Journal of Rangeland

Print ISSN: 2008-0891

Online ISSN: 2676-5039

# Analysis of the relationship between carbon sequestration and environmental factors in grassland and grass-shrubland habitats (Case study: Northern Sabalan Rangelands)

**Vahideh Moradzadeh[1], Ardavan Ghorbani*[2], Neda Mirghaffari Toulon[3], Mehdi Moameri[4], Abazar Esmali-Ouri[4], Zeinab Hazbavi[5], Ali Teymorzadeh[6], Akbar Ghavidel[7], Mohadeseh Amiri[8]**

[1]. PhD Student in Rangeland Science and Engineering, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

[2]. Corresponding Author, Prof., Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. a_ghorbani@uma.ac.ir

[3]. MSc. in Range Management, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

[4]. Prof., Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

[5]. Associate Prof., Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

[6]. Retired Assistant Prof., Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

[7]. Associate Prof., Department of Soil Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

[8]. Assistant Prof., Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

**Article Info**

**Article type:**
Research Full Paper

**2026; Vol 20, Issue 3**

**Article history:**
Received: 23.08.2025
Revised: 08.01.2026
Accepted: 17.02.2026

**Keywords:**
Soil Carbon Sequestration,
Sabalan Rangelands,
Grassland Vegetation,
Slope,
Topography,
Soil Quality.

## Abstract

**Background and Objective**: Rangelands, as one of the most important natural ecosystems, play a crucial role in carbon sequestration and mitigating climate change effects, while being influenced by multiple factors such as management practices, vegetation composition, climatic conditions, and soil characteristics. Considering the ecological significance and large extent of the Sabalan rangelands in northwestern Iran, along with the existing gap in comprehensive studies on their carbon storage capacity, this research was conducted to identify soil carbon sequestration patterns under the influence of slope, vegetation structure, and soil depth, and to provide evidence-based management recommendations.

**Methodology:** This study was conducted in the northern rangelands of Sabalan, located in the southeast of Meshginshahr County. Two main vegetation habitats, grassland and grass-shrubland, were selected. In each habitat, three 100-meter transects were established, with a total of 30 one-square-meter plots. Vegetation characteristics, including canopy cover percentage and density, bare soil, litter, and rock fragments, were recorded. Soil samples were collected from two depths (0–15 cm and 15–30 cm) and across four slope classes in grasslands (0–20%, 20–40%, 40–60%, and 60–80%) and three slope classes in grass-shrublands (0–20%, 20–40%, and 40–60%). A total 12 physical and chemical soil properties, including texture (clay, silt, sand and bulk density), organic and particulate carbon, nitrogen, lime, phosphorus, potassium, pH, and electrical conductivity (EC) were measured



[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]

in the laboratory. Carbon sequestration was calculated based on organic carbon content, bulk density, and soil depth. Climatic charactersitics (annual precipitation, annual temperature, standardized precipitation index (SPI)) were calculated, while topographic characteristics, including elevation, slope steepness, slope aspect, flow accumulation, topographic position index (TPI), topographic wetness index (TWI), terrain ruggedness index (TRI), and hillshadeand were computed. Data analysis was performed using paired and independent t-tests, GLM, ANOVA, and factor analysis in SPSS and R software, with spatial maps generated in ArcGIS.

**Results**: The results indicated that clay (21.68%), silt (28.91%), organic carbon (3.38%), particulate organic carbon (2.79%), and carbon sequestration (66.59 t/ha) were significantly higher ($p<0.01$) in grasslands compared to grass-shrublands, while sand (54.70%), pH (6.29), and electrical conductivity (633.62 µS/cm) were higher in grass-shrublands. The surface soil layer (0–15 cm) exhibited higher carbon sequestration (67.84 t/ha) compared to the subsurface layer. Lower slopes (0–20%) with lower clay content (0.00%), higher sand content (45.32%), and reduced erosion provided better conditions for carbon sequestration, whereas steeper slopes (60–80%) with increased sand content (56.25%) and reduced organic carbon limited carbon sequestration capacity ($p<0.01$). Factor analysis identified four major components influencing carbon sequestration, including climatic variables, land cover, topography, and soil properties, which together explained 53% of the total variance in the dataset.

**Conclusion**: These findings indicated that managing lower slope gradients (0–20%) and conserving grassland habitats can optimize carbon sequestration in the Sabalan rangelands. The results provide a scientific basis for sustainable rangeland management and enhancing ecological services to mitigate climate change. They highlighted the necessity of protecting grasslands, controlling erosion in steep slopes, and improving soil quality by reducing grazing pressure. Implementing such strategies can strengthen the resilience of rangeland ecosystems and enhance their capacity to reduce greenhouse gas emissions.

**Cite this article:** Moradzadeh, V., A. Ghorbani, N. Mirghaffari Toulon, M. Moameri, A. Esmali-Ouri, Z. Hazbavi, A. Teymorzadeh, A. Ghavidel, M. Amiri, 2026. Analysis of the relationship between carbon sequestration and environmental factors in grassland and grass-shrubland habitats (Case study: Northern Sabalan Rangelands). Journal of Rangeland, 20(3): 318-337.



© The Author(s).

DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1

Publisher: Iranian Society for Range Management

[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]

مـــرتـــع

شاپا چاپی: ۰۸۹۱-۲۰۰۸

شاپا الکترونیکی: ۵۰۳۹-۲۶۷۶

# تحلیل رابطه بین ترسیب کربن و عوامل محیطی در رویشگاه‌های علف‌زار و علف-بوته‌زار (مطالعه موردی: مراتع شمال سبلان)

**وحیده مرادزاده[۱]، اردوان قربانی[۲*]، ندا میرغفاری تولون[۳]، مهدی معمری[۴]، اباذر اسمعلی‌عوری[۴]، زینب حزباوی[۶]، علی تیمورزاده[۷]، اکبر قویدل[۸]، محدثه امیری[۹]**

[۱] دانشجوی دکتری علوم و مهندسی مرتع، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

[۲] نویسنده مسئول، استاد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایان‌نامه: a_ghorbani@uma.ac.ir

[۳] کارشناسی ارشد مهندسی مرتعداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

[۴] استاد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

[۵] دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

[۶] استادیار بازنشسته گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

[۷] دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

[۸] استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:**
مقاله کامل – پژوهشی

**۱۴۰۵؛ جلد ۲۰، شماره ۳**

**تاریخ دریافت** ۱۴۰۴/۰۶/۰۱
**تاریخ ویرایش:** ۱۴۰۴/۱۰/۱۸
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۱۱/۲۸

**واژه‌های کلیدی:**
ترسیب کربن خاک،
مراتع سبلان،
پوشش گیاهی علف‌زار،
شیب،
پستی و بلندی،
کیفیت خاک.

**چکیده**

**سابقه و هدف:** مراتع به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بوم‌سازگان‌های طبیعی، نقش کلیدی در ترسیب کربن و کاهش اثرات تغییر اقلیم دارند و تحت تأثیر عوامل متعددی چون مدیریت، ترکیب گیاهی، شرایط اقلیمی و ویژگی‌های خاک قرار می‌گیرند. با توجه به اهمیت مراتع سبلان در شمال غرب کشور از لحاظ وسعت و نقش آن‌ها در ذخیره‌سازی کربن و خلأ مطالعات جامع در این زمینه، این پژوهش با هدف تحلیل رابطه بین ترسیب کربن و عوامل محیطی در رویشگاه‌های علف‌زار و علف-بوته‌زار (مطالعه موردی: مراتع شمال سبلان) انجام شد.

**مواد و روش:** این پژوهش در مراتع شمال سبلان واقع در جنوب‌شرقی شهرستان مشگین‌شهر انجام شد. دو نوع رویشگاه اصلی شامل علف‌زار و علف-بوته‌زار انتخاب شد. در هر رویشگاه سه ترانسکت ۱۰۰ متری و در مجموع ۳۰ پلات یک مترمربعی استقرار یافت و ویژگی‌های پوشش گیاهی شامل درصد تاج‌پوشش، تراکم گیاهی، خاک لخت، لاشبرگ و سنگ و سنگریزه ثبت شد. نمونه‌برداری خاک از دو عمق (۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متر) و در چهار طبقه شیب در علف‌زار (۲۰-۰، ۴۰-۲۰، ۶۰-۴۰ و ۸۰-۶۰ درصد) و سه طبقه شیب در علف-بوته‌زار (۲۰-۰، ۴۰-۲۰ و ۶۰-۴۰ درصد) انجام شد. در مجموع، ۱۲ ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت (رس، سیلت، شن و وزن مخصوص ظاهری)، کربن آلی و ذره‌ای، نیتروژن، آهک، فسفر، پتاسیم، pH و هدایت الکتریکی (EC) در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. ترسیب کربن بر اساس مقادیر کربن آلی، وزن مخصوص ظاهری و عمق خاک محاسبه شد. ویژگی‌های اقلیمی (بارش سالانه، دمای سالانه و شاخص بارش استاندارد شده (SPI)) از ایستگاه‌های هواشناسی و گرادیان ارتفاعی استخراج و شاخص‌های پستی و بلندی شامل ارتفاع، تندی شیب، جهت شیب، تجمع جریان، شاخص موقعیت پستی و بلندی (TPI)، شاخص ناهمواری زمین (TRI)، شاخص رطوبت پستی و بلندی (TWI) و سایه‌زدایی از مدل رقومی ارتفاع به‌دست آمد.



[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]

تحلیل داده‌ها با آزمون‌های t جفتی و مستقل، GLM، ANOVA و تحلیل عاملی در نرم‌افزارهای SPSS و R انجام شد و نقشه‌های مکانی در ArcGIS ترسیم شد.

**نتایج:** نتایج نشان داد که مقادیر متغیرهای رس (۲۱/۶۸ درصد)، سیلت (۲۸/۹۱ درصد)، کربن آلی (۳/۳۸ درصد)، کربن آلی ذره‌ای (۲/۷۹ درصد) و ترسیب کربن (۶۶/۵۹ تن بر هکتار) در علف‌زار به‌طور معنی‌داری ($p<۰/۰۱$) نسبت به علف-بوته‌زار بیش‌تر بود، در حالی‌که شن (۵۴/۷۰ درصد)، pH (۶/۲۹) و هدایت الکتریکی (۶۳۳/۶۲ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) در علف-بوته‌زار بالاتر بود. لایه سطحی خاک (۱۵-۰ سانتی‌متری) ترسیب کربن بیش‌تری (۶۷/۸۴ تن بر هکتار) نسبت به لایه زیرین نشان داد. شیب‌های پایین‌تر (۲۰-۰ درصد) با درصد رس کم‌تر (۰/۰۰ درصد)، شن بیش‌تر (۴۵/۳۲ درصد) و فرسایش کاهش‌یافته، شرایط بهتری برای ترسیب کربن فراهم کردند، در حالی‌که شیب‌های تندتر (۸۰-۶۰ درصد) با افزایش شن (۵۶/۲۵ درصد) و کاهش کربن آلی، ظرفیت ترسیب کربن را محدود کردند ($p<۰/۰۱$). تحلیل عاملی، چهار عامل کلیدی مؤثر بر ترسیب کربن (ویژگی‌های اقلیمی، پوشش زمین، پستی و بلندی و خاک) را شناسایی کرد که ۵۳ درصد واریانس داده‌ها را تبیین نمود.

**نتیجه‌گیری:** این یافته‌ها نشان می‌دهند که مدیریت شیب‌های پایین‌تر (۲۰-۰ درصد) و حفظ رویشگاه‌های علف‌زار می‌تواند ترسیب کربن را در مراتع سبلان بهینه کند. این نتایج مبنای علمی برای مدیریت پایدار مراتع و ارتقاء خدمات بوم‌شناختی در راستای کاهش تغییر اقلیم فراهم می‌آورد و بر لزوم حفاظت از علف‌زارها، مهار فرسایش در شیب‌های تند و بهبود کیفیت خاک از طریق کاهش فشار چرا تأکید دارد. اجرای چنین راهبردهایی می‌تواند پایداری بوم‌سازگان‌های مرتعی و نقش آن‌ها در کاهش گازهای گلخانه‌ای را تقویت کند.

**استناد:** مرادزاده، و.، ا. قربانی، ن. میرغفاری تولون، م. معمری، ا. اسمعلی‌عوری، ز. حزباوی، ع. تیمورزاده، ا. قویدل، م. امیری، ۱۴۰۵. تحلیل رابطه بین ترسیب کربن و عوامل محیطی در رویشگاه‌های علف‌زار و علف-بوته‌زار (مطالعه موردی: مراتع شمال سبلان). مرتع، ۲۰(۳): ۳۱۸-۳۳۷.

DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1

**ناشر**: انجمن علمی مرتعداری ایران © نویسندگان

[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]

**مقدمه**

مراتع نقشی مهمی در کاهش اثرات تغییر اقلیم ایفا می‌کنند، زیرا حدود نیمی از سطح خشکی‌های جهان را پوشش می‌دهند (۱۱). بر همین اساس، پتانسیل زیادی برای جذب کربن دارند، چرا که حدود نیمی از سطح خشکی‌های زمین را پوشش می‌دهند و بیش از ۱۰ درصد از زی‌توده کربن زمینی و بین ۱۰ تا ۳۰ درصد از کربن آلی خاک در سطح جهان را ذخیره می‌کنند (۳۸ و ۳۹). برآورد شده است که مراتع در سراسر جهان با نرخ ۰/۵ پتاگرم کربن در سال ($Pg\ C\ yr^{-1}$)، کربن از خاک جذب می‌کنند (۳۸ و ۳۹). اگرچه نرخ جذب کربن خاک در مراتع نسبت به اراضی زراعی و چراگاه‌های بهبودیافته پایین‌تر است، اما افزایش کربن زمینی در مراتع ناشی از مدیریت، به‌دلیل وسعت زیاد این نوع از منابع زمینی، مقدار قابل توجهی از جذب کربن را تشکیل می‌دهد و معمولاً به ورودی‌های اندکی نیاز دارد. این بدان‌معناست که تغییرات نسبتاً جزئی در میزان ذخیره کربن در بوم‌سازگان‌های مرتعی می‌توانند چرخه جهانی کربن را تحت تأثیر قرار داده و به‌طور غیرمستقیم بر اقلیم اثر بگذارند (۵، ۳۱ و ۳۷).

ذخیره‌سازی کربن در بوم‌سازگان‌های مرتعی به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در مقابله با تغییر اقلیم و کاهش گازهای گلخانه‌ای، موضوعی گسترده و پیچیده است که عوامل متعددی بر آن تأثیرگذارند. پژوهش‌های متعدد نشان می‌دهند که مدیریت مراتع، تنوع زیستی، ویژگی‌های خاک و شرایط اقلیمی مانند بارندگی، نقش کلیدی در تعیین میزان جذب و ذخیره کربن دارند (۷، ۳۰ و ۴۳).

نیک‌نهاد و همکاران (۲۰۱۵) در مراتع گمیشان ایران دریافتند که حذف چرای دام منجر به بهبود پوشش گیاهی و افزایش ذخیره کربن در زی‌توده و خاک می‌شود، به‌طوری‌که پس از ۲۰ سال حذف چرای دام، ارزش اقتصادی ذخیره کربن به‌طور چشم‌گیری افزایش یافت. فییسا و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی تأثیر مدیریت قرق در مراتع نیمه‌خشک شرق آفریقا پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که اگرچه تفاوت معنی‌داری در ویژگی‌های خاک بین مناطق قرق شده و مراتع باز مشاهده نشد، اما میزان کربن آلی خاک در مناطق قرق بالاتر بود. قرق‌های بیش از ۳۰ سال دارای بیش‌ترین ذخیره کربن بودند. هم‌چنین، مدیریت قرق تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های پوشش گیاهی داشت. این یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده از قرق می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش جذب کربن و مقابله با تغییر اقلیم در مراتع استفاده شود. در مطالعات بوم‌شناختی شرق آفریقا توسط مگالولا و همکاران (۲۰۲۱)، اهمیت مدیریت پایدار مراتع در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش ظرفیت جذب کربن مورد تأکید قرار گرفته است. سنایی و همکاران (۲۰۲۳) بررسی اثرات شدت چرای دام بر تنوع گیاهی و ذخیره کربن در بوم‌سازگان‌های مرتعی نشان داد که چرای شدید با کاهش تنوع گیاهی، ظرفیت جذب کربن را کاهش می‌دهد و مدیریت مناسب چرای دام برای حفظ تنوع زیستی و افزایش ذخیره کربن ضروری است. رودریگز و همکاران (۲۰۲۳) و هنری و همکاران (۲۰۲۵) بر روی ذخیره کربن در مراتع و خاک‌ها نشان می‌دهد که عوامل محیطی مانند بارندگی و نوع خاک، نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان ذخیره‌سازی کربن دارند و تأثیر مدیریت مراتع در بسیاری موارد هنوز نیازمند تحقیقات بیش‌تر است. روش‌هایی مانند چرای تناوبی اثرات متفاوتی دارند و استفاده از علوفه‌های پرمحصول‌تر معمولاً منجر به افزایش ذخیره کربن خاک می‌شود.

شیدای کرکج و همکاران (۲۰۱۷) در مراتع آذربایجان شرقی، با استفاده از تحلیل مسیر و رگرسیون گام‌به‌گام نشان دادند که ویژگی‌های فیزیکی خاک (مانند رس، سیلت و رطوبت اشباع) تأثیر مستقیم و بیش‌تری نسبت به ویژگی‌های شیمیایی بر ذخیره کربن آلی خاک دارند و مدیریت برای جلوگیری از فرسایش ذرات ریز و شوری خاک می‌تواند پتانسیل ذخیره کربن را حفظ کند. این یافته‌ها بر نقش کلیدی بافت و کیفیت خاک در مراتع شمال‌غرب ایران تأکید دارند. یزدان‌شناس و همکاران (۲۰۱۸) ارتباط میان ویژگی‌های پوشش گیاهی و ذخیره کربن خاک نیز مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها نشان دادند که ترکیب گونه‌ای و ساختار فیزیکی خاک از عوامل مهم افزایش ظرفیت کربن‌گیری مراتع مناطق خشک است. فانگ و همکاران (۲۰۱۸) با تحلیل سامانه‌های بوم‌شناختی در چین دریافتند که تعاملات پیچیده بین اقلیم، فعالیت‌های انسانی و ویژگی‌های زیستی گیاهان، تأثیر قابل توجهی بر ذخایر کربن دارد. قربانی و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعات خود در



[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]

شمال کوه سبلان، نشان دادند که با افزایش ارتفاع میزان کربن ترسیب‌شده در دو رویشگاه علف‌زار و علف-بوته‌زار افزایش می‌یابد و بیش‌ترین ترسیب کربن در عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع بیش از ۲۵۰۰ متر مشاهده شده است. هم‌چنین درصد رس، سیلت، کربن آلی و ماده آلی همبستگی مثبت و درصد شن، pH و هدایت الکتریکی با ترسیب کربن همبستگی منفی داشتند. مرادزاده و همکاران (۲۰۲۵) طی مطالعه‌ای در مراتع شمال سبلان دریافتند که عوامل اقلیمی، خاکی و پستی و بلندی به‌طور معنی‌داری بر ترسیب کربن مؤثرند؛ رویشگاه علف‌زار نسبت به رویشگاه بوته‌زار، کربن آلی و ترسیب کربن بیش‌تری دارد. هم‌چنین، دامنه‌های شمالی نسبت به جنوبی، کربن آلی و رس بیش‌تری ذخیره می‌کنند و افزایش عمق خاک موجب کاهش ترسیب کربن می‌شود.

آکپا و همکاران (۲۰۱۶) در نیجریه، ذخیره‌سازی کربن خاک را در لایه‌های مختلف ارزیابی و ظرفیت ذخیره‌سازی خاک را در مقیاس ملی تخمین زدند که نشان‌دهنده نقش مهم بازسازی و مدیریت خاک در افزایش جذب کربن است. جهانداری و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل InVEST به بررسی اثرات توسعه شهری بر ترسیب و ذخیره کربن در حوزه آبخیز بندرعباس پرداختند و نشان دادند که توسعه اراضی کشاورزی موجب افزایش ظرفیت ترسیب کربن شده است؛ افزایشی که ارزش اقتصادی قابل توجهی دارد و بر ضرورت ادغام خدمات بوم‌سازگان در برنامه‌ریزی شهری تأکید می‌کند. جلورو و همکاران (۲۰۲۵) در حوزه آبخیز کجور (مازندران)، با استفاده از مدل InVEST و تحلیل توپوگرافی نشان دادند که شیب‌های متوسط (۵-۱۲ درصد) و ارتفاعات متوسط (۱۷۵۰-۲۱۵۰ متر) بیش‌ترین ظرفیت ترسیب کربن را دارند، در حالی‌که شیب‌های تند و ارتفاعات بالا ظرفیت کم‌تری نشان می‌دهند. این یافته‌ها بر اهمیت ویژگی‌های توپوگرافی در توزیع مکانی ترسیب کربن در بوم‌سازگان‌های کوهستانی ایران تأکید دارند.

در مجموع، بررسی همه‌جانبه مطالعات پیشین نشان می‌دهد که ذخیره‌سازی کربن در مراتع تحت تأثیر ترکیبی از عوامل مدیریتی، اقلیمی، زیستی و خاک‌شناسی است، اما مطالعات جامع در مراتع کوهستانی شمال‌غرب ایران، به‌ویژه با تمرکز همزمان بر شیب، ترکیب رویشگاهی و عمق خاک، محدود بوده‌اند. نوآوری اصلی پژوهش حاضر، در تحلیل جامع و یکپارچه اثرات ویژگی‌های فیزیکی–شیمیایی خاک، شرایط اقلیمی (میانگین بارش، میانگین دما و شاخص استاندارد بارش)، شیب و ساختار پوشش گیاهی در کنار تغییرات عمقی خاک بر ظرفیت ترسیب کربن در بوم‌سازگان‌های مرتعی شمال سبلان است. در این تحقیق با اتکاء به رویکردهای نوین آماری از جمله تحلیل عاملی، شاخص‌های کلیدی مؤثر بر کارایی ترسیب کربن خاک شناسایی شده و الگوهای مکانی-عمقی ذخیره‌سازی کربن تبیین شده است. در این مطالعه برای نخستین‌بار نقش هم‌زمان عوامل خاکی، اقلیمی و بوم‌شناختی را در مراتع کوهستانی شمال‌غرب ایران بررسی شده و خلأ موجود در مطالعات کاربردی این حوزه برطرف شده است. نتایج این تحقیق مبنایی علمی و مبتنی بر شواهد برای مدیریت پایدار مراتع، افزایش خدمات بوم‌شناختی کربن و ارتقاء تاب‌آوری بوم‌سازگان در برابر تغییر اقلیم فراهم می‌آورد. بنابراین، هدف این پژوهش بررسی ترسیب کربن خاک تحت تأثیر ویژگی‌های خاک، شرایط اقلیمی، ساختار پوشش گیاهی و شیب در بوم‌سازگان‌های مرتعی شمال سبلان و تبیین عوامل مؤثر بر آن به‌منظور ارائه راهکارهای مدیریتی مبتنی بر شواهد علمی است.

## مواد و روش

### منطقه مورد مطالعه

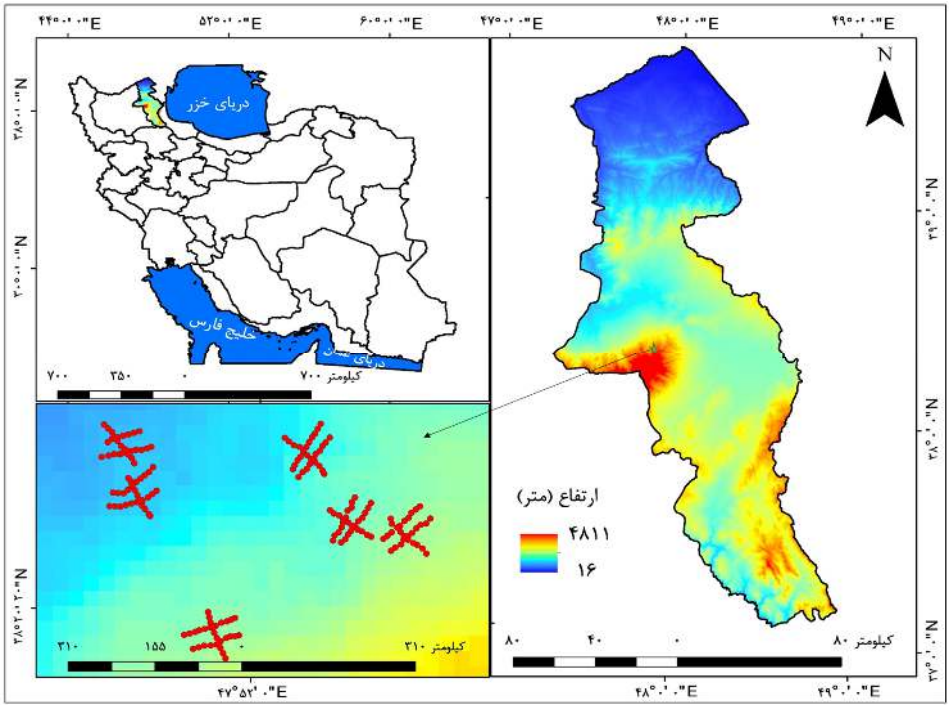
منطقه مطالعاتی حدود ۱۵۰ کیلومتری استان اردبیل و در فاصله ۴۸ کیلومتری جنوب‌شرقی شهرستان مشگین-شهر، با مختصات طول جغرافیایی ″۴۷ ′۵۱ °۴۷ تا ″۱۴ ′۵۲ °۴۷ شرقی و عرض جغرافیایی ″ ۱۶ ′۲۰ °۳۸ تا ″۳۲ ′۲۰ °۳۸ شمالی واقع شده است (شکل ۱). این محدوده شامل دو نوع رویشگاه اصلی، یعنی علف‌زار و علف-بوته‌زار است که برای بررسی و نمونه‌برداری خاک انتخاب شده‌اند (۱۶ و ۱۲). ارتفاع منطقه بین ۲۳۷۷ تا ۳۰۳۸ متر از سطح دریا متغیر است و به‌عنوان بخشی از مراتع ییلاقی عشایر شاهسون در ارتفاعات میانی سبلان شناخته می‌شود. میانگین بارندگی سالانه در این منطقه حدود ۳۵۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر است و دمای متوسط سالانه، بر اساس داده‌های ۲۰ ساله (۱۳۹۸-۱۳۷۸) و با استفاده از معادله گرادیان دما



[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]

و بارش، در بازه ۰/۲۴ تا ۱۰/۱ درجه سانتی‌گراد قرار دارد. بر اساس طبقه‌بندی دومارتن، اقلیم منطقه در طبقه نیمه‌خشک تا نیمه‌مرطوب سرد جای می‌گیرد. تابستان‌های این ناحیه معتدل بوده، اما در اغلب اوقات سال، ویژگی‌های اقلیم سرد و کوهستانی بر آن غالب است. خاک رویشگاه‌های مورد مطالعه نیز تحت تأثیر این شرایط اقلیمی قرار دارد (۲۸ و ۴۱).




**شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری شده**

## روش تحقیق

### نمونه‌برداری و جمع‌آوری داده‌ها

پس از تیپ‌بندی منطقه بر اساس نمود ظاهری و انتخاب رویشگاه‌های مورد مطالعه، سه محل نمونه‌برداری تعیین شد که در هر محل نمونه‌برداری، سه ترانسکت ۱۰۰ متری استقرار یافت. بدین‌صورت که دو ترانسکت موازی هم و به فاصله ۳۰ متر و ترانسکت سوم عمود بر این دو مستقر شد. انتخاب طول ۱۰۰ متر برای هر ترانسکت و تعداد سه محل نمونه‌برداری در هر رویشگاه (علف‌زار و علف-بوته‌زار)، بر اساس چارچوب مطالعات پیشین منطقه (۲۸، ۱۶ و ۱۲) صورت گرفت. هدف از این چارچوب، دستیابی به مکان‌های بزرگ همگن و قابل مقایسه از نظر آماری بود، به‌طوری‌که هر رویشگاه ۹ ترانسکت و هر ترانسکت ۱۰ پلات نمونه‌برداری را در خود جای دهد. این تعداد نمونه، طبق مطالعات مرتع‌داری، حداقل سطح و تعداد نمونه‌های لازم را برای دستیابی به واریانس و انحراف معیار قابل‌قبول در متغیرهای پوشش و تولید گیاهی در رویشگاه سبلان تأمین می‌کند (۱۳ و ۱۵). پلات‌های یک مترمربعی برای هر ترانسکت به نحوی انتخاب شده‌اند که با توجه به نوع، ترکیب و اندازه گیاهان رویشگاه، تمامی گونه‌های آن امکان حضور در سطح نمونه انتخاب شده را داشته باشند. در مجموع، در هر رویشگاه، ۹ ترانسکت ۱۰۰ متری و ۹۰ پلات یک مترمربعی مستقر شد تا نمایان‌گر دقیق شرایط پوشش گیاهی منطقه باشد.

متغیرهای فیزیوگرافی و پوشش گیاهی اعم از طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع، شیب، تراکم و درصد تاج‌پوشش گیاهی، درصد سنگ و سنگریزه، درصد خاک لخت و درصد لاشبرگ در هر پلات ثبت شد. گونه‌های گیاهی از هر پلات



[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]
[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]

جمع‌آوری و با انتقال به هرباریوم شناسایی شدند. نمونه‌های خاک نیز از پلات‌های اول، پنجم و دهم در طول هر ترانسکت و در دو عمق ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متری خاک در هر طبقه شیب جمع‌آوری شد. با توجه به پوشش گیاهی منطقه که عمدتاً شامل پوشش‌های پهن‌برگان علفی، گندمیان و پوشش‌های بوته‌ای بود، و بر اساس بررسی‌های انجام‌شده در زمینه تخصیص منابع در مراتع استان از جمله سبلان، مشخص شد که عمق ریشه‌دوانی گونه‌های علفی و گرامینه عمدتاً تا ۱۵ سانتی‌متر و گونه‌های بوته‌ای ریشه‌هایی عمیق‌تر عمدتاً بیش از ۱۵ و تا حدود ۳۰ سانتی‌متر هستند. از آن‌جاکه در محدوده مطالعه، سه گروه گیاهی گندمیان، علفی‌ها و بوته‌ای‌ها غالب بودند، لذا عمق نمونه‌برداری ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر برای گونه‌های علفی و گرامینه‌ها و عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر برای گونه‌های بوته‌ای در نظر گرفته شد. در هر عمق از سه محل، نمونه خاک جمع‌آوری شده، سپس با هم مخلوط و یک نمونه برای عمق اول و یک نمونه برای عمق دوم در هر ترانسکت در نظر گرفته شد. بنابراین، برای هر ترانسکت دو نمونه (بر اساس دو عمق مورد نظر) و با وجود سه ترانسکت، در مجموع شش نمونه از هر رویشگاه برداشت شد. نمونه‌ها در هوای آزاد خشک و بعد از خرد نمودن کلوخه‌ها، جدا کردن ریشه‌ها، سنگ و سایر ناخالصی‌ها، از الک دو میلی‌متری عبور داده شد تا برای انجام آزمایش‌های خاک آماده شود.

**تعیین ویژگی‌های خاک**

برای بررسی ویژگی‌های خاک در دو عمق ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵، حدود ۱۲ متغیر مستقل شامل ویژگی‌های فیزیکی (رس، سیلت، شن و وزن مخصوص ظاهری) و شیمیایی (کربن آلی (Organic Carbon, OC)، کربن آلی ذره‌ای (Particulate Organic Carbon, POC)، نیتروژن، آهک، فسفر، پتاسیم، pH و هدایت الکتریکی (EC)) مورد ارزیابی قرار گرفتند. انتخاب این ویژگی‌ها، بر اساس بررسی منابع پیشین مرتبط با ترسیب کربن و تحلیل پوشش گیاهی (۲، ۱۴ و ۲۷) انجام شد که کارایی آن‌ها در تشریح وضعیت خاک به‌طور گسترده تأیید شده است.

جهت تعیین درصد رس، سیلت و شن از روش هیدرومتری استفاده شد. کربن آلی به روش والکی-بلک بر اساس دی‌کرومات پتاسیم برای اکسید کربن آلی اندازه‌گیری شد (۴۴). مقدار کربن آلی ذره‌ای نیز با استفاده از الک مرطوب و جداسازی ذرات بزرگ‌تر از ۵۳ میکرومتر از خاک و سپس تعیین مقدار آن با روش والکی-بلک و دستگاه TOC Analyzer تعیین شد. میزان نیتروژن کل خاک با روش کجلدال محاسبه شد که در آن، پس از هضم اسیدی نمونه، آمونیوم حاصل از آن اندازه‌گیری شد. مقدار pH با روش الکترودی، در سوسپانسیون خاک با آب مقطر یا محلول KCl (نسبت ۲/۵: ۱) و مقدار EC (نشان‌دهنده میزان نمک‌های محلول) با استفاده از EC متر، در محلول اشباع خاک یا عصاره ۲/۵: ۱ (خاک به آب) تعیین شد. روش خنثی‌سازی با استفاده از اسید کلریدریک و تیتراسیون با سود یک نرمال (۳۵) برای اندازه‌گیری درصد آهک، روش اولسون (۱۸) برای اندازه‌گیری فسفر و روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم با دستگاه فلیم‌فتومتر (۱۸) برای تعیین پتاسیم تبادلی استفاده شدند.

**تعیین ویژگی‌های اقلیمی**

متغیرهای اقلیمی به‌عنوان داده ورودی برای انجام تحلیل عاملی با هدف بررسی عوامل مؤثر بر تغییرات ترسیب کربن خاک استفاده شده‌اند. برای تحلیل ویژگی‌های اقلیمی، سه متغیر مهم شامل میانگین بارش سالانه، میانگین دمای سالانه و شاخص بارش استاندارد شده (SPI) مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور محاسبه و تحلیل میانگین بارش در منطقه مورد مطالعه، داده‌های آماری از ایستگاه‌های هواشناسی منتخب استخراج شدند. پس از رفع نواقص آماری، با توجه به ارتفاع ایستگاه‌ها از سطح دریا و میانگین بارش آن‌ها، معادله گرادیان بارش منطقه (ارتفاع-بارش) به‌صورت رابطه ۱ به‌دست آمد:

$$P = 0.1908H + 79.95$$ رابطه ۱)

که در آن؛ P متوسط بارش بر حسب میلی‌متر و H ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر است. با استفاده از این معادله، نقشه هم‌باران منطقه به روش گرادیان ترسیم شد که نشان‌دهنده تغییرات میانگین بارش سالانه بین ۱۶۳ تا ۷۷۰ میلی‌متر است. میانگین بارش سالانه در شش مکان مورد مطالعه نیز در بازه ۵۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر قرار دارد. با افزایش ارتفاع، دمای هوا کاهش می‌یابد. بر این اساس، با



[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]

استفاده از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک، کلیماتولوژی و تبخیرسنجی، گرادیان میانگین دما و حداکثر دمای سالانه به‌صورت رابطه‌های زیر محاسبه شدند:

رابطه ۲) Tmean= -4.36532+0.917135* Tmax

رابطه ۳) Tmax= 23.0428-0.0051286* H

در این رابطه‌ها، Tmean و Tmax به‌ترتیب بیانگر میانگین دمای سالانه و حداکثر دمای سالانه بر حسب درجه سانتی‌گراد و H نیز بیانگر ارتفاع بر حسب متر است.

در نهایت، آخرین متغیر اقلیمی شامل شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، طبق رابطه ۴ (۲۵) استخراج شد:

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

$X_i$؛ مجموع بارش در یک سال معین، $\bar{X}$؛ میانگین بارش در یک سال معین و $S_d$؛ انحراف معیار داده‌هاست. بدین‌منظور، داده‌های بارش ۳۰ ساله منطقه به‌عنوان دوره پایه مورد استفاده قرار گرفت و SPI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه برای سال نمونه‌برداری استخراج شد.

**تعیین ویژگی‌های پوشش زمین**

ویژگی‌های پوشش زمین شامل درصد پوشش تاجی، تراکم گیاه در هر مترمربع، درصد خاک لخت، سنگ و سنگریزه و لاشبرگ در ۱۸۰ پلات یک مترمربعی در رویشگاه‌های منتخب برآورد شدند. در هر پلات، فهرستی از گونه‌های گیاهی موجود تهیه شده و درصد پوشش تاجی به تفکیک فرم‌های رویشی در زمان اوج رشد گونه‌های غالب تعیین شد که نتایج جامع حاصل از تحلیل پوشش گیاهی منطقه در مطالعات قبلی (۲۸، ۱۲ و ۱۶) ارائه شده است.

**تعیین ویژگی‌های پستی و بلندی**

برای بررسی تأثیر پستی و بلندی بر نوع رویشگاه و در نهایت ترسیب کربن، از ویژگی‌های ارتفاع، تندی شیب، جهت شیب، تجمع جریان (Flow Accumulation)، شاخص موقعیت پستی و بلندی (Topographic Position Index, TPI)، شاخص ناهمواری زمین (Terrain Ruggedness Index, TRI)، شاخص رطوبت پستی و بلندی (Topographic Wetness Index, TWI) و سایه‌زدایی (Hillshade) استفاده شد. مدل رقومی ارتفاع (DEM) متداول‌ترین روش ثبت رقومی شکل ارتفاع زمین و یک لایه اطلاعاتی پایه برای تعیین خصوصیات سطح زمین مانند 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 ۲۳۷۷ تا ۳۰۳۸ متر از سطح دریا تهیه شد. نقشه شیب و جهت شیب از نقشه DEM استخراج شد. شاخص‌های ثانویه پستی و بلندی مانند تجمع جریان برای شبیه‌سازی رواناب https://www.supergeotek.com/SpatialAnalyst_ENG (_HTML/flow_accumulation.htm)، شاخص موقعیت پستی و بلندی (TPI) بر اساس رابطه ۵، شاخص ناهمواری زمین (TRI) طبق رابطه ۶ و شاخص رطوبت پستی و بلندی (TWI)طبق رابطه ۷ محاسبه شدند و اثرات آن‌ها بر تغییرات ترسیب کربن مورد توجه قرار گرفت. نقشه سایه‌زدایی با استفاده از DEM تهیه شد (https://srs-gis.ir/create-hillshade-layer-in-arcgis-pro/).

رابطه ۵) $$TPI_i = Z_0 - \frac{\sum_{n-1} Z_n}{n}$$

که $Z_0$؛ ارتفاع نقطه مدل مورد ارزیابی، $Z_n$؛ ارتفاع از شبکه و $n$ تعداد کل نقاط اطراف است (۴۶).

رابطه ۶) $$TRI = \sqrt{\sum_{P=1}^{8} ZMd}$$

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 (۳۳).

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

که $\alpha$؛ شیب بالادست دامنه و $\beta$؛ زاویه شیب در هر پیکسل است که برای برآورد توزیع رطوبت محاسبه شد (۲۲).



[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]

**محاسبه ترسیب کربن**

برای محاسبه متغیر وابسته ترسیب کربن، ابتدا ویژگی‌های خاک شامل وزن مخصوص ظاهری با روش کلوخه (۴) و ماده آلی و کربن آلی به روش اکسیداسیون با بی‌کربنات پتاسیم (۳) در آزمایشگاه تعیین شدند. سپس، مقدار ترسیب کربن بر حسب کیلوگرم بر هکتار با استفاده از رابطه ۸ محاسبه شد (۲۱ و ۳۲).

$$Cs = 10000 \times OC(\%) \times Bd \times e$$ رابطه ۸)

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

**تجزیه و تحلیل آماری**

نرمال بودن داده‌های مربوط به متغیرهای فیزیکی، شیمیایی و ترسیب کربن خاک در دو رویشگاه علف‌زار و علف-بوته‌زار و در دو عمق ۱۵-۰ تا ۳۰-۱۵ سانتی‌متری، با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف بررسی شد. آزمون t غیرجفتی (Independent t-test) برای مقایسه میانگین متغیرها بین دو رویشگاه مستقل و آزمون t جفتی (Paired t-test) برای مقایسه میانگین‌ها در دو عمق مختلف خاک به‌کار گرفته شد. برای تحلیل چندمتغیره و بررسی اثرات متقابل متغیرهای مستقل از مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM) و تحلیل واریانس یک‌طرفه استفاده شد. در صورت وجود اختلاف معنادار، آزمون چنددامنه‌ای دانکن برای مقایسه دقیق‌تر میانگین‌ها اجرا شد. آماره F برای بررسی معنی‌داری اختلاف میان گروه‌ها به‌کار گرفته شد. تمامی تحلیل‌های آماری مذکور در محیط نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 26.0 انجام شد.

تحلیل عاملی (Factor Analysis) یک تکنیک آماری است که از عوامل چندمتغیره بالقوه برای توضیح ساختار کوواریانس میان چندین متغیر استفاده می‌کند (۸). تحلیل عاملی شامل چرخش (Rotation) عوامل به‌گونه‌ای است که ضمن به حداکثر رساندن واریانس، ترکیبی خطی از متغیرهای اصلی ایجاد می‌نماید. برای کاهش ابعاد داده‌های چندمتغیره، داده‌های اصلی به‌گونه‌ای دقیق مشخص می‌شوند که کم‌ترین میزان از اطلاعات از دست برود (۸ و ۲۴). تحلیل عاملی در نرم‌افزار R v4.5.1 انجام شد. نقشه‌های مربوط به خصوصیات پستی و بلندی شامل شیب، جهت شیب، تجمع جریان، TPI، SPI، TRI، TWI و سایه‌زدایی در محیط نرم‌افزار ArcGIS 8.0 تهیه شدند.

## نتایج

**تحلیل تغییرات خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک و ترسیب کربن در رویشگاه‌های مختلف**

نتایج مقایسه میانگین خصوصیات فیزیکی-شیمیایی و ترسیب کربن خاک در دو رویشگاه علف‌زار و علف-بوته‌زار با استفاده از آزمون t غیرجفتی نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در بیش‌تر متغیرها بود (جدول ۱). در خصوص ویژگی‌های فیزیکی خاک، رویشگاه علف‌زار از نظر درصد رس (۲۱/۶۸ درصد) و سیلت (۲۸/۹۱ درصد) مقدار بالاتری نسبت به علف-بوته‌زار داشت و در مقابل درصد شن آن کم‌تر (۴۹/۴۱ درصد) بود. این الگو نشان‌دهنده بافت ریزدانه‌تر، توان نگهداری آب بیش‌تر و نفوذپذیری کم‌تر در علف‌زار است. تفاوت این سه مؤلفه با آماره t به‌ترتیب برابر با ۵/۱۳، ۵۳/۵ و ۷/۱۸- از نظر آماری معنی‌دار بود ($p<۰/۰۱$). هم‌چنین، وزن مخصوص ظاهری خاک در علف‌زار (۱/۳۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب) کمی بیش‌تر از علف-بوته‌زار (۱/۲۸) بود که این اختلاف نیز با آماره t معادل ۳/۱۴ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود.

در مورد ویژگی‌های شیمیایی، pH خاک در علف‌زار پایین‌تر (۶/۰۵) و هدایت الکتریکی آن نیز کم‌تر (۴۰۱/۳۷ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) از علف-بوته‌زار بود، که این اختلاف معنی‌دار حاکی از غلظت کم‌تر یون‌های محلول در این جامعه گیاهی است. مقدار نیتروژن در علف‌زار (۰/۱۶ درصد) کم‌تر از علف-بوته‌زار (۰/۲۵ درصد) به‌دست آمد که در سطح معنی‌داری بالا تأیید شد. درصد آهک نیز در علف‌زار کم‌تر از علف-بوته‌زار گزارش شد و این اختلاف در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. در مقابل، مقادیر پتاسیم و فسفر اگرچه در علف‌زار اندکی بیش‌تر هستند، اما اختلاف آن‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبود. در خصوص شاخص‌های مرتبط با کربن، علف‌زار دارای مقادیر بالاتری از کربن آلی ذره‌ای، کربن آلی کل و ترسیب کربن نسبت به علف-بوته‌زار بود ($p< ۰/۰۱$). این نتایج بیانگر نقش مؤثر جامعه گیاهی



[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]

علف‌زار در بهبود کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک و افزایش توانایی ترسیب کربن هستند.

**جدول ۱: مقایسه میانگین خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و ترسیب کربن خاک در رویشگاه‌های علف‌زار و علف-بوته‌زار**

| ویژگی / رویشگاه | فیزیکی | | | | شیمیایی | | | | | | | ترسیب کربن خاک (تن بر هکتار) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | رس (درصد) | سیلت (درصد) | شن (درصد) | وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مربع) | pH | EC (میکروزیمنس بر سانتی‌متر) | نیتروژن (درصد) | درصد آهک | پتاسیم ppm | فسفر ppm | کربن الی ذره‌ای (درصد) | کربن آلی (درصد) | |
| علف‌زار | ۲۱/۶۸ | ۲۸/۹۱ | ۴۹/۴۱ | ۱/۳۲ | ۶/۰۵ | ۴۰۱/۳۷ | ۰/۱۶ | ۸/۴۳ | ۱۸/۲۵ | ۰/۲۴ | ۲/۷۹ | ۳/۳۸ | ۶۶/۵۹ |
| علف-بوته‌زار | ۱۸/۴۵ | ۲۶/۸۵ | ۵۴/۷۰ | ۱/۲۸ | ۶/۲۹ | ۶۳۳/۶۲ | ۰/۲۵ | ۹/۱۴ | ۱۶/۶۷ | ۰/۲۶ | ۲/۴۶ | ۳/۱۴ | ۶۰/۴۰ |
| آماره t | ۵/۱۳** | ۵/۵۳** | -۷/۱۸** | ۳/۱۴** | -۶/۳۹** | -۷/۵۹** | -۷/۲۰** | -۲/۱۲* | ۱/۵۰ ns | -۱/۱۹ ns | ۴/۲۷** | ۴/۲۸** | ۵/۴۶** |

* و ** به‌ترتیب نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ و ۹۹ درصد و ns بیان‌گر عدم معنی‌داری است.

## تحلیل تغییرات میانگین متغیرهای پوشش گیاهی و پوشش سطح خاک در رویشگاه‌های مختلف

نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های پوشش گیاهی و پوشش سطح خاک در دو رویشگاه علف‌زار و علف-بوته‌زار با استفاده از آزمون t غیرجفتی نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در تمام متغیرهای مورد بررسی بود (جدول ۲). در مورد پوشش سطح خاک، علف‌زار دارای درصد بسیار کم‌تری از خاک لخت (۱۱/۴۰ درصد) در مقایسه با علف-بوته‌زار (۳۱/۴۹ درصد) بوده که بیانگر حفاظت بیش‌تر سطح خاک در این جامعه گیاهی است. هم‌چنین، درصد سنگ در سطح خاک علف‌زار (۳/۴۴ درصد) کم‌تر از علف-بوته‌زار (۲۳/۵۶ درصد) بوده و درصد لاشبرگ نیز در علف‌زار بیش‌تر (۵/۹۰ درصد در برابر ۴/۷۸ درصد) مشاهده شد. این تفاوت‌ها در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بوده و نشان‌دهنده نقش مؤثر پوشش علفی در کاهش فرسایش و افزایش تثبیت خاک هستند.

در بخش ویژگی‌های پوشش گیاهی نیز جامعه علف‌زار عملکرد بهتری نشان داد؛ به‌طوری‌که درصد پوشش تاجی در آن (۷۹/۲۶ درصد) به‌مراتب بیش‌تر از علف-بوته‌زار (۴۰/۱۷ درصد) بوده و تراکم کل نیز با ۲۵۰/۴۷ تعداد در متر مربع نسبت به ۵۱/۲۳ تعداد در متر مربع در علف-بوته‌زار، به‌طور معنی‌داری بیش‌تر بود ($p< ۰/۰۱$). به‌طور کلی، جامعه علف‌زار با فراهم آوردن پوشش بهتر، تراکم گیاهی بالاتر و کاهش قابل توجه خاک لخت و سنگ، در بهبود وضعیت بوم‌شناختی منطقه مؤثرتر عمل می‌کند.

**جدول ۲: مقایسه میانگین ویژگی‌های سطح خاک و پوشش گیاهی در رویشگاه‌های علف‌زار و علف-بوته‌زار**

| ویژگی / رویشگاه | خاک | | پوشش گیاهی | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | درصد خاک لخت | درصد سنگ | درصد لاشبرگ | درصد پوشش تاجی | تراکم کل (تعداد گیاه در متر مربع) |
| علف‌زار | ۱۱/۴۰ | ۳/۴۴ | ۵/۹۰ | ۷۹/۲۶ | ۲۵۰/۴۷ |
| علف-بوته‌زار | ۳۱/۴۹ | ۲۳/۵۶ | ۴/۷۸ | ۴۰/۱۷ | ۵۱/۲۳ |
| آماره t | -۱۳/۵۳** | -۱۷/۶۸** | ۴/۹۷** | ۲۲/۵۸** | ۱۸/۰۶** |

* و ** به‌ترتیب نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ و ۹۹ درصد و ns بیان‌گر عدم معنی‌داری است.

## تحلیل تغییرات خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک و ترسیب کربن در عمق‌های مختلف خاک

نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و ترسیب کربن خاک در دو عمق ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متر با استفاده از آزمون t جفتی نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در بیش‌تر متغیرها بود (جدول ۳). در خصوص ویژگی‌های فیزیکی، خاک سطحی (عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری) به‌طور معنی‌داری دارای درصد کم‌تر رس (۱۷/۹۰ درصد) و شن بیش‌تری (۵۳/۲۶ درصد) نسبت به لایه زیرین (عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متری) بود. درصد سیلت در خاک سطحی (۲۸/۸۴ درصد) کمی بیش‌تر از لایه زیرین (۲۶/۹۳ درصد) بوده که این تفاوت نیز معنی‌دار است. وزن



[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]

مخصوص ظاهری خاک در لایه زیرین (۱/۳۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بیش‌تر از خاک سطحی (۱/۲۹) بود ($p< ۰/۰۱$).

در مورد ویژگی‌های شیمیایی، pH در لایه سطحی (۶/۲۰) کمی بیش‌تر از لایه زیرین (۶/۱۴) بود ($p< ۰/۰۱$). هدایت الکتریکی(EC) در خاک سطحی به میزان ۶۱/۳۶ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بیش‌تر از لایه زیرین بود که این اختلاف در سطح ۵ درصد معنی‌دار گزارش شد. نیتروژن در لایه سطحی (۰/۲۳ درصد) بیش‌تر از لایه زیرین (۰/۱۸ درصد) بود ($p< ۰/۰۱$). درصد آهک در دو لایه اختلاف معنی‌داری نداشت. پتاسیم و فسفر نیز به‌طور معنی‌داری در لایه سطحی بیش‌تر بوده و این تفاوت‌ها در سطح یک درصد معنی‌دار بودند. هم‌چنین کربن آلی ذره‌ای، کربن آلی کل و ترسیب کربن خاک در لایه سطحی بیش‌تر از لایه زیرین بودند ($p< ۰/۰۱$).

**جدول ۳: مقایسه میانگین خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و ترسیب کربن خاک در دو عمق ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متری خاک**

| ویژگی / عمق | فیزیکی | | | | شیمیایی | | | | | | | ترسیب کربن خاک (تن بر هکتار) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | رس (درصد) | سیلت (درصد) | شن (درصد) | وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مربع) | pH | EC (میکروزیمنس بر سانتی‌متر) | نیتروژن (درصد) | درصد آهک | پتاسیم ppm | فسفر ppm | کربن الی ذره‌ای (درصد) | کربن آلی (درصد) | |
| ۱۵-۰ | ۱۷/۹۰ | ۲۸/۸۴ | ۵۳/۲۶ | ۱/۲۹ | ۶/۲۰ | ۵۴۸/۱۷ | ۰/۲۳ | ۸/۸۶ | ۱۹/۴۳ | ۰/۲۹ | ۲/۹۲ | ۳/۵۲ | ۶۷/۸۴ |
| ۳۰-۱۵ | ۲۲/۲۲ | ۲۶/۹۳ | ۵۰/۸۵ | ۱/۳۱ | ۶/۱۴ | ۴۸۶/۸۱ | ۰/۱۸ | ۸/۷۱ | ۱۵/۵۰ | ۰/۲۲ | ۲/۳۳ | ۳/۰۱ | ۵۹/۱۴ |
| آماره t | -۱۴/۰۳** | ۶/۲۶** | ۶/۴۷** | -۲/۸۶** | ۴/۳۰** | ۲/۶۰* | ۷/۰۵** | ۰/۶۴ ns | ۱۱/۳۵** | ۶/۴۷** | ۱۰/۵۲** | ۱۳/۱۶** | ۹/۴۹** |

* و ** به‌ترتیب نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ و ۹۹ درصد و ns بیان‌گر عدم معنی‌داری است.

**تحلیل تغییرات خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک و ترسیب کربن در شیب‌های مختلف**

تحلیل تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در چهار طبقه شیب (۲۰—۰، ۴۰—۲۰، ۶۰—۴۰ و ۸۰—۶۰ درصد) با استفاده از GLM و ANOVA نشان داد که تفاوت‌ها در اکثر متغیرها به‌طور معنی‌دار ($p< ۰/۰۱$) تأیید شدند (جدول ۴). درصد رس در شیب ۲۰—۰ برابر ۰/۰۰ درصد بود و در سایر کلاس‌ها به‌ترتیب به ۱۸/۸۷، ۱۸/۴۰ و ۱۴/۱۰ درصد افزایش یافت. در مقابل، درصد شن در شیب‌های بالاتر بیش‌تر بود؛ به این ترتیب که از ۴۵/۳۲ درصد در شیب ۲۰—۰ درصد به ۵۳/۸۸، ۵۴/۲۰ و ۵۶/۲۵ درصد در شیب‌های بیش‌تر رسید. وزن مخصوص ظاهری در شیب ۲۰—۰ درصد بالاتر از شیب ۸۰—۶۰ درصد بود. این تفاوت‌ها در مورد متغیرهای رس، شن و وزن مخصوص ظاهری در سطح یک درصد معنی‌دار بودند.

در میان ویژگی‌های شیمیایی، pH در شیب‌های پایین‌تر بالاتر بود و در شیب ۸۰—۶۰ به کم‌ترین مقدار رسید. نیتروژن از ۰/۱۴ درصد در شیب ۲۰—۰ به ۰/۳۰ درصد در شیب ۸۰—۶۰ افزایش یافت. درصد آهک نیز در شیب ۲۰—۰ با ۱۰/۰۹ درصد بالاترین مقدار را داشت و در شیب ۸۰—۶۰ به ۵/۷۵ درصد کاهش یافت. فسفر در شیب ۲۰—۰ معادل ۰/۲۹ ppm بود و در شیب ۸۰—۶۰ به ۰/۱۵ ppmکاهش یافت که در سطح $p< ۰/۰۵$ معنی‌دار بود. با وجود تفاوت در سایر متغیرها مانند کربن آلی، کربن آلی ذره‌ای و ترسیب کربن خاک، این اختلافات از نظر آماری معنی‌دار نبودند. به‌طور کلی، در شیب‌های پایین‌تر pH و آهک خاک بالاتر و درصد شن کم‌تر بود، درحالی‌که شیب‌های تندتر با درصد بالاتر نیتروژن و شن مشخص شدند که بیانگر تفاوت در کیفیت خاک و تأثیر شیب بر فرسایش‌پذیری است.



[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]

**جدول ۴: مقایسه میانگین خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و ترسیب کربن خاک در شیب‌های مختلف**

| ویژگی / شیب | فیزیکی | | | | شیمیایی | | | | | | | ترسیب کربن خاک (تن بر هکتار) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | رس (درصد) | سیلت (درصد) | شن (درصد) | وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مربع) | pH | EC (میکروزیمنس بر سانتی‌متر) | نیتروژن (درصد) | درصد آهک | پتاسیم ppm | فسفر ppm | کربن الی ذره‌ای (درصد) | کربن آلی (درصد) | |
| ۰-۲۰ | ۰/۰۰ $^{a}$ | ۲۹/۸۸ $^{a}$ | ۴۵/۳۲ $^{b}$ | ۱/۳۲ $^{a}$ | ۶/۲۶ $^{a}$ | ۴۷۸/۳۸ $^{a}$ | ۰/۱۴ $^{b}$ | ۱۰/۰۹ $^{a}$ | ۲۱/۳۶ $^{a}$ | ۰/۲۹ $^{a}$ | ۲/۴۹ $^{a}$ | ۳/۱۵ $^{a}$ | ۶۲/۰۴ $^{a}$ |
| ۲۰-۴۰ | ۱۸/۸۷ $^{b}$ | ۲۷/۲۵ $^{a}$ | ۵۳/۸۸ $^{a}$ | ۱/۳۰ $^{a}$ | ۶/۱۵ $^{a}$ | ۵۴۰/۳۴ $^{a}$ | ۰/۲۱ $^{ab}$ | ۸/۱۷ $^{ab}$ | ۱۶/۵۴ $^{ab}$ | ۰/۲۴ $^{a}$ | ۲/۶۶ $^{a}$ | ۳/۳۰ $^{a}$ | ۶۴/۳۳ $^{a}$ |
| ۴۰-۶۰ | ۱۸/۴۰ $^{b}$ | ۲۷/۴۰ $^{a}$ | ۵۴/۲۰ $^{a}$ | ۱/۲۸ $^{a}$ | ۶/۲۰ $^{a}$ | ۵۰۲/۵۵ $^{a}$ | ۰/۲۴ $^{ab}$ | ۹/۵۶ $^{a}$ | ۱۶/۱۵ $^{ab}$ | ۰/۲۶ $^{a}$ | ۲/۷۰ $^{a}$ | ۳/۲۷ $^{a}$ | ۶۲/۷۲ $^{a}$ |
| ۸۰-۶۰ | ۱۴/۱۰ $^{b}$ | ۲۹/۶۵ $^{a}$ | ۵۶/۲۵ $^{a}$ | ۱/۱۳ $^{b}$ | ۵/۲۸ $^{b}$ | ۲۵۲/۵۰ $^{a}$ | ۰/۳۰ $^{a}$ | ۵/۷۵ $^{b}$ | ۸/۶۴ $^{b}$ | ۰/۱۵ $^{a}$ | ۲/۱۷ $^{a}$ | ۳/۳۸ $^{a}$ | ۵۷/۰۶ $^{a}$ |
| آماره F | ۲۵/۱۷** | ۱۱/۷۱** | ۳۶/۳۷** | ۶/۲۹** | ۱۰/۰۲** | ۱/۸۲ $^{ns}$ | ۱۰/۰۹** | ۹/۹۵** | ۶/۲۶** | ۲/۸۴* | ۱/۷۶ $^{ns}$ | ۱/۶۲ $^{ns}$ | ۱/۴۰ $^{ns}$ |

حروف متفاوت نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار، علامت‌های * و ** به‌ترتیب نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ و ۹۹ درصد و $^{ns}$ بیان‌گر عدم معنی‌داری است.

## تحلیل تغییرات خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک و ترسیب کربن تحت اثرات متقابل نوع رویشگاه و عمق خاک

نتایج مقایسه میانگین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در دو رویشگاه علف‌زار و علف-بوته‌زار در دو عمق ۱۵—۰ و ۳۰—۱۵ سانتی‌متری با استفاده از GLM و ANOVA، اختلاف معنی‌داری را در سطح یک درصد در ترکیب و کیفیت خاک به‌جز در مورد درصد آهک نشان داد (جدول ۵). در مورد ویژگی‌های فیزیکی، خاک علف‌زار در عمق سطحی دارای درصد رس و سیلت بیش‌تر بیش‌ترو شن کم‌تری نسبت به علف-بوته‌زار بود. این روند در عمق ۳۰—۱۵ نیز مشاهده شد، به‌طوری‌که علف‌زار دارای رس بیش‌تر و شن کم‌تری نسبت به علف-بوته‌زار بود.

در مورد خصوصیات شیمیایی، pH خاک در علف‌زار کمی پایین‌تر از علف-بوته‌زار و هدایت الکتریکی (EC) نیز در علف-بوته‌زار بیش‌تر بود که این امر نشان‌دهنده غلظت بالاتر یون‌های محلول در علف-بوته‌زار بود. میزان نیتروژن خاک در علف-بوته‌زار در هر دو عمق بیش‌تر از علف‌زار بود؛ که بیانگر وضعیت حاصلخیزی بهتر در این جامعه گیاهی است. از نظر پتاسیم، علف‌زار در عمق سطحی مقدار بیش‌تری را به خود اختصاص داد، اما در عمق زیرین، علف-بوته‌زار مقدار پتاسیم بیش‌تری داشت. مقدار فسفر خاک نیز در علف‌زار بیش‌تر بود، اگرچه تفاوت‌ها در این متغیر کم‌تر است. کربن آلی ذره‌ای و کربن آلی کل نیز در علف‌زار در عمق سطحی بیش‌تر بودند، اما در عمق پایین‌تر علف-بوته‌زار کاهش شدیدتری در میزان کربن آلی ذره‌ای و کربن آلی کل نشان داد. شاخص ترسیب کربن خاک نیز در علف‌زار به‌طور معنی‌داری در هر دو عمق بیش‌تر بود.

در مجموع، خاک علف‌زار در هر دو عمق دارای ویژگی‌های فیزیکی مطلوب‌تر، کربن آلی و ترسیب کربن بیش‌تر و pH پایین‌تری بود، در حالی‌که علف-بوته‌زار از نظر نیتروژن و EC در وضعیت بهتری قرار داشت. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده تأثیر ترکیب پوشش گیاهی بر خصوصیات خاک است و اغلب در سطح احتمال یک درصد از نظر آماری معنی‌دار بوده است.

**جدول ۵: تغییرات میانگین ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و ترسیب کربن خاک در رویشگاه‌ها و عمق‌های مختلف خاک**

| رویشگاه | ویژگی / عمق خاک | فیزیکی | | | | شیمیایی | | | | | | | | ترسیب کربن خاک (تن بر هکتار) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | رس (درصد) | سیلت (درصد) | شن (درصد) | وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مربع) | pH | EC (میکروزیمنس بر سانتی‌متر) | نیتروژن (درصد) | درصد آهک | پتاسیم ppm | فسفر ppm | کربن الی ذره‌ای (درصد) | کربن آلی (درصد) | |
| علف‌زار | ۱۵-۰ | ۱۹/۵۸ $^{a}$ | ۲۹/۵۳ $^{a}$ | ۵۰/۸۹ $^{d}$ | ۱/۳۰ $^{a}$ | ۶/۰۸ $^{a}$ | ۴۲۷/۸۴ $^{c}$ | ۰/۱۹ $^{b}$ | ۸/۷۲ $^{ab}$ | ۱۹/۸۷ $^{a}$ | ۰/۲۷ $^{a}$ | ۳/۱۱ $^{a}$ | ۳/۶۱ $^{a}$ | ۷۰/۶۵ $^{a}$ |
| | ۳۰-۱۵ | ۲۳/۷۷ $^{b}$ | ۲۸/۳۰ $^{b}$ | ۴۷/۹۴ $^{c}$ | ۱/۳۳ $^{a}$ | ۶/۰۲ $^{b}$ | ۳۷۴/۸۹ $^{d}$ | ۰/۱۳ $^{c}$ | ۸/۱۳ $^{b}$ | ۱۶/۶۴ $^{c}$ | ۰/۲۲ $^{b}$ | ۲/۴۷ $^{b}$ | ۳/۱۴ $^{b}$ | ۶۲/۵۲ $^{b}$ |
| علف-بوته‌زار | ۱۵-۰ | ۱۶/۲۲ $^{c}$ | ۲۸/۱۵ $^{b}$ | ۵۵/۶۳ $^{a}$ | ۱/۲۷ $^{b}$ | ۶/۳۳ $^{ab}$ | ۶۶۸/۵۰ $^{a}$ | ۰/۲۷ $^{a}$ | ۸/۹۹ $^{ab}$ | ۱۸/۹۹ $^{b}$ | ۰/۳۱ $^{a}$ | ۲/۷۳ $^{a}$ | ۳/۴۲ $^{a}$ | ۶۵/۰۳ $^{b}$ |
| | ۳۰-۱۵ | ۲۰/۶۷ $^{b}$ | ۲۵/۵۶ $^{c}$ | ۵۳/۷۶ $^{b}$ | ۱/۳۰ $^{a}$ | ۶/۲۵ $^{a}$ | ۵۹۸/۷۴ $^{b}$ | ۰/۲۳ $^{b}$ | ۹/۳۰ $^{a}$ | ۱۴/۳۶ $^{c}$ | ۰/۲۲ $^{b}$ | ۲/۱۹ $^{c}$ | ۲/۸۷ $^{c}$ | ۵۵/۷۶ $^{c}$ |
| آماره F | | ۰/۰۵** | ۳/۵۷** | ۰/۵۶** | ۰/۰۰** | ۰/۱۷** | ۰/۰۸** | ۰/۷۵** | ۱/۷۹ $^{ns}$ | ۰/۴۶** | ۲/۱۶** | ۰/۶۳** | ۰/۴۶** | ۱/۷۹** |

حروف متفاوت نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار، علامت‌های * و ** به‌ترتیب نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ و ۹۹ درصد و $^{ns}$ بیان‌گر عدم معنی‌داری است.



[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]

**تحلیل تغییرات ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک و ترسیب کربن تحت اثرات متقابل نوع رویشگاه، درصد شیب و عمق خاک**

تحلیل چندمتغیره اثرات اصلی و متقابل نوع رویشگاه (علف‌زار و علف-بوته‌زار) و شیب (۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰ و ۶۰-۸۰ درصد) بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با استفاده از GLM و ANOVA نشان‌دهنده تفاوت‌های معنی‌دار در ترکیب و کیفیت خاک است (جدول ۶). به‌طور مثال، درصد رس در خاک علف‌زار در شیب ۰-۲۰ و عمق ۱۵-۰ سانتی‌متر به‌طور متوسط ۲۳/۲۸ درصد است، که به‌طور قابل توجهی بیش‌تر از ۱۷/۲۲ درصد رس در علف-بوته‌زار در همین شرایط است. درصد سیلت در علف‌زار ۳۰/۹۸ درصد و در علف-بوته‌زار ۲۷ درصد است، در حالی‌که درصد شن در علف-بوته‌زار (۵۵/۷۸ درصد) نسبت به علف‌زار (۴۵/۷۴ درصد) به‌طور معنی‌داری ($p< ۰/۰۱$) بالاتر شده است. آماره F برای رس، سیلت و شن به‌ترتیب ۱۷/۳۷، ۷/۱۵ و ۱۵/۳۶ بوده است.

از نظر شیمیایی، میزان کربن آلی خاک در علف‌زار در شیب ۰-۲۰ و عمق ۰-۱۵ برابر با ۳/۰۱ درصد است، که نسبت به ۲/۱۷ درصد در علف-بوته‌زار در همان شرایط، تفاوت معنی‌داری دارد. مقدار نیتروژن در خاک علف‌زار ۰/۱۶ درصد و در علف-بوته‌زار ۰/۲۴ درصد اندازه‌گیری شده است. هم‌چنین فسفر خاک در علف‌زار به میزان ۲۳/۶۷ ppm و در علف-بوته‌زار ۲۵/۰۸ ppm است. این تفاوت‌ها توسط آماره F به‌ترتیب ۱۱/۴۷ برای کربن آلی و ۸/۵۸ برای فسفر تأیید شده است ($p<۰/۰۱$). مقادیر pH خاک در علف‌زار ۶/۲۰ و در علف-بوته‌زار ۶/۵۶ است که این تفاوت نیز معنی‌دار است. هدایت الکتریکی (EC) در خاک علف‌زار ۵۰۰/۷۹ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و در علف-بوته‌زار ۶۲۷/۳۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر است. این تفاوت‌ها به‌طور آماری توسط آماره F با مقدار ۵/۴۵ مورد تأیید قرار گرفته است ($p<۰/۰۱$). نتایج نشان می‌دهد خاک رویشگاه علف‌زار در لایه سطحی و شیب‌های کم‌تر، ترکیبی با درصد بالاتر رس، سیلت و کربن آلی دارد که موجب بهبود کیفیت خاک و توانایی نگهداری مواد مغذی می‌شود، در حالی‌که خاک علف-بوته‌زار با درصد شن بیش‌تر و EC بالاتر، نفوذپذیری بیش‌تری دارد اما کیفیت شیمیایی پایین‌تری نشان می‌دهد. تمامی تفاوت‌های مذکور به‌طور معنی‌دار ($p< ۰/۰۱$) هستند.

**جدول ۶: تأثیر شیب و عمق خاک بر ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی و میزان ترسیب کربن خاک در دو رویشگاه علف‌زار و علف-بوته‌زار**

| رویشگاه | درصد شیب | ویژگی / عمق خاک | فیزیکی | | | | شیمیایی | | | | | | | ترسیب کربن خاک (تن بر هکتار) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | رس (درصد) | سیلت (درصد) | شن (درصد) | وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مربع) | pH | EC (میکروزیمنس بر سانتی‌متر) | نیتروژن (درصد) | درصد آهک | پتاسیم ppm | فسفر ppm | کربن الی ذره‌ای (درصد) | کربن آلی (درصد) | |
| علف‌زار | ۲۰-۰ | ۱۵-۰ | ۲۳/۲۸$^{abc}$ | ۳۰/۹۸$^{a}$ | ۴۵/۷۴$^{de}$ | ۱/۳۰$^{a}$ | ۶/۲۰$^{ab}$ | ۵۰۰/۷۹$^{abcde}$ | ۰/۱۶$^{bcd}$ | ۱۰/۹۱$^{ab}$ | ۲۳/۶۷$^{ab}$ | ۰/۳۴$^{a}$ | ۳/۰۱$^{a}$ | ۳/۵۳$^{ab}$ | ۶۸/۷۸$^{abc}$ |
| | | ۳۰-۱۵ | ۱۸/۳۸$^{cde}$ | ۲۸/۴۷$^{abc}$ | ۵۳/۱۵$^{abc}$ | ۱/۳۱$^{a}$ | ۶/۰۱$^{bc}$ | ۳۹۱/۷۸$^{abcde}$ | ۰/۱۹$^{bcd}$ | ۷/۴۴$^{bcde}$ | ۱۸/۸۸$^{abcd}$ | ۰/۲۲$^{ab}$ | ۳/۱۴$^{a}$ | ۳/۶۶$^{ab}$ | ۷۲/۳۴$^{a}$ |
| | ۴۰-۲۰ | ۱۵-۰ | ۱۲/۰۸$^{f}$ | ۲۸/۹۸$^{abc}$ | ۵۸/۹۴$^{e}$ | ۱/۲۹$^{a}$ | ۶/۰۰$^{bc}$ | ۳۵۳/۳۲$^{bcde}$ | ۰/۲۷$^{ab}$ | ۷/۱۸$^{cde}$ | ۱۲/۴۰$^{bcd}$ | ۰/۲۲$^{ab}$ | ۳/۳۸$^{a}$ | ۳/۷۷$^{a}$ | ۷۲/۹۸$^{a}$ |
| | | ۳۰-۱۵ | ۱۵/۱۰$^{def}$ | ۲۹/۸۰$^{ab}$ | ۵۵/۱۰$^{abc}$ | ۱/۱۴$^{b}$ | ۵/۵۳$^{d}$ | ۲۸۰/۰۰$^{de}$ | ۰/۳۶$^{a}$ | ۵/۷۵$^{e}$ | ۸/۶۴$^{d}$ | ۰/۱۹$^{ab}$ | ۲/۸۱$^{abc}$ | ۳/۲۶$^{abcd}$ | ۵۵/۶۹$^{def}$ |
| | ۶۰-۴۰ | ۱۵-۰ | ۲۷/۳۹$^{a}$ | ۲۹/۷۲$^{ab}$ | ۴۲/۸۹$^{e}$ | ۱/۳۵$^{a}$ | ۶/۲۴$^{ab}$ | ۴۳۵/۴۱$^{abcde}$ | ۰/۱۱$^{d}$ | ۹/۵۶$^{abcd}$ | ۱۹/۳۹$^{abcd}$ | ۰/۲۵$^{ab}$ | ۲/۱۲$^{cd}$ | ۲/۸۴$^{de}$ | ۵۷/۵۶$^{def}$ |
| | | ۳۰-۱۵ | ۲۳/۱۰$^{abc}$ | ۲۷/۳۴$^{abc}$ | ۴۹/۵۶$^{cde}$ | ۱/۳۲$^{a}$ | ۵/۹۵$^{bc}$ | ۳۵۰/۴۰$^{bcde}$ | ۰/۱۳$^{cd}$ | ۷/۴۶$^{bcde}$ | ۱۵/۹۰$^{abcd}$ | ۰/۲۰$^{ab}$ | ۲/۶۹$^{abc}$ | ۳/۲۹$^{abcd}$ | ۶۵/۰۸$^{abcd}$ |
| | ۸۰-۶۰ | ۱۵-۰ | ۱۵/۳۵$^{def}$ | ۲۷/۱۴$^{abc}$ | ۵۷/۵۱$^{ab}$ | ۱/۳۴$^{a}$ | ۵/۷۶$^{cd}$ | ۲۹۲/۵۶$^{cde}$ | ۰/۱۸$^{bcd}$ | ۶/۳۳$^{de}$ | ۱۱/۳۰$^{cd}$ | ۰/۲۰$^{ab}$ | ۲/۹۴$^{ab}$ | ۳/۵۰$^{ab}$ | ۷۰/۱۸$^{ab}$ |
| | | ۳۰-۱۵ | ۱۳/۱۰$^{ef}$ | ۲۹/۵۰$^{ab}$ | ۵۷/۴۰$^{ab}$ | ۱/۱۱$^{b}$ | ۵/۰۳$^{e}$ | ۲۲۵/۰۰$^{e}$ | ۰/۲۵$^{abc}$ | ۵/۷۵$^{e}$ | ۸/۶۴$^{d}$ | ۰/۱۱$^{b}$ | ۱/۵۴$^{d}$ | ۳/۵۱$^{ab}$ | ۵۸/۴۴$^{cdef}$ |
| علف-بوته‌زار | ۲۰-۰ | ۱۵-۰ | ۱۷/۲۲$^{def}$ | ۲۷/۰۰$^{abc}$ | ۵۵/۷۸$^{abc}$ | ۱/۲۴$^{a}$ | ۶/۵۶$^{a}$ | ۶۲۷/۳۰$^{abc}$ | ۰/۲۴$^{abc}$ | ۹/۱۸$^{abcde}$ | ۲۵/۰۸$^{a}$ | ۰/۲۸$^{ab}$ | ۲/۱۷$^{cd}$ | ۳/۱۹$^{bcd}$ | ۶۰/۱۳$^{bcde}$ |
| | | ۳۰-۱۵ | ۱۵/۵۶$^{def}$ | ۲۸/۳۰$^{abc}$ | ۵۶/۱۴$^{abc}$ | ۱/۲۷$^{a}$ | ۶/۳۰$^{ab}$ | ۷۱۸/۸۳$^{a}$ | ۰/۲۷$^{ab}$ | ۸/۶۲$^{abcde}$ | ۱۷/۹۷$^{abcd}$ | ۰/۳۱$^{a}$ | ۲/۷۸$^{abc}$ | ۳/۴۴$^{ab}$ | ۶۵/۵۷$^{abcd}$ |
| | ۴۰-۲۰ | ۱۵-۰ | ۱۸/۲۵$^{cde}$ | ۲۷/۹۲$^{abc}$ | ۵۳/۸۳$^{abc}$ | ۱/۲۷$^{a}$ | ۶/۴۱$^{a}$ | ۵۰۴/۵۰$^{abcde}$ | ۰/۲۷$^{ab}$ | ۱۰/۲۰$^{abc}$ | ۲۰/۹۴$^{abc}$ | ۰/۲۹$^{a}$ | ۲/۷۳$^{abc}$ | ۳/۴۰$^{abc}$ | ۶۴/۴۵$^{abcd}$ |
| | | ۳۰-۱۵ | ۲۴/۷۹$^{ab}$ | ۲۶/۲۳$^{bc}$ | ۴۸/۹۸$^{cde}$ | ۱/۲۶$^{a}$ | ۶/۵۰$^{a}$ | ۴۷۳/۳۰$^{abcde}$ | ۰/۱۸$^{bcd}$ | ۹/۰۰$^{abcde}$ | ۱۵/۲۴$^{abcd}$ | ۰/۲۱$^{ab}$ | ۱/۷۴$^{d}$ | ۲/۵۷$^{e}$ | ۴۸/۱۶$^{f}$ |
| | ۶۰-۴۰ | ۱۵-۰ | ۱۹/۷۰$^{bcd}$ | ۲۵/۳۱$^{c}$ | ۵۴/۹۹$^{abc}$ | ۱/۳۱$^{a}$ | ۶/۲۲$^{ab}$ | ۵۸۷/۵۱$^{abcd}$ | ۰/۲۴$^{abc}$ | ۸/۶۷$^{abcde}$ | ۱۳/۹۸$^{abcd}$ | ۰/۲۰$^{ab}$ | ۲/۲۱$^{bcd}$ | ۲/۹۱$^{cde}$ | ۵۷/۲۶$^{def}$ |
| | | ۳۰-۱۵ | ۲۲/۹۸$^{abc}$ | ۲۶/۲۶$^{bc}$ | ۵۰/۷۶$^{bcd}$ | ۱/۲۵$^{a}$ | ۶/۳۱$^{ab}$ | ۶۷۰/۷۶$^{ab}$ | ۰/۲۰$^{bcd}$ | ۱۱/۵۷$^{a}$ | ۱۵/۴۲$^{abcd}$ | ۰/۲۸$^{ab}$ | ۲/۲۳$^{bcd}$ | ۲/۸۰$^{de}$ | ۵۲/۵۹$^{ef}$ |
| آماره F | | | ۱۷/۳۷$^{**}$ | ۷/۱۵$^{**}$ | ۱۷/۳۷$^{**}$ | ۷/۱۵$^{**}$ | ۱۵/۳۶$^{**}$ | ۱۴/۴۹$^{**}$ | ۱۰/۲۵$^{**}$ | ۵/۴۵$^{**}$ | ۳/۳۲$^{**}$ | ۳/۸۰$^{**}$ | ۸/۵۵$^{**}$ | ۶/۲۶$^{**}$ | ۷/۷۰$^{**}$ |

حروف متفاوت نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار، علامت‌های * و ** به‌ترتیب نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ و ۹۹ درصد و $^{ns}$ بیان‌گر عدم معنی‌داری است.



[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]

**بررسی نتایج حاصل از تحلیل عاملی (FA)**

نتایج حاصل از تحلیل عاملی (FA) بر اساس ۲۸ متغیر تأثیرگذار در ترسیب کربن در جدول ۷ ارائه شده است. تعداد عامل‌ها بر اساس نمودار سنگریزه (شکل ۲) و تحلیل موازی (شکل ۳) تعیین و در نهایت چهار عامل استخراج شد. این چهار عامل مجموعاً ۵۳ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین کردند که به‌ترتیب شامل عامل اول (۲۶ درصد)، عامل دوم (۱۰ درصد)، عامل سوم (۹ درصد) و عامل چهارم (۸ درصد) بودند (جدول ۸).

بارهای عاملی استانداردشده (بیش از ۰/۳±) شامل موارد زیر بودند:

عامل اول (ویژگی‌های اقلیمی، پوشش زمین، پستی و بلندی و خاک): این عامل با ۲۶ درصد واریانس، شامل متغیرهایی با بارهای عاملی بالا به‌ترتیب اهمیت (مقدار مطلق) از جمله بارش (۰/۹۳)، دما (۰/۹۳-)، ارتفاع (۰/۹۲)، شن (۰/۸۴)، رس (۰/۷۹-)، تراکم گیاهی (۰/۷۵-)، شاخص سایه‌زدایی (۰/۷۱)، درصد شیب (۰/۶۴)، و جهت شیب (۰/۴۷) بوده است.

عامل دوم (ویژگی‌های اقلیمی، پوشش زمین و خاک): این عامل با ۱۰ درصد واریانس، به‌ترتیب اهمیت (مقدار مطلق) شامل پوشش تاجی (۰/۷۰-)، pH (۰/۶۴)، سنگ (۰/۵۴)، شاخص ناهمواری زمین (۰/۵۳-)، خاک لخت (۰/۵۱)، آهک (۰/۴۳)، لاشبرگ (۰/۳۵-) و EC (۰/۳۱) بوده است.

عامل سوم (ویژگی‌های اقلیمی و پستی و بلندی): این عامل با ۹ درصد واریانس، متغیرهایی با بارهای عاملی بالا به‌ترتیب اهمیت (مقدار مطلق) از جمله رطوبت پستی و بلندی (۰/۹۹)، شاخص بارش استاندارد شده (۰/۷۲)، تجمع جریان (۰/۵۷)، و شاخص موقعیت پستی و بلندی (۰/۳۹) را شامل شده است.

عامل چهارم (ویژگی‌های خاک): این عامل با ۸ درصد واریانس، شامل متغیرهایی با بارهای عاملی بالا به‌ترتیب اهمیت (مقدار مطلق) شامل کربن آلی (۰/۶۸)، کربن آلی ذره‌ای (۰/۶۷)، فسفر (۰/۵۷)، پتاسیم (۰/۵۳)، سیلت (۰/۴۲) و نیتروژن (۰/۳۸) بوده است.



[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]

**جدول ۷: بارهای عاملی استانداردشده متغیرهای محیطی و خاکی در چهار عامل استخراج‌شده با استفاده از تحلیل عاملی**

| متغیرها | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 |
|---|---|---|---|---|
| رطوبت پستی و بلندی (TWI) | -۰/۱۷ | ۰/۰۹ | **۰/۹۹** | -۰/۰۵ |
| بارش | **۰/۹۳** | -۰/۰۱ | -۰/۰۴ | -۰/۱۴ |
| دما | **-۰/۹۳** | ۰/۰۱ | ۰/۰۴ | ۰/۱۴ |
| ارتفاع | **۰/۹۲** | ۰/۰۱ | -۰/۰۷ | -۰/۱۱ |
| شن | **۰/۸٤** | -۰/۱۵ | ۰/۱۰ | -۰/۱۴ |
| رس | **-۰/۷۹** | ۰/۱۹ | -۰/۰۵ | -۰/۱۳ |
| تراکم گیاهی | **-۰/۷۵** | -۰/۳۵ | -۰/۱۷ | ۰/۲۴ |
| شاخص بارش استاندارد شده (SPI) | ۰/۱۷ | ۰/۱۰ | **۰/۷۲** | -۰/۰۱ |
| سایه‌زدایی | **۰/۷۱** | ۰/۰۵ | -۰/۲۹ | ۰/۱۲ |
| پوشش تاجی | -۰/۵۹ | **-۰/۷۰** | -۰/۰۹ | ۰/۱۰ |
| کربن آلی | ۰/۲۷ | -۰/۴۷ | ۰/۰۸ | **۰/٦۸** |
| کربن آلی ذره‌ای | ۰/۱۴ | -۰/۳۷ | ۰/۰۰ | **۰/٦۷** |
| درصد شیب | **۰/٦٤** | ۰/۰۵ | -۰/۳۲ | ۰/۰۹ |
| pH | -۰/۲۳ | **۰/٦٤** | ۰/۰۷ | ۰/۰۲ |
| فسفر | -۰/۱۵ | ۰/۱۶ | ۰/۰۶ | **۰/۵۸** |
| تجمع جریان (FA) | -۰/۱۱ | ۰/۰۴ | **۰/۵۷** | ۰/۰۳ |
| سنگ | ۰/۳۹ | **۰/۵٤** | ۰/۰۹ | -۰/۱۶ |
| شاخص ناهمواری زمین (TRI) | ۰/۰۴ | **-۰/۵٤** | -۰/۲۵ | ۰/۰۷ |
| پتاسیم | -۰/۳۸ | ۰/۱۹ | -۰/۲۳ | **۰/۵۳** |
| خاک لخت | ۰/۴۸ | **۰/۵۱** | ۰/۰۵ | ۰/۰۰ |
| جهت شیب | **۰/٤۷** | -۰/۰۹ | -۰/۰۶ | ۰/۰۵ |
| آهک | -۰/۲۹ | **۰/٤۳** | -۰/۰۱ | -۰/۰۷ |
| سیلت | -۰/۳۵ | -۰/۰۴ | -۰/۱۰ | **۰/٤۲** |
| شاخص موقعیت پستی و بلندی (TPI) | ۰/۳۵ | -۰/۱۶ | **-۰/۳۹** | ۰/۰۹ |
| نیتروژن | ۰/۳۲ | ۰/۱۲ | ۰/۰۳ | **۰/۳۸** |
| لاشبرگ | ۰/۱۱ | **-۰/۳۵** | ۰/۰۳ | -۰/۱۲ |
| EC | ۰/۱۸ | **۰/۳۱** | ۰/۰۴ | ۰/۰۳ |
| وزن مخصوص ظاهری | -۰/۲۴ | -۰/۰۲ | -۰/۲۱ | -۰/۰۳ |

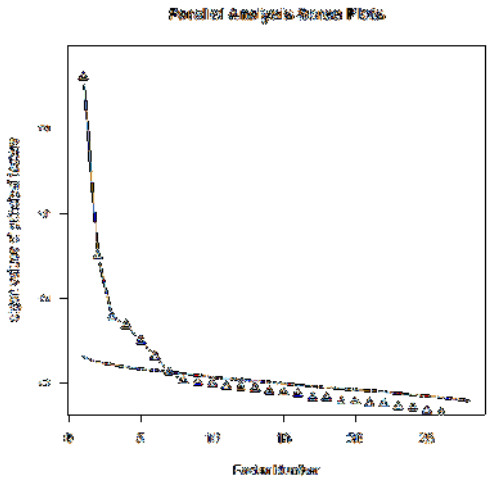
**جدول ۸: آماره‌های توصیفی چهار عامل استخراج‌شده در تحلیل عاملی اکتشافی**

| عوامل | PA1 | PA2 | PA3 | PA4 |
|---|---|---|---|---|
| مجموع مربع بارهای عاملی برای هر عامل (SS loadings) | ۷/۲۴ | ۲/۸۰ | ۲/۴۳ | ۲/۰۹ |
| نسبت واریانس تبیین‌شده توسط هر عامل (Proportion Var) | ۰/۲۶ | ۰/۱۰ | ۰/۰۹ | ۰/۰۸ |
| واریانس تجمعی (Cumulative Var) | ۰/۲۶ | ۰/۳۶ | ۰/۴۵ | ۰/۵۲ |
| نسبت واریانس تبیین‌شده نسبت به کل عوامل استخراج‌شده (Proportion Explained) | ۰/۵۰ | ۰/۱۹ | ۰/۱۷ | ۰/۱۴ |
| نسبت تجمعی واریانس تبیین‌شده از کل عوامل استخراج‌شده (Cumulative Proportion) | ۰/۵۰ | ۰/۶۹ | ۰/۸۶ | ۱/۰۰ |

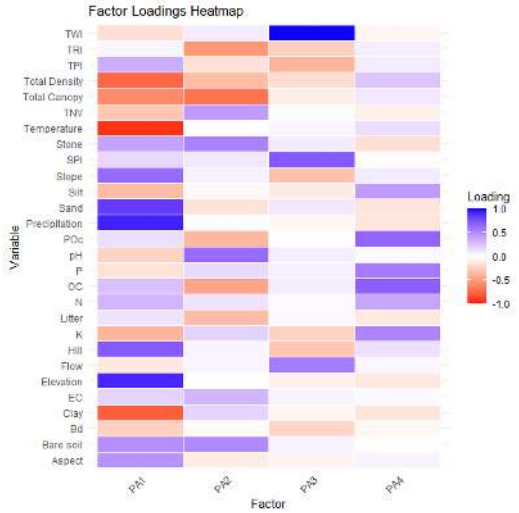


[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]



شکل ۲: نمودار سنگریزه (Scree plot) برای تعیین تعداد عوامل نهفته در تحلیل عاملی اکتشافی




شکل ۳: نتایج تحلیل موازی برای انتخاب تعداد عوامل بر اساس مقایسه مقدار ویژه داده‌های واقعی و تصادفی

## بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان‌دهنده برتری رویشگاه علف‌زار نسبت به علف-بوته‌زار در بهبود ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک و افزایش ترسیب کربن در مراتع سبلان بود. علف‌زارها با بافت ریزدانه‌تر، پوشش تاجی بالاتر و خاک لخت کم‌تر در مقایسه با علف-بوته‌زار، ترسیب کربن بیش‌تری داشتند، که با یافته‌های مرادزاده و همکاران (۲۰۲۵) در مراتع شمال سبلان و نیک‌نهاد و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت دارد. این برتری به‌دلیل کاهش فرسایش و حفظ رطوبت خاک در علف‌زارهاست که شرایط مناسب‌تری برای انباشت کربن آلی فراهم می‌کند. هم‌چنین، pH پایین‌تر و هدایت الکتریکی کم‌تر در علف‌زارها نشان‌دهنده غلظت کم‌تر یون‌های محلول و فعالیت میکروبی بالاتر بود که با تأکید لال و همکاران (۲۰۱۵) بر اهمیت کربن آلی خاک (۱/۵ تا ۲ درصد) برای بهبود کیفیت خاک و تنوع زیستی هم‌خوانی دارد. این نتایج تأیید می‌کنند که رویشگاه‌های علف‌زار پتانسیل بالایی برای مدیریت پایدار مراتع و کاهش گازهای گلخانه‌ای دارند.

بررسی اثر عمق خاک نشان داد که لایه سطحی در هر دو رویشگاه، ترسیب کربن بیش‌تری نسبت به لایه زیرین داشت که با یافته‌های قربانی و همکاران (۲۰۲۴) در مراتع شمال سبلان هم‌راستاست، جایی‌که ترسیب کربن در عمق ۰-۱۵ سانتی‌متر در علف‌زارها به‌طور معنی‌داری بالاتر بود. این موضوع بر اهمیت حفظ پوشش گیاهی متراکم و کاهش فشار چرا در لایه‌های سطحی خاک تأکید دارد و همسو با پیشنهادات اوسیری و لال (۲۰۱۷) برای مدیریت پایدار خاک است. با این حال، نیتروژن بالاتر در علف-بوته‌زار ممکن است به حضور گونه‌های بوته‌ای با ریشه‌های عمیق‌تر مربوط باشد که با نتایج فانگ و همکاران (۲۰۱۸) درباره نقش صفات گیاهی در توزیع عناصر غذایی هم‌خوانی دارد. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده تأثیر ترکیب گیاهی بر پویایی مواد مغذی و کربن خاک هستند که باید در راهبردهای مدیریت مراتع مد نظر قرار گیرند.

اثر شیب بر ویژگی‌های خاک و ترسیب کربن نیز قابل توجه بود، اما عدم معنی‌داری تفاوت‌های کربن آلی در طبقات مختلف شیب با نتایج هنری و همکاران (۲۰۲۵) که نشان دادند عوامل اقلیمی و خاکی بیش از ۹۰ درصد تغییرات ذخیره کربن را تبیین می‌کنند، مطابقت دارد. در شیب‌های پایین‌تر (۲۰-۰ درصد)، درصد رس بالاتر و شن کم‌تر همراه با pH و آهک بیش‌تر، شرایط بهتری برای ترسیب کربن فراهم کرد. در این راستا، دِنبوبا (۲۰۲۲) گزارش نمود که در مراتع خشک، فرسایش در شیب‌های



[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]

تندتر ظرفیت ترسیب را محدود می‌کند. مقایسه این یافته‌ها با مطالعه مرادزاده و همکاران (۲۰۲۵) نشان می‌دهد که در مراتع سبلان، عوامل پستی و بلندی (مانند جهت شیب) تأثیر متفاوتی بر ترسیب کربن دارند، به‌طوری‌که دامنه‌های شمالی شرایط بهتری نسبت به دامنه‌های جنوبی داشتند. این تفاوت‌ها بر پیچیدگی تعاملات پستی و بلندی و اقلیم در پویایی کربن خاک تأکید دارند.

تحلیل عاملی این پژوهش با بررسی ۲۸ متغیر و شناسایی چهار عامل کلیدی (اقلیم، پوشش زمین، پستی و بلندی و غنای شیمیایی خاک) که ۵۳ درصد واریانس داده‌ها را تبیین کردند، نقش ترکیبی عوامل محیطی را تأیید می‌کند. این نتایج با تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در مطالعه مرادزاده و همکاران (۲۰۲۵) که دو مؤلفه اصلی (۳۰/۳۶ درصد واریانس) را شناسایی کردند، قابل مقایسه است، اما تحلیل عاملی این پژوهش به‌دلیل تعداد متغیرهای بیش‌تر (۲۸ در مقابل ۲۴) و تمرکز بر درصد شیب، جزئیات بیش‌تری از ساختار داده‌ها ارائه می‌دهد. یافته‌های حاصل از پژوهش حاضر بر اهمیت حفظ پوشش گیاهی طبیعی در مراتع سبلان، به‌ویژه علف‌زارها، برای جلوگیری از کاهش ترسیب کربن در اثر توسعه انسانی تأکید دارد. این نتایج نشان‌دهنده لزوم رویکردهای یکپارچه در مدیریت مراتع برای بهینه‌سازی خدمات بوم‌شناختی مانند ترسیب کربن هستند.

با وجود اهمیت یافته‌های به‌دست آمده، چالش‌ها و محدودیت‌هایی در انجام پژوهش حاضر وجود داشت. برای نمونه، عدم معنی‌داری برخی تفاوت‌ها (مانند پتاسیم و کربن در شیب‌های مختلف) می‌تواند به تنوع بالای شرایط اقلیمی و خاکی یا محدودیت‌های داده‌ای مربوط باشد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، داده‌های بلندمدت از مراتع سبلان با تمرکز بر اثرات ترکیبی شیب، ارتفاع و مدیریت چرا جمع‌آوری شود. استفاده از مدل‌های پیشرفته‌تر مانند InVEST برای پیش‌بینی تغییرات ترسیب کربن در سناریوهای مختلف کاربری زمین و نیز بررسی کاشت گونه‌های علفی یا لگوم‌ها می‌تواند به شناسایی راهکارهای مؤثر برای افزایش ترسیب کربن کمک کند. هم‌چنین، با توجه به پتانسیل بالای رویشگاه‌های علف‌زار در مراتع سبلان جهت ترسیب کربن و بهبود کیفیت خاک، مدیریت پایدار این بوم‌سازگان‌ها می‌تواند به کاهش اثرات تغییر اقلیم و ارتقاء پایداری بوم‌سازگان‌های مرتعی کمک کند.

این پژوهش نشان داد که رویشگاه‌های علف‌زار در مراتع سبلان نسبت به رویشگاه‌های علف-بوته‌زار با پوشش تاجی بالاتر، خاک لخت کم‌تر و ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی مطلوب‌تر (مانند بافت ریزدانه‌تر و pH پایین‌تر)، ترسیب کربن بیش‌تری (۶۶/۵۹ تن بر هکتار) دارند و نقش مهمی در کاهش فرسایش و بهبود کیفیت خاک ایفا می‌کنند. ترسیب بالاتر کربن در لایه سطحی خاک (۰-۱۵ سانتی‌متر) و تأثیر عوامل محیطی مانند شیب و اقلیم، بر ضرورت حفظ پوشش گیاهی متراکم و مدیریت پایدار مراتع تأکید دارد. این یافته‌ها، هم‌راستا با مطالعات پیشین، نشان‌دهنده پتانسیل بالای علف‌زارها در کاهش گازهای گلخانه‌ای و ارتقاء پایداری بوم‌سازگان‌های مرتعی هستند. در نهایت پیشنهاد می‌شود که با کاهش فشار چرا و استفاده از مدل‌های پیشرفته مانند InVEST، می‌توان راهکارهای مؤثری برای بهینه‌سازی ترسیب کربن و حفاظت از مراتع سبلان اجرا کرد.

**References**


1. Akpa, S.I., I.O. Odeh, T.F. Bishop, A.E. Hartemink & I.Y. Amapu, 2016. Total soil organic carbon and carbon sequestration potential in Nigeria. Geoderma, 271: 202-215.
2. Alizadeh, M., A. Ghorbani, M. Moameri, M. Badrzadeh Orang, M. Bidar Lord & J. Sharifi, 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): 316-336. (In Persian)
3. 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: Chemical and Microbiological Properties, pp. 1367-1376. American Society of Agronomy, Madison, WI. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3147904
4. Blake, G.R. & K.H. Hartge, 1986. Bulk density. In: A. Klute (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods, pp. 361-376. Soil Science Society of America, Madison, WI.




[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]

5. Conant, R.T., K. Paustian & E.T. Elliott, 2001. Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. Ecological Applications, 11: 343-355.
6. Denboba, M.A., 2022. Grazing management and carbon sequestration in the Dry Lowland Rangelands of Southern Ethiopia. Sustainable Environment, 8(1): 2046959.
7. Derner, J.D. & G.E. Schuman, 2007. Carbon sequestration and rangelands: a synthesis of land management and precipitation effects. Journal of Soil and Water Conservation, 62(2): 77-85.
8. Ding, S., W. Jia, C. Su, L. Zhang & L. Liu, 2011. Research of neural network algorithm based on factor analysis and cluster analysis. Neural Computing and Applications, 20: 297-302.
9. Fang, J., G. Yu, L. Liu, S. Hu & F.S. Chapin III, 2018. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 115(16): 4015-4020.
10. Feyisa, K., S. Beyene, A. Angassa, M.Y. Said, J. De Leeuw, A. Abebe & B. Megersa, 2017. Effects of enclosure management on carbon sequestration, soil properties and vegetation attributes in East African rangelands. Catena, 159: 9-19.
11. Friedel, M.H., W.A. Laycock & G.N. Basin, 2000. Assessing rangeland condition and trend. In: L.T. Mannetje, R.M. Jones (Eds.), Field and Laboratory Methods for Grassland and Animal Production Research, pp. 227-261. CABI Publishing, Wallingford, UK. https://doi.org/10.1079/9780851993515.0227
12. 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.
13. Ghorbani, A., A. Pourali, M. Baderzadeh, A. Teymorzadeh, J. Sharifi Neyaragh & A. Pournemati, 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.
14. Ghorbani, A., M. Moameri, M. Abbasi Khalaki, S. Lazemi Zare, M. Baghaei, K. Hashemi Majd & B. Bahrami, 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. (In Persian)
15. Ghorbani, A., S. Ahmad Abadi & H. Elyasi Brojeni, 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)
16. Ghorbani, E., F. Nazari Anbaran, A. Asghari, & M. Molaei Shams Asbi, 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.
17. Henry, B., D. Allen, W. Badgery, S.G. Bray, J. Carter, R. Dalal & H. McMillan, 2025. A review of the evidence linking management and soil carbon sequestration in rangelands. Journal of Environmental Management.
18. Indiati, R. & N. Rossi, 1999. Extractability of residual phosphorus from highly manured soils. Italian Journal of Agronomy, 3(2): 63-74.
19. Jahandari, J., R. Hejazi, S.A. Jozi & A. Moradi, 2022. Impacts of urban expansion on spatio-temporal patterns of carbon storage ecosystem service in Bandar Abbas Watershed using InVEST software. Water and Soil Management and Modeling, 2(4): 91-106. (In Persian)
20. Joloro, H., G.A. Dianati Tilaki, H. Memarian & Y. Kooch, 2025. Evaluation of the effect of topography on carbon sequestration in the Kojur watershed. Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering, 19(69): 95-113.
21. Kolahchi, 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)
22. Kumar, S., P.K. Srivastava & Snehmani, 2017. GIS-based MCDA–AHP modelling for avalanche susceptibility mapping of Nubra valley region, Indian Himalaya. Geocarto International, 32(11): 1254-1267.
23. Lal, R., W. Negassa & K. Lorenz, 2015. Carbon sequestration in soil. Current Opinion in Environmental Sustainability, 15: 79-86.
24. Liu, J., D. Zhang, Q. Tang, H. Xu, S. Huang, D. Shang & R. Liu, 2021. Water quality assessment and source identification of the Shuangji River (China) using multivariate statistical methods. PLoS ONE, 16(1): e0245525.
25. McKee, T.B., N.J. Doesken & J. Kleist, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 17(22): 179-183. American Meteorological Society, Boston, MA.
26. Mgalula, M.E., O.V. Wasonga, C. Hülsebusch, U. Richter & O. Hensel, 2021. Greenhouse gas emissions and carbon sink potential in Eastern Africa rangeland ecosystems: A review. Pastoralism: Research, Policy and Practice, 11(1): 19.



[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]

**27.** Moradzadeh, V., A. Ghorbani, L. Nemati Sham-Asbi, M. Moameri, Z. Hazbavi, A. Teymourzadeh & B. Behtari, 2025. Identification of Carbon Sequestration Patterns under the Influence of Climatic, Soil, and Topographic Factors in the Rangelands of Northern Sabalan. Journal of Range and Watershed Management, 78(4): 491-512. (In Persian)
28. 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)
29. Negasa Gilo Bikila, N.G.B., Z.K. Tessema & E.G.A. Ebro Gedda Abule, 2016. Carbon sequestration potentials of semi-arid rangelands under traditional management practices in Borana, southern Ethiopia. Agriculture, Ecosystems & Environment. 223: 108-114.
30. Niknahad, G.H., F.I. Jafari & A. Sharifi, 2015. Effects of grazing exclusion on plant productivity and carbon sequestration (Case study: Gomishan rangelands, Golestan province, Iran). Rangeland Science.
31. Ojima, D.S., B.O. Dirks, E.P. Glenn, C.E. Owensby & J.O. Scurlock, 1993. Assessment of C budget for grasslands and drylands of the world. Water, Air, and Soil Pollution, 70: 95-109.
32. Okon, M.A., G.E. Osuji, B.U. Uzoho & G.M. Ahukaemere, 2014. Soil organic carbon storage as affected by physiographic positions on a caternary landscape in an ultisol in Owerri. International Journal of Research in Agriculture and Forestry, 1(2): 18-22.
33. Riley, S.J., S.D. DeGloria & R. Elliot, 1999. A Terrain Ruggedness Index that Quantifies Topographic Heterogeneity. Intermountain Journal of Sciences, 5: 1-4.
34. Rodrigues, C.I.D., L.M. Brito & L.J. Nunes, 2023. Soil carbon sequestration in the context of climate change mitigation: A review. Soil Systems, 7(3): 64.
35. Sadusky, M.C., D.L. Sparks, M.R. Noll & G.J. Hendricks, 1987. Kinetics and mechanisms of potassium release from sandy Middle Atlantic Coastal Plain soils. Soil Science Society of America Journal, 51(6): 1460-1465.
36. Sanaei, A., E.J. Sayer, Z. Yuan, H. Saiz, M. Delgado-Baquerizo, M. Sadeghinia & A. Ali, 2023. Grazing intensity alters the plant diversity–ecosystem carbon storage relationship in rangelands across topographic and climatic gradients. Functional Ecology, 37(3): 703-718.
37. Schimel, D.S., W.J. Parton, T.G. Kittel, D.S. Ojima & C.V. Cole, 1990. Grassland biogeochemistry: Links to atmospheric processes. Climatic Change, 17: 13-25.
38. Schlesinger, W.H., 1997. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change. Academic Press, New York, NY.
39. Scurlock, J.M. & D.O. Hall, 1998. The global carbon sink: A grassland perspective. Global Change Biology, 4: 229-233.
40. Sheidai Karkaj, E., A. Sepehry, H. Barani & J. Motamedi, 2017. Soil organic carbon reserve relationship with some soil properties in East Azerbaijan rangelands. Journal of Rangeland, 11(2): 125-138.
41. Shekasteband, F., S. Mohammadi Moghadam, H. Shahab Arkhazlo & A. Ghorbani, 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, 10(20): 127-147.
42. Singh, K.R., A.P. Goswami, A.S. Kalamdhad & B. Kumar, 2020. Surface water quality and health risk assessment of Kameng River (Assam, India). Water Practice and Technology, 15(4): 1190-1201.
43. Ussiri, D.A. & R. Lal, 2017. Carbon sequestration for climate change mitigation and adaptation. Springer International Publishing, Cham, pp. 287-325.
44. Vashun, K.T. & S. Jayakumar, 2012. Methods to estimate above-ground biomass and carbon stock in natural forests—a review. Journal of Ecosystem & Ecography, 2: 116.
45. Walkley, A. & I.A. Black, 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.
46. Weiss, A.D., 2001. Topographic Positions and Landforms Analysis. ESRI International User Conference, San Diego, CA, 3: 9-13.
47. Yazdanshenas, H., A. Tavili, M. Jafari & E. Shafeian, 2018. Evidence for relationship between carbon storage and surface cover characteristics of soil in rangelands. Catena, 167: 139-146.

[ Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-25 ]

[ DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.3.7.1 ]