



Identification of Carbon Sequestration Patterns under the Influence of Climatic, Soil, and Topographic Factors in the Rangelands of Northern Sabalan

Vahideh Moradzadeh¹ | Ardavan Ghorbani^{2*} | Leila Nemati Sham-Asbi¹ | Mehdi Moameri² | Zeinab Hazbavi² | Ali Teymourzadeh¹ | Behzad Behtari³

1. Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran.

2. Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, and Member of the Research Institute of Water Management, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran.

3. Department of Natural Resources, Faculty of Natural Resources, University of Agricultural and Natural Resources Sciences, Sari, Iran.

Correspond E-mail: a_ghorbani@uma.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 15 May. 2025

Revised: 27 Jul. 2025

Accepted: 03 Aug. 2025

Published online: 01 Jan. 2026

Keywords:

Ardabil Province,
Rangelands of Northern Sabalan,
Rangeland Ecosystem Sustainability,
Soil Health,
Soil Organic Carbon,
Standardized Precipitation Index.

Abstract

Rangelands, as natural ecosystems, play a significant role in maintaining carbon balance of the environment. This study aimed to Identification of Carbon Sequestration Patterns under the Influence of Climatic, Soil, and Topographic Factors in the Rangelands of Northern Sabalan, located in Meshginshahr County. Soil sampling was conducted in two types of vegetation cover- grassland and shrubland- across four main geographical directions and at two soil depths (0–15 and 15–30 cm). Data were collected for 24 different soil properties. To perform statistical analyses, the normality of the data was first assessed, followed by a one-way analysis of variance (ANOVA) and Duncan's multiple range test to compare the mean values of different properties between grasslands and shrublands. Principal Component Analysis (PCA) was also used to evaluate data structure. The results revealed that clay content, silt, organic carbon, particulate organic carbon, total nitrogen, and soil carbon sequestration were significantly higher in grasslands than in shrublands ($p < 0.01$). In contrast, sand content, pH, and electrical conductivity were significantly higher in shrublands than in grasslands ($p < 0.01$). The northern slope exhibited higher levels of clay, silt, organic carbon, and carbon sequestration compared to the southern slope. Additionally, increasing soil depth led to decreases in organic carbon, total nitrogen, and carbon sequestration. PCA showed that the first two components explained 36.30% of the total variance. Sand content, precipitation, and organic carbon having the highest correlation with the first component, while slope percentage and litter showing the strongest correlation with the second component. These findings indicate that soil physical and chemical properties- particularly those affected by climatic gradients and topography- significantly influence carbon sequestration. The results provide a scientific basis for rangeland management and enhancing the effectiveness of carbon storage strategies in arid and semi-arid regions.

Cite this article: Moradzadeh, V., Ghorbani, A., Nemati Sham-Asbi, L., Moameri, M., Hazbavi, Z., Teymourzadeh, A., Behtari, B. (2025). Identification of Carbon Sequestration Patterns under the Influence of Climatic, Soil, and Topographic Factors in the Rangelands of Northern Sabalan. *Journal of Range & Watershed Management*, 78 (4), 491-512. DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2025.395345.1831>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Grasslands, which cover more than 50% of the Earth's terrestrial surface, play a pivotal role in the global carbon and nitrogen cycles and are recognized as significant carbon reservoirs. It is estimated that approximately 10% of global biomass carbon and 30% of soil carbon are stored in grasslands. By sequestering carbon in both soil and vegetation, grasslands help mitigate the impacts of climate change and provide essential ecosystem services, such as regulating the water cycle and preventing soil erosion. Carbon sequestration, defined as the process of capturing atmospheric carbon and storing it in plants and soils, is fundamental to maintaining ecosystem balance- particularly in the context of climate change. Soil is considered one of the most important carbon sinks, and enhancing carbon sequestration in soils can significantly reduce greenhouse gas emissions. Besides, physiographic factors such as slope, aspect, and elevation influence the type and density of vegetation cover as well as soil characteristics, all of which ultimately affect the rate and capacity of carbon sequestration. These factors, therefore, play a critical role in determining a landscape's carbon storage potential. Land degradation negatively impacts various soil properties, including its ability to sequester carbon, leading to increased carbon dioxide (CO₂) emissions into the atmosphere. However, appropriate land management practices can reverse these adverse effects and enhance the soil's carbon sequestration potential.

Materials and Methods: The study area is located in the northern rangelands of Mount Sabalan, within the Fakhrabad–Shabil altitudinal zone, covering approximately 5,500 ha. It is situated about 35 km southeast of Meshginshahr County. Soil samples were collected from two types of vegetation cover- grassland and shrubland- across four cardinal directions (north, south, east, and west) and at two soil depths (0–15 and 15–30 cm). Following laboratory analyses and development a comprehensive database, data were recorded for 24 variables, including: bare soil, rock and gravel cover, clay, silt, sand, organic carbon, particulate organic carbon, nitrogen, pH, electrical conductivity, precipitation, average temperature, canopy cover, plant density, litter, slope, aspect, elevation, flow accumulation, hillshade, standardized precipitation index (SPI), topographic position index (TPI), terrain ruggedness index (TRI), topographic wetness index (TWI), and carbon sequestration. The normality of soil and land cover variables was assessed using the Kolmogorov–Smirnov test (Habibi & Sarabadani, 2022). To evaluate the main effects of soil depth (0–15 and 15–30 cm) on soil and vegetation characteristics, independent t-tests were conducted using IBM SPSS Statistics 26.0. Additionally, one-way analysis of variance (ANOVA) was employed to assess mean differences among multiple groups, with the F-statistic applied to test the significance of those groups. Where significant differences were found, Duncan's multiple range test was used for more detailed pairwise comparison of means. Finally, to reduce dataset dimensionality and identify the principal components that explained the largest proportion of variance, Principal Component Analysis (PCA) was conducted using PC-ORD5 software (McCune & Grace, 2002). Spatial analysis and mapping were also performed using ArcGIS 8.0 software.

Results and Discussion: The results showed that among the physical and chemical soil properties, the levels of clay (13.02%), silt (26.64%), organic carbon (2.71%), particulate organic carbon (2.18%), total nitrogen (0.36%), and soil carbon sequestration (59.36 t ha⁻¹) were significantly higher in grasslands compared to shrublands ($p < 0.01$). In contrast, sand content (73.01%), pH (6.75), and electrical conductivity (399.68 $\mu\text{S cm}^{-1}$) were significantly greater in shrublands ($p < 0.01$). Clay (25.21% in the north vs. 8.83% in the south) and silt (29.20% in the north vs. 16.42% in the south) contents were also significantly higher on the northern slope compared to the southern slope. Similarly, organic carbon (3.16% in the north vs. 2.09% in the south) and soil carbon sequestration (68.05 t ha⁻¹ in the north vs. 44.87 t ha⁻¹ in the south) were significantly greater on the northern slope ($p < 0.01$), indicating more favorable conditions for carbon storage in this region. Specifically, carbon sequestration values were 68.05 and 44.87 t ha⁻¹ for the northern and southern slopes, respectively. The analysis of soil property variations between the two depths (0–15 cm and 15–30 cm) showed that several chemical properties significantly declined with increasing depth. For instance, organic carbon at 0–15 cm to at 15–30 cm decreased from 2.53% to 2.14%, particulate organic carbon from 1.85% to 1.50%, total nitrogen from 0.31% to 0.25%, and soil carbon sequestration from 53.03 to 47.69 tons per hectare ($p < 0.01$). Finally, PCA revealed that the first two components accounted for the greatest proportion of variance in the dataset (36.30%). Sand content, precipitation, and organic carbon were most strongly correlated with the first component, while slope and litter showed the strongest correlation with the second component.

Conclusion: It could be concluded that the northern slopes, due to their higher clay, silt, and organic carbon, had a

greater capacity for carbon sequestration, whereas the eastern and western slopes showed lower performance. Additionally, the surface soil layer (0–15 cm) contained higher levels of carbon and nitrogen compared to the deeper layer (15–30 cm). In terms of vegetation type, grasslands exhibited higher soil quality than shrublands, with greater amounts of organic carbon and nutrients. These findings underscore the importance of sustainable rangeland management and consideration of topographic and soil characteristics to enhance carbon sequestration and mitigate the effects of climate change.

Keywords: Ardabil Province, Correlation Analysis, Rangeland Ecosystem Sustainability, Soil Health, Soil Organic Carbon, Standardized Precipitation Index

Article Type: Research Article

Acknowledgements: The authors express their sincere appreciation to the University of Mohaghegh Ardabili for providing the facilities and support necessary to conduct this study.

Conflicts of interest: The authors declare no conflict of interest.



دوره ۷۸ (۴)

شاپا الکترونیکی: ۷۷۹۵-۲۴۲۳

نشریه مرتع و آبخیزداری



شناسایی الگوهای ترسیب کربن تحت تاثیر ویژگی‌های مختلف اقلیمی، خاکی و پستی و بلندی در مراتع شمال سبلان

وحیده مرادزاده^۱ | اردوان قربانی^{۲*} | لیلا نعمتی شام‌اسبی^۱ | مهدی معمری^۲ | زینب حزباوی^۲ | علی تیمورزاده^۱ | بهزاد بهتری^۳

۱. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۳. گروه منابع طبیعی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

رایانامه: a_ghorbani@uma.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۱۱

کلیدواژه‌ها:

استان اردبیل،

پایداری بوم‌سازگان‌های مرتعی،

سلامت خاک،

شاخص بارش استاندارد شده،

کربن آلی،

مراتع شمال سبلان.

مراتع به‌عنوان یکی از بوم‌سازگان‌های طبیعی، نقش قابل توجهی در حفظ تعادل کربن در محیط زیست ایفا می‌کنند. تحقیق حاضر با هدف بررسی شناسایی الگوهای ترسیب کربن تحت تاثیر ویژگی‌های مختلف اقلیمی، خاکی و پستی و بلندی در مراتع شمال سبلان، شهرستان مشگین‌شهر انجام شد. در این تحقیق، نمونه‌برداری خاک از دو نوع رویشگاه علف‌زار و بوته‌زار در چهار جهت جغرافیایی (شمال، جنوب، شرق و غرب) و از دو عمق مختلف خاک (۰-۱۵ و ۱۵-۳۰ سانتی‌متر) انجام شد. در ادامه، اطلاعات مربوط به ۲۴ ویژگی مختلف ثبت شد. به‌منظور انجام تحلیل‌های آماری، نرمال بودن داده‌ها بررسی شد و از تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) و آزمون چنددامنه‌ای دانکن برای مقایسه میانگین ویژگی‌های مختلف علف‌زار و بوته‌زار و برای ارزیابی ساختار از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. نتایج نشان داد مقدار رس، سیلت، کربن آلی، کربن آلی ذره‌ای، نیتروژن کل و ترسیب کربن خاک در رویشگاه علف‌زار به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از رویشگاه بوته‌زار است ($p < 0.01$). در مقابل، درصد شن، pH و هدایت الکتریکی در رویشگاه بوته‌زار به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از علف‌زار مشاهده شد ($p < 0.01$). دامنه شمالی نسبت به دامنه جنوبی، مقادیر بالاتری از رس، سیلت، کربن آلی و ترسیب کربن داشت. همچنین، با افزایش عمق، مقدار کربن آلی، نیتروژن کل و ترسیب کربن کاهش یافت. در نهایت، PCA نشان داد که دو مؤلفه اول، بیش‌ترین واریانس داده‌ها (۳۶/۳۰ درصد) را تبیین می‌کنند که درصد شن، بارش و کربن آلی بیش‌ترین همبستگی را با مؤلفه اول و درصد شیب و لاشبرگ بیش‌ترین همبستگی را با مؤلفه دوم دارند. بر همین اساس، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به‌ویژه در سطوح مختلف اقلیمی و پستی و بلندی تأثیرگذار بر ترسیب کربن هستند. نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مبنای علمی در مدیریت مراتع و ارتقاء کارایی روش‌های ذخیره‌سازی کربن در مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده شود.

استناد: مرادزاده؛ وحیده، قربانی؛ اردوان، نعمتی شام‌اسبی؛ لیلا، معمری؛ مهدی، حزباوی؛ زینب، تیمورزاده؛ علی، بهتری؛ بهزاد (۱۴۰۴). شناسایی الگوهای ترسیب کربن تحت تاثیر ویژگی‌های مختلف اقلیمی، خاکی و پستی و بلندی در مراتع شمال سبلان. نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۸ (۴)، ۴۹۱-۵۱۲.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2025.395345.1831>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

مراتع که بیش از ۵۰ درصد از سطح خشکی‌های کره زمین را پوشش می‌دهند، نقش کلیدی در چرخه‌های کربن و نیتروژن دارند و به‌عنوان ذخایر مهم کربن شناخته می‌شوند. تخمین زده می‌شود که حدود ۱۰ درصد از ذخایر جهانی زیتوده کربن و ۳۰ درصد از کربن خاک در مراتع قرار دارد (Masson-Delmotte et al., 2019). مراتع با ذخیره‌سازی کربن در خاک و پوشش گیاهی به کاهش اثرات تغییر اقلیم کمک کرده و در ارائه خدمات بوم‌شناختی مانند تنظیم چرخه آب و جلوگیری از فرسایش خاک تأثیر دارند (Lal, 2004b; Gao et al., 2015; Conant et al., 2001).

ترسیب کربن، به‌عنوان یک فرآیند ذخیره کربن موجود در هوا در خاک و گیاهان، نقش اساسی در حفظ تعادل بوم‌سازگان‌ها به‌ویژه در مقابله با تغییر اقلیم دارد. خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ذخیره‌گاه‌های کربن شناخته می‌شود و ترسیب کربن در آن می‌تواند در کاهش گازهای گلخانه‌ای مؤثر باشد. ویژگی‌های فیزیوگرافی مانند شیب، جهت و ارتفاع از سطح دریا بر نوع و تراکم پوشش گیاهی و ویژگی‌های خاک تأثیر می‌گذارند که در نهایت به ترسیب کربن می‌انجامد (فرخزاده و همکاران، ۱۴۰۱؛ جعفریان و قربانی، ۱۴۰۲). بنابراین آن‌ها نقش کلیدی در مقدار ترسیب کربن دارند. برای مثال، در زمینه تحلیل ارتباط بین ترسیب کربن و ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک، مطالعات قریشی و همکاران (۱۳۹۲) در مراتع خوی، یاکشیچ^۱ و همکاران (۲۰۲۱) در منطقه نیش^۲ واقع در صربستان، رفیعی و همکاران (۱۳۹۹) در منطقه ساردوئی، جانجانی و همکاران (۱۴۰۱) در حومه تهران، قربانی و همکاران (۱۴۰۱) در مراتع سبلان و فرخزاده و همکاران (۱۴۰۱) در حوضه زوجی گنبد همدان، نشان‌دهنده ارتباط معکوس بین ترسیب کربن و افزایش عمق و نیز ارتباط مستقیم ترسیب کربن با جهت دامنه، شیب و ارتفاع بوده است.

تخریب اراضی تأثیر منفی بر ویژگی‌های مختلف خاک از جمله ترسیب کربن دارد و باعث افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن (CO₂) به جو می‌شود. با این حال، شیوه‌های مدیریتی مناسب می‌توانند این اثرات منفی را معکوس کنند و ترسیب کربن را افزایش دهند (Ai et al., 2018). برای نمونه، تغییرپذیری ترسیب کربن در اثر اقدامات مدیریتی قرق توسط آن و لی^۳ (۲۰۱۵) در چین، دنگ^۴ و همکاران (۲۰۱۷) در مراتع چین، وان^۵ و همکاران (۲۰۲۴) در مراتع آلپ^۶، ساوانای استوایی^۷، مراتع نیمه‌خشک معتدل^۸ و مراتع استپی نیمه‌بیابانی^۹، سیلویرا^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۴) در جنوب‌شرقی ایالات متحده و استانی^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۵) در مراتع کالیفرنیا گزارش شده است. همچنین در داخل کشور، یوسفیان و همکاران (۲۰۱۱)، دیانتی تیلکی و همکاران (۱۳۸۸)، علی‌زاده و همکاران (۱۳۹۰)، اسکندری شهرکی و همکاران (۱۳۹۵) و نیک‌نهاد و همکاران (۱۳۹۵) به بالا بودن مقدار ترسیب کربن و نیز وجود کربن آلی و ماده آلی بالاتر در مراتع قرق شده تأکید داشتند که نشان‌دهنده اهمیت مدیریت صحیح مراتع برای بهبود ترسیب کربن و حفظ منابع خاک است.

هنری^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر راهبردهای مدیریتی بر مقدار کربن آلی خاک در مراتع استرالیا پرداختند. نتایج نشان داد که ویژگی‌های خاک و بارش عوامل اصلی تعیین‌کننده تغییرات کربن آلی خاک هستند. آن‌ها بیان نمودند که کاشت گیاهان علوفه‌ای پربازده معمولاً باعث افزایش کربن آلی خاک می‌شود، درحالی‌که چرای بیش از حد با کاهش کربن آلی خاک همراه است. همچنین، حذف دام یا کاهش شدت چرا در خاک‌های تخریب‌شده به افزایش اندک کربن آلی خاک منجر شد. همچنین پژوهشگران دریافتند که در مناطقی با بارش بالا، مدیریت‌هایی مانند کاشت گونه‌های پربازده تأثیر بیش‌تری در افزایش کربن آلی خاک دارند، درحالی‌که در نواحی کم‌بارش، پاسخ کربن آلی خاک به مدیریت بسیار محدود و گاهی غیرقابل اندازه‌گیری است. این پژوهش بر ضرورت مطالعات بلندمدت و با کیفیت بالا برای درک بهتر تأثیر مدیریت بر کربن آلی خاک تأکید دارد.

1. Jakšić

2. Niš

3. An & Li

4. Deng

5. Wan

6. Alpine grasslands

7. Tropical savannas

8. Temperate subhumid grasslands

9. Semi-desert steppes

10. Silveira

11. Stanley

12. Henry

پیرستانی و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی تأثیر اسیدیته، هدایت الکتریکی و کربن آلی بر میزان نیتروژن کل در خاک منطقه زرین‌شهر پرداختند. نتایج نشان داد که هدایت الکتریکی در فصول گرم سال افزایش می‌یابد و خاک‌های منطقه عمدتاً قلیایی هستند. همچنین، درصد کربن آلی و نیتروژن کل خاک رابطه خطی معنی‌داری داشتند، به‌طوری‌که با افزایش کربن آلی، مقدار نیتروژن کل نیز افزایش یافت. تحلیل‌های خط مرزی و رگرسیون گام‌به‌گام نشان داد که هدایت الکتریکی و کربن آلی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر نیتروژن خاک هستند. این پژوهش نشان داد که روش‌های آماری مذکور ابزارهای مناسبی برای ارزیابی تأثیر متغیرهای محیطی بر ترکیب شیمیایی خاک هستند. همچنین، آقابابایی و همکاران (۱۴۰۳) به بررسی واحدهای بوم‌شناختی گیاهی (PEUs) در مراتع نیمه‌استپی استان چهارمحال و بختیاری و تأثیر آن‌ها بر خدمات بوم‌شناختی، به‌ویژه ترسیب کربن پرداختند. آن‌ها با استفاده از تصاویر چندزمانه و مدل‌سازی تغییرات اراضی (LCM)، تغییرات واحدهای بوم‌شناختی را در بازه‌ای ۳۰ ساله تحلیل و با بهره‌گیری از مدل زنجیره مارکوف (MC) پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد که تا سال ۲۰۳۶ برخی از واحدهای گیاهی افزایش و برخی کاهش خواهند یافت که این تغییرات موجب از بین رفتن ۴۶۳ تن کربن جذب‌شده خواهد شد. بررسی خدمات بوم‌شناختی نشان داد که کاهش ترسیب کربن عمدتاً در مناطق تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی مانند چرای دام، قطع بوته‌ها و شخم اراضی رخ داده است. این پژوهش تأکید دارد که مدیریت صحیح منابع طبیعی می‌تواند موجب پایداری بوم‌سازگان و حفظ پوشش گیاهی شود. اخیراً، مسلم‌پور و همکاران (۱۴۰۳) به بررسی مقدار ترسیب کربن خاک در شش گونه گیاهی در مناطق بیابانی خراسان جنوبی پرداخته است. نتایج نشان داد که مقدار ترسیب کربن با درصد پوشش گیاهی ارتباط معنی‌داری دارد. در میان گونه‌های مورد مطالعه، بیش‌ترین ترسیب کربن در رویشگاه *Zygophyllum eurypterum* (۲۸/۶۶ تن در هکتار) با بالاترین مقدار پوشش گیاهی (۳۶/۸۴ درصد) و کم‌ترین مقدار در *Seidlitzia rosmarinus* (۱۲/۸۰ تن در هکتار) با کم‌ترین مقدار پوشش گیاهی (۱۰/۱۵ درصد) مشاهده شد.

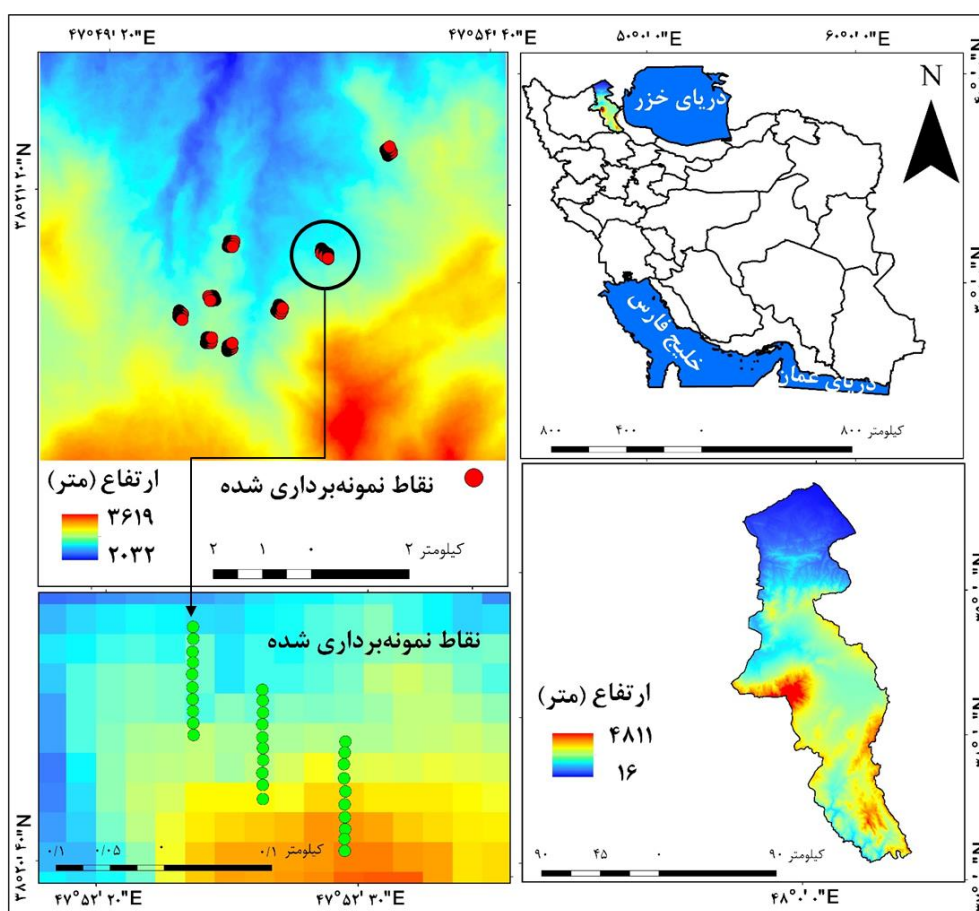
جمع‌بندی مرور منابع تأکید بر اهمیت شرایط مختلف اقلیم، خاک، پستی و بلندی و پوشش گیاهی بر الگوی تغییرات ترسیب کربن دارد. در حالی که تاکنون مطالعه جامعی که همه این شرایط را مورد بررسی قرار داده باشد، انجام نشده است. بر همین اساس و با توجه به این‌که منطقه شمال سبلان با دامنه ارتفاعی گسترده از ۱۰۰۰ تا ۴۸۱۱ متر و پوشش گیاهی متنوع، فرصتی بی‌نظیر برای مطالعه تغییرات ترسیب کربن در بوم‌سازگان‌های مرتعی فراهم می‌کند، تحقیق حاضر با هدف تحلیل چندجانبه برای شناسایی الگوهای ترسیب کربن تحت تأثیر ویژگی‌های مختلف اقلیمی، خاکی و پستی و بلندی برنامه‌ریزی شد. این منطقه که اقلیمی متغیر از نیمه‌خشک در ارتفاعات پایین تا سرد و مرطوب در ارتفاعات بالاتر دارد، به‌دلیل تنوع گیاهی شامل مراتع چمن‌زار، علف‌زار و بوته‌زار و اثرات پستی و بلندی، امکان ارزیابی الگوهای ترسیب کربن و ارتباط آن با ویژگی‌های خاک و پستی و بلندی را فراهم می‌آورد (نظری عنبران، ۱۳۹۳؛ Conant et al., 2001; Lal, 2004a; Poeplau & Don, 2015). مراتع سبلان به‌عنوان مخزن کربن بالقوه می‌توانند نقش مهمی در کاهش تغییر اقلیم ایفا نمایند. با این حال، در سال‌های اخیر تغییرات شدید اقلیمی به‌ویژه در مناطق کوهستانی، فشارهای انسانی و مدیریت ناکارآمد مراتع منجر به تخریب خاک، پوشش گیاهی و کاهش ترسیب کربن شده است. علی‌رغم این موضوع نتایج کمی در این خصوص تاکنون ارائه نشده که در تحقیق حاضر مد نظر قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند مبنای علمی برای تدوین راهکارهای مدیریتی جهت بهبود ذخیره‌سازی کربن و مدیریت پایدار مراتع در شرایط اقلیمی متغیر فراهم نمایند.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل مراتع دامنه شمالی سبلان است که در محدوده ارتفاعی فخرآباد-شابلیل با مساحت حدود ۵۵۰۰ هکتار در فاصله ۳۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان مشگین‌شهر بین مختصات جغرافیایی ۳۸° ۵۰' ۱۳" تا ۴۷° ۵۴' ۵۳" طول شرقی و ۳۸° ۱۸' ۴۱" تا ۳۸° ۲۳' ۱۶" عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). در این منطقه، دو نوع رویشگاه اصلی با پوشش گیاهی متفاوت

شامل سیمای گیاهی علفزار و بوته‌زار گسترش دارد که برای نمونه‌برداری خاک در نظر گرفته شدند (قربانی و همکاران، ۱۳۹۶؛ غفاری و همکاران، ۱۳۹۹). محدوده نمونه‌برداری به‌طور تقریبی دارای طبقه ارتفاعی حدود ۲۰۰۰ تا ۳۶۰۰ متر از سطح دریا است که معرف ارتفاعات میانی سبلان بوده و جزء مراتع بیلاقی عشایر شاهسون محسوب می‌شود. میزان بارش سالانه در این ناحیه حدود ۳۵۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر بوده و دمای متوسط آن در دامنه عددی ۰/۲۴ تا ۱۰/۱ درجه سانتی‌گراد بر اساس آمار متوسط ۲۰ ساله (۱۳۷۸-۱۳۹۸) و معادله گرادیان بارش و دما قرار دارد. طبق روش دومارتن، اقلیم منطقه در محدوده نیمه‌خشک تا نیمه‌سرد مرطوب طبقه‌بندی می‌شود. تابستان این منطقه دارای آب و هوای معتدل است، اما در بیش‌تر روزهای سال، ویژگی‌های آب و هوای سرد و کوهستانی غالب است. همچنین، خاک رویشگاه‌های مورد بررسی از این ویژگی‌ها تأثیر می‌پذیرد (نظری عنبران، ۱۳۹۳؛ شکسته‌بند و همکاران، ۱۴۰۱).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری شده

۲-۲. روش تحقیق

۲-۲-۱. نمونه‌برداری و جمع‌آوری داده

پس از انتخاب دامنه شمالی بوم‌سازگان مرتعی سبلان به‌عنوان منطقه معرف بر اساس نقشه پستی و بلندی و محیط نرم‌افزار Google Earth، از طریق پیمایش صحرایی کنترل لازم انجام شد. سپس، سیمای گیاهی، تیپ‌های گیاهی غالب و گونه‌های همراه منطقه تعیین شد. مکان دقیق نمونه‌برداری به‌گونه‌ای انتخاب شد که نمایان‌گر پوشش کل جامعه گیاهی علفزار و بوته‌زار باشد. در کل، چهار

مکان نمونه برداری در سطح سیمای گیاهی علفزار و چهار مکان نمونه برداری در سطح سیمای گیاهی بوتهزار انتخاب شد. این مکان ها به گونه ای انتخاب شدند که رویشگاه ها در تمام دامنه های شمالی، جنوبی، غربی و شرقی منطقه قرار داشته باشند تا پوشش گیاهی کل منطقه به طور کامل پوشش داده شود.

بنابراین، برای منظور کردن جهت های جغرافیایی مختلف، هر چند جهت اصلی منطقه مورد مطالعه شمال سبلان بود، تلاش شد بر جهات جغرافیایی فرعی تمرکز شود. بدین منظور در چهار جهت جغرافیایی شمالی، جنوبی، شرقی و غربی نمونه برداری یکسان انجام شد. در کل هشت مکان نمونه برداری بر اساس سیمای گیاهی (چهار مکان علفزار و چهار مکان بوتهزار)، به گونه ای انتخاب شدند که در هر جهت جغرافیایی دو مکان نمونه برداری مستقر شود. در هشت مکان نمونه برداری انتخاب شده بر اساس سیمای گیاهی و جهت جغرافیایی، منطقه کلیدی برای نمونه برداری انتخاب و با روش تصادفی-سیستماتیک، سه ترانسکت ۱۰۰ متری قرار داده شد. انتخاب طول ۱۰۰ متر برای هر ترانسکت و تعداد سه ترانسکت در هر رویشگاه، بر اساس دستورالعمل های تدوین شده در مطالعات پیشین استان اردبیل (نظری عنبران، ۱۳۹۳؛ قربانی و همکاران، ۱۳۹۶؛ قربانی و همکاران، ۱۳۹۷؛ غفاری و همکاران، ۱۳۹۹؛ Ghafari et al., 2020) صورت پذیرفت. هدف این دستورالعمل ها، دستیابی به پلات های بزرگ همگن و قابل مقایسه از نظر آماری بوده است، به طوری که هر ترانسکت بتواند حداقل ده پلات نمونه برداری را در خود جای دهد. این تعداد نمونه، طبق مطالعات مرتع داری، حداقل سطح و تعداد نمونه های لازم را برای دستیابی به واریانس و انحراف معیار قابل قبول در پارامترهای پوشش و تولید گیاهی تأمین می کند (قربانی و همکاران، ۱۳۹۲؛ ۱۳۹۳). همچنین پلات های یک مترمربعی برای هر ترانسکت به نحوی طراحی شده اند که با توجه به نوع، ترکیب و اندازه گیاهان منطقه، اکثر گونه های حاضر را به طور کامل پوشش دهند. به این ترتیب، در هر رویشگاه، سه ترانسکت ۱۰۰ متری و مجموعاً ۳۰ پلات یک مترمربعی مستقر شد تا نمایان گر دقیق شرایط پوشش گیاهی منطقه باشد.

در هر پلات، اطلاعات پوشش سطحی و گیاهی شامل درصد تاج پوشش، خاک لخت، سنگ و سنگ ریزه و لاشبرگ در فصل رشد حداکثری گونه ها ثبت شد. برای بررسی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی و ترسیب کربن خاک، در ابتدا، وسط و انتهای هر ترانسکت، با توجه به نوع گیاهان و عمق ریشه دوانی گیاهان و مطالعات گذشته در سطح منطقه (نظری عنبران، ۱۳۹۳؛ شکسته بند و همکاران، ۱۴۰۱)، نیمرخ خاک حفر شده و نمونه خاک از دو عمق ۰-۱۵ و ۱۵-۳۰ سانتی متری برداشت شد. با توجه به پوشش گیاهی منطقه که عمدتاً شامل پوشش های علفی، گرامینه ها و پوشش های بوته ای بوده است، و بر اساس بررسی های انجام شده در زمینه تخصیص منابع در مراتع استان سبلان و منطقه مشرف به گیلان، مشخص شد که عمق ریشه دوانی گونه های علفی و گرامینه عمدتاً تا ۱۵ سانتی متر است، در حالی که گونه های بوته ای ریشه هایی با عمق بیش از ۳۰ سانتی متر دارند. از آن جاکه در محدوده مطالعه، سه گروه گیاهی گراس ها، علفی ها و بوته ای ها غالب بوده اند، لذا عمق نمونه برداری ۰ تا ۱۵ سانتی متر برای گونه های علفی و گرامینه ها و عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی متر برای گونه های بوته ای در نظر گرفته شد. در هر عمق از سه محل، نمونه خاک جمع آوری شده، سپس با هم مخلوط و یک نمونه برای عمق اول و یک نمونه برای عمق دوم در نظر گرفته شد. نمونه برداری خاک به گونه ای انجام شده است که با توجه به محدود بودن سطح و عدم وجود تغییرات معنی دار در ویژگی های خاک، بر اساس مطالعات پیشین (قربانی و همکاران، ۱۴۰۱؛ علیزاده و همکاران، ۱۴۰۲)، در هر ترانسکت از ابتدا، وسط و انتهای ترانسکت نمونه برداری صورت گرفت. سپس نمونه های گرفته شده از هر ترانسکت با هم مخلوط شده و یک نمونه ترکیبی برای هر عمق تهیه شد. بنابراین، برای هر ترانسکت دو نمونه (بر اساس دو عمق مورد نظر) و با وجود سه ترانسکت، در مجموع شش نمونه در نظر گرفته شده است. در کل شمای کلی نمونه برداری طبق جدول ۱، در سیمای گیاهی علفزار و بوتهزار هر کدام چهار مکان نمونه برداری، یعنی در هر جهت (شمالی، جنوبی، غربی و شرقی) یک مکان نمونه برداری (در مجموع هشت مکان)؛ در هر مکان ۳ ترانسکت و در هر ترانسکت ۱۰ پلات در مجموع ۲۴۰ پلات برای بررسی پوشش گیاهی در نظر گرفته شد. در هر مکان در دو عمق و در هر جهت جغرافیایی سه نمونه خاک در مجموع ۱۲ نمونه خاک عمق اول و ۱۲ نمونه خاک عمق دوم (۲۴ نمونه) در رویشگاه علفزار و در مجموع ۱۲ نمونه خاک عمق اول و ۱۲ نمونه خاک عمق دوم (۲۴ نمونه) در رویشگاه بوتهزار (در مجموع ۴۸

نمونه خاک از هر دو رویشگاه) برداشت شد. سپس نتایج پارامترهای خاک هر ترانسکت (که از ابتدا، وسط و انتهای ترانسکت برداشت شده بود) برای هر پلات نمونه‌برداری (در مجموع ۱۰ پلات هر ترانسکت) در نظر گرفته شد. بنابراین در مجموع، ۲۴۰ نمونه برای عمق اول و ۲۴۰ نمونه برای عمق دوم و در کل ۴۸۰ نمونه برای دو عمق کل منطقه که در محاسبات ترسیب کربن مد نظر قرار گرفت.

جدول ۱. جزئیات نمونه‌برداری پوشش گیاهی و ویژگی‌های خاک در منطقه مورد مطالعه

ردیف	سیمای گیاهی	جهت جغرافیایی	تعداد مکان نمونه‌برداری	تعداد ترانسکت	تعداد پلات (هر ترانسکت)	مجموع پلات‌ها (هر مکان)	نمونه خاک (هر مکان، دو عمق و سه ترانسکت)	عمق نمونه‌برداری (سانتی‌متر)	تعداد کل نمونه خاک برای ترسیب کربن (۲۴ ترانسکت $\times$ ۱۰ پلات $\times$ ۲ عمق)
۱	علفزار	شمال	۱	۳	۱۰	۳۰	۲×۳	۱۵-۳۰، ۰-۱۵	۲×۱۰×۳×۱
۲	علفزار	جنوب	۱	۳	۱۰	۳۰	۲×۳	۱۵-۳۰، ۰-۱۵	۲×۱۰×۳×۱
۳	علفزار	شرق	۱	۳	۱۰	۳۰	۲×۳	۱۵-۳۰، ۰-۱۵	۲×۱۰×۳×۱
۴	علفزار	غرب	۱	۳	۱۰	۳۰	۲×۳	۱۵-۳۰، ۰-۱۵	۲×۱۰×۳×۱
۵	بوته‌زار	شمال	۱	۳	۱۰	۳۰	۲×۳	۱۵-۳۰، ۰-۱۵	۲×۱۰×۳×۱
۶	بوته‌زار	جنوب	۱	۳	۱۰	۳۰	۲×۳	۱۵-۳۰، ۰-۱۵	۲×۱۰×۳×۱
۷	بوته‌زار	شرق	۱	۳	۱۰	۳۰	۲×۳	۱۵-۳۰، ۰-۱۵	۲×۱۰×۳×۱
۸	بوته‌زار	غرب	۱	۳	۱۰	۳۰	۲×۳	۱۵-۳۰، ۰-۱۵	۲×۱۰×۳×۱
مجموع	-	-	۸	۲۴	-	۲۴۰	۴۸	-	۴۸۰

۲-۳. محاسبه ویژگی‌های خاک

برای تحلیل ویژگی‌های خاک، از ۸ متغیر مستقل شامل ویژگی‌های فیزیکی (رس، سیلت، شن) و شیمیایی (کربن آلی^۱، کربن آلی ذره‌ای^۲، نیتروژن، pH و EC) استفاده شد که هر کدام نقش مهمی در تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارند. انتخاب ویژگی‌های استفاده شده در این تحقیق، بر اساس بررسی منابع پیشین (قربانی و همکاران، ۱۴۰۱؛ علیزاده و همکاران، ۱۴۰۲) مرتبط با ترسیب کربن و مطالعات پوشش گیاهی انجام شده است که به‌طور گسترده‌ای توانمندی آن‌ها در توصیف وضعیت فیزیکی و شیمیایی خاک اثبات شده است.

برای اندازه‌گیری رس، سیلت و شن از روش هیدرومتری استفاده شد. روش هیدرومتری یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری بافت خاک (درصد شن، سیلت و رس) است. این روش بر اساس سرعت ته‌نشینی ذرات خاک در آب عمل می‌کند و از قانون استوک^۳ برای تعیین اندازه ذرات استفاده می‌شود. کربن آلی با روش والکی-بلک^۴ بر اساس دی‌کرومات پتاسیم برای اکسید کربن آلی اندازه‌گیری شد (Walkley & Black, 1934). همچنین، کربن آلی ذره‌ای با استفاده از روش جداسازی با الک مرطوب تعیین شد که در واقع از طریق جداسازی ذرات بزرگ‌تر از ۵۳ میکرومتر از خاک اندازه‌گیری شده و تعیین مقدار آن با روش والکی-بلک و دستگاه TOC Analyzer صورت پذیرفت. میزان نیتروژن کل خاک نیز با استفاده از روش کج‌لدال^۵ محاسبه شد که در آن از هضم اسیدی نمونه و سپس اندازه‌گیری آمونیوم حاصل از آن استفاده شد. علاوه‌براین، pH با روش الکترودی، در سوسپانسیون خاک با آب مقطر یا محلول KCl (نسبت ۲/۵: ۱) و EC (نشان‌دهنده میزان نمک‌های محلول) با استفاده از EC متر، در محلول اشباع خاک یا عصاره ۲/۵: ۱ (خاک به آب) اندازه‌گیری شد.

۲-۴. محاسبه ویژگی‌های اقلیمی

برای بررسی برخی از ویژگی‌های اقلیمی از سه شاخص مستقل شامل میانگین بارش سالانه، میانگین دمای سالانه و شاخص بارش استاندارد شده (SPI) استفاده شد. به‌منظور برآورد و تحلیل متوسط بارش در محدوده مورد مطالعه از آمار ایستگاه هواشناسی منتخب استفاده شد. پس از

1. Organic Carbon, OC

2. Particulate Organic Carbon, POC

3. Stokes' Law

4. Walkley-Black

5. Kjeldahl Method

بازسازی نواقص آماری با استفاده از آمار تکمیل شده، معادله ارتفاع- بارش (گرادیان بارش منطقه) به دست آمد. با در نظر گرفتن ارتفاع از سطح دریا هر کدام از ایستگاه‌های انتخاب شده و میزان بارش متوسط آن‌ها، معادله گرادیان بارش به صورت رابطه ۱ به دست آمد.

$$P = 0.1908H + 79.95 \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن P متوسط بارش بر حسب میلی‌متر، H ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر است. با استفاده از معادله فوق نقشه هم‌بارش منطقه به روش گرادیان تهیه که متوسط بارش سالانه منطقه بین ۷۷۰-۱۶۳ میلی‌متر متغیر بوده و متوسط بارش سالانه تمامی هشت مکان مورد مطالعه بین ۷۰۰-۵۰۰ میلی‌متر متغیر است. با افزایش ارتفاع از سطح زمین، دمای هوا کاهش پیدا می‌کند. بر همین اساس، با استفاده از آمار ایستگاه‌های سینوپتیک کلیماتولوژی و تبخیرسنجی، گرادیان دمای میانگین و حداکثر دمای سالانه به صورت رابطه‌های ۲ و ۳ به دست آمد.

$$T_{\text{mean}} = -4.36532 + 0.917135 * T_{\text{max}} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$T_{\text{max}} = 23.0428 - 0.0051286 * H \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه‌ها، Tmean، Tmax و H به ترتیب بیان گر گرادیان دمای میانگین، حداکثر دمای سالانه و ارتفاع بر حسب متر است. در نهایت، آخرین ویژگی اقلیمی شامل شاخص بارش استاندارد شده (SPI) است که طبق رابطه ۴ (McKee et al., 1993) استخراج شد.

$$SPI = \frac{X_i - \bar{X}}{S_d} \quad \text{رابطه ۴}$$

X_i : مجموع بارش در یک سال معین، $\bar{X}$: میانگین مجموع بارش در یک سال معین و S_d : انحراف معیار داده‌هاست.

۲-۵. محاسبه ویژگی‌های پوشش زمین

ویژگی‌های پوشش زمین شامل شاخص‌های خاک لخت، سنگ و سنگریزه، لاشبرگ، پوشش تاجی و تراکم گیاه در مترمربع) در سطح ۱۰ پلات هر ترانسکت در مجموع ۲۴۰ پلات یک مترمربعی در سطح مکان‌های انتخاب شده نمونه‌برداری به صورت تخمین در داخل هر پلات ارزیابی شد. در داخل هر پلات فهرست گیاهان موجود و درصد تاج پوشش به تفکیک فرم رویشی، در فصل رشد حداکثری گونه‌های غالب تعیین شد. گونه‌های ناشناس، جمع‌آوری و سپس با استفاده از منابع علمی مورد شناسایی قرار گرفتند. نتایج حاصل از بررسی پوشش گیاهی منطقه به صورت جامع در پژوهش‌های پیشین (نظری عنبران، ۱۳۹۳؛ قربانی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Ghafari et al., 2020) ارائه شده است.

۲-۶. محاسبه ویژگی‌های پستی و بلندی

به منظور تحلیل اثر ویژگی‌های پستی و بلندی بر نوع رویشگاه و در نهایت بر ترسیب کربن، از ویژگی‌های ارتفاع، شیب، جهت، تجمع جریان^۱، شاخص موقعیت پستی و بلندی (TPI)^۲، شاخص ناهمواری زمین (TRI)^۳، رطوبت پستی و بلندی (TWI)^۴ و سایه‌زدایی^۵ استفاده شد. مدل رقومی ارتفاع (DEM) متداول‌ترین روش ثبت رقومی شکل ارتفاع زمین و یک لایه اطلاعاتی پایه برای تعیین خصوصیات سطح زمین هم‌چون شیب، جهت شیب و ارتفاع متوسط است. نقشه مدل رقومی ارتفاع با استفاده از خطوط منحنی میزان و نقاط ارتفاعی رقومی با دقت ۱۰ متری بین ۲۰۰۰ تا ۳۶۱۷ متر از سطح دریا تهیه شد. نقشه شیب و جهت جغرافیایی شیب از نقشه DEM استخراج شد. هم‌چنین شاخص‌های ثانویه پستی و بلندی مانند تجمع جریان برای شبیه‌سازی رواناب^۶؛ شاخص موقعیت پستی و بلندی (TPI) براساس

1. Flow Accumulation

2. Topographic Position Index

3. Terrain Ruggedness Index

4. Topographic Wetness Index

5. Hillshade

6. https://www.supergeotek.com/SpatialAnalyst_ENG_HTML/flow_accumulation.htm

رابطه ۵ (Weiss, 2001) محاسبه شد. شاخص ناهمواری زمین (TRI) طبق رابطه ۶ (Riley et al., 1999) محاسبه و اثرات آن بر تغییرات ترسیب کربن مورد توجه قرار گرفت. شاخص رطوبت پستی و بلندی (TWI) مطابق رابطه ۷ (Kumar et al., 2017) محاسبه و اثرات آن بر تغییرات ترسیب کربن مورد توجه قرار گرفت. نقشه سایه‌زدایی^۱ در سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) با استفاده از DEM تهیه شد که تصویری از سطح زمین با توجه به نور و سایه‌ها ایجاد می‌کند. این نقشه باعث تشکیل تصویری واقع‌گرا از زمین می‌شود که بازتاب دقیق‌تری از ساختار سه‌بعدی منطقه ارائه می‌دهد.^۲

$$TPI_i = Z_0 - \frac{\sum_{n=1}^n Z_n}{n} \quad \text{رابطه ۵}$$

که Z_0 ارتفاع نقطه مدل مورد ارزیابی، Z_n ارتفاع از شبکه و n تعداد کل نقاط اطراف است.

$$TRI = \sqrt{\sum_{p=1}^8 ZMd} \quad \text{رابطه ۶}$$

که P : تعداد پیکسل اطراف و ZMd : میانگین تفاضل هشت پیکسل اطراف هر پیکسل است که برای شناسایی ویژگی‌های نسبی ارتفاع و پیچیدگی سطح مورد استفاده قرار گرفتند.

$$TWI = \ln\left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \quad \text{رابطه ۷}$$

که α : شیب بالادست دامنه و β : زاویه شیب در هر پیکسل است که برای برآورد توزیع رطوبت محاسبه شد.

۲-۷. محاسبه ترسیب کربن

برای محاسبه متغیر وابسته ترسیب کربن، ابتدا ویژگی‌های خاک شامل وزن مخصوص ظاهری با روش کلوخه (Blake & Hartge, 1986) و ماده آلی و کربن آلی به روش اکسیداسیون با بی‌کربنات پتاسیم (Allison, 1975) در آزمایشگاه تعیین شد. سپس، مقدار ترسیب کربن بر حسب کیلوگرم بر هکتار با استفاده از رابطه ۸ محاسبه شد (کلاچ، ۱۳۸۴؛ Okon et al., 2014).

$$Cs = 10000 \times OC(\%) \times Bd \times e \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن: Cs ترسیب کربن (کیلوگرم بر هکتار)، OC کربن آلی (درصد)، Bd چگالی ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب) و e عمق خاک (سانتی‌متر) است.

۲-۸. تجزیه و تحلیل آماری

نرمال بودن داده‌های حاصل از اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک و پوشش زمین با استفاده از آزمون Kolmogorov-Smirnov مورد بررسی قرار گرفت (حبیبی و سرآبادانی، ۱۴۰۱). برای مقایسه دو گروه مستقل و بررسی اثرات اصلی عمق خاک (۰ تا ۱۵ و ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر خاک) بر ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی، از آزمون t مستقل (Independent t-test) استفاده شد. همچنین، برای مقایسه تفاوت‌های میانگین در چند گروه مختلف، از تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-Way ANOVA) استفاده شد که آماره F برای بررسی معنی‌داری تفاوت میان گروه‌ها به کار گرفته شد. در صورت وجود تفاوت معنی‌دار میان گروه‌ها، برای مقایسه دقیق‌تر میانگین‌ها از آزمون چنددامنه‌ای دانکن نیز استفاده شد. تجزیه و تحلیل‌های آماری مورد اشاره در محیط نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 26.0 انجام شد.

به‌منظور کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی مؤلفه‌های اصلی که بیش‌ترین واریانس را در مجموعه داده‌ها توضیح می‌دهند، از آزمون تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در محیط نرم‌افزار PC-ORD5 استفاده شد (McCune & Grace, 2002). تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

^۱. Hillshade

^۲. <https://srs-gis.ir/create-hillshade-layer-in-arcgis-pro/>

بر اساس ۲۴ متغیر مختلف انجام شد. در واقع هدف اصلی از انجام PCA، تعیین سهم اثر هر یک از این ویژگی‌ها در فرآیند ترسیب کربن و ارزیابی تأثیر مستقل هر کدام بوده است. بنابراین، این تحلیل برای شناسایی ساختار داده‌ها، کاهش ابعاد و اولویت‌بندی متغیرها در مطالعه انجام شده و به منظور تحلیل تفاوت بین گروه‌ها به کار نرفته است. در نهایت، نقشه‌های مربوطه (شامل شیب، جهت شیب، تجمع جریان، TPI، SPI، TRI، TWI و سایه‌زدایی) در محیط نرم‌افزار ArcGIS 8.0 تهیه شدند.

۳. یافته‌های پژوهش

۳-۱. تحلیل تغییرات ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک و ترسیب کربن در رویشگاه‌های مختلف

نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک در دو رویشگاه علف‌زار و بوته‌زار نشان‌دهنده تفاوت معنی‌داری در ترکیب و کیفیت خاک است (جدول ۲). بدین‌صورت که در خصوص ویژگی‌های فیزیکی، خاک رویشگاه علف‌زار از نظر محتوای رس ($13/02$ درصد) و سیلت ($21/64$ درصد) غنی‌تر و شن کم‌تری ($65/08$ درصد) دارد که به ظرفیت بالاتر نگهداری آب و مواد مغذی اشاره دارد، درحالی‌که بوته‌زار به دلیل درصد بالاتر شن ($73/01$ درصد) نفوذپذیری بیش‌تری دارد. این تفاوت‌ها با آماره t برابر $3/18$ برای رس و $7/52$ برای سیلت و $5/85$ برای شن به‌طور معنی‌دار ($p < 0/01$) تأیید می‌شوند.

رویشگاه علف‌زار از نظر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک از جمله کربن آلی ($2/71$ درصد)، نیتروژن ($0/36$ درصد) و هم‌چنین شاخص ترسیب کربن ($59/36$ تن بر هکتار) وضعیت مطلوب‌تری نسبت به بوته‌زار دارد. این تفاوت‌ها با آماره t برابر با $9/34$ برای کربن آلی، $10/97$ برای نیتروژن و $10/22$ برای ترسیب کربن خاک نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($p < 0/01$) در میان دو رویشگاه است. علاوه‌براین، pH پایین‌تر ($5/71$) و هدایت الکتریکی بیش‌تر ($448/99$ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) در علف‌زار نیز نشان‌دهنده غلظت بالاتر یون‌های محلول است که این تفاوت‌ها با آماره t برابر $4/17$ برای pH و $3/97$ برای هدایت الکتریکی (EC) به‌طور معنی‌دار ($p < 0/01$) مورد تأیید قرار گرفته است.

جدول ۲. مقایسه اثر نوع رویشگاه بر میانگین ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک

ویژگی رویشگاه	فیزیکی			شیمیایی				ترسیب کربن خاک (تن بر هکتار)
	رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	pH	EC (میکروزیمنس بر سانتی متر)	نیتروژن (درصد)	کربن الی ذره‌ای (درصد)	
علفزار	۱۳/۰۲ ^a	۲۱/۶۴ ^a	۶۵/۰۸ ^b	۵/۷۱ ^b	۴۴۸/۹۹ ^a	۰/۳۶ ^a	۲/۱۸ ^a	۲/۷۱ ^a
بوته‌زار	۱۰/۶۱ ^b	۱۶/۳۸ ^b	۷۳/۰۱ ^a	۶/۷۵ ^a	۳۹۹/۶۸ ^b	۰/۲۱ ^b	۱/۱۷ ^b	۱/۹۵ ^b
آماره t	۳/۱۸ ^{**}	۷/۵۲ ^{**}	۵/۸۵ ^{**}	۴/۱۷ ^{**}	۳/۹۷ ^{**}	۱۰/۹۷ ^{**}	۱۰/۴۵ ^{**}	۹/۳۴ ^{**}

حروف متفاوت a و b نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین ویژگی‌های مورد بررسی هستند.

* و ** به ترتیب نشان‌دهنده وجود همبستگی معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ و ۹۹ درصد و ns بیان‌گر عدم معنی‌داری است.

۳-۲. تحلیل تغییرات ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک و ترسیب کربن در جهت‌های جغرافیایی مختلف

بررسی میانگین ویژگی‌های خاک در جهت‌های مختلف دامنه (شمالی، جنوبی، شرقی و غربی) نشان‌دهنده تفاوت قابل‌توجهی در ترکیب اجزاء و عناصر و کیفیت خاک است (جدول ۳). دامنه شمالی با درصد بالاتر رس ($25/21$ درصد، $p < 0/01$)، $F=1020/21$ و سیلت ($29/20$ درصد، $p < 0/01$) و $F=180/21$ درصد کم‌تر شن ($45/60$ درصد، $p < 0/01$)، $F=602/11$ ، دارای ساختاری مناسب‌تر برای نگهداری آب و مواد مغذی است و از نظر کربن آلی ($3/16$ درصد، $p < 0/01$)، $F=50/27$ ، کربن آلی ذره‌ای ($2/61$ درصد، $p < 0/01$)، $F=50/58$ و ترسیب کربن خاک ($68/05$ درصد، $p < 0/01$)، $F=47/97$ نیز کیفیت بالاتری دارد. مقدار بالای آماره F در این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که اختلاف بین

دامنه‌های جغرافیایی از نظر این خصوصیات معنی‌دار است و جهت دامنه تأثیر قابل توجهی بر کیفیت خاک دارد. در مقابل، دامنه‌های شرقی و غربی بیش‌ترین درصد شن (به‌ترتیب ۷۸/۷۶ و ۷۷/۵۸ درصد) و کم‌ترین کربن آلی را نشان می‌دهند که می‌تواند باعث کاهش توانایی خاک در حفظ رطوبت و مواد مغذی شود. دامنه جنوبی نیز با درصد پایین‌تر رس (۸/۸۳ درصد) و مقادیر متوسطی از کربن آلی (۲/۰۹ درصد) در موقعیت بینابینی قرار دارد. همچنین دامنه‌های شمالی و غربی به‌دلیل هدایت الکتریکی بالاتر (۴۷۱/۸۳ و ۴۷۳/۹۸ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، $p < 0.01$ ، $F = 22.83$) در محدوده مناسب‌تر، کیفیت شیمیایی بالاتری دارند. در مقابل، مقدار pH خاک تفاوت معنی‌داری نداشت ($p < 0.05$ ، $F = 2.25$). تفاوت‌های آماری این پارامترها با سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار بوده و تأثیر جهت دامنه بر کیفیت خاک را تأیید می‌کند. به‌طور کلی، دامنه شمالی از نظر شیمیایی و فیزیکی خاک برتر است و دامنه‌های شرقی و غربی عملکرد ضعیف‌تری دارند.

جدول ۳. مقایسه اثر جهت جغرافیایی بر میانگین ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک و ترسیب کربن

ترسیب کربن خاک (تن بر هکتار)	شیمیایی					فیزیکی			ویژگی جهت جغرافیایی
	کربن آلی (درصد)	کربن آلی ذره‌ای (درصد)	نیتروژن (درصد)	EC (میکروزیمنس بر سانتی‌متر)	pH	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	
۶۸/۰۵ ^a	۳/۱۶ ^a	۲/۶۱ ^a	۰/۲۱ ^c	۴۷۱/۸۳ ^a	۶/۳۸ ^{ab}	۴۵/۶۰ ^c	۳۹/۲۰ ^a	۲۵/۲۱ ^a	شمال
۴۴/۸۷ ^b	۲/۰۹ ^b	۱/۳۵ ^c	۰/۲۳ ^c	۳۶۶/۷۸ ^b	۵/۷۸ ^b	۷۴/۲۵ ^b	۱۶/۴۲ ^b	۸/۸۳ ^b	جنوب
۴۳/۲۹ ^b	۲/۰۱ ^b	۱/۰۹ ^d	۰/۳۱ ^b	۳۸۴/۷۴ ^b	۶/۰۹ ^{ab}	۷۸/۷۶ ^a	۱۴/۸۱ ^c	۶/۴۳ ^c	شرق
۴۵/۲۵ ^b	۲/۰۸ ^b	۱/۶۴ ^b	۰/۳۹ ^a	۴۷۳/۹۸ ^a	۶/۶۷ ^a	۷۷/۵۸ ^a	۱۵/۶۲ ^{bc}	۶/۷۹ ^c	غرب
۴۷/۹۷ ^{**}	۵۰/۲۷ ^{**}	۵۰/۵۸ ^{**}	۳۶/۴۵ ^{**}	۲۲/۸۳ ^{**}	۲/۲۵ ^{ns}	۶۰۲/۱۱ ^{**}	۱۸۰/۲۱ ^{**}	۱۰۲۰/۲۱ ^{**}	آماره F

حروف متفاوت a و b نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین ویژگی‌های مورد بررسی هستند.

* و ** به‌ترتیب نشان‌دهنده وجود همبستگی معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ و ۹۹ درصد و ^{ns} بیان‌گر عدم معنی‌داری است.

۳-۳. تحلیل تغییرات ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک و ترسیب کربن در عمق‌های خاک مختلف

مقایسه میانگین خصوصیات خاک در دو عمق (۰ تا ۱۵ سانتی‌متر و ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر) نشان‌دهنده تغییرات معنی‌داری در کیفیت خاک با افزایش عمق است (جدول ۴). در لایه سطحی (۰ تا ۱۵ سانتی‌متر)، خاک دارای کربن آلی (۲/۵۳ درصد)، کربن آلی ذره‌ای (۱/۸۵ درصد)، نیتروژن (۰/۳۱ درصد) و ترسیب کربن (۵۳/۰۳ تن بر هکتار) بیش‌تری نسبت به عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر است که مقادیر کم‌تری از این پارامترها (به‌ترتیب برابر با ۲/۱۴ درصد، ۱/۵۰ درصد، ۰/۲۵ درصد و ۴۷/۶۹ تن بر هکتار) را نشان می‌دهد. این تفاوت‌ها با آماره t برابر با ۴/۴۹ برای کربن آلی، ۳/۳۴ برای کربن آلی ذره‌ای، ۳/۹۶ برای نیتروژن و ۲/۷۷ برای ترسیب کربن، در سطح اطمینان ۹۹ درصد ($p < 0.01$) معنی‌دار بوده و نشان‌دهنده تأثیر عمق خاک بر این ویژگی‌ها است. از نظر ویژگی‌های فیزیکی، عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر درصد بالاتری از رس (۱۲/۵۱ درصد) و درصد کم‌تری از شن (۶۸/۵۵ درصد) را در مقایسه با لایه سطحی دارد. با این حال، تفاوت‌های رس، سیلت و شن بین دو عمق از نظر آماری معنی‌دار نیستند. به‌طور خاص، آماره t برای رس برابر با ۱/۸۲-، برای سیلت برابر با ۰/۸۶ و برای شن برابر با ۰/۷۲ است که نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین دو عمق در این خصوصیات فیزیکی خاک است.

از نظر شیمیایی، مقدار pH در عمق بیش‌تر (برابر با ۶/۳۶) کمی بالاتر از عمق پایینی (برابر با ۶/۱۰) است، درحالی‌که هدایت الکتریکی در لایه سطحی (۴۵۰/۴۱ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) نسبت به لایه عمقی (۳۹۸/۲۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) بالاتر بوده و نشان‌دهنده تجمع بیش‌تر یون‌های محلول در این لایه است. آماره t برای هدایت الکتریکی برابر با ۴/۲۰ است که نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین دو عمق در این ویژگی شیمیایی است. به‌طور کلی، لایه سطحی خاک (۰ تا ۱۵ سانتی‌متر) به‌دلیل دارا بودن مقادیر بالاتر کربن آلی، نیتروژن و هدایت

الکتریکی، کیفیت بالاتری دارد و به عنوان منبع غنی تر مواد مغذی برای گیاهان و فرایندهای زیستی محسوب می شود.

جدول ۴. مقایسه اثر عمق خاک بر میانگین ویژگی های فیزیکی-شیمیایی خاک و ترسیب کربن

ویژگی عمق خاک	شیمیایی					فیزیکی		
	کربن آلی (درصد)	کربن الی ذره ای (درصد)	نیتروژن (درصد)	EC (میکروزیمنس بر سانتی متر)	pH	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)
۱۵-۰	۲/۵۳ ^a	۱/۸۵ ^a	۰/۳۱ ^a	۴۵۰/۴۱ ^a	۶/۱۰ ^b	۶۹/۵۵ ^a	۱۹/۳۳ ^a	۱۱/۱۲ ^b
۳۰-۱۵	۴۷/۶۹ ^b	۲/۱۴ ^b	۰/۲۵ ^b	۳۹۸/۲۵ ^b	۶/۳۶ ^a	۶۸/۵۵ ^b	۱۸/۶۹ ^b	۱۲/۵۱ ^a
آماره t	۴/۴۹ ^{**}	۳/۳۴ ^{**}	۳/۹۶ ^{**}	۴/۲۰ ^{**}	-۱/۰۰ ^{ns}	۰/۷۲ ^{ns}	۰/۸۶ ^{ns}	-۱/۸۲ ^{ns}

حروف متفاوت a و b نشان دهنده اختلاف معنی دار بین میانگین ویژگی های مورد بررسی هستند.

* و ** به ترتیب نشان دهنده وجود همبستگی معنی دار در سطح احتمال ۹۵ و ۹۹ درصد و ^{ns} بیان گر عدم معنی داری است.

۳-۴. تحلیل تغییرات ویژگی های فیزیکی-شیمیایی خاک و ترسیب کربن تحت اثرات متقابل نوع رویشگاه، جهت جغرافیایی و عمق خاک

مقایسه اثرات متقابل رویشگاه (علفزار و بوتهزار) و جهت دامنه (شمال، جنوب، شرق، غرب) بر خصوصیات خاک در منطقه مطالعه شده، تفاوت های قابل توجهی را در ساختار و کیفیت خاک نشان می دهد (جدول ۵). از لحاظ ویژگی های فیزیکی، در رویشگاه علفزار، دامنه شمالی با بالاترین مقدار رس (۲۸/۰۷ درصد) و سیلت (۳۰/۹۰ درصد) و کمترین مقدار شن (۴۱/۰۳ درصد)، ساختار فیزیکی مطلوب تری برای نگهداری آب و مواد مغذی دارد. این درحالی است که در رویشگاه بوتهزار، دامنه غربی با بیشترین مقدار شن (۸۵/۹۲ درصد) و کمترین مقدار رس (۵/۹۱ درصد)، کیفیت خاک ضعیف تری را نشان می دهد. این تفاوت ها از نظر آماری معنی دار بوده و با آماره F برابر با ۳۰/۶۱۳ برای رس، ۸۱/۲۱۰ برای سیلت و ۱۹/۵۶۶ برای شن تأیید می شود.

از نظر ویژگی های شیمیایی، دامنه شمالی دارای رویشگاه علفزار، بالاترین کربن آلی (۳/۳۰ درصد) و کربن آلی ذره ای (۲/۸۳ درصد) است، درحالی که در رویشگاه بوتهزار، این مقادیر در دامنه شمالی نیز کمتر از علفزار است و در دامنه غربی کمترین مقدار کربن آلی (۰/۹۷ درصد) و کربن آلی ذره ای (۰/۳۱ درصد) مشاهده می شود. این اختلافات با آماره F برابر با ۳۵/۱۱۵ برای کربن آلی و ۵۵/۱۱۴ برای کربن آلی ذره ای معنی دار هستند. هدایت الکتریکی (EC) نیز در دامنه های شمالی و غربی علفزار بالاترین مقدار را دارد که به تجمع بیش تر یون های محلول در این دامنه ها اشاره دارد. به طوری که این تفاوت ها از نظر آماری معنی دار بوده و با آماره F برابر ۱۸/۷۹ تأیید می شود. از نظر pH نیز، دامنه غربی در بوتهزار نسبت به سایر دامنه ها قلیایی تر بوده، درحالی که دامنه جنوبی علفزار کمترین مقدار pH را نشان می دهد که این اختلاف با آماره F برابر ۴/۳۸ مشخص شده است.

دامنه شمالی در هر دو رویشگاه بیشترین ظرفیت عملکرد را در ذخیره سازی کربن نشان می دهد، به ویژه در علفزار با ترسیب کربن ۷۲/۰۹ تن بر هکتار درحالی که، دامنه غربی در بوتهزار کمترین میزان ترسیب کربن (۲۱/۱۰ تن بر هکتار) و نیتروژن را دارد. این تفاوت ها از نظر آماری معنی دار بوده و با آماره F برابر ۱۱۴/۹۰ برای ترسیب کربن و ۱۱۰/۱۶ برای نیتروژن تأیید می شود. در مجموع، این تحلیل نشان می دهد که رویشگاه علفزار در تمامی دامنه ها به ویژه در جهت های شمالی و غربی کیفیت خاک بالاتری نسبت به بوتهزار دارد. دامنه شمالی به ویژه در هر دو رویشگاه بهترین ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک را از خود نشان می دهد، درحالی که دامنه غربی در بوتهزار کمترین کیفیت خاک را دارد. این نتایج تأثیر قابل توجهی از ترکیب رویشگاه و جهت دامنه بر خصوصیات خاک و توان بوم سازگان ها در این منطقه دارند.

جدول ۵. مقایسه میانگین اثرات متقابل نوع رویشگاه و جهت دامنه بر میانگین ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک و ترسیب کربن

رویشگاه	ویژگی جهت دامنه	فیزیکی			شیمیایی				ترسیب کربن خاک (تن بر هکتار)
		رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	pH	EC (میکروزیمنس بر سانتی‌متر)	نیتروژن (درصد)	کربن آلی ذره‌ای (درصد)	کربن آلی (درصد)
علفزار	شمال	۲۸/۰۷ ^a	۳۰/۹۰ ^a	۴۱/۰۳ ^g	۶/۲۶ ^{ab}	۵۰۹/۴۵ ^a	۰/۱۸ ^d	۲/۸۳ ^a	۳/۳۰ ^a
	جنوب	۹/۸۲ ^c	۱۷/۲۵ ^d	۷۱/۹۲ ^d	۴/۸۵ ^c	۳۴۴/۲۹ ^d	۰/۳۳ ^b	۱/۲۸ ^d	۱/۹۲ ^d
	شرق	۶/۵۱ ^e	۱۵/۳۷ ^e	۷۸/۱۲ ^{bc}	۵/۷۲ ^{bc}	۳۹۷/۹۷ ^{ab}	۰/۳۵ ^b	۱/۶۳ ^c	۲/۴۷ ^c
	غرب	۷/۶۸ ^d	۲۳/۰۷ ^c	۶۹/۲۵ ^e	۵/۹۹ ^b	۵۴۴/۲۴ ^a	۰/۵۹ ^a	۲/۹۶ ^a	۳/۱۸ ^{ab}
بوته‌زار	شمال	۲۲/۳۵ ^b	۲۷/۵۰ ^b	۵۰/۱۶ ^f	۶/۵۰ ^{ab}	۴۳۴/۲۱ ^b	۰/۲۴ ^c	۲/۳۹ ^b	۳/۰۲ ^b
	جنوب	۷/۸۴ ^d	۱۵/۵۹ ^e	۷۶/۵۸ ^c	۶/۷۰ ^{ab}	۳۸۹/۲۸ ^{bcd}	۰/۱۳ ^e	۱/۴۳ ^{cd}	۲/۲۶ ^c
	شرق	۶/۳۴ ^e	۱۴/۲۵ ^e	۷۹/۴۱ ^b	۶/۴۶ ^{ab}	۳۷۱/۵۲ ^{cd}	۰/۲۷ ^c	۰/۵۵ ^e	۱/۵۵ ^e
	غرب	۵/۹۱ ^e	۸/۱۸ ^f	۸۵/۹۲ ^a	۷/۳۴ ^a	۴۰۳/۷۱ ^{ab}	۰/۲۰ ^d	۰/۳۱ ^e	۰/۹۷ ^f
آماره F		۶۱۳/۳۰ ^{**}	۲۱۰/۸۱ ^{**}	۵۶۶/۱۹ ^{**}	۴/۳۸ ^{**}	۱۸/۷۹ ^{**}	۱۱۰/۱۶ ^{**}	۱۱۴/۵۵ ^{**}	۱۱۵/۳۵ ^{**}

حروف متفاوت a و b نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین ویژگی‌های مورد بررسی هستند.

* و ** به ترتیب نشان‌دهنده وجود همبستگی معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ و ۹۹ درصد و ns بیان‌گر عدم معنی‌داری است.

مقایسه اثرات متقابل رویشگاه (علفزار و بوته‌زار) و عمق خاک (۰ تا ۱۵ و ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر) نشان‌دهنده تفاوت معنی‌داری در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است (جدول ۶). از نظر فیزیکی، خاک علفزار در هر دو عمق، مقدار سیلت بیش‌تری نسبت به بوته‌زار دارد (۲۲/۴۸ درصد در خاک سطحی و ۲۰/۸۱ درصد در خاک عمقی)، درحالی‌که بوته‌زار مقدار شن بالاتری (۷۴/۰۲ درصد در خاک سطحی و ۷۲/۰۱ درصد در خاک عمقی) دارد، که بر نفوذپذیری و ظرفیت نگهداری آب تأثیر می‌گذارد. این تفاوت‌ها نیز از نظر آماری معنی‌دارند، به‌طوری‌که آماره F برای سیلت برابر با ۱۹/۸۶ و برای شن برابر با ۱۱/۷۷ به‌دست آمد. از نظر شیمیایی در علفزار، لایه سطحی (۰ تا ۱۵ سانتی‌متر) دارای بالاترین مقدار کربن آلی (۲/۹۱ درصد)، کربن آلی ذره‌ای (۲/۳۰ درصد)، نیتروژن (۰/۳۹ درصد) و ترسیب کربن خاک (۶۲/۳۳ تن بر هکتار) است که به کیفیت بالای خاک و توانایی ذخیره کربن اشاره دارد. این تفاوت‌ها از نظر آماری نیز تأیید می‌شوند، به‌طوری‌که آماره F برای کربن آلی برابر با ۳۸/۴۲، برای کربن آلی ذره‌ای برابر با ۴۲/۳۷، برای نیتروژن برابر با ۳۸/۱۲ و برای ترسیب کربن برابر با ۳۸/۵۴ به‌دست آمد که همگی در سطح معنی‌داری ۹۹ درصد قرار دارند.

در رویشگاه بوته‌زار، هر دو عمق خاک درصد کم‌تری از کربن آلی و نیتروژن دارند، به‌ویژه در لایه عمیق‌تر (۱/۷۵ درصد کربن آلی و ۰/۱۸ درصد نیتروژن)، که نشان‌دهنده کیفیت پایین‌تر این رویشگاه است. همچنین، pH خاک در بوته‌زار (۶/۷۷-۶/۷۳) نسبت به علفزار (۵/۹۸-۵/۴۳) بالاتر بوده و تفاوت آن‌ها با آماره F برابر ۶/۶۳ از نظر آماری معنی‌دار است. هدایت الکتریکی (EC) در هر دو رویشگاه در لایه سطحی بیش‌تر است، اما رویشگاه علفزار مقادیر بالاتری نشان می‌دهد (۴۸۶/۵۲ در عمق ۰-۱۵ سانتی‌متر) که این تفاوت نیز با آماره F برابر با ۱۲/۷۵ تأیید می‌شود. اثرات متقابل رویشگاه و عمق خاک نشان می‌دهد که علفزار، به‌ویژه در لایه سطحی، از نظر کیفیت خاک برتر است و این برتری در کربن آلی، نیتروژن و سیلت به‌طور معنی‌داری بارزتر است. رویشگاه بوته‌زار، به‌دلیل مقدار شن بیش‌تر و مواد مغذی کم‌تر، خاکی با کیفیت پایین‌تر دارد.

مقایسه اثرات متقابل جهت دامنه (شمال، جنوب، شرق، غرب) و عمق خاک (۰ تا ۱۵ و ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر) بر خصوصیات خاک نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجه در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و ذخیره‌سازی کربن است (جدول ۷). در ویژگی‌های فیزیکی، دامنه شمالی با بالاترین مقدار رس (۲۷/۸۰ درصد، $F=۵۴۳/۶۶$) و کم‌ترین مقدار شن (۴۳/۹۷ درصد، $F=۲۶۱/۱۵$) در لایه عمیق‌تر (۱۵-۳۰

سانتی‌متر)، ظرفیت بالاتری برای حفظ رطوبت و مواد مغذی دارد. این درحالی است که دامنه‌های شرقی و غربی در هر دو عمق بیش‌ترین مقدار شن ($78/62$ درصد- $77/73$ درصد، $F=261/15$) و کم‌ترین مقدار رس ($6/20$ درصد- $6/85$ درصد) را نشان می‌دهند، که ممکن است به نفوذپذیری بیش‌تر خاک در این نواحی اشاره داشته باشد.

جدول ۶. مقایسه میانگین اثرات متقابل نوع رویشگاه و عمق خاک بر میانگین ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک و ترسیب کربن

رویشگاه	ویژگی عمق خاک	فیزیکی			شیمیایی				ترسیب کربن خاک (تن بر هکتار)
		رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	pH	EC (میکروزیمنس بر سانتی‌متر)	نیترژن (درصد)	کربن الی ذره‌ای (درصد)	کربن آلی (درصد)
علفزار	۱۵-۰	۱۲/۴۴ ^a	۲۲/۴۸ ^a	۶۵/۰۸ ^b	۵/۴۳ ^b	۴۸۶/۵۲ ^a	۰/۳۹ ^a	۲/۳۰ ^a	۲/۹۱ ^a
	۳۰-۱۵	۱۳/۶۰ ^a	۲۰/۸۱ ^a	۶۵/۰۸ ^b	۵/۹۸ ^b	۴۱۱/۴۶ ^b	۰/۳۳ ^b	۲/۰۵ ^a	۲/۵۲ ^b
بوته‌زار	۱۵-۰	۹/۸۰ ^b	۱۶/۱۸ ^b	۷۴/۰۲ ^a	۶/۷۷ ^a	۴۱۴/۳۱ ^b	۰/۲۴ ^c	۱/۴۰ ^b	۲/۱۵ ^c
	۳۰-۱۵	۱۱/۴۲ ^{ab}	۱۶/۵۷ ^b	۷۲/۰۱ ^a	۶/۷۳ ^a	۳۸۵/۰۴ ^b	۰/۱۸ ^d	۰/۹۴ ^c	۱/۷۵ ^d
آماره F		۴/۵۳ ^{**}	۱۹/۸۶ ^{**}	۱۱/۷۷ ^{**}	۶/۶۳ ^{**}	۱۲/۷۵ ^{**}	۴۸/۱۲ ^{**}	۴۲/۳۷ ^{**}	۳۸/۴۲ ^{**}

حروف متفاوت a و b نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین ویژگی‌های مورد بررسی هستند.
* و ** به ترتیب نشان‌دهنده وجود همبستگی معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ و ۹۹ درصد و ^{ns} بیان‌گر عدم معنی‌داری است.

جدول ۷. مقایسه میانگین اثرات متقابل جهت دامنه و عمق خاک بر میانگین ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک و ترسیب کربن

جهت دامنه	ویژگی عمق خاک	فیزیکی			شیمیایی				ترسیب کربن خاک (تن بر هکتار)
		رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	pH	EC (میکروزیمنس بر سانتی‌متر)	نیترژن (درصد)	کربن الی ذره‌ای (درصد)	کربن آلی (درصد)
شمال	۱۵-۰	۲۲/۶۱ ^b	۳۰/۱۶ ^a	۴۷/۲۳ ^c	۶/۳۶ ^a	۴۹۲/۹۵ ^{ab}	۰/۲۵ ^d	۲/۹۴ ^a	۳/۵۰ ^a
	۳۰-۱۵	۲۷/۸۰ ^a	۲۸/۲۳ ^a	۴۴/۹۷ ^d	۶/۴۰ ^a	۴۵۰/۷۱ ^{bc}	۰/۱۷ ^e	۲/۲۷ ^b	۲/۸۱ ^b
جنوب	۱۵-۰	۸/۹۴ ^c	۱۶/۱۵ ^b	۷۴/۹۲ ^b	۵/۲۴ ^b	۳۶۸/۳۱ ^d	۰/۲۷ ^d	۱/۶۳ ^c	۲/۳۸ ^c
	۳۰-۱۵	۸/۷۳ ^c	۱۶/۶۹ ^b	۷۲/۵۸ ^b	۶/۳۲ ^{ac}	۳۶۵/۲۶ ^d	۰/۱۸ ^e	۱/۰۹ ^d	۱/۸۰ ^d
شرق	۱۵-۰	۶/۲۰ ^d	۱۵/۱۹ ^b	۷۸/۶۳ ^a	۶/۱۱ ^{ac}	۴۱۵/۶۷ ^c	۰/۳۳ ^{bc}	۱/۱۲ ^d	۲/۱۳ ^{cd}
	۳۰-۱۵	۶/۶۶ ^d	۱۴/۴۳ ^b	۷۸/۹۱ ^a	۶/۰۶ ^{ac}	۳۵۳/۸۲ ^d	۰/۲۹ ^{cd}	۱/۰۷ ^d	۱/۸۹ ^d
غرب	۱۵-۰	۶/۷۴ ^d	۱۵/۸۲ ^b	۷۷/۴۴ ^a	۶/۶۸ ^a	۵۲۴/۷۳ ^a	۰/۴۱ ^a	۱/۷۱ ^c	۲/۱۱ ^{cd}
	۳۰-۱۵	۶/۸۵ ^d	۱۵/۴۲ ^b	۷۷/۷۳ ^a	۶/۶۵ ^a	۴۲۳/۲۳ ^c	۰/۳۸ ^{ab}	۱/۵۶ ^c	۲/۰۴ ^d
آماره F		۵۴۳/۶۶ ^{**}	۷۷/۹۸ ^{**}	۲۶۱/۱۵ ^{**}	۱/۶۱ ^{ns}	۱۴/۵۹ ^{**}	۱۹/۳۲ ^{**}	۲۵/۷۸ ^{**}	۲۵/۷۸ ^{**}

حروف متفاوت a و b نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین ویژگی‌های مورد بررسی هستند.
* و ** به ترتیب نشان‌دهنده وجود همبستگی معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ و ۹۹ درصد و ^{ns} بیان‌گر عدم معنی‌داری است.

از نظر ویژگی‌های شیمیایی، دامنه شمالی در لایه سطحی (۰ تا ۱۵ سانتی‌متر) دارای بالاترین مقدار کربن آلی (۳/۵۰ درصد، آماره $F=28.61$) و کربن آلی ذره‌ای (۲/۹۴ درصد، $F=25/78$) است. این مقادیر در لایه‌های عمیق‌تر کاهش می‌یابند، اما همچنان بالاتر از سایر دامنه‌ها باقی می‌مانند. دامنه‌های جنوبی و شرقی کم‌ترین مقدار کربن آلی و کربن آلی ذره‌ای را در هر دو عمق نشان می‌دهند. همچنین،

دامنه غربی دارای بالاترین مقدار pH (برابر با ۶/۶۸) و با آماره $F=1/61$ در لایه سطحی است و از نظر هدایت الکتریکی (EC)، دامنه غربی در لایه سطحی ($524/73$ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) و با آماره $F=14/59$ بالاترین مقدار را دارد که می‌تواند نشان‌دهنده تجمع بیش‌تر یون‌های محلول در این منطقه باشد. در خصوص ذخیره‌سازی کربن و نیتروژن، دامنه شمالی در هر دو عمق، به‌ویژه در لایه سطحی با بالاترین مقدار ترسیب کربن خاک ($73/21$ تن بر هکتار) و با آماره $F=23/71$ ، نیتروژن ($0/25$ درصد، $F=19/32$) روبه‌رو است، درحالی‌که دامنه‌های جنوبی و شرقی کم‌ترین مقدار ترسیب کربن و نیتروژن را نشان می‌دهند. دامنه غربی از نظر نیتروژن ($0/41$ درصد) نزدیک به دامنه شمالی است، اما هم‌چنان در ذخیره‌سازی کربن پایین‌تر از شمال قرار دارد. نتیجه‌گیری کلی این است که دامنه شمالی در تمامی ابعاد فیزیکی، شیمیایی و ذخیره‌سازی کربن از کیفیت بالاتری برخوردار است و به‌عنوان یک ذخیره‌گاه بوم‌شناختی برتر شناخته می‌شود. در مقابل، دامنه‌های شرقی و جنوبی به‌دلیل درصد بالای شن و مقادیر پایین‌تر مواد آلی و مغذی، کیفیت کم‌تری دارند. دامنه غربی نیز از نظر ویژگی‌های شیمیایی و هدایت الکتریکی عملکرد خوبی دارد، اما در ذخیره‌سازی کربن و نیتروژن هم‌چنان پایین‌تر از دامنه شمالی است.

۳-۵. نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) بر اساس ۲۴ ویژگی تأثیرگذار در ترسیب کربن در جدول ۸ ارائه شده است. نتایج نشان داد که دو مؤلفه اول دارای بیش‌ترین مقادیر ویژه هستند. این مؤلفه‌ها به‌ترتیب $23/04$ و $13/26$ درصد از واریانس جامعه را تبیین می‌نمایند و در مجموع $36/3$ درصد از واریانس جامعه توسط دو مؤلفه اول توصیف شده است. بنابراین دو مؤلفه اول به‌عنوان بهترین مؤلفه‌ها در توصیف تغییرات ترسیب کربن هستند. مطابق با نتایج جدول ۹ مشخص شد که مؤلفه اول بیش‌ترین درصد تبیین واریانس جامعه را دارد و ویژگی‌های بارش، دما، رس، سیلت، شن، کربن آلی، کربن آلی ذره‌ای و هدایت الکتریکی بیش‌ترین همبستگی را با این مؤلفه داشتند. در میان ویژگی‌های موجود در مؤلفه اول، درصد شن دارای بیش‌ترین بار عاملی ($0/36$) است و به‌عنوان ویژگی اصلی این مؤلفه شناخته شده است. این ویژگی می‌تواند به‌عنوان عامل اصلی در فرایندهای فیزیکی و شیمیایی خاک که بر میزان ترسیب کربن اثر می‌گذارند، شناخته شود. هم‌چنین، ویژگی‌های دیگری مانند بارش و کربن آلی که بار عاملی بالایی دارند، نقش مهمی در روند ترسیب کربن دارند. در مؤلفه دوم، لاشبرگ و شیب به‌ترتیب با بار عاملی $0/31$ و $0/35$ دارای بیش‌ترین همبستگی با این مؤلفه هستند. این نشان‌دهنده تأثیر بالای ویژگی‌های پستی و بلندی و پوشش سطحی بر روند تغییرات ترسیب کربن است. به‌ویژه، شیب و پوشش لاشبرگ می‌توانند به‌عنوان عوامل تعیین‌کننده در فرایندهای فرسایش خاک و انتقال مواد آلی در نظر گرفته شوند که به‌طور غیرمستقیم بر ترسیب کربن اثر می‌گذارند. هم‌چنین، نتایج نشان داد که EC، درصد رس و درصد سیلت در مؤلفه‌های بعدی نقش دارند، اما تأثیر آن‌ها نسبت به مؤلفه‌های اول و دوم کم‌تر است. این امر می‌تواند به این معنی باشد که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به‌طور غیرمستقیم‌تر از ویژگی‌های پستی و بلندی و اقلیمی بر ترسیب کربن تأثیر می‌گذارند. در نتیجه، دو مؤلفه اول که به‌ترتیب بیش‌ترین واریانس را تبیین می‌کنند، به‌طور مشخص تحت تأثیر مقدار شن، بارش، کربن آلی، شیب و لاشبرگ هستند. این یافته‌ها می‌توانند به‌عنوان مبنای طراحی راهبردهای مدیریت خاک و منابع طبیعی برای افزایش کارایی ترسیب کربن در این منطقه استفاده شوند.

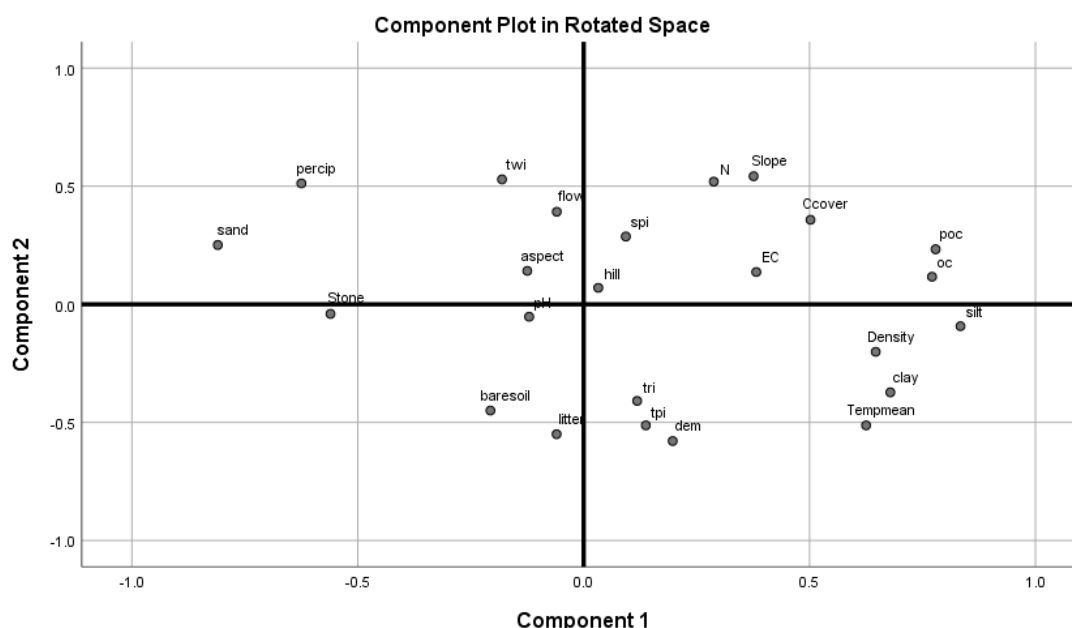
تحلیل ارتباطات بین ویژگی‌های مورد بررسی، مانند درصد شن و درصد سنگ و سنگریزه که در نزدیکی یکدیگر قرار دارند، نشان‌دهنده همبستگی مثبت میان این دو است (شکل ۲). هم‌چنین شاخص رطوبت پستی و بلندی و بارش در قسمت مثبت محور مؤلفه اول قرار دارند، که این امر نشان می‌دهد که این دو ویژگی به‌صورت مشترک در یک فضای جدید تأثیر دارند. در عین حال، متغیرهایی مانند خاک لخت و لاشبرگ که در بخش منفی محور مؤلفه اول واقع شده‌اند، ارتباط منفی بین این دو را نشان می‌دهند. از سوی دیگر، تراکم پوشش گیاهی (گیاه در مترمربع) و درصد رس که در بخش پایین راست نمودار پراکنده شده‌اند، همبستگی منفی با سایر ویژگی‌ها دارند. هم‌چنین، نیتروژن، شیب، پوشش تاجی و EC که پراکندگی بیش‌تری دارند و در نقاط مختلف نمودار قرار گرفته‌اند، به نظر می‌رسد که کم‌تر از سایر ویژگی‌ها به هم مرتبط هستند.

جدول ۸. نتایج کلی تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) مربوط به ویژگی‌های مورد مطالعه

شماره مؤلفه‌های اصلی	مقدار ویژه	درصد واریانس	درصد واریانس تجمعی	Broken-stick Eigenvalue
۱	۵/۵۳	۲۳/۰۴	۲۳/۰۴	۳/۷۸
۲	۳/۱۸	۱۳/۲۶	۳۶/۳۰	۲/۷۸
۳	۲/۲۴	۹/۳۳	۴۵/۶۳	۲/۲۸
۴	۲/۰۲	۸/۴۱	۵۴/۰۴	۱/۹۴
۵	۱/۷۲	۷/۱۸	۶۱/۲۲	۱/۶۹
۶	۱/۴۱	۵/۸۸	۶۷/۱۰	۱/۴۹
۷	۱/۱۴	۴/۷۵	۷۱/۸۵	۱/۳۳
۸	۱/۰۲	۴/۲۶	۷۶/۱۱	۱/۱۸
۹	۰/۹۴	۳/۹۰	۸۰/۰۱	۱/۰۶
۱۰	۰/۸۱	۳/۳۶	۸۳/۳۸	۰/۹۵

جدول ۹. ضریب تاثیر مؤلفه‌های اصلی (PCA) مربوط به ویژگی‌های مورد مطالعه

ویژگی	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
خاک لخت	۰/۰۳	-۰/۲۷	-۰/۱۶	-۰/۲۶	-۰/۳۳	-۰/۱۹
سنگ و سنگریزه	۰/۲۲	-۰/۱۱	-۰/۳۵	-۰/۲۳	۰/۱۳	۰/۰۸
رس	-۰/۳۲	-۰/۰۹	-۰/۲۹	-۰/۰۷	۰/۱۷	-۰/۱۲
سیلت	-۰/۳۵	۰/۰۸	-۰/۱۷	-۰/۱۷	۰/۰۳	-۰/۰۵
شن	۰/۳۶	۰/۰۱	۰/۲۵	۰/۱۲	-۰/۱۲	-۰/۰۴
کربن آلی	-۰/۳۰	۰/۱۸	-۰/۰۷	-۰/۲۱	-۰/۰۶	-۰/۱۸
کربن الی ذره‌ای	-۰/۲۹	۰/۲۵	-۰/۰۵	-۰/۲۱	-۰/۰۷	-۰/۱۰
نیترژن	-۰/۰۶	۰/۳۲	۰/۳۳	-۰/۱۶	-۰/۲۹	-۰/۱۱
pH	۰/۰۴	-۰/۰۵	-۰/۱۲	-۰/۰۶	-۰/۰۲	۰/۰۸
EC	-۰/۱۴	۰/۱۳	-۰/۰۵	-۰/۲۳	-۰/۰۳	-۰/۱۲
بارش	۰/۳۲	۰/۱۸	-۰/۰۳	-۰/۲۷	۰/۰۹	-۰/۰۴
میانگین دما	-۰/۳۲	-۰/۱۸	۰/۰۳	۰/۲۷	-۰/۰۹	۰/۰۴
پوشش تاجی	-۰/۱۶	۰/۲۷	۰/۳۸	۰/۳۳	۰/۱۰	-۰/۰۷
تراکم پوشش گیاهی	-۰/۲۹	-۰/۰۱	-۰/۱۰	۰/۳۰	۰/۲۷	۰/۱۳
لاشبرگ	-۰/۰۴	-۰/۳۱	-۰/۰۱	-۰/۱۱	-۰/۱۰	-۰/۲۰
شیب	-۰/۰۹	۰/۳۵	۰/۱۱	-۰/۲۲	-۰/۱۰	۰/۰۱
جهت جغرافیایی	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۲۱	-۰/۰۴
ارتفاع	-۰/۱۵	-۰/۲۸	۰/۱۱	۰/۱۰	-۰/۳۱	-۰/۲۲
تجمع جریان (FA)	۰/۰۷	۰/۲۰	-۰/۲۸	۰/۲۵	-۰/۳۶	۰/۱۴
سایه‌زدایی	۰/۰۰	۰/۰۴	-۰/۰۶	۰/۱۲	-۰/۰۹	-۰/۶۲
شاخص بارش استاندارد شده (SPI)	۰/۰۰	۰/۱۷	-۰/۳۷	۰/۲۳	-۰/۳۴	-۰/۰۳
شاخص موقعیت پستی و بلندی (TPI)	-۰/۱۲	-۰/۲۵	۰/۲۱	-۰/۲۰	-۰/۲۱	۰/۳۴
شاخص ناهمواری زمین (TRI)	-۰/۱۰	-۰/۲۰	۰/۲۰	-۰/۱۵	-۰/۳۱	۰/۳۶
رطوبت پستی و بلندی (TWI)	۰/۱۴	۰/۲۶	-۰/۲۶	۰/۲۱	-۰/۲۹	۰/۳۱



شکل ۲. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و نمایش توزیع داده‌ها در دو بعد اصلی با بیش‌ترین واریانس

۴. بحث و نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر که به بررسی الگوی ترسیب کربن تحت تاثیر ویژگی‌های مختلف در مراتع شمال سیلان پرداخته است، نتایج قابل توجهی را در زمینه تفاوت‌های عملکرد خاک در شرایط مختلف بوم‌شناختی و اثرات آن بر ذخیره‌سازی کربن نشان داد. برای نمونه، نتایج به‌دست آمده تأیید کردند که عوامل پستی و بلندی نظیر شیب، تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک و ظرفیت آن در ترسیب کربن دارند. در این زمینه جانجانی و همکاران (۱۴۰۱) نشان دادند که ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت جغرافیایی دامنه‌ها بر میزان ترسیب کربن اثرگذارند. همچنین مطالعه‌ای که توسط قربانی و همکاران (۱۴۰۱) انجام شد، نشان داد که ارتفاع و شیب تأثیر زیادی در ترسیب کربن دارند. این نتیجه با یافته‌های تحقیق حاضر همخوانی دارد، زیرا نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع موجب افزایش ترسیب کربن می‌شود. این هم‌راستایی به این معناست که شرایط پستی و بلندی می‌تواند عامل مهمی در مدیریت و ذخیره کربن باشد.

شرایط آلاینده‌گی هوا و تغییر اقلیم (تغییرات محسوس دما و بارش)، می‌توانند بر چرخه ترسیب کربن اثر منفی داشته باشند. این تاثیر به‌طور ویژه بر دامنه‌های جنوبی و شرقی بیش‌تر خواهد بود. همچنین دامنه‌های شمالی دارای ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مطلوب‌تری مانند درصد بالاتر رس و سیلت و کربن آلی بیش‌تر بودند که باعث افزایش ظرفیت این مناطق در ذخیره‌سازی کربن و مواد مغذی خاک می‌شود. در مقابل، دامنه‌های شرقی و غربی با درصد بالاتر شن و مقادیر پایین‌تر کربن آلی، عملکرد ضعیف‌تری در ذخیره‌سازی کربن و نگهداری رطوبت و مواد مغذی نشان دادند. Jakšić و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که بالاترین مقدار کربن آلی خاک، ۱۰/۹۴ گرم بر کیلوگرم در خاک‌های روبه شمال وجود دارد که به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از سایر جهت‌هاست.

مقایسه ویژگی‌های خاک در عمق‌های مختلف (۰-۱۵ سانتی‌متر و ۱۵-۳۰ سانتی‌متر) نیز نشان‌دهنده تفاوت معنی‌داری در کیفیت خاک و ظرفیت آن برای ترسیب کربن بود. لایه سطحی (۰-۱۵ سانتی‌متر) به‌طور کلی دارای کربن آلی و نیتروژن بیش‌تری بود و به‌عنوان منبع غنی‌تری برای گیاهان و فرآیندهای زیستی شناخته شد. در این زمینه یوسفیان و همکاران (۲۰۱۱) بیان کردند که مقدار کربن آلی و ماده آلی در پایه گیاه در عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر بیش‌تر از عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر در هر دو مرتع قرق‌شده و بدون قرق

است. همچنین، مقایسه میانگین متغیرهای خاک به دست آمده در مطالعه قربانی و همکاران (۱۴۰۱) نشان داد که بیشترین مقدار کربن آلی و کربن آلی ذره‌ای به ترتیب (۳/۵۹ و ۵/۵۲ درصد) متعلق به عمق خاک ۱۵-۰ سانتی‌متری رویشگاه علفزار در طبقه ارتفاعی بیش از ۲۵۰۰ متر است که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد. در همین راستا، رفیعی و همکاران (۱۳۹۹) نشان دادند که کربن آلی خاک در افق‌های سطحی خاک بیش‌تر است و مقدار آن با افزایش عمق کاهش می‌یابد. همچنین مطالعه‌ای که توسط استانی و همکاران (۲۰۲۵) در مورد تأثیر مدیریت چرا به‌طور تطبیقی (AMP) و مدیریت چرای متعارف (CONV) بر ذخایر کربن خاک در مراتع مدیرانه‌ای کالیفرنیا انجام شد، نشان داد که ذخیره کربن آلی خاک در لایه‌های سطحی (۰-۱۰ سانتی‌متر) به میزان ۱۷ درصد بیش‌تر است.

مقایسه اثرات متقابل رویشگاه (علفزار و بوته‌زار) و عمق خاک (۰ تا ۱۵ و ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر) نشان‌دهنده تفاوت معنی‌داری در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک است که با نتایج مطالعه جعفریان و قربانی (۱۴۰۱) هم‌خوانی ندارد. این محققان نشان دادند که بیش‌ترین میزان ترسیب کربن به میزان ۵۴/۶۰۴۶ گرم در مترمربع مربوط به طبقه ارتفاعی ۴ (۲۸۹۶-۳۱۱۹ متر) و عمق ۱۵-۳۰ سانتی‌متر و کم‌ترین میزان ترسیب کربن در حدود ۲۲۵۰ گرم در مترمربع مربوط به طبقه ارتفاعی ۲ (۲۸۹۶-۲۷۳۰ متر) و عمق ۱۵-۰ سانتی‌متر است. علاوه‌براین، نتایج نشان داد که در میان رویشگاه‌های مورد مطالعه، علفزار به‌دلیل محتوای بالاتر کربن آلی، نیتروژن و ترسیب کربن نسبت به بوته‌زار، کیفیت خاک بهتری دارد. این ویژگی‌ها اثرات مثبتی در بهبود ذخیره‌سازی کربن و حفظ سلامت خاک در بوم‌سازگان مرتعی دارند. در نهایت، این مطالعه تأکید دارد که مدیریت پایدار مراتع و توجه به شرایط پستی و بلندی و ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک می‌تواند به‌طور مؤثری در افزایش ترسیب کربن و مقابله با تغییر اقلیم نقش ایفا کند. شناسایی الگوهای ترسیب کربن در این بوم‌سازگان‌ها، به‌ویژه در شرایط اقلیمی متغیر، برای توسعه راهکارهای مدیریتی مناسب و بهبود ظرفیت ذخیره‌سازی کربن در مراتع، امری حیاتی است.

References

- Aghababaei, M., Ebrahimi, A., Naghipour, A. A., & Asadi, E. (2025). Mapping Plant Ecological Units to Quantify Ecosystem Services (Carbon Sequestration) in the Semi-Steppe Rangelands of Chaharmahal and Bakhtiari Province. *Rangeland*, 18(3), 432-450. <http://rangelandsrm.ir/article-1-1269-fa.html>. (In Persian)
- Ai, M., Wei, Y., Yan, B., & Sun, Y. (2018). A Summary of the Impact of Land Degradation on Soil Carbon Sequestration. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 394(5), 052028. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/394/5/052028>
- Alizadeh, M., Ghorbani, A., Moameri, M., Badrzadeh Orang, M., Bidar Lord, M., & Sharifi, J. (2023). Investigating the composition and diversity of plants and effective factors in different elevational classes in Alvares-Sabalan peak gradient. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 21(2), 336-316. <https://doi.org/10.22092/ijfrpr.2023.362660.1588>. (in Persian)
- Alizadeh, M., Mahdavi, M., Jouri, M. H., Mahdavi, S., & Malekpour, B. (2011). Estimation of soil carbon sequestration in steppic rangelands (Case study: steppe rangeland Rudshur, Saveh). *Rangeland*, 5(2), 163-170. <https://sid.ir/paper/136214/fa>. (In Persian)
- Allison, L. E. (1965). Organic Carbon. In C. A. Black, D. D. Evans, J. L. White, L. E. Ensminger, F. E. Clark (Eds.), *Methods of Soil Analysis*, Part 2 (pp. 1367-1376). <https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=3147904>
- An, H., & Li, G. (2015). Effects of grazing on carbon and nitrogen in plants and soils in a semiarid desert grassland, China. *Journal of Arid Land*, 7, 341-349. <https://doi.org/10.1007/s40333-014-0049-x>
- Arzani, H. (1997). National plan for rangeland assessment in different climatic regions of the country. Research Institute of Forests and Rangelands. (In Persian)
- Basiri, M., Jalalian, A., & Wahabi, M. R. (1989). Seed multiplication plan and habitat study of indigenous rangeland plants in Fereydun region: Vegetation coverage and soil science report. Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology. (In Persian)
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk density In Klute, A. (Ed.), *Methods of Soils Analysis. Part I. Physical & Mineralogical Methods*, *Soil Science Society of America*, 9(1), 361-376.
- Conant, R. T., Paustian, K., & Elliott, E. T. (2001). Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. *Ecological Applications*, 11(2), 343-355. <https://doi.org/10.1890/1051-0761>
- Deng, L., Shangguan, Z. P., Wu, G. L., & Chang, X. F. (2017). Effects of grazing exclusion on carbon sequestration in China's grassland. *Earth-Science Reviews*, 173, 84-95. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.08.008>

- Dianati Tilki, Q., Naqipourborj, A. A., Tavakkoli, H., Heydarian Aghakhani, M., & Saeed Afkhamshelra, M. R. (2009). Effect of grazing exclusion on soil carbon sequestration and plant cover in semi-arid rangelands of North Khorasan. *Rangeland*, 3(4), 668-679. (In Persian)
- Eskandari Shahreki, A., Kiani, B., & Iranmanesh, Y. (2016). The effect of different land uses on soil carbon sequestration. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 24(3), 379-389. (In Persian)
- Farokhzadeh, B., Ghasemi, B., Ataiean, B., & Akhzari, D. (2023). Effective Physiological parameters and some physio-chemical parameters on soil organic carbon storage in Gonbad rangelands. *Rangeland*, 16(4), 846-859. <http://rangelandsrm.ir/article-1-1170-fa.html>. (In Persian)
- Gao, Y., Cheng, J., Liu, W., Wu, Y., Yu, L., Chen, A., & Jing, G. (2015). Distinguishing carbon and nitrogen storage in plant and soil of grassland under different climates in the Loess Plateau, China. *Arid Land Research and Management*, 29(1), 125-139. <https://doi.org/10.1080/15324982.2014.917387>
- Ghafari, S., A Ghorbani, M Moameri, R Mostafazadeh, M Bidarlord, A. Kakehmami (2020). Floristic diversity and distribution patterns along an elevational gradient in the Northern Part of the Ardabil Province rangelands, Iran, *Mountain Research and Development*, 40(1), R37, <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-18-00089.1>
- Ghafari, S., Ghorbani, A., Moameri, M., Mostafazadeh, R., Bidarlord, M., & Kakehmami, A. (2020). Patterns of distribution and plant diversity in along elevational gradient (Case study: Moghan-Sabalan rangelands). *Journal of Plant Ecosystem Conservation*, 8(16), 37-54. <http://pec.gonbad.ac.ir/article-1-587-fa.html>. (In Persian)
- Ghorbani, A., Ahmad Abadi, S. & Elyasi Brojeni, H. (2013). Ecological characteristics of medicinal plants in rangeland ecosystems of ZilbarChay watershed of East Azerbaijan. *Plant Ecosystem Conservation*, 1(1), 65-86. <http://pec.gonbad.ac.ir/article-1-43-en.html>. (in Persian)
- Ghorbani, A., Moameri, M., Abbasi Khalaki, M., Lazemi Zare, S., Baghaei, M., Hashemi Majd, K., & Bahrami, B. (2024). Investigating changes in carbon sequestration and some soil properties in the elevation gradient of rangelands in the north of Sablan, Iran. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(1), 135-150. <https://doi.org/10.22098/mmws.2023.12245.1218>. (In Persian)
- Ghorbani, A., Pourali, A., Baderzadeh, M., Teymorzadeh, A., Sharifi Neyaragh, J. & Pournemati, A. (2014). The effect of distance on flora, life forms, chrotype, species diversity and evenness in three villages in Ardabil Province. *Iranian Journal of Plant Ecosystem Conservation*, 5(2), 91-108. <http://pec.gonbad.ac.ir/article-1-136-en.html>. (in Persian)
- Ghorbani, E., Nazari Anbaran, F., Asghari, A., Azimi Mo'atem, F., & Molaei Shams Asbi, M. (2018). The effect of some ecological factors on plant cover distribution in the grass-bush physiognomy unit of the Fakhrabad-Shabil altitudinal gradient (North Sabalan). *Plant Ecosystem Conservation*, 6(12), 215-238. <https://sid.ir/paper/259572/fa>. (In Persian)
- Ghorbani, E., Nazari Anbaran, F., Asghari, A., Azimi Mo'atem, F., & Molaei Shams Asbi, M. (2017). The effect of some ecological factors on plant cover distribution in the grass-bush physiognomy unit of the Fakhrabad-Shabil altitudinal gradient (North Sabalan). *Plant Ecosystem Conservation*, 6(12), 215-238. https://pec.gonbad.ac.ir/files/site1/user_files_2f3b62/ardavanica-A-10-36-9-92d6773.pdf. (In Persian)
- Ghoreyshi, R., Goly Kalanpa, E., Motamedji, J., & Keivan Behjou, F. (2014). Carbon sequestration capacity in rangeland ecosystems and it's relation with soil physical and chemical characteristics in rangelands of Khoy. *Applied Soil Research*, 1(2), 34-44. https://asr.urmia.ac.ir/article_20124.html. (In Persian)
- Habibi, A., & Sarabadiani, M. (2022). Practical SPSS training. Tehran, Narvan. (In Persian)
- Henry, B., Allen, D., Badgery, W., Bray, S., Carter, J., Dalal, R. C., & McMillan, H. (2024). Soil carbon sequestration in rangelands: a critical review of the impacts of major management strategies. *The Rangeland Journal*, 46(3), 1-23.
- Jafarian, Z., & Ghorbani, Z. (2023). Prediction of soil carbon sequestration in rangelands based on soil sampling depth and elevation using response surface methodology. *Journal of Rangeland*, 17(2), 179-194. <http://rangelandsrm.ir/article-1-1129-fa.html>. (In Persian)
- Jakšić, S., Ninkov, J., Milić, S., Vasin, J., Živanov, M., Jakšić, D., & Komlen, V. (2021). Influence of slope gradient and aspect on soil organic carbon content in the region of Niš, Serbia. *Sustainability*, 13(15), 8332. <https://doi.org/10.3390/su13158332>
- Janjani, N., Azizi, Z., Dehshiri, M. M., & Baikpour, S. (2022). Effects of aspect and elevation on carbon sequestration process in Tehran Suburbs vegetation. *Geographical Research*, 37(2), 213-219. <http://georesearch.ir/article-1-1302-fa.html>. (In Persian)
- Kolahi, N. (2005). A study on carbon sequestration in dominant shrub plants and soils of Haydera-Pasht rangelands in Hamadan province (Master's thesis, Rangeland Management, Islamic Azad University, Tehran, Science and Research Branch). (In Persian)
- Kumar, S., Srivastava, P. K., & Snehmani. (2017). GIS-based MCDA-AHP modelling for avalanche susceptibility mapping of Nubra valley region, Indian Himalaya. *Geocarto International*, 32(11), 1254-1267. <https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1206626>
- Lal, R. (2004a). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623-1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>

- Lal, R. (2004b). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1-2), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>
- Masoudi, M. (2003). *Rangeland Management in Iran* (333 p.). Astan Quds Razavi Publishing. (In Persian)
- Masson-Delmotte, V., Pörtner, H. O., Skea, J., Buendía, E. C., Zhai, P., & Roberts, D. (2019). Climate change and land. IPCC Report.
- McCune, B., & Grace, J.B. (2002). Analysis of ecological communities. MjM Software Design: Gleneden Beach. ISBN 0-9721290-0-6. 300 pp.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 17(22), 179-183.
- Moslempour, R., Yari, R., & Mirmiran, S. M. (2025). Comparison of soil carbon sequestration of several plant species in the desert areas of South Khorasan. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 31(4), 334-344. doi: 10.22092/ijrdr.2025.132714. (In Persian)
- Nazari Anbaran, F. (2014). A study on the structure, composition, and diversity of rangeland species on the northern slopes of Sabalan (M.Sc. Thesis, Rangeland Management, Mohaghegh Ardabili University). (In Persian)
- Niknahad, H., Aghtabye, A., & Akbarlou, M. (2017). Effects of grazing exclusion on some soil physical and, its erodibility and carbon sequestration (Case study: Bozdaghin rangelands, North Khorasan, Iran). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 24(4), 708-718. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2017.114058>. (In Persian)
- Okon, M. A., Osuji, G. E., Uzoho, B. U., & Ahukaemere, G. M. (2014). Soil organic carbon storage as affected by physiographic positions on a catenary landscape in an ultisol in owerri. *International Journal of Research in Agriculture and Forestry*, 1(2), 18-22. <http://www.ijraf.org/v1-i2>
- Pirestani, N., Ahmadi Nadoushan, M., Abolhassani, M. H., & Zamani-Ahmadmahooodi, R. (2023). Investigating the relationship between the amount of total nitrogen and some soil characteristics in Zarin Shahr Region. *Iranian Journal of Soil Research*, 37(2), 167-182. doi: 10.22092/ijsr.2023.359235.674. (In Persian)
- Poeplau, C., & Don, A. (2015). Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops—A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 200, 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024>
- Rafiei, H. R., Jafari, A., Heidari, A., Farpoor, M. H., & Abbasnejad, A. (2021). Organic and inorganic carbon storage in the soils of Sardooeyeh Semi-arid Region in South of Kerman. *Water and Soil*, 35(1), 33-48. <https://doi.org/10.22067/jsw.v35i1.82133>. (In Persian)
- Riley, S. J., DeGloria, S. D. & Elliot, R., (1999), A Terrain Ruggedness Index that Quantifies Topographic Heterogeneity, *Intermountain Journal of Sciences*, 5, 1-4. https://download.osgeo.org/qgis/doc/reference-docs/Terrain_Ruggedness_Index.pdf
- Shekastehband, F., Mohammadi Moghaddam, S., Shahab Arkhazlou, H., & Ghorbani, E. (2022). Investigation changes of soil macro elements and minerals of plants with different vegetative life forms in the Northern half of Ardabil province. *Plant Ecosystem Conservation*, 20, 127-147. <http://pec.gonbad.ac.ir/article-1-827-fa.html>. (In Persian)
- Silveira, M. L., Rodrigues da Cruz, P. J., Vendramini, J. M. B., Boughton, E., Bracho, R., & da Silva Cardoso, A. (2024). Opportunities to increase soil carbon sequestration in grazing lands in the southeastern United States. *Grassland Research*, 3(1), 69-78. <https://doi.org/10.1002/glr2.12074>
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241(2), 155–176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Stanley, P., Roche, L., & Bowles, T. (2025). Amping up soil carbon: soil carbon stocks in California rangelands under adaptive multi-paddock and conventional grazing management. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 23(1), 2461826. <https://doi.org/10.1080/14735903.2025.2461826>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38.
- Wan, L., Liu, G., Sun, J., Ma, J., Cheng, H., Shen, Y., & Su, X. (2024). Optimizing grazing exclusion duration for carbon sequestration in grasslands: Incorporating temporal heterogeneity of aboveground biomass and soil organic carbon. *Science of The Total Environment*, 927, 172006. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172006>
- Weiss, A. D., (2001). Topographic Positions and Landforms Analysis, *ESRI International User Conference, San Diego, CA*, 3, PP. 9-13. https://env761.github.io/assets/files/tpi-poster-tnc_18x22.pdf
- Yousefian, M., Mahdavi, K., Mahdavi, M., & Tamartash, R. (2011). Evaluation of enclosure effects on soil carbon storage (Case study: Rangeland of Shahtappeh-Chah Mahmood and Chiro in Semnan province). *Journal of Rangeland Science*, 2(1), 439-448.