Journal of Rangeland

Print ISSN: 2008-0891

Online ISSN: 2676-5039

Spatio-Temporal Dynamics of Soil Properties and Their Relationship with Bracken Fern (*Pteridium aquilinum*) Growth Indices Along an Altitudinal Gradient in the Alborz Slopes

Fatemeh Ghanbari[1], Jamshid Ghorbani[2], Zeinab Jafarian*[3], Rab Mars[4], Vahid Mousavi[5]

[1]. PhD Student in Rangeland Science and Engineering, Department of Range Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
[2]. Associate Prof., Department of Range Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
[3]. Corresponding Author, Prof., Department of Range Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-Mail: z.jafarian@sanru.ac.ir
[4]. Prof., University of Liverpool, Liverpool, England.
[5]. Associate Prof., Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.

Article Info

Article type:
Research Full Paper

2026; Vol 20, Issue 4

Article history:
Received: 25.07.2026
Revised: 01.11.2026
Accepted: 04.11.2026

Keywords:
Carbon-to-nitrogen ratio (C/N),
Habitat differentiation,
Invasive plants,
Multivariate analysis,
Habitat differentiation,
Nutrient cycling,
Soil fertility.

Abstract

Background and Objective: Altitudinal gradient is a major environmental factor in mountain ecosystems that, together with seasonal changes, influences the physical, chemical, and biological dynamics of soil. These changes affect the establishment and expansion of invasive species such as bracken fern (*Pteridium aquilinum*). Considering the importance of conserving mountain ecosystems, this study aimed to determine the spatio-temporal dynamics of physicochemical and biological soil properties and evaluate their relationships with bracken fern growth variables along an altitudinal gradient (1000, 1500, and 2000 m) during the growing season (June and August) in the Alborz Mountains.

Methodology: The research was conducted in three regions with different elevations in Babol County (Mazandaran Province, Iran): Tiar (1000 m), Sangchal (1500 m), and Filband (2000 m). In each region, three bracken-dominated patches (>1 ha) were selected, resulting in 30 sampling plots with a minimum distance of 50 m. Soil samples were collected from a depth of 0–30 cm. Measured variables included physical properties (texture, moisture, bulk density), chemical characteristics (pH, electrical conductivity, organic carbon, total nitrogen, nitrate, ammonium, and available phosphorus), and microbial activity indicators (basal respiration and substrate-induced respiration). Sampling was repeated at the beginning (June) and the end (August) of the growing season. Simultaneously, bracken fern height and biomass were recorded. Data were analyzed using R software. Two-way analysis of variance (ANOVA) was used to evaluate the effects of altitude, season, and their interaction, followed by Tukey's HSD test. Principal Component Analysis (PCA) was applied to examine multivariate patterns and habitat differentiation.

Results: Two-way ANOVA showed that soil and plant variables were significantly affected by altitude, season, and their interaction. Bracken biomass increased from negligible amounts in June to 2420 g m^{-2} in August at 1500 m. Available phosphorus decreased across all elevations from June to August. Nitrate and

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.4.1.7]

ammonium also showed seasonal and altitudinal variation. Organic carbon and the C/N ratio increased with elevation, and the highest C/N ratio (20.72) was recorded at 2000 m. Basal respiration and substrate-induced respiration increased across all elevations in August. However, soil pH and moisture were unaffected by seasonal changes and followed the altitudinal gradient. Principal Component Analysis (PCA) showed that the first axis was mainly controlled by pH, phosphorus, and the C/N ratio, whereas the second axis was controlled by substrate-induced respiration, ammonium, and electrical conductivity. Bracken biomass showed a positive correlation with substrate-induced respiration and a negative correlation with phosphorus.

Conclusion: Soil properties in bracken-dominated habitats result from the interaction between spatial physical constraints and temporal biological drivers. Bracken fern depleted phosphorus resources through its growth and stimulated late-season microbial activity by supplying carbon-rich compounds. Understanding these spatio-temporal dynamics provides a scientific basis for the ecological management and conservation of vulnerable mountain ecosystems.

Cite this article: Ghanbari, F., J. Ghorbani, Z. Jafarian, R. Mars, V. Mousavi, 2026. Spatio-Temporal Dynamics of Soil Properties and Their Relationship with Bracken Fern (*Pteridium aquilinum*) Growth Indices Along an Altitudinal Gradient in the Alborz Slopes. Journal of Rangeland, 20(4): 338-351.

© The Author(s).
DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.4.1.7

Publisher: Iranian Society for Range Management

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.4.1.7]

مـــرتـــع

شاپا چاپی: ۰۸۹۱-۲۰۰۸

شاپا الکترونیکی: ۵۰۳۹-۲۶۷۶

پویایی مکانی-زمانی ویژگی‌های خاک و ارتباط آن با شاخص‌های رویشی سرخس عقابی (*Pteridium aquilinum*) در امتداد گرادیان ارتفاعی دامنه‌های البرز

فاطمه قنبری[۱]، جمشید قربانی[۲]، زینب جعفریان[۳*]، راب مارس[۴]، وحید موسوی[۵]

[۱] دانشجوی دکتری علوم و مهندسی مرتع، گروه مرتع، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

[۲] نویسنده مسئول، دانشیار گروه مرتع، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

[۳] نویسنده مسئول، استاد گروه مرتع، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: z.jafarian@sanru.ac.i

[۴] استاد دانشگاه لیورپول، لیورپول، انگلستان.

[۵] دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل – پژوهشی

۱۴۰۵؛ جلد ۲۰، شماره ۴

تاریخ دریافت ۱۴۰۵/۰۵/۰۳
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۸/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۱۳

واژه‌های کلیدی:
تحلیل چندمتغیره،
تفکیک رویشگاه،
چرخه عناصر غذایی،
حاصلخیزی خاک،
گیاهان مهاجم،
نسبت کربن به نیتروژن (*C/N*).

چکیده

سابقه و هدف: گرادیان ارتفاعی یکی از عوامل محیطی کلان در اکوسیستم‌های کوهستانی است که در ترکیب با تغییرات فصلی، در پویایی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک نقش دارد. این تغییرات می‌توانند استقرار و گسترش گونه‌های مهاجم نظیر سرخس عقابی (*Pteridium aquilinum*) را تحت تأثیر قرار دهند. با توجه به اهمیت حفظ اکوسیستم‌های کوهستانی، این پژوهش با هدف تعیین الگوی پویایی مکانی-زمانی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و زیستی خاک و ارزیابی ارتباط آن‌ها با متغیرهای رشد سرخس عقابی در گرادیان ارتفاعی (۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ متر) طی فصول رویشی (خرداد و مرداد) در دامنه‌های البرز انجام شد.

مواد و روش: این پژوهش در سه منطقه با طبقات ارتفاعی متفاوت در شهرستان بابل (استان مازندران) شامل تیار (۱۰۰۰ متر)، سنگچال (۱۵۰۰ متر) و فیلبند (۲۰۰۰ متر) انجام شد. در هر منطقه، سه توده بزرگ‌تر از یک هکتار از رویشگاه‌های تحت سلطه سرخس عقابی انتخاب و در مجموع ۳۰ پلات نمونه‌برداری با حداقل فاصله ۵۰ متر مستقر شد. نمونه‌برداری از خاک در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری انجام شد. متغیرهای اندازه‌گیری‌شده شامل خصوصیات فیزیکی (بافت خاک، رطوبت و چگالی ظاهری)، ویژگی‌های شیمیایی (اسیدیته، هدایت الکتریکی، کربن آلی، نیتروژن کل، نیترات، آمونیوم و فسفر قابل جذب) و شاخص‌های فعالیت میکروبی (تنفس پایه و تنفس برانگیخته) بودند. نمونه‌برداری در ابتدای فصل رویش (خردادماه) و اواخر فصل رویش (مردادماه) تکرار شد. هم‌زمان، ارتفاع و زیست‌توده سرخس عقابی نیز اندازه‌گیری و ثبت گردید. تجزیه‌وتحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار R انجام شد؛ برای بررسی اثر ارتفاع، فصل و اثر متقابل آن‌ها از آنالیز واریانس دوطرفه (Two-way ANOVA) و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون توکی (Tukey HSD) استفاده شد. همچنین، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای بررسی الگوهای چندمتغیره و تفکیک رویشگاه‌ها به کار گرفته شد.

نتایج: نتایج آنالیز واریانس دوطرفه نشان داد که متغیرهای خاک و گیاه تحت تأثیر ارتفاع، فصل و اثر متقابل آن‌ها قرار دارند. زیست‌توده سرخس عقابی از مقادیر ناچیز در خردادماه به ۲۴۲۰ گرم در متر مربع در مردادماه (ارتفاع ۱۵۰۰ متر) افزایش یافت. هم‌زمان، غلظت فسفر قابل جذب خاک از خرداد به مردادماه در تمامی طبقات ارتفاعی کاهش یافت. اشکال معدنی نیتروژن (نیترات و آمونیوم) نیز الگوهای فصلی و ارتفاعی نشان

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.4.1.7]

دادند. کربن آلی و نسبت C/N با افزایش ارتفاع روند صعودی داشتند و بیشترین نسبت C/N (۷۲/۲۰) در ارتفاع ۲۰۰۰ متر ثبت شد. شاخص‌های زیستی (تنفس پایه و تنفس برانگیخته) در مردادماه در تمامی طبقات ارتفاعی افزایش یافتند. با این وجود، اسیدیته (pH) و رطوبت خاک تحت تأثیر تغییرات فصلی قرار نگرفتند و تنها تابع گرادیان ارتفاعی بودند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان داد که محور اول عمدتاً توسط pH، فسفر و نسبت C/N و محور دوم توسط SIR، آمونیوم و هدایت الکتریکی کنترل می‌شوند. زیست‌توده سرخس نیز همبستگی مثبت با تنفس برانگیخته و همبستگی منفی با فسفر نشان داد.

نتیجه‌گیری: این پژوهش نشان داد که ویژگی‌های خاک در رویشگاه‌های سرخس عقابی حاصل تعامل محدودیت‌های فیزیکی مکانی و محرک‌های بیولوژیک زمانی است. سرخس عقابی با رشد خود باعث تخلیه منابع فسفر شده و با تزریق ترکیبات کربنی، فعالیت میکروبی را در اواخر فصل رویش تحریک می‌کند. شناخت این پویایی مکانی-زمانی می‌تواند بستری علمی برای برنامه‌ریزی و مدیریت اکولوژیک اکوسیستم‌های آسیب‌پذیر کوهستانی فراهم کند.

استناد: قنبری، ف.،ج. قربانی، ز. جعفریان، ر. مارس، و. موسوی، ۱۴۰۵. پویایی مکانی-زمانی ویژگی‌های خاک و ارتباط آن با شاخص‌های رویشی سرخس عقابی (*Pteridium aquilinum*) در امتداد گرادیان ارتفاعی دامنه‌های البرز. مرتع، ۲۰(۴): ۳۳۸-۳۵۱.

DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.4.1.7

ناشر: انجمن علمی مرتعداری ایران

© نویسندگان

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.4.1.7]

مقدمه

سرخس عقابی (*Pteridium aquilinum*) از خانواده Dennstaedtiaceae، یکی از گسترده‌ترین سرخس‌های جهان است که پراکنش آن در اغلب قاره‌ها، از مناطق معتدل تا نواحی مرطوب، گزارش شده است (۱۷). این گونه در ایران نیز در جنگل‌های هیرکانی و دامنه‌های البرز حضور داشته و در بسیاری از مناطق تخریب‌شده یا بازشده به‌عنوان گونه‌ای مهاجم و انحصارطلب شناخته می‌شود (۴). سرخس عقابی با تولید لاش‌برگ اسیدی، شبکه ریزوم‌های گسترده و رقابت شدید، قادر است ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و زیستی خاک را تغییر دهد؛ از جمله کاهش pH خاک، تغییر ترکیب میکروبی و تأثیر بر نفوذپذیری خاک (۷ و ۱۸) این ویژگی‌ها موجب می‌شود که سرخس عقابی نه‌تنها از خاک تأثیر بپذیرد، بلکه خود نیز به‌طور فعال شرایط رویشگاه را به نفع گسترش بیشتر مهندسی و تغییر دهد.

گرادیان ارتفاعی یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی کلان در اکوسیستم‌های کوهستانی است که به‌طور هم‌زمان ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و خصوصیات گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در مناطق کوهستانی عوامل مختلف ارتفاع، جهت و آتش سوزی بر روی پوشش گیاهی و خاک اثر می گذارد (۲، ۶، ۱۵ و ۲۱). تغییرات دما، رطوبت، ورودی مواد آلی، شدت تجزیه و فرایندهای هوازدگی در طول ارتفاع موجب می‌شود که متغیرهای خاک الگوهای متفاوتی را نشان دهند (۱۶). بررسی الگوهای خاک‌شناسی در مناطق کوهستانی ایران بیانگر آن است که برخی عناصر غذایی مایل به کاهش در ارتفاعات بالاتر هستند؛ به‌طوری‌که همگام با فرایندهای هوازدگی و تغییر شرایط اکوسیستمی، pH خاک کاهش یافته و روند اسیدی شدن شدت می‌یابد (۱۰). در مقابل، مقدار کربن آلی و ماده آلی خاک با افزایش ارتفاع روند افزایشی نشان می‌دهد، زیرا افت دما در مناطق مرتفع‌تر سرعت تجزیه بقایای گیاهی را کند کرده و موجب تجمع مواد آلی می‌شود (۸ و ۱۰).

تغییرات بافتی نیز از الگوهای مهم در گرادیان ارتفاعی است؛ شست‌وشو و فرسایش ذرات ریز در ارتفاعات بالا و انتقال آن‌ها به دامنه‌های پایین‌تر، معمولاً منجر به افزایش درصد شن در ارتفاعات بالاتر و تجمع رس در بخش‌های پایینی گرادیان می‌شود (۱۳). همچنین، شاخص‌های زیستی و عملکردی میکروبیوم خاک، مانند تنفس پایه (BR)و تنفس برانگیخته (SIR)، به محدودیت‌های اقلیمی ارتفاعات بالا حساس بوده و تمایل به کاهش در لایه‌های مرتفع‌تر دارند (۱۹). در چنین زمینه‌ای، استقرار و عملکرد سرخس عقابی نه‌تنها تحت تأثیر فاکتورهای مکانی (گرادیان ارتفاعی) قرار دارد، بلکه به‌شدت از پویایی‌های زمانی و فصلی نیز تأثیر می‌پذیرد. مطالعات نشان داده‌اند که تراکم، زیست‌توده و پارامترهای فنولوژیک سرخس عقابی ارتباط تنگاتنگی با تغییرات اقلیمی در طول توپوگرافی دارند (۳ و ۴). با توجه به رشد انفجاری این گونه در طول فصل رویش تابستان، جذب عناصر غذایی از خاک و بازگشت ترکیبات کربنی از طریق ترشحات ریشه‌ای می‌تواند ویژگی‌های شیمیایی و زیستی بستر را در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت دچار دگرگونی کند. از این رو، بررسی هم‌زمان پویایی‌های فصلی و ارتفاعی در رویشگاه‌های تحت سلطه این گونه می‌تواند الگوهای پاسخ فرایندهای خاک را به تعاملات مکان و زمان روشن سازد.

علی‌رغم گستردگی مطالعات روی جوامع گیاهی دامنه‌های البرز، تمرکز بر تغییرات هم‌زمان فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و عملکرد زیستی خاک در بسترهای تحت تهاجم گونه‌های انحصارطلب کمتر مورد توجه قرار گرفته است. ضرورت انجام این پژوهش از آنجا ناشی می‌شود که اکوسیستم‌های کوهستانی به‌شدت در برابر تخریب خاک و از دست رفتن تنوع زیستی آسیب‌پذیرند و شناخت دقیق تغییرات ساختاری بستر خاک در امتداد عامل کلان ارتفاع و چرخه‌های فصلی، پیش‌نیاز هرگونه برنامه‌ریزی مدیریتی و اکولوژیک است. بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش، تعیین الگوی پویایی مکانی–زمانی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و خصوصیات رشد سرخس عقابی در یک گرادیان ارتفاعی مشخص (۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ متر) در طول فصول رویشی (خرداد و مرداد) و ارزیابی پیوندهای چندمتغیره آن‌ها با استفاده از تحلیل‌های پیشرفته آماری است.

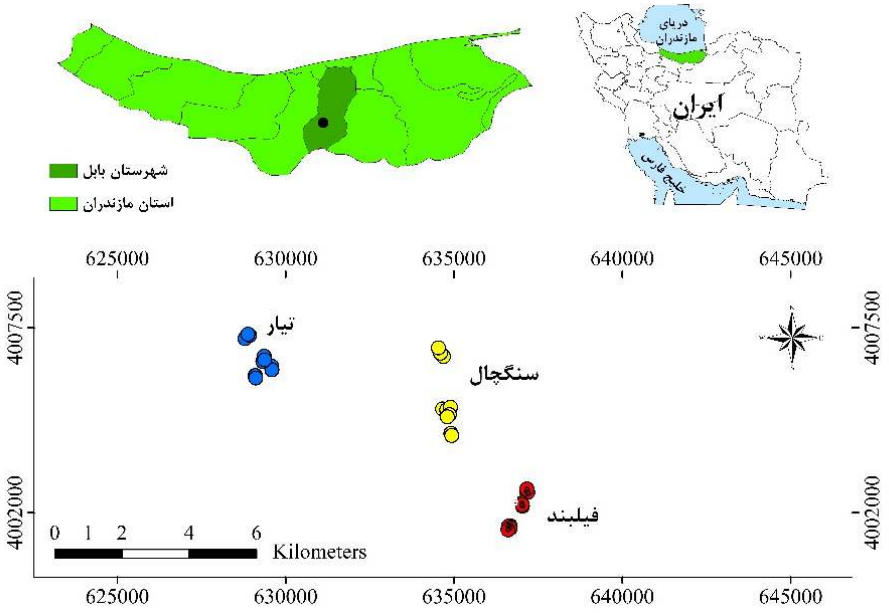
[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.4.1.7]

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مورد مطالعه

با توجه به مناطق تحت هجوم سرخس عقابی در استان مازندران سه منطقه در شهرستان بابل انتخاب شد که دارای ارتفاع متفاوت از سطح دریا هستند و نمونه برداری در دو فصل بهار و تابستان سال ۱۴۰۴ انجام شد. این مناطق تیار (کمتر از ارتفاع ۱۱۰۰ متر)، سنگچال (بین ارتفاع ۱۴۰۰تا ۱۶۰۰ متر) و فیلبند (بیشتر از ارتفاع ۲۰۰۰ متر) از توابع بخش بندپی غربی شهرستان بابل در استان مازندران خواهند بود و در محدوده طول های جغرافیایی ′۲۵ °۵۲ تا ′۳۵ °۵۲ شرقی و عرض های جغرافیایی ′۱۲ °۳۶ تا ′۰۹ °۳۶ شمالی قرار دارند شکل (۱). نمونه‌برداری در دو مرحله، شامل خرداد (ابتدای فصل رشد) و مرداد (اوج فصل رشد) انجام گرفت. با توجه به داده‌های دما و بارش ایستگاه هواشناسی گت کلا، میانگین بارندگی سالانه حدود ۴۸۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۲ درجه سانتیگراد است. حداکثر دما در فصل تابستان به ۳۲ درجه سانتیگراد و حداقل دما در فصل زمستان به صفر درجه سانتیگراد می‌رسد. طبق طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، اقلیم منطقه تیار نیمه مرطوب معتدل، سنگچال نیمه مرطوب معتدل و فیلبند نیمه خشک سرد است (۳).



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه و مکان های نمونه برداری در تیار، سنگچال و فیلبند، استان مازندران

ابتدا نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) و نقشه جهت شیب تهیه شد و بر اساس آن سه طبقه ارتفاعی تعیین گردید. سپس با استفاده از نقاط حضور سرخس عقابی گزارش‌شده توسط آموزگار و همکاران (۲۰۲۰) و همچنین تصاویر Google Earth، لکه‌های استقرار این گونه در هر منطقه شناسایی شدند. در هر یک از سه منطقه، سه توده سرخس عقابی با مساحت بیش از یک هکتار انتخاب شد. در هر توده، ۳ تا ۴ پلات یک مترمربعی استقرار یافت که در مجموع ۳۰ پلات را تشکیل داد. نمونه‌برداری در دو مرحله (خرداد و مرداد ۱۴۰۳) انجام شد. به‌منظور جلوگیری از تأثیر برداشت زیست‌توده در مرحله نخست بر نتایج مرحله دوم، در مردادماه پلات‌های جدیدی در مجاورت پلات‌های اولیه و با شرایط رویشگاهی مشابه استقرار یافتند. در هر پلات، ابتدا ارتفاع سرخس عقابی از سطح خاک تا بلندترین برگ با استفاده از متر اندازه‌گیری شد. سپس به‌منظور تعیین زیست‌توده هوایی، تمامی اندام‌های هوایی سرخس موجود در پلات یک مترمربعی از سطح خاک برداشت و توزین شد و در پایان نمونه خاک برداشت شد. از آنجا که

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-26]
[DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.4.1.7]

برداشت زیست‌توده ماهیت تخریبی داشت، در مرحله دوم نمونه‌برداری (مردادماه) پلات‌های جدیدی در مجاورت پلات‌های مرحله اول و با شرایط رویشگاهی مشابه انتخاب شدند تا از تأثیر برداشت اولیه بر نتایج جلوگیری شود. برای جلوگیری از خودهمبستگی در لکه‌های سرخس عقابی نمونه‌برداری شده، حداقل فاصله ۵۰ متر بین نقاط نمونه‌برداری در نظر گرفته شد. از پلات های یک متر مربعی برای نمونه برداری از سرخس عقابی استفاده شد و در مرکز هر پلات یک مترمربعی، یک زیرپلات به ابعاد ۰/۵×۰/۵ متر برای نمونه‌برداری خاک تعیین شد (۵). برای بررسی مشخصات سرخس در متغیر ارتفاع و زیتوده سرخس در هرطبقه ارتفاعی و فصل در ۱۰ پلات ۱در ۱ متر اندازه گیری شد (۳).

برای اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک، در هر مرحله نمونه‌برداری، از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک در مجاورت بوته‌های سرخس عقابی نمونه برداشت شد. در مرکز هر پلات یک نمونه خاک تهیه شد و نمونه‌ها برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی به آزمایشگاه منتقل شدند. همین فرآیند برای همه پلات ها انجام شده تا در مجموع ۳۰ نمونه ترکیبی خاک تهیه و تحت آنالیزهای مختلف تحلیلی قرار گرفته تا خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک تحت تاثیر سرخس عقابی بررسی شود. ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده شامل بافت خاک، رطوبت، pH، هدایت الکتریکی (EC)، کربن آلی، نیتروژن کل، آمونیوم، نیترات، فسفر قابل جذب، تنفس پایه (BR) و تنفس برانگیخته (SIR) بود که بر اساس روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شدند (۱و۱۲).

تجزیه آماری داده‌ها

جهت بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون شاپیرو و همگنی واریانس از آزمون لون استفاده شد. همچنین جهت بررسی تفاوت بین طبقات ارتفاعی و فصل از آنالیز واریانس دو طرفه استفاده شد و جهت مقایسه میانگین از آزمون توکی HSD استفاده شد. متغیرهای بافت خاک با توجه به اینکه دریک فصل اندازه گیری شده اند با استفاده از آنالیزواریانس یک‌طرفه تحلیل شد. همچنین جهت بررسی ارتباط متغیرهای خاک با یکدیگر ونیز تعیین مهمترین متغیر خاک از آنالیز چندمتغیره از آزمون تجزیه مولفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. کلیه آنالیزهای آماری با استفاده از نرم‌افزار R ورژن ۴.۶.۰ و بسته FactoMineR و agricolae استفاده شد.

نتایج

نتایج آنالیز واریانس دوطرفه (جدول ۱) و مقایسه ویژگی‌های خاک در سه ارتفاع (جدول ۲) نشان داد که اغلب متغیرها به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تغییرات ارتفاع، فصل و اثر متقابل این دو فاکتور قرار گرفتند. غلظت فسفر قابل جذب نه‌تنها با افزایش ارتفاع روند کاهشی معنی‌داری نشان داد، بلکه تحت تأثیر شدید فصل نیز قرار داشت؛ به‌طوری‌که بالاترین میزان آن در خردادماه و در ارتفاع ۱۰۰۰ متری (۲۲/۵۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) ثبت شد و در مردادماه در تمامی طبقات ارتفاعی افت چشمگیری پیدا کرد و در ارتفاع ۲۰۰۰ متری به ۸/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم رسید (P<۰/۰۱). اشکال معدنی نیتروژن نیز الگوهای متفاوتی نشان دادند؛ غلظت نیترات در خردادماه از ۱۶/۶۶ در ارتفاع پایین به ۱۹/۳۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم در ارتفاع بالا افزایش یافت، درحالی‌که آمونیوم در خردادماه در تمامی طبقات حول میانگین ۱۴/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم ثابت بود، اما در مردادماه در ارتفاع ۱۰۰۰ متری به بالاترین مقدار خود (۱۶/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) رسید (P<۰/۰۱). نیتروژن کل در خردادماه تحت تأثیر ارتفاع نبود (حدود ۰/۲ درصد)، اما در مردادماه با افزایش ارتفاع کاهش یافت و به ۰/۱۳ درصد در بالاترین طبقه رسید (P<۰/۰۱). اسیدیته خاک (pH) تنها تحت تأثیر گرادیان ارتفاعی کاهش یافت (از میانگین حدود ۷/۱ در ارتفاع ۱۰۰۰ به حدود ۶/۱ در ارتفاع ۲۰۰۰ متر)، درحالی‌که هدایت الکتریکی (EC) هم تحت تأثیر ارتفاع و هم فصل بود و از ۱۶۵/۲۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در مردادماهِ طبقه اول، به ۷۲/۷۷ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در خردادماهِ طبقه میانی کاهش یافت (P<۰/۰۱). در مقابل، کربن آلی روند صعودی بارزی را با افزایش ارتفاع نشان داد که در مردادماه شدت بیشتری داشت (از ۲/۳۸ به ۲/۷۱ درصد). این انباشت کربن در مردادماه با جهش شدید نسبت C/N همراه بود؛ به‌طوری‌که این شاخص در بالاترین طبقه ارتفاعی به ۲۰/۷۲ رسید (P<۰/۰۱). رطوبت خاک متأثر از فصل نبود، اما صعود

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.4.1.7]

چشمگیری همگام با گرادیان ارتفاعی نشان داد و از حدود ۳۳ درصد در طبقه اول به بالای ۵۰ درصد در بالاترین طبقه رسید. شاخص‌های زیستی خاک شامل تنفس پایه (BR) و تنفس برانگیخته (SIR) در مردادماه به‌طور چشمگیری بیشتر از خردادماه بودند. SIR از اوج ۰/۸۵ در مردادماهِ ارتفاع ۱۰۰۰ متری، به ۰/۳۶ در خردادماهِ ارتفاع ۲۰۰۰ متری افت کرد (P<۰/۰۱). همگام با این تغییرات، زیست‌توده سرخس عقابی از میانگین بسیار ناچیز در خردادماه (حداکثر ۱۳۲ گرم در ارتفاع ۱۵۰۰ متر)، در مردادماه با جهشی زیاد به ۲۴۲۰ گرم در همان ارتفاع رسید که گویای اثر متقابل معنی‌دار ارتفاع و فصل بر پویایی رشد این گونه است(P<۰/۰۱).

جدول ۱: جدول آنالیز واریانس اثر فصل و ارتفاع برخصوصیات خاک و سرخس

فاکتور خاک	فصل (F)	فصل (p)	ارتفاع (F)	ارتفاع (p)	فصل × ارتفاع (F)	فصل× ارتفاع (p)
فسفر	۲۵/۱۴	۰۰۱/۰<	۵۵/۳۲	۰۰۱/۰<	۰۸/۸	۰۰۱/۰
نیترات	۸۳/۹	۰۰۳/۰	۳۱/۰	۷۳۳/۰	۵۱/۶	۰۰۳/۰
آمونیوم	۳۵/۶۲	۰۰۳/۰<	۸۱/۳	۰۲۸/۰	۴۹/۸۴	۰۱۶/۰
نیتروژن	۲۳/۰	۶۳۲/۰	۵۷/۲	۰۸۶/۰	۲۰/۷	۰۰۲/۰
کربن	۳۱/۱۵	۰۰۱/۰<	۵۲/۸	۰۰۱/۰	۹۶/۰	۳۸۸/۰
هدایت الکتریکی	۶۲/۲۰	۰۰۱/۰<	۷۸/۸	۰۰۱/۰	۸۴/۴	۰۱۲/۰
pH	۶۱/۱	۲۱۰/۰	۶/۳۲	۰۰۱/۰<	۵۱/۰	۶۰۲/۰
تنفس میکروبی پایه	۹۷/۹	۰۰۳/۰	۷۷/۳	۰۳/۰	۱۵/۲	۱۲۶/۰
تنفس میکروبی برانگیخته	۰۱/۱۶۲	۰۰۱/۰<	۰۱/۷	۰۰۲/۰	۱/۴	۰۲۲/۰
رطوبت	۲۱/۱	۲۷۷/۰	۵۹/۱۲	۰۰۱/۰<	۲۸/۰	۷۶۰/۰
نسبت C/N	۹۶/۱۷	۰۰۱/۰<	۰۶/۱۷	۰۰۱/۰<	۳۲/۱۱	۰۰۱/۰<
رس			۵۷/۲۵	۰۰۰/۰		
سیلت			۰۰/۰	۰۰۰/۱		
شن			۷۳/۹	۰۰۱/۰		
ارتفاع	۶۱/۱۳۳	۰۰۱/۰<	۸۴/۲۲	۰۰۱/۰<	۵۱/۶	۰۰۳/۰
زیتوده	۲۵/۱۴۴	۰۰۱/۰<	۶۷/۳	۰۳۲/۰	۳۸/۳	۰۴۱/۰

ارزیابی ماتریس ضرایب همبستگی ساختار روابط خطی متغیرها را در شرایط پویای فصلی روشن ساخت. بر اساس این الگو، زیست‌توده همبستگی مثبت بسیار قوی با ارتفاع گیاه (r=۰/۸۳) و تنفس برانگیخته (SIR) با (r=۰/۶۶) نشان داد که بیانگر ارتباط مستقیم رشد گیاه با تحریک فعالیت‌های میکروبی در اواخر فصل است. SIR همچنین همبستگی مثبت بالایی با غلظت آمونیوم (r=۰/۶۹) و هدایت الکتریکی (r=۰/۴۶) داشت. اسیدیته (pH) همبستگی مثبت و قوی با غلظت فسفر (r=۰/۵۷) و هدایت الکتریکی (r=۰/۵۹) برقرار کرد. در مقابل، متغیر نسبت C/N همبستگی منفی شدیدی با نیتروژن کل (r=۰/۷۲) و اسیدیته خاک (r=۰/۴۱) ثبت نمود. رطوبت خاک نیز ضمن داشتن همبستگی منفی با فسفر (r= -۰/۳۸) و pH بستر (r= -۰/۴۰)، همبستگی مثبتی با نیتروژن کل (r=۰/۳۸) ایجاد کرده است. کربن آلی نیز همبستگی منفی بالایی با فسفر (r= -۰/۶۱) نشان داد که نشان‌دهنده پویایی متضاد تجمع کربن و کاهش عناصر پرمصرف در طول فصل رشد است (شکل ۲).

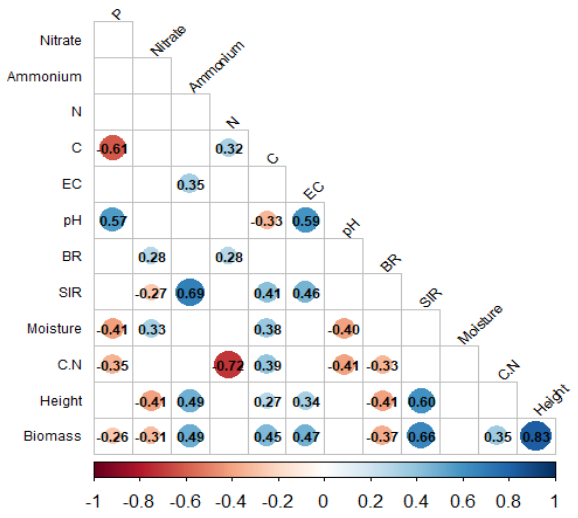
[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.4.1.7]

جدول ۲: مقایسه میانگین متغیرهای خاک و سرخس در طبقات مختلف ارتفاعی

فاکتور	فصل	۱۰۰۰ متر	۱۵۰۰ متر	۲۰۰۰ متر
فسفر	تابستان	۱۳/۷۲ ± ۰/۲۶ bA	۱۰/۲۰ ± ۰/۸۳ aB	۸/۵۰ ± ۰/۸۹ aB
	بهار	۲۲/۵۱ ± ۱/۳۷ aA	۱۴/۴۲ ± ۲/۳۶ aB	۶/۸۴ ± ۰/۷۱ aC
نیترات	تابستان	۱۶/۸۵ ± ۰/۵۰ aA	۱۶/۷۰ ± ۰/۱۹ aA	۱۴/۹۵ ± ۰/۱۵ bB
	بهار	۱۶/۶۶ ± ۰/۳۱ aA	۱۷/۷۴ ± ۰/۵۵ aA	۱۹/۳۷ ± ۱/۴۴ aA
آمونیوم	تابستان	۱۶/۹۰ ± ۰/۲۹ aA	۱۶/۲۴ ± ۰/۱۴ aAB	۱۵/۴۶ ± ۰/۳۵ aB
	بهار	۱۴/۴۸ ± ۰/۲۸ bA	۱۴/۷۷ ± ۰/۲۶ bA	۱۴/۵۴ ± ۰/۱۲ bA
نیتروژن	تابستان	۰/۲۱ ± ۰/۰۱ aA	۰/۲۲ ± ۰/۰۲ aA	۰/۱۳ ± ۰/۰۰ bB
	بهار	۰/۱۸ ± ۰/۰۱ aA	۰/۲۰ ± ۰/۰۲ aA	۰/۲۲ ± ۰/۰۲ aA
کربن	تابستان	۲/۳۸ ± ۰/۰۸ aB	۲/۵۴ ± ۰/۱۰ aAB	۲/۷۱ ± ۰/۰۲ aA
	بهار	۱/۸۵ ± ۰/۱۴ bB	۲/۱۷ ± ۰/۱۸ aAB	۲/۵۰ ± ۰/۱۲ aA
EC	تابستان	۱۶۵/۲۵ ± ۷/۸۲ aA	۱۵۳/۵۹ ± ۲۰/۴۸ aAB	۱۰۳/۸۹ ± ۹/۳۸ aB
	بهار	۱۲۸/۷۱ ± ۸/۲۶ bA	۷۲/۷۷ ± ۳/۷۱ bB	۹۵/۲۳ ± ۱۲/۴۳ aB
pH	تابستان	۶/۹۹ ± ۰/۱۲ aA	۶/۵۷ ± ۰/۱۸ aA	۶/۰۲ ± ۰/۰۷ aB
	بهار	۷/۲۷ ± ۰/۱۶ aA	۶/۵۹ ± ۰/۰۸ aB	۶/۱۲ ± ۰/۱۲ aC
تنفس میکروبی پایه	تابستان	۰/۱۹ ± ۰/۰۲ aA	۰/۱۰ ± ۰/۰۱ bB	۰/۱۳ ± ۰/۰۲ aB
	بهار	۰/۲۰ ± ۰/۰۱ aA	۰/۱۸ ± ۰/۰۳ aA	۰/۱۹ ± ۰/۰۲ aA
تنفس میکروبی برانگیخته	تابستان	۰/۸۵ ± ۰/۰۳ aA	۰/۷۱ ± ۰/۰۵ aB	۰/۶۳ ± ۰/۰۳ aB
	بهار	۰/۳۹ ± ۰/۰۲ bA	۰/۳۸ ± ۰/۰۴ bA	۰/۳۶ ± ۰/۰۳ bA
رطوبت	تابستان	۳۳/۲۷ ± ۱/۵۴ aB	۳۸/۳۲ ± ۱/۷۷ aB	۵۰/۲۰ ± ۳/۴۰ aA
	بهار	۳۳/۵۳ ± ۱/۸۲ aB	۴۳/۲۰ ± ۲/۶۷ aAB	۵۵/۷۲ ± ۸/۵۹ aA
C/N	تابستان	۱۱/۴۹ ± ۰/۷۵ aB	۱۲/۳۱ ± ۱/۱۸ aB	۲۰/۷۲ ± ۰/۸۴ aA
	بهار	۱۰/۶۸ ± ۱/۰۳ aA	۱۱/۴۹ ± ۱/۰۶ aA	۱۱/۹۴ ± ۰/۶۴ bA
رس	تابستان	۳۰/۲۰ ± ۱/۰۱ (a)	۲۲/۶۰ ± ۰/۹۹ (b)	۱۸/۸۹ ± ۱/۴۲ (b)
سیلت	تابستان	۴۶/۰۰ ± ۱/۱۲ (a)	۴۶/۰۰ ± ۲/۳۱ (a)	۴۶/۰۰ ± ۲/۱۱ (a)
شن	تابستان	۲۴/۸۰ ± ۱/۷۹ (b)	۳۱/۴۰ ± ۱/۵۵ (a)	۳۵/۱۱ ± ۱/۶۴ (a)
ارتفاع سرخس	تابستان	۱۱۳/۳۰ ± ۱۰/۷۷ aB	۱۶۸/۸۰ ± ۱۰/۵۲ aA	۱۲۴/۰۰ ± ۱۳/۶۴ aB
	بهار	۶۰/۵۰ ± ۷/۱۳ bB	۸۲/۳۰ ± ۵/۲۵ bA	۵/۵۰ ± ۲/۵۲ bC
زیتوده سرخس	تابستان	۱۴۴۰/۰۰ ± ۲۷۱/۰۹ aB	۲۴۲۰/۰۰ ± ۲۹۵/۱۶ aA	۱۸۸۶/۰۰ ± ۲۱۸/۱۷ aAB
	بهار	۱۱۸/۱۰ ± ۱۷/۳۳ bA	۱۳۲/۰۰ ± ۹/۸۹ bA	۱۰/۰۰ ± ۵/۵۸ bB

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار و حروف متفاوت نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار است.



شکل ۲: ماتریس همبستگی بین متغیرهای خاک و شاخص‌های رشد سرخس عقابی

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.4.1.7]

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان داد که مؤلفه اول (Dim1) با تبیین ۲۵/۶ درصد از واریانس کل، و مؤلفه دوم (Dim2) با تبیین ۱/۲۲ درصد، محورهای اصلی تمایز متغیرها در امتداد فاکتورهای مکان و زمان هستند. در مؤلفه اول، اسیدیته (pH) با ۰/۸۲ و فسفر (P) با ۰/۷۹ بیشترین بارگذاری مثبت، و نسبت C/N با ۰/۷۱- و کربن آلی (C) با ۰/۶۳- قوی‌ترین بارگذاری منفی را داشتند که نشان‌دهنده تفکیک قوی نمونه‌های ارتفاع پایین از ارتفاعات بالا در این محور است. در مقابل، مؤلفه دوم بیشتر تحت تأثیر متغیرهای حساس به تغییرات فصلی قرار داشت؛ به‌طوری‌که تنفس برانگیخته (SIR) با ۰/۸۸، غلظت آمونیوم با ۰/۷۸ و هدایت الکتریکی (EC) با ۰/۶۹ بالاترین بارگذاری‌های مثبت را در این محور به خود اختصاص دادند (جدول۳). بر اساس نمودار پراکنش (شکل ۳)، نمونه‌های مردادماه در بخش مثبت محور دومر (همگام با مقادیر بالای SIR، آمونیوم وEC) تجمع یافته‌اند، در حالی که نمونه‌های خردادماه در بخش منفی محور دوم توزیع شده‌اند. از نظر مکانی، نمونه‌های ارتفاع پایین (۱۰۰۰ متر) متمایل به بخش مثبت محور اول (بخش غنی از عناصر و pH بالاتر) قرار گرفتند، در حالی که نمونه‌های ارتفاع بالا (۲۰۰۰ متر) در سمت منفی محور اول (همگام با نسبت C/N و کربن بیشتر) تجمع یافتند. این الگوی تفکیک چندمتغیره به وضوح نشان می‌دهد که ساختار فیزیکوشیمیایی و بیولوژیک خاک تحت سلطه سرخس عقابی، تابع اثرات هم‌زمان گرادیان ارتفاعی (محور اول) و پویایی‌های فصلی (محور دوم) است.

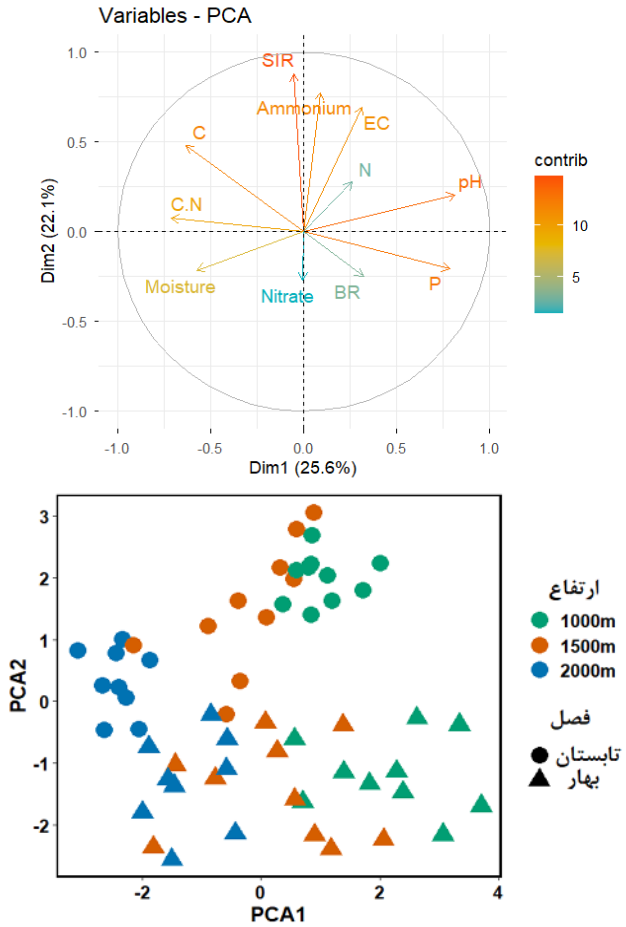
جدول ۳: میزان همبستگی متغیرهای خاک با محورهای مختلف PCA

متغیرهای خاک	مولفه ۱	مولفه ۲	مولفه ۳	مولفه ۴	مولفه ۵
فسفر	۰/۷۹***	-۰/۲۱	-۰/۲۵	۰/۰۴	۰/۲۳
نیترات	۰	-۰/۲۷*	۰/۶۴***	۰/۳۸**	-۰/۱
آمونیوم	۰/۰۹	۰/۷۸***	-۰/۱	-۰/۲۵	۰/۰۶
نیتروژن	۰/۲۶*	۰/۲۸*	۰/۸۱***	-۰/۲۸*	-۰/۲۴
کربن	-۰/۶۳***	۰/۴۸***	۰/۴**	۰/۱۳	۰/۰۴
هدایت الکتریکی	۰/۳۱*	۰/۶۹***	۰/۰۳	۰/۵۷***	-۰/۱۱
pH	۰/۸۲***	۰/۲	-۰/۰۱	۰/۴۳***	۰/۰۲
تنفس میکروبی پایه	۰/۳۲*	-۰/۲۵	۰/۵۳***	-۰/۷	۰/۷۰***
تنفس میکروبی برانگیخته	-۰/۰۵	۰/۸۸***	۰/۰۴	-۰/۱۷	۰/۳۲*
رطوبت	-۰/۵۸***	-۰/۲۱	۰/۴۸***	۰/۲۴	۰/۱۶
نسبت C/N	-۰/۷۱***	۰/۰۸	-۰/۵۱***	۰/۳۳*	۰/۲۸*

***P<0.001, **P<0.01, *P<0.05

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.4.1.7]



شکل ۳: پلات دوبعدی تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) متغیرهای خاک در ارتباط با فصل و ارتفاع

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش تأیید می‌کند که فرآیندهای فیزیکوشیمیایی و بیولوژیک خاک در اکوسیستم‌های تحت نفوذ سرخس عقابی به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر فاکتورهای مکانی (گرادیان ارتفاعی) و پویایی‌های زمانی (تغییرات فصلی) قرار دارند. روند صعودی اسیدی شدن خاک و کاهش مکرر pH بستر در ارتفاعات بالا، با یافته‌های قربانی و همکاران (۲۰۲۴) در دامنه‌های مرتفع کوهستانی کشور هم‌خوانی دارد. دلیل اصلی این پدیده، شستشوی مداوم کاتیون‌های بازی از افق‌های فوقانی به دلیل بارندگی و رطوبت بیشتر در مناطق مرتفع کوهستانی (که با جهش رطوبت به بالای ۵۰ درصد در داده‌های این تحقیق مشهود است) و همچنین تضعیف نرخ چرخه‌های بیوژئوشیمیایی عناصر در مواجهه با کاهش دما است (۸). شبکه همبستگی‌ها در شکل ۲ نیز با تأیید رابطه معکوس رطوبت و pH (با ضریب همبستگی ۰/۴۶-)، این مکانیسم شستشوی کاتیون‌ها را حمایت می‌کند. نکته حائز اهمیت این است که رطوبت و pH خاک، برخلاف سایر متغیرهای شیمیایی و زیستی، تحت تأثیر معنی‌دار فاکتور فصل قرار نگرفتند؛ این امر پایداری فیزیکی بستر را در برابر نوسانات کوتاه‌مدت فصلی نشان داده و گویای تسلط توپوگرافی و شرایط کلان اقلیمی بر این دو پارامتر کلیدی است.

با این وجود، چرخه عناصر و ترکیبات کربنی از یک الگوی شدیداً پویا در طول فصل رویش پیروی می‌کند. انباشت و روند صعودی تجمع کربن آلی بستر خاک با افزایش ارتفاع، نشان‌دهنده شکل‌گیری یک توازن ناپایدار میان ورودی بقایای گیاهی و نرخ فعالیت تجزیه‌کنندگان

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.4.1.7]

است. قربانی و همکاران (۲۰۲۴) نیز در ارزیابی مراتع مرتفع شمال سبلان تأیید کردند که کاهش دما و افزایش رطوبت در لایه‌های مرتفع توپوگرافی (که در شکل ۲ با همبستگی مثبت رطوبت و کربن آلی به میزان ۰/۵۸ تایید می‌شود) سرعت تجزیه بقایا را تضعیف کرده و منجر به ترسیب و ذخیره‌سازی بیشتر کربن و ماده آلی در لایه‌های فوقانی خاک می‌گردد. با این حال، تحلیل شاخص کلیدی نسبت C/N در این پژوهش ابعاد اکولوژیک عمیق‌تری را از اثر متقابل ارتفاع و فصل آشکار می‌سازد؛ جهش این نسبت به بالای عدد ۲۰ در بالاترین طبقه ارتفاعی در مردادماه (۲۰/۷۲) در مقایسه با مقدار آن در خردادماه (۱۱/۹۴)، نشان می‌دهد که همگام با بلوغ رویشی سرخس عقابی در اواخر تابستان، کیفیت اکولوژیک بستر به شدت افت می‌کند. طبق اصول خاک‌شناسی، نسبت‌های C/N فراتر از ۲۰ مهارکننده فرآیند معدنی شدن عناصر غذایی توسط جوامع میکروبی هستند و پدیده قفل‌شدن (Immobilization) عناصر را به همراه دارند (۹). این بستر فقیر ساختاری، متأثر از ویژگی‌های عملکردی گونه مهاجم سرخس عقابی در طول فصل رشد نیز هست؛ لاشبرگ‌های اسیدی این گونه که سرشار از ترکیبات سلولزی، لیگنینی و اسیدهای تانیک مقاوم هستند، به ویژه در اواخر فصل رشد که بیوماس گیاه به اوج می‌رسد، روند انباشت هوموس‌های پایدار و تجزیه‌ناپذیر را در افق‌های مرتفع تشدید می‌کنند (۷). این فرآیند مهار به خوبی در ماتریس همبستگی، جایی که نسبت C/N همبستگی منفی شدیدی با نیتروژن کل (r= -۰/۷۲) نشان داده، منعکس شده است.

تحلیل تعاملات متقابل پوشش گیاهی و خاک نشان می‌دهد که زیتوده و ارتفاع سرخس عقابی، پیوند تنگاتنگی با پویایی فصلی عناصر غذایی بستر دارند. در ابتدای فصل رشد (خردادماه)، زیست‌توده سرخس عقابی در تمامی ارتفاعات بسیار ناچیز است (حداکثر ۱۳۲ گرم در متر مربع در ارتفاع ۱۵۰۰ متر و تنها ۱۰ گرم در ارتفاع ۲۰۰۰ متر) که به دلیل تاخیر رویش اینگونه در بهار است. با این حال، در مردادماه یک جهش رویشی مشاهدهمی شود، به‌طوری‌که زیست‌توده گیاه در ارتفاع ۱۵۰۰ متری به اوج خود یعنی ۲۴۲۰ گرم می‌رسد. این توسعه زیاد زیست‌توده و ارتفاع گیاه (که در ارتفاع ۱۵۰۰ متری به ۸/۱۶۸ سانتی‌متر می‌رسد)، اثر مستقیمی بر تخلیه عناصر غذایی خاک دارد. مقایسه فصلی نشان می‌دهد که غلظت فسفر قابل جذب خاک در خردادماه در تمامی ارتفاعات به طور معنی‌داری بالاتر از مردادماه است (به عنوان مثال کاهش از ۲۲/۵۱ به ۱۳/۷۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم در ارتفاع ۱۰۰۰ متر و از ۱۴/۴۲ به ۱۰/۲۰ در ارتفاع ۱۵۰۰ متر). این روند کاهشی، گویای جذب فعال و شدید فسفر توسط سیستم ریشه‌ای و ریزوم‌های گسترده سرخس عقابی برای پشتیبانی از رشد زیاد برگ‌ها در تابستان است. از سوی دیگر، این توده عظیم زیتوده در مردادماه با افزایش ترشحات ریشه‌ای و ترکیبات کربنی ناپایدار، محرک فعالیت‌های میکروبی خاک شده است، به طوری که تنفس برانگیخته (SIR) در مردادماه در پاسخ به این توسعه رویشی، جهش چشمگیری در تمامی ارتفاعات نشان می‌دهد (مثلاً افزایش از ۰/۳۸ به ۰/۷۱ در ارتفاع ۱۵۰۰ متر). این نتایج اثبات می‌کند که ارتفاع ۱۵۰۰ متری به عنوان یک «نقطه بهینه اکولوژیک» عمل می‌کند؛ جایی که تعادل میان محدودیت‌های حرارتی ارتفاعات بالا و تنش خشکی ارتفاعات پایین برقرار شده و اجازه بالاترین تولید زیتوده را به سرخس می‌دهد که متعاقباً شدیدترین اثر اکوسیستم بر خاک را به همراه دارد.

تغییر الگوهای فیزیکی و بافتی بستر رویشگاهی، یعنی تقلیل ذرات ریز رس و غلبه یافتن درصد شن در ارتفاع بالا (در حالی که میزان سیلت در سراسر گرادیان در سطح ثابت ۴۶ درصد بدون تغییر مانده است)، گویای پویایی فرآیندهای ژئومورفولوژیک و رخداد فرسایش سطحی و شستشوی مکانیکی در اراضی شیب‌دار دامنه‌های کوهستانی البرز است. این پدیده باعث انتقال ذرات ریز خاک به افق‌های پایینی گرادیان شده و فرآیندهای کاملاً مشابهی را با گزارش‌های توصیف‌شده در دامنه‌های هیمالیا به نمایش می‌گذارد (۱۳). این فقر ساختاری بافت به همراه محدودیت‌های اقلیمی و دمایی، ضربه مستقیمی به عملکرد بیولوژیک میکروبیوم خاک وارد کرده است؛ به‌طوری‌که افت شاخص‌های زیستی فعالیت میکروبی (تنفس پایه و تنفس القایی) بازتاب‌دهنده کاهش بیوماس و ظرفیت تنفسی ارگانیسم‌های بستر در اتمسفرهای سرد کوهستانی است (۱۹). نقشه همبستگی شکل ۲ با نشان دادن همبستگی مثبت قوی رس با تنفس برانگیخته (r= ۰/۶۳) و همبستگی

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.4.1.7]

منفی شدید شن با(r= -۰/۵۶)، اثبات می‌کند که لایه‌های شنیِ ارتفاعات بالا بستر فیزیکی نامناسبی برای پایداری فعالیت‌های بیولوژیک میکروب‌ها فراهم می‌سازند. این نتیجه با یافته‌های Tashi و همکاران، ۲۰۱۶ نیز تطابق دارد که نشان دادند با افزایش ارتفاع در هیمالیای شرقی، غلظت نیتروژن و کربن خاک دگرگون می‌شود.

تحلیل چندمتغیره مؤلفه‌های اصلی (PCA) به خوبی این پویایی‌های دوگانه (مکانی-زمانی) را تبیین می‌کند. بر اساس نتایج، مؤلفه اول (Dim1 با تبیین ۲۵/۶ درصد واریانس کل) عمدتاً نمایانگر گرادیان ارتفاعی و ویژگی‌های فیزیکی پایدار خاک مانند pH (بارگذاری ۰/۸۲) و غلظت فسفر (بارگذاری ۰/۷۹) است، در حالی که مؤلفه دوم (Dim2 با تبیین ۲۲/۱ درصد واریانس) پویایی‌های زمانی و فصلی را از طریق شاخص‌های بیولوژیکی و تغذیه‌ای فعال مانند تنفس برانگیخته (SIR با بارگذاری ۰/۸۸)، آمونیوم (بارگذاری ۰/۷۸) و هدایت الکتریکی (بارگذاری ۰/۶۹) منعکس می‌کند. تفکیک واضح نمونه‌های خردادماه (متمایل به بخش منفی محور دوم) از نمونه‌های مردادماه (متمایل به بخش مثبت محور دوم همراه با SIR و آمونیوم بالا) گواهی بر نقش کلیدی فاکتور فصل در هدایت فرآیندهای زیستی خاک است. پایداری استقراری سرخس عقابی در این بستر متغیر (۴) نشان‌دهنده توانایی‌های سازگاری بالای این گونه است. همبستگی مثبت SIR با غلظت فسفر (۰/۵۸ =r) گویای پویایی آنزیمی در رویشگاه است. مطالعات مکانیسم‌محور نشان داده‌اند که سرخس عقابی با رهاسازی اسیدهای آلی ریشه‌ای و ترشح بهینه آنزیم‌های فسفاتاز، کارایی بالایی در هضم و انحلال کانی‌های مسدود خاک داشته و می‌تواند به‌طور مستقل بستر تغذیه‌ای خود را در خاک‌های بسیار فقیر کوهستانی تأمین کند (۱۴). استقرار متمایز نمونه‌ها در امتداد بای‌پلات PCA اثبات می‌کند که دینامیک خاک در اکوسیستم‌های تحت نفوذ این گونه، حاصل تلاقی گرادیان ارتفاعی به‌عنوان متغیر کلان جغرافیایی، و فصل رشد به عنوان موتور محرک بیولوژیکی است (۱۱).

به‌طور کلی، این پژوهش الگوهای مشخص و چندمتغیره تفکیک ویژگی‌های خاک را در طول گرادیان‌های مکانی (ارتفاع) و زمانی (فصل) در ارتباط با رویشگاه‌های سرخس عقابی دامنه‌های البرز روشن ساخت. بر اساس یافته‌های واقعی این مطالعه، افزایش ارتفاع از ۱۰۰۰ به ۲۰۰۰ متر فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی خاک را پایه‌ریزی می‌کند (از طریق اسیدی‌تر کردن بستر، افزایش رطوبت به بالای ۵۰ درصد و تغییر بافت به سمت شنی). با این حال، فاکتور فصل به عنوان محرک اصلی چرخه‌های زیستی عمل کرده و پویایی شدیدی را در دسترسی به عناصر و فعالیت میکروبی ایجاد می‌کند؛ به‌طوری‌که با رسیدن به اواخر فصل رشد (مردادماه)، زیست‌توده سرخس عقابی جهش چشمگیری یافته (به‌ویژه در طبقه میانی ۱۵۰۰ متر با ۲۴۲۰ گرم)، که این رشد قابل توجه از یک سو به تخلیه منابع فسفر خاک منجر شده و از سوی دیگر با تزریق گسترده ترکیبات کربنی، موجب جهش تنفس میکروبی (SIR) و افزایش نسبت C/N به بالای ۲۰ (به‌ویژه در ارتفاع ۲۰۰۰ متر با۲۰/۷۲) و در نتیجه قفل شدن فصلی عناصر می‌گردد. در نهایت، این نتایج نشان می‌دهد که پایداری استقراری سرخس عقابی حاصل انطباق‌پذیری بیولوژیک بالای آن با ویژگی‌های فیزیکی حاصل از ارتفاع و اثر فعال فیزیکوشیمیایی بستر در طول فصل رشد است. پتانسیل پیش‌بینی بالای این تحلیل چندمتغیره مکانی-زمانی، بستر علمی ارزشمندی را برای مدیریت اکولوژیک رویشگاه‌های کوهستانی شمال کشور فراهم می‌آورد.

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.4.1.7]

References

1. Aliasgharzade, N., 2010. Laboratory Methods in Soil Biology. Tabriz University Press, 522 p. (In Persian)
2. Amani M, Kooch Y, Abedi M. 2023. Effect of degradation intensity of wooded rangelands on root characteristics and soil ecochemical activities of Mirkola Region of Nowshahr. Journal of Rangeland, 17(1): 82-96. (In Persian)
3. Amouzgar, L., J. Ghorbani, M. Shokri, R.H. Marrs & J.G. Alday, 2020. Pteridium aquilinum performance is driven by climate, soil and land-use in Southwest Asia. Folia Geobotanica, 55(4):301-314.
4. Amouzgar, L., J. Ghorbani, M. Shokri, R.H. Marrs & J.G. Alday, 2023. A regional assessment of the Pteridium aquilinum growth and phenology: A case study in Southwestern Asia. Landscape and Ecological Engineering, 19(1):137-150.
5. Arzani, H. & M. Abedi, 2015. Rangeland Assessment, Vegetation Measurement. Vol. II. University of Tehran Press, 305 p. (In Persian)
6. Bahlakeh K, Abedi M, Dianati Tilaki G. 2017. Competition effects of Onobrychis cornuta changes between exposures and fire (Case Study Golestan Natural Park). Journal of Rangeland,11(3):342-352.
7. Bardon, C., F. Piola, F. Bellvert, F.Z. Haichar, et al., 2018. Control of soil N cycle processes by Pteridium aquilinum and Erica cinerea in heathlands along a pH gradient. Ecosphere, 9(9): e02426.
8. Bayranvand, M., M. Akbarinia, G. Salehi Jouzani, J. Gharechahi & G. Alberti, 2021. Dynamics of humus forms and soil characteristics along a forest altitudinal gradient in Hyrcanian Forest. iForest – Biogeosciences and Forestry, 14(1): 26-33.
9. García-Palacios, P., F.T. Maestre, J. Kattge & D.H. Wall, 2013. Climate and litter quality differently modulate the effects of soil fauna on litter decomposition across biomes. Ecology Letters, 16(8); 1045-1053.
10. Ghorbani, A., A. Moameri, M. Abbasi Khalki, M. Lazemi Zare, N. Baghaei, ... & M. Behnam, 2024. Determination of carbon sequestration and some soil properties along an altitudinal gradient in the northern Sabalan rangelands. Water and Soil Management and Modeling, 4(1): 135-150. (In Persian)
11. Han, W., L. Chen, X. Su, D. Liu, T. Jin, S. Shi, T. Li & G. Liu, 2022. Effects of soil physico-chemical properties on plant species diversity along an elevation gradient over alpine grassland on the Qinghai–Tibetan Plateau, China. Frontiers in Plant Science, 13:822268.
12. Jafari Haghighi, M., 2003. Soil Analysis Methods (Sampling and Important Physical and Chemical Analyses). Nedaye Zohi Publications, 236 p. (In Persian)
13. Joshi, R.K. & S.C. Garkoti, 2023. Influence of vegetation types on soil physical and chemical properties, microbial biomass and stoichiometry in the central Himalaya. Catena, 222: 106835.
14. Jurjević, A., M. Piližota, A. Špoljar, K. Novak & J. Šoštarić, 2022. Bracken-induced increase in soil P availability, along with its high P acquisition efficiency, enables it to invade P-deficient meadows. Journal of Plant Ecology, 15(4): 783-796.
15. Khoshyar F, Dianati Tilaki G, Abedi M. 2020. The effect of land management on soil fertility characteristics (Case study: Rangelands of Kohneh Lashak, Kojur, Mazandaran). Journal of Rangeland, 14(1): 25-36. (In Persian)
16. Körner, C., 2007. The use of altitude in ecological research. Trends in Ecology & Evolution, 22(11): 569-574.
17. Mitchell, R.J., R.H. Marrs, M.G. Le Duc & M.H.D. Auld, 1997. A comparative study of bracken (*Pteridium aquilinum*) invasion in temperate ecosystems. Botanical Journal of Scotland, 49(2): 147-160.
18. Poel, L.W., 1960. The influence of bracken rhizomes on soil physical properties. Journal of Ecology, 48(2): 337-345.
19. Siles, J.A. & R. Margesin, 2016. Abundance and diversity of bacterial, archaeal, and fungal communities along an altitudinal gradient in alpine forest soils: What are the driving factors? Microbial Ecology, 72(1): 207-220.
20. Tashi, S., B. Singh, C. Keitel & M. Adams, 2016. Soil carbon and nitrogen stocks along an elevation gradient in the eastern Himalayas. Catena, 149: 31-39.
21. Zaki E, Abedi M. 2017. Effects of smoke and heat treatments on germination of Stipa caucasica, Festuca valesiaca and Poa densa. Journal of Rangeland,10(4):474-482. (In Persian)

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1405.20.4.1.7]