kumar, K., Shukla, S.K., Singh, A., Kumar, A. and Singh, V., 2014. Soil organic carbon, dehydrogenase activity, nutrient availability and leaf nutrient content as affected by organic and inorganic

- source of nutrient in mango orchard soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 14 (2): 394-406. DOI: 10.4067/S0718-95162014005000031
- Asgari, H.R., Savarolya, M., Yeganeh, H., Honardoust, F. and Mombeni, M., 2021. Effects of grazing exclusion on some soil properties, carbon storage and estimating the economic value of (case study: arid rangelands north of Gonbad Kavous). *Degradation and Rehabilitation of Natural Land*, 2 (3): 1-11 [In Persian]

- Attaeian, B., Karami, F., Akhzari, D. and Kiani, G., 2023. A comparative study of vegetation parameters, soil elements, and organic carbon storage in mountain rangelands under enclosure and grazing management: a case study in Asadabad, Hamadan. *Journal of Rangeland*, 247-262 (In Persian)
- Bagherifam, S., Karimi, A.R., Lakzian, A. and Izanloo, E., 2013. Effects of land use management on soil organic carbon, particle size distribution and aggregate stability along hillslope in semi-arid areas of northern Khorasan. *Journal of Water and Soil Conservation*, 20 (4): 51-73 (In Persian)
- Denboba, M.A., 2022. Grazing management and carbon storage in the dry lowland rangelands of Southern Ethiopia. *Sustainable Environment*, 1 (8): 1-24. DOI: 10.1080/27658511.2022.2046959
- Faraji, A., Joneidi Jafari, H. and Omidipour, R., 2019. Investigating the carbon storage in different climatic regions and the affecting factors in Kordestan Province. *Journal of Plant Ecosystem Conservation*, 6 (13) :215-232 (In Persian)
- Fox, J. and Weisberg, S. 2019. *An R Companion to Applied Regression*, Third edition. Sage, Thousand Oaks CA. <<https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>>.
- Gheitury, M., Heshmati, M., Parvizi, Y., Arabkhedri, M., Tabatabaei, M. and Shahbazi, K. 2020. Surveying the performance of flood control dams on vegetation cover and soil carbon storage in Kermanshah Province. *Watershed Engineering and Management*, 12(3): 812-820. [In Persian] DOI: 10.22092/ijwmse.2019.125588.1621
- Ghoreyshi, R., Goly kalanpa, E., Motamedi, J. and Keivan Behjou, F., 2013. Carbon storage capacity in rangeland ecosystems and its relation with soil physical and chemical characteristics in rangelands of Khoy. *Soil Applied Researches*, 1 (2): 34-44 (In Persian)
- Gondek, M., Weindorf, D.C., Thiel, C. and Kleinheinz, G., 2020. Soluble salts in compost and their effects on soil and plants: a review. *Compost Science Utilization*, 28 (2): 59-75. DOI: 10.1080/1065657X.2020.1772906
- Jafari Haghighi, M., 2003. *Sampling soil decomposition Methods and important physical and chemical decompositions with emphasis on theoretical and practical principles*, First Edition, Tehran: Nedaye Zoha Publications, 236 pp [In Persian]
- Juhos, K., Czigány, S., Madarász, B., and Ladányi, M., 2019. Interpretation of soil quality indicators for land suitability assessment—A multivariate approach for Central European arable soils. *Ecol Ind* 99:261–272. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.11.063
- Kamali, N. and Sadeghipour, A., 2020. Investigating the effect of some environmental factors on the amount of soil carbon storage (case study: Hashtgerd Alborz). *The seventh National Conference of Iran Rangeland and Rangeland Management*, 1-15 (In Persian)
- Kashi Zenouzi, L, Banej Shafiee, S. and Jafari, A.A., 2016. Investigating the Effect of Some Environmental Factors on Organic Carbon in ZilberChay Watershed. *Journal of Water and Soil Science*, 20 (76) :207-218 [In Persian] DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.20.76.207
- Kim, H.N. and Park, J.H., 2024. Monitoring of soil EC for the prediction of soil nutrient regime under different soil water and organic matter contents. *Applied Biology Chemistry*, 67(1): 1-13. DOI: 10.1186/s13765-023-00849-4
- Liland, K., Mevik, B. and Wehrens, R., 2024. *_pls: Partial Least Squares and Principal Component Regression_. R package version 2.8-5, <<https://CRAN.R-project.org/package=pls>>.*
- Mahmoudi, Sh. and Hakimian, M., 2019. *Foundations of soil science*. University of Tehran Press. 720p (In Persian)
- Marenco, R. A. and Antezana-Vera, S.A., 2021. Principal component regression analysis demonstrates the collinearity-free effect of sub estimated climatic variables on tree growth in the central Amazon. *Revista de Biología Tropical*, 69(2): 482-493. DOI: 10.15517/rbt.v69i2.44489
- Martens, H. and Martens, M., 2000. Modified Jack-knife Estimation of Parameter Uncertainty in Bilinear Modelling by Partial Least Squares Regression (PLSR). *Food Quality and Preference*, 11: 5-16. DOI: 10.1016/S0950-3293(99)00039-7
- McDonald, S., Badgery, W., Clarendon, S., Orgill, S., Sinclair, K., Meyer, R., Butchart, D.B., Eckard, R., Rowlings, D., Grace, P., Doran-Browne, N., Harden, S., Macdonald, A., Wellington, M., Pachas, A.N.A., Eisner, R., Amidy, M. and Harrison, M.T., 2023. Grazing management for soil carbon in Australia: a review. *Journal of Environmental Management*, 347: 119146. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119146
- Mohammadian, A.E., Asadi borujeni, A., Ebrahimi, A. and Tahmasebi Naghipour, A.A., 2020. Effect of integrated fire period and intensity grazing on plant species diversity in the semi-steppe rangeland of Chaharmahal and Bakhtiari province. *Iranian journal of Range and Desert research*, 27(1): 84-97. (In Persian) DOI: 10.22092/ijdr.2020.121351
- Moradi Shahgharie, M. and Tahmasbi, P., 2016. The effect of enclosure on carbon sequestration and soil physical and chemical properties in semi steppe

- rangelands of Chaharmahal and Bakhtiari Province. *Natural Ecosystems of Iran*, 6(4): 97-109. (In Persian).
- Pandey, C.B., Chaudhari, S.K., Dagar, J.C., Singh, G.B. and Singh, R.K. 2010. Soil N mineralization and microbial biomass carbon affected by different tillage levels in a hot humid tropic. *Soil and Tillage Resource*, 110: 33-41. DOI: 10.1016/j.still.2010.06.007
- Polglace, J. and Almeida, A., 2013. Potential for forest carbon plantings to offset greenhouse emissions in Australia: economics and constraints to implementation. *Climate Change*, 121: 161-175. DOI: [10.1007/s10584-013-0882-5](https://doi.org/10.1007/s10584-013-0882-5)
- R Core Team, 2023. *_R: A Language and Environment for Statistical Computing_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.
- Rahimi, H., Pazira, E., and Tajik, F., 2000. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. *Soil and Tillage Research*, 54(3-4), 145-153. [In Persian]
- Rastgar, Sh., Najafipour, Z., Jafarian, Z. and Ghorbani, J., 2018. Investigation and comparison of the economic value of carbon storage function of vegetation cover in biological operations (case study: Sarbishe rangelands-South Khorasan province). *Journal of Environmental Studies*, 1 (44): 131-148 (In Persian) DOI: 10.22059/jes.2018.242342.1007506
- Ruiz-Sinoga, J.D., Pariente, S., Diaz, A.R. and Martinez-Murillo, J.F., 2012. Variability of relationships between soil organic carbon and some soil properties in Mediterranean rangelands under different climatic conditions (South of Spain). *Catena*, 94: 17-25. DOI: 10.1016/j.catena.2011.06.004
- Shimizu, G., Marubayashi, R., Goncalves, L., 2023. *_AgroR: Experimental Statistics and Graphics for Agricultural Sciences_*. R package version 1.3.5, <<https://CRAN.R-project.org/package=AgroR>>.
- Singh, S.K., Pande, C.B., Sidhu, G.S. and Dipak-Sarkar, R.S., 2011. Concentration and stock of carbon in the soils affected by land uses and climates in the western Himalaya, India. *Catena*, 87: 78-89. DOI: 10.1016/j.catena.2011.05.008
- Strickland, M.S., Keiser, A.D. and Bradford, M.A., 2015. Climate history shapes contemporary leaf litter decomposition. *Biogeochemistry*, 122: 165-174. DOI: 10.1007/s10533-014-0060-1
- Sung, J., Kim, W., Oh, T.K. and So, Y.S., 2023. Nitrogen (N) use efficiency and yield in rice under varying types and rates of N source: chemical fertilizer, livestock manure compost and food waste-livestock manure compost. *Applied Biological Chemistry*, 66(1): 4. DOI: 10.1186/s13765-023-00793-z
- Tan, B., Fan, J., He, Y., Luo, S. and Peng, X., 2014. Possible effect of soil organic carbon on its own turnover: A negative feedback. *Soil Biology and Biochemistry*, 69: 313-319. DOI: 10.1016/j.soilbio.2013.11.010
- Tang, Y., 2023. Impact of livestock grazing management on carbon stocks: a case study in sparse elm woodlands of semi-arid lands. *PeerJ*, 11: e16629. DOI: 10.7717/peerj.16629
- Zandi, L., Erfanzadeh, R. and Joneidi Jafari, H., 2022. Effect of Rangeland Use Change on Soil Physico-Chemical Characteristics with Emphasizing on Soil Aggregates Stability (Case Study: Salvatabad Rangeland, Sanandaj). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 29(1): 24-35. (In Persian) DOI: 10.22092/ijrdr.2022.126000