University of Tehran Press

Journal of Natural Environment

Online ISSN: 2423-7817

Homepage: https://jne.ut.ac.ir/

Assessment of soil quality in different types of forests in north Zagros (Case study: Armardeh Baneh forests)

Saman Maleki[1] | Babak Pilehvar[2]✉ | Mohammad Ali Mahmoodi[3]

1. Department of Forestry, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: sam.maleki2017@hotmail.com
2. Corresponding Author, Department of Forestry, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: babakpilehvar@yahoo.com
3. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Kurdistan, Iran. E-mail: a.mahmoodi@uok.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 20 October 2023

Received in revised form 25 November 2023

Accepted 27 December 2023

Published online 4 May 2024

Keywords:

Forestry,

Minimum data set,

Principal component analysis,

Soil quality index.

ABSTRACT

Soil is one of the important components of the forest ecosystem and can be affected by vegetation. Knowing the quality of the soil can be used as a guide to analyze the health of the forest ecosystem. Since soil characteristics are influenced by different forest types. The purpose of this study was to investigate the soil quality in four types of (Pure *Quercus infectoria*), (*Quercus brantii-Quercus libani* and other species) (Pure *Quercus libani*), and (*Quercus infectoria–Quercus libani*) in the forests of north Zagros. For this purpose, 15 physical, chemical and biological characteristics of soil from a horizon were selected as the Total Data Set. Then, using principal components analysis, 4 characteristics including nitrogen, phosphorus, soil absorbable potassium and the metabolic quotient were selected as the minimum data set. Soil Quality Index was evaluated in these two datasets. The results showed that the average soil quality index of four forest types was calculated from 0.23 (Pure *Quercus infectoria*) to 0.44 (*Quercus brantii-Quercus libani* and other species). The soil quality index was 0.25 and 0.24 for the pure *Quercuslibani* and *Quercus libani- Quercus infectoria* types, respectively. The coefficient of explanation between the Minimum Data Set and the Total Data Set is equal to 0.80, which indicates the reliability of using the Minimum Data Set instead of the Total Data Set Therefore, the use of the most effective soil characteristics in soil quality assessment studies, while reducing the time of soil science studies, provides the basis for economic savings in the discussion of forestry studies.

Cite this article: Maleki, S., Pilehvar, B., & Mahmoodi, M.A. (2024). Assessment of soil quality in different types of forests in north Zagros (Case study: Armardeh Baneh forests). *Journal of Natural Environment*, 77 (1), 133-146. DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2023.366981.2609

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2023.366981.2609

محیط زیست طبیعی
شاپای الکترونیکی: ۷۸۱۷-۲۴۲۳
Homepage: https://jne.ut.ac.ir/
انتشارات دانشگاه تهران

ارزیابی کیفیت خاک در تیپ‌های مختلف جنگل‌های زاگرس شمالی (مطالعهٔ جنگل‌های آرمردهٔ بانه)

سامان ملکی[۱] | بابک پیله‌ور[۲]✉ | محمدعلی محمودی[۳]

۱. گروه جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشکدهٔ کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. رایانامه: sam.maleki2017@hotmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشکدهٔ کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. رایانامه: babakpilehvar@yahoo.com
۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: a.mahmoodi@uok.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۶
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۲/۱۵

کلیدواژه‌ها:
تجزیه مؤلفه‌های اصلی،
جنگل‌شناسی،
شاخص کیفیت خاک،
مجموعه حداقل داده.

چکیده

خاک یکی از اجزای مهم اکوسیستم جنگل به‌شمار می‌رود و می‌تواند تحت تأثیر پوشش گیاهی قرار گیرد. شناخت کیفیت خاک می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای تحلیل سلامت اکوسیستم جنگل مورد استفاده قرار گیرد. از آنجا که ویژگی‌های خاک تحت تأثیر تیپ‌های مختلف جنگلی قرار دارند، هدف از مطالعهٔ حاضر بررسی کیفیت خاک در چهار تیپ مازودار خالص، برودار–ویول همراه سایر گونه‌ها، ویول خالص و ویول–مازودار در جنگل‌های زاگرس شمالی بود. برای این منظور ۱۵ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک از افق A به‌عنوان مجموعه کل داده‌ها (Total Data Set) انتخاب شدند. سپس با استفاده از تجزیهٔ مؤلفه‌های اصلی ۴ ویژگی شامل نیتروژن، فسفر، پتاسیم قابل جذب خاک و بهرهٔ متابولیکی به‌عنوان مجموعه حداقل داده (Minimum Data Set) انتخاب شدند. شاخص کیفیت خاک (Index Soil Quality) در این دو مجموعه داده ارزیابی شد. نتایج نشان داد که میانگین شاخص کیفیت خاک چهار تیپ جنگلی از ۰/۲۳ (مازودار خالص) تا ۰/۴۴ (برودار–ویول همراه سایر گونه‌ها) متغیر بود. برای تیپ‌های ویول خالص و ویول–مازودار شاخص کیفیت خاک به‌ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۲۴ بود. ضریب تبیین بین مجموعه حداقل داده و مجموعه کل داده‌ها برای شاخص کیفیت خاک برابر ۰/۸۰ است، که بیانگر قابل اطمینان بودن استفاده از مجموعه حداقل داده به‌جای مجموعه کل داده‌ها می‌باشد. بنابراین استفاده از مؤثرترین ویژگی‌های خاک در مطالعات ارزیابی کیفیت خاک ضمن کاهش زمان مطالعات خاک‌شناسی زمینهٔ صرفهٔ اقتصادی در بحث مطالعات جنگل‌شناسی را فراهم می‌نماید.

استناد: ملکی، سامان؛ پیله‌ور، بابک؛ و محمودی، محمدعلی (۱۴۰۳). ارزیابی کیفیت خاک در تیپ‌های مختلف جنگل‌های زاگرس شمالی (مطالعهٔ جنگل‌های آرمردهٔ بانه). *محیط زیست طبیعی*، ۷۷ (۱)، ۱۴۶-۱۳۳.

DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2023.366981.2609

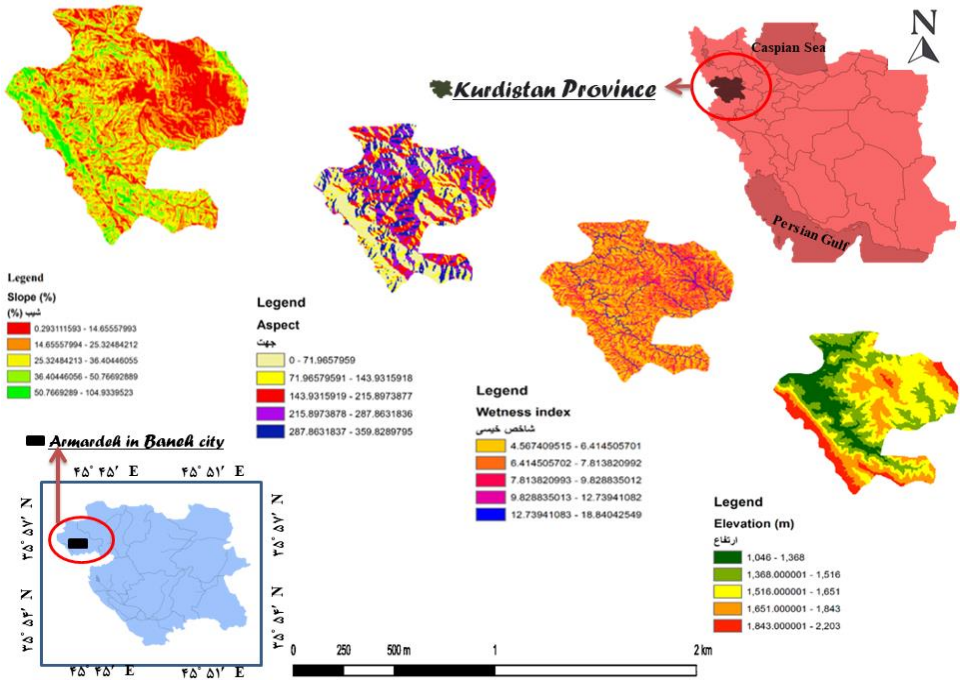
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

مقدمه

جنگل‌ها و درختان نقش مهمی در جذب کربن، چرخهٔ آب، تغییرات آب و هوایی، محافظت از تنوع زیستی و خاک دارند. از طرف دیگر خاک نیز بخش مهمی از اکوسیستم جنگل است، زیرا به تنظیم فرآیندهای مهم اکولوژیک مانند جذب مواد مغذی، تجزیه و در دسترس بودن آب کمک می‌کند. از این‌رو جنگل‌شناسان همیشه بر افزایش دانش ویژگی‌های مختلف خاک جهت حمایت از جنگل‌ها تأکید کرده‌اند (Paudel and Yadav, 2021). با افزایش علاقهٔ عمومی به ارزیابی اثرات استفاده از زمین و شیوه‌های مدیریت کیفیت خاک و عملکرد اکوسیستم‌های جنگلی نیاز به ارزیابی کیفیت خاک به‌منظور دستیابی به مدیریت پایدار و پیش‌بینی خطرات تخریب خاک ضروری است (Isong *et al*., 2022). کیفیت خاک با دو کارکرد اصلی حمایت از تولید زیست‌توده و ترسیب کربن در میان اکوسیستم‌های جنگلی ارتباط نزدیکی دارد (Yu and Song, 2023). در جنگلداری، ارزیابی کیفیت خاک به‌عنوان مهم‌ترین جنبهٔ مدیریت پایدار شناخته شده است. کیفیت خاک به‌عنوان ظرفیت خاک برای حمایت تولیدات گیاهی و حیوانی، حفظ و بهبود کیفیت آب و هوا، تأمین سلامت و سکونتگاه انسان در اکوسیستم‌های طبیعی و مدیریت‌شده تعریف شده است (Doran and Parkin, 1994). از زمانی که سرویس حفاظت خاک، سیستم طبقه‌بندی خاک‌ها را در سال ۱۹۶۱ منتشر نمود، بسیاری از روش‌های ارزیابی کیفیت خاک توسعه یافت. در شروع از تک شاخص‌ها مانند کربن آلی یا نیتروژن خاک برای این کار استفاده می‌شد. با درک عمیق‌تر از کیفیت خاک، روش‌های ارزیابی کامل‌تری که عملیات مدیریتی و تولید محصول را مورد توجه قرار دادند، توسعه یافت (Li *et al*., 2018). در میان این روش‌ها شاخص کیفیت خاک (Soil quality index) که شرایط خاک و ویژگی‌های مربوط به آن را به‌خوبی نشان داده، بیشترین استفاده را داشته است. در روش‌های متداول کمی‌سازی کیفیت خاک، تعیین شاخص‌ها طی سه مرحله شامل انتخاب حداقل ویژگی‌های مؤثر از میان کل ویژگی‌های خاک، یکسان‌سازی واحدها و مقیاس حداقل ویژگی‌های مؤثر با استفاده از توابع امتیازدهی و ادغام امتیازات ویژگی‌ها در یک شاخص واحد انجام می‌شود (Zahedifar, 2023). کیفیت خاک به اثرات متقابل خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی بستگی دارد. ارزیابی مناسب کیفیت خاک مستلزم اندازه‌گیری تعداد زیادی پارامتر است (Omer *et al*., 2023). مطالعات قدیمی به‌دلیل روش‌های آنالیز ساده و کمتر شدن هزینه‌های نمونه‌برداری و آزمایشگاهی، تنها ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را به‌عنوان شاخص‌های کاربردی و مؤثر برای ارزیابی کیفیت خاک انتخاب می‌کردند. اخیراً ویژگی‌های زیستی خاک به‌دلیل حساسیت کوتاه تا بلندمدت (ساعت تا سال) به تغییرات محیطی در تعیین میزان بهره‌وری اکوسیستم‌های جنگلی توجه بیشتری را به‌خود جلب کرده‌اند (Li *et al*., 2023b). بنابراین ویژگی‌های خاک انتخاب شده به‌عنوان شاخص کیفیت خاک باید طیف وسیعی از خواص خاک را پوشش دهند، که نه تنها می‌تواند بر عملکرد چرخهٔ مواد مغذی خاک تأثیر بگذارد، بلکه می‌تواند به تغییرات در کیفیت خاک نیز واکنش حساسی نشان دهد (Guo *et al*., 2017). با این وجود ارزیابی کیفیت خاک به‌علت عملکردهای گوناگون و همچنین تفاوت در ذهنیت و نگرش متعددی که کاربران از خاک دارند، متفاوت است. به‌همین دلیل پژوهشگران تعداد محدودتری از ویژگی‌های خاک را که نمایندهٔ بهتری از کیفیت خاک هستند، به‌عنوان مجموعهٔ حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک (MDS) پیشنهاد کرده‌اند. انتخاب این ویژگی‌ها بر اساس بیشترین همبستگی با کل کیفیت خاک (شاخص کلی) و سهولت اندازه‌گیری آن‌ها صورت می‌گیرد (Selmy *et al*., 2021). در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در مورد ارزیابی کیفیت خاک انجام شده است (de São José *et al*., 2023)، ولی عمدتاً بر ارزیابی کیفیت خاک در زمین‌های زراعی (Guillaume *et al*., 2022; Liu *et al*., 2023; Li *et al*., 2023a)، مراتع (Yu *et al*., 2018, Lee *et al*., 2021, Zhang *et al*., 2022) و زمین‌های با کاربری مختلف تمرکز شده است (Kalu *et al*., 2015, Mulat *et al*., 2021).

جنگل‌های زاگرس وسیع‌ترین عرصهٔ جنگلی کشور هستند که نقش مهمی در حفاظت آب و خاک دارند، بنابراین ارزیابی وضعیت کیفیت خاک تحت پوشش گیاهان مختلف در آرمرده برای توسعهٔ مدیریت پایدار و بهبود عملکرد این جنگل‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. در حال حاضر، بیشتر مطالعات قبلی عمدتاً بر مطالعات جنگل‌شناسی متمرکز هستند. با این حال، به‌ندرت اطلاعاتی در مورد ارزیابی کیفیت خاک در این جنگل‌ها گزارش شده است؛ بنابراین در این پژوهش برای اولین بار در جنگل‌های زاگرس شمالی چهار تیپ جنگلی مختلف انتخاب و ۱۵ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی اندازه‌گیری شد. اهداف این مطالعه



شکل ۱- منطقهٔ مورد مطالعه (نقشه‌های ارتفاع، شیب، جهت و شاخص خیسی)

عبارت بودند از: (۱) اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک در چهار تیپ جنگلی، (۲) ایجاد یک مجموعه حداقل داده برای ارزیابی کیفیت خاک و (۳) ارزیابی کیفیت خاک تیپ‌های مختلف جنگلی با استفاده از شاخص کیفیت خاک.

روش‌شناسی پژوهش

منطقهٔ پژوهش: شهر آرمرده جزء شهرستان بانه، استان کردستان، در طول جغرافیایی ′۴۵ °۴۵ تا ′۴۹ °۴۵ شرقی و عرض جغرافیایی ′۵۲ °۳۵ تا ′۵۶ °۳۵ شمالی واقع شده است. ارتفاع حداکثر آن از سطح دریا ۱۷۶۵ متر و حداقل آن از سطح دریا ۱۶۵۰ متر و شیب عمومی منطقه به طرف شمال غربی می‌باشد (شکل ۱). بیشینهٔ مطلق دمای سالیانه ۳۵/۱ و حداقل دما ۲۸/۷- بوده، متوسط بارندگی و دمای هوای سالانه به‌ترتیب ۶۶۷ میلی‌متر و ۱۴ درجهٔ سانتی‌گراد و طبق منحنی آمبروترمیک دارای چهار ماه فصل خشک (خرداد، تیر، مرداد و شهریور) در سال است. منطقهٔ مورد مطالعه دارای عوارض طبیعی دره، دامنه و یال بوده و جزء جنگل‌های تنک می‌باشد. از نظر اقلیمی دارای آب و هوای نیمه‌خشک و پوشش عمدهٔ گیاهی شامل جوامع گیاهی گون همراه با خانوادهٔ گندمیان، نخودیان، علف‌ها و درختچه‌ها است. درختان غالب موجود در ترکیب پوشش گیاهی منطقه بلوط برودار (*Quercus infectoria* Oliv)، مازودار (*Quercus brantii* Lindl.) و ویول (*Quercus libanii* Oliv.) هستند (Namiranian *et al*., 2007).

روش تحقیق: در سال ۱۳۹۸ در فصل رویش با توجه به تفاوت در تیپ‌های جنگلی بخش آرمرده بانه (با مساحت ۴۶۱۸/۲۳ هکتار) چهار تیپ جنگلی مازودار خالص (Pure *Quercus infectoria*)، برودار-ویول همراه سایر گونه‌ها (*Quercus brantii*- *Quercus libani* and other species)، ویول خالص (Pure *Quercus libani*) و ویول-مازودار (*Quercus libani*-*Quercus infectoria*) به‌صورت انتخابی (هر تیپ با مساحت تقریبی ۶۰۰۰۰ مترمربع) مطابق با هدف مورد بررسی با جنگل گردشی و با نظر کارشناسی انتخاب شدند (Zobairi, 2002, Maleki *et al*., 2023b). هر یک از تیپ‌های جنگلی با سه قطعه نمونهٔ استاندارد (Rad *et al*., 2017) ۲۰×۲۰ متری (Moradi *et al*., 2022) جهت نمونه‌برداری از مشخصات جنگل‌شناسی انتخاب شد. در هر قطعه نمونه اطلاعات مربوط به نوع گونه، قطر برابر سینه، ارتفاع کل، قطر بزرگ و کوچک تاج کلیهٔ درختان در فرم‌های آماربرداری ثبت شد (جدول ۱) (Maleki *et al*., 2023a, Maleki *et al*., 2022). در آماربرداری از وسایل کالیپر و شیب‌سنج سونتو و متر (۳۰ متری) استفاده شد (Heidari *et al*., 2013). با توجه به کوهستانی بودن جنگل‌های بانه، این منطقه دارای

جدول ۱- میانگین مشخصه‌های کمی درختان در ارتباط با تیپ‌های مورد بررسی

تیپ‌ها / مشخصه‌ها	ارتفاع کل درخت (متر)	قطر برابر سینه (سانتی‌متر)	تعداد در هکتار	مساحت تاج پوشش (مترمربع)
مازودار خالص Pure *infectoria*	۶/۷	۳۴	۹۰	۱۱
برودار-ویول همراه سایر گونه‌ها (*Quercus brantii*-*Quercus libani* and other species)	۷/۵	۳۳	۱۷۰	۱۲/۸
ویول خالص Pure *libani*	۶/۷	۳۷	۱۴۰	۱۱/۵
ویول-مازودار *libanii- infecoria*	۷	۳۵	۱۴۳	۱۲

خاک‌های کم‌عمق تا نیمه‌عمیق است (Maroufi *et al*., 2005). بنابراین به‌صورت کاملاً تصادفی در هر تیپ جنگلی ۵ نمونه خاک مرکب (Bandyopadhyay *et al*., 2020) (که هر نمونه خاک خود در فاصلهٔ نیم‌متری تنهٔ هر درخت از چهار سمت و زیر تاج، برداشت شد، با هم مخلوط شدند و از آنها نمونه‌های ترکیبی حاصل گردید) از افق A پس از کنار زدن لایه، لاشبرگ برداشت (Brejda *et al*., 2000) و به کیسه‌های پلاستیکی منتقل شد (در مجموع ۲۵ نمونه خاک برای کل منطقه برداشت شد). پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، یک نمونه از آن در دمای چهار درجهٔ سانتی‌گراد نگهداری شد و سایر نمونه‌های خاک در هوای آزاد خشک و از الک دو میلی‌متر رد شدند (Maleki *et al*., 2022).

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک: بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتر (Gee and Or, 2002) و جرم مخصوص ظاهری با بکارگیری استوانه‌های نمونه‌برداری (با حجم تقریبی ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب و تهیهٔ نمونهٔ دست‌نخورده و خشک کردن آن‌ها در دمای ۱۰۵ درجهٔ سانتی‌گراد در آون به‌دست آمد (Hesse and Hesse, 1971). pH خاک با استفاده از دستگاه pHمتر تعیین شد (Kalra and Maynard, 1991). کربن آلی خاک با استفاده از روش تیتراسیون والکلی-بلاک (Black, 1979)، محتوای نیتروژن با روش کجلدال و فسفر با روش اولسن اندازه‌گیری شد (Olsen *et al*., 1954; Bradstreet, 1954). غلظت پتاسیم، منیزیم، کلسیم با روش طیف‌سنجی جذب اتمی اندازه‌گیری شد (Dipietro *et al*., 1988). تنفس میکروبی با قرار دادن نمونه‌های خاک در ظروف شیشه‌ای دربسته، انکوبه کردن آن‌ها در دمای ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد در تاریکی در رطوبت ظرفیت زراعی و به دام انداختن CO_2 آزاد شده بعد از یک روز توسط NaOH ۰/۵ مولار تعیین شد (Anderson, 1983). نسبت تنفس میکروبی خاک و زیست‌تودهٔ میکروبی کربن خاک برای محاسبهٔ بهره متابولیکی (qCO_2) و بهرهٔ میکروبی (qMic) از نسبت کربن زیست‌تودهٔ میکروبی به نسبت کربن آلی تعیین شد (Tavares *et al*., 2015; Ungaro *et al*., 2022).

ارزیابی کیفیت خاک: روش ارزیابی شاخص کیفیت خاک (SQI) یک روش تحلیلی پرکاربرد در ارزیابی کمی کیفیت خاک در سال‌های اخیر است. اولین قدم در این روش، دستیابی به یک مجموعهٔ حداقلی از ویژگی‌های مهم خاک جهت کاهش تعداد متغیرهای مورد مطالعه و ایجاد مؤلفه‌های مستقل از هم و ویژگی‌هایی که بیش‌ترین نقش را در توجیه تغییرات ویژگی‌های خاک دارند، از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد و مؤلفه‌های اصلی با ارزش ویژهٔ بیشتر از یک در نظر گرفته شدند. در هر مؤلفهٔ اصلی ویژگی‌های با وزن بالا به‌عنوان حداقل ویژگی‌های مؤثر انتخاب شدند. با توجه به اینکه ویژگی‌های مورد بررسی دارای واحدهای گوناگونی می‌باشند، برای اینکه بتوان آنها را در قالب یک شاخص کلی بیان نمود، ویژگی‌ها را باید بی‌بعد در نظر گرفت. برای این منظور از توابع نمره‌دهی خطی استفاده شد. به این صورت که متغیرها در سه دسته (بیشتر-بهتر) ویژگی‌هایی که افزایش آن‌ها موجب بهبود کیفیت خاک می‌گردد (رابطهٔ ۱)، (کمتر-بهتر) ویژگی‌هایی که افزایش آن‌ها موجب کاهش کیفیت خاک می‌گردد (رابطهٔ ۲) و (محدودهٔ بهینه) برای ویژگی‌هایی که دارای حدود بهینه هستند (رابطهٔ ۱و ۲)، دسته‌بندی می‌شوند. برای تعیین امتیاز متغیرها، ویژگی‌هایی که از نظر کیفیت خاک دارای مطلوب‌ترین مقدار بود، مقدار ۱ و محدوده‌ای که کمترین کیفیت را داشت مقدار ۰/۱ به آن تعلق گرفت؛ بنابراین تابعی به‌دست آمد که با استفاده از آن، مقادیر ویژگی مورد نظر بین ۰/۱ (کمترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) و ۱ (بیشترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) متغیر بود.

$$f(x)=\begin{cases}0.1 & x\le L\\ 0.9\times\frac{x-L}{U-L}+0.1 & L<x<U\\ 1 & x\ge U\end{cases}$$ رابطهٔ ۱

$$f(\mathrm{x})=\begin{cases}0.1 & \mathrm{x}\le \mathrm{L}\\ 1-0.9\times\frac{\mathrm{x}-\mathrm{L}}{\mathrm{U}-\mathrm{L}} & \mathrm{L}<\mathrm{x}<\mathrm{U}\\ 1 & \mathrm{x}\ge \mathrm{U}\end{cases}$$ رابطهٔ ۲

در این دو معادله f(x) : مقادیر نمره ویژگی L و U به‌ترتیب مقادیر حد بحرانی پایین و بالا هستند. وزن‌ها نقش مهمی در ارزیابی کیفیت خاک دارند. در این تحقیق به‌منظور تعیین وزن تعلق یافته به ویژگی‌های خاک از تحلیل سلسله مراتبی و برای ادغام امتیازات ویژگی‌ها از همبستگی PCA استفاده شد. در این روش از شاخص اشتراک می‌توان استفاده نمود. نسبت شاخص اشتراک هر ویژگی به مجموع این شاخص، وزن ویژگی مورد نظر را نشان می‌دهد. در این حالت هر ویژگی دارای شاخص اشتراک بالاتری باشد، وزن بیشتری گرفته و بخش بزرگ‌تری از واریانس را می‌تواند توضیح دهد. وزن هر ویژگی از طریق رابطهٔ ۳ به‌دست آمد:

$$\mathrm{W_i}=\mathrm{C_i}/\sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{n}}\mathrm{C_i}$$ رابطهٔ ۳

در این رابطه W_i: وزن ویژگی‌ها، C_i: ارزش همبستگی ویژگی و n: تعداد کل ویژگی‌ها می‌باشد. در نهایت پس از امتیازدهی و وزن‌دهی همهٔ ویژگی‌ها، با استفاده از رابطهٔ ۴ شاخص کیفیت خاک (SQI)محاسبه شد:

$$SQI=\sum_{i=1}^{n}W_i\,f(x)_i$$ رابطهٔ ۴

در این رابطه Wi: وزن هر ویژگی، f(x)i: مقدار نمره یا امتیاز تعلق یافته به هر ویژگی و n: تعداد ویژگی‌های خاک می‌باشد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها: تمامی تجزیه و تحلیل‌های آماری داده‌ها با استفاده از Microsoft Excel 2010، SPSS 20.0 وPast3 انجام شد. از آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) و آزمون مقایسهٔ فیشر برای ارزیابی تفاوت معنی‌دار آماری (P<۰/۰۵) بین ویژگی‌های مختلف خاک استفاده شد. تجزیه و تحلیل همبستگی پیرسون برای شناسایی روابط بین متغیرهای خاک انجام شد. تحلیل رگرسیون خطی برای تعیین روابط بین شاخص کیفیت خاک (SQI) براساس مجموعه داده‌های مختلف انجام شد. برای انتخاب مناسب‌ترین شاخص‌های خاک برای ارزیابی کیفیت خاک از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی استفاده شد.

یافته‌های پژوهش و بحث

ویژگی‌های خاک در تیپ‌های مختلف جنگلی: نتایج ۱۵ ویژگی خاک در چهار تیپ جنگلی در جدول ۲ ارائه شده است. میانگین شن، pH، نیتروژن، فسفر، نسبت زیست‌تودهٔ میکروبی کربن به زیست‌تودهٔ میکروبی نیتروژن و تنفس میکروبی بین تیپ‌های مختلف دارای اختلاف معنی‌داری (P<۰/۰۵) بود. pH خاک در تیپ‌های جنگلی اسیدی (از ۶/۳۶ تا ۶/۶۱) بود. محتوای نیتروژن و فسفر در تیپ ویول خالص دارای بیشترین مقدار بود. پتاسیم، کلسیم و نسبت زیست‌تودهٔ میکروبی کربن به زیست‌تودهٔ میکروبی نیتروژن و تنفس میکروبی در تیپ برودار–ویول همراه سایر گونه‌ها بیشترین مقدار را داشت.

انتخاب شاخص برای مجموعه حداقل داده: تمام شاخص‌های خاک تیپ‌های جنگلی مختلف به اجزای PCA گروه‌بندی شدند. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، چهار محور اول دارای مقادیر ویژهٔ > ۱، با مقادیری از ۱/۴۹ تا ۳/۳۱ که هر کدام حداقل ۱۰ درصد از تغییرات داده‌ها را تشکیل و ۶۸ درصد از واریانس کل را نشان دادند. برای مجموعه حداقل داده نسبت واریانس توضیح داده شده برای اولین محور ۲۳/۶۶ درصد و برای سه محور دیگر به‌ترتیب ۱۸/۴۴، ۱۳/۹۷ ، ۱۱/۳۱ درصد بود. وزن ویژگی‌های خاک در تجزیه مؤلفه‌های اصلی خاک نشان داد که سه مؤلفه بیش از ۹۰ درصد وزن دارند. نیتروژن، فسفر، پتاسیم و بهرهٔ متابولیکی بیش از ۸۰ درصد وزن داشتند. در حالی که شش مؤلفهٔ باقی‌مانده کمتر از ۴۰ درصد تجزیهٔ مؤلفه‌های اصلی را توضیح دادند که نشان‌دهندهٔ رابطهٔ ضعیف‌تر با سایر ویژگی‌ها است. منیزیم کم اهمیت‌ترین متغیر برای ارزیابی کیفیت خاک در نظر گرفته شد. به‌طور کلی ویژگی که بیشترین وزن را داشته باشد و براساس ۱۰ درصد وزن این متغیر، متغیرهایی که بیشترین همبستگی را با آن داشته باشد، انتخاب می‌شود (Zhang *et al.*, 2016). از تحلیل همبستگی پیرسون برای بررسی روابط بین این شاخص‌ها برای کاهش افزونگی استفاده شد (جدول ۴).

فرآیند انتخاب شاخص برای ارزیابی کیفیت خاک به‌دلیل عملکرد خاص و وابستگی‌های چندجانبهٔ اکوسیستم‌های جنگلی می‌تواند پیچیده باشد. برای ایجاد یک شاخص جامع کیفیت خاک بر روی چهار تیپ جنگلی ۱۵ شاخص شامل خواص فیزیکی،

جدول ۲- میانگین (±انحراف معیار) مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در تیپ‌های جنگلی مختلف

تیپ‌ها/ویژگی‌ها	مازودار خالص Pure *infectoria*	برودار–ویول همراه سایر گونه ها(*Quercus brantii-Quercus libani* and other species	ویول خالص Pure *libani*	ویول– مازودار *libanii-infecoria*
شن	۳۴/۸±۱/۴۹^{ab}	۲۷/۸±۴/۶۸^{ab}	۲۳/۴±۵/۱۹^{b}	۳۷/۲±۵/۷۳^{a}
سیلت	۳۳/۴±۴/۲۴^{a}	۴۳±۶/۴۵^{a}	۴۹/۲±۷/۵۵^{a}	۴۰/۴±۴/۶۷^{a}
رس	۳۱/۸±۴/۷۲^{a}	۲۹/۲±۵/۵۴^{a}	۲۷/۴±۴/۰۵^{a}	۲۲/۴±۱/۴۶^{a}
جرم مخصوص ظاهری (g/cm3)	۱/۴۰±۰/۱۳۱^{a}	۱/۲۸±۰/۰۷۶^{a}	۱/۳۲±۰/۰۷۷^{a}	۱/۳۵±۰/۱۲۲^{a}
pH	۶/۶۱±۰/۰۲^{a}	۶/۵۶±۰/۰۶^{a}	۶/۳۶±۰/۰۲^{b}	۶/۶۱±۰/۰۳^{a}
کربن آلی خاک (درصد) C (%)	۰/۷۸±۰/۰۸^{a}	۰/۷۲±۰/۰۶^{a}	۰/۸۱±۰/۰۵^{a}	۰/۹۰±۰/۰۸^{a}
نیتروژن خاک (میلی‌گرم برکیلوگرم) N	۰/۰۵۸±۰/۱۵^{ab}	۰/۰۳۹±۰/۰۶^{b}	۰/۰۸۰±۰/۱۳^{a}	۰/۰۴۳±۰/۰۹^{b}
فسفر قابل‌جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم) P (mg/kg)	۱۹/۵۰±۲/۸۶^{b}	۴۷/۲۰±۴/۱۳^{b}	۹۹/۸۵±۲۲/۱۷^{a}	۴۲/۷۵±۱۰/۸۷^{b}
پتاسیم قابل‌جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم) K (mg/kg)	۲۲۱/۸۴±۱۷/۴۵^{a}	۲۶۸/۰۱±۲۷/۸۳^{a}	۲۶۶/۹۵±۱۵/۳۷^{a}	۲۳۶/۲۲±۱۵/۱۹^{a}
کلسیم تبادلی (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Ca (mg/kg)	۴۵/۳۶±۱/۳۲^{a}	۴۹/۴۴±۲/۱۶^{a}	۴۴/۵۲±۵/۰۸^{a}	۴۷/۷۶±۲/۴۷^{a}
منیزیم تبادلی (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Mg (mg/kg)	۳۳/۲۶±۳/۲۹^{a}	۳۶/۱۴±۱/۶۲^{a}	۳۶/۸۶±۴/۷۶^{a}	۳۵/۳۵±۱/۹۲^{a}
نسبت زیست‌تودهٔ میکروبی کربن به زیست‌تودهٔ میکروبی نیتروژن MBC/MBN	۲/۷۷±۰/۵۰^{ab}	۳/۸۰±۰/۲۵^{a}	۱/۸۲±۰/۳۵^{b}	۳/۶۳±۰/۶۰^{a}
بهرهٔ میکروبی q Mic	۲/۳±۰/۲^{a}	۲/۵±۰/۱^{a}	۲/۶±۰/۱^{a}	۲/۳±۰/۱^{a}
بهرهٔ متابولیکی q CO2	۲۸۲/۳۹±۵۱/۳۸^{a}	۲۵۵/۹۲±۲۱/۹۲^{a}	۲۴۷/۷۹±۱۲/۳۸^{a}	۲۱۹/۱۱±۴۰/۱۹^{a}
تنفس میکروبی (میلی‌گرم کربن بر گرم خاک در روز) (mg Co2 g-1 day-1)	۰/۴۴۸±۰/۰۱^{ab}	۰/۴۶۶±۰/۰۱^{a}	۰/۴۲۸±۰/۰۱^{bc}	۰/۴۰۸±۰/۰۱^{c}

شیمیایی و زیستی خاک به‌عنوان شاخص‌های بالقوه برای ارزیابی کیفیت خاک در این مطالعه انتخاب شدند (Sadeghi *et al*., 2019; Mohammadi Samani *et al*., 2022; Maleki *et al*., 2022; Rahimi *et al*., 2020). بافت خاک یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در تفکیک تیپ‌های گیاهی است (Mohammad *et al*., 2019). در این مطالعه درصد شن در تیپ‌های مختلف تفاوت معنی‌داری را نشان داد. جرم مخصوص ظاهری از شاخص‌های مهم جهت ارزیابی فیزیک خاک است که بین تیپ‌های مورد بررسی اختلاف معنی‌داری را نشان نداد و در مجموعه حداقل داده مطابق با نتایج Khezri و همکاران (۲۰۲۲) قرار نگرفت. pH خاک در تیپ جنگلی ویول خالص کمترین مقدار را نشان داد. با توجه به نقش مهم pH در پاسخ به اقدامات مدیریتی جنگل، مطالعات قبلی در جنگل‌های متفاوت pH را به‌عنوان یک شاخص مهم برای تعیین کیفیت خاک انتخاب کرده‌اند (Nabiollahi *et al*., 2017; Zhijun *et al*., 2018)؛ اما در این تحقیق اجزای بافت خاک و pH در مجموعه حداقل داده قرار نگرفتند. محتوای کربن آلی تیپ برودار–ویول همراه سایر گونه‌ها بیشتر از دیگر تیپ‌های جنگلی بود که به‌دلیل ضخیم بودن لایهٔ لاشبرگ این تیپ و متعاقباً تجمع بیشتر هوموس بود که منجر به فعالیت زیستی بالاتری نسبت به سایر تیپ‌های جنگلی شد؛ بنابراین، نتایج از فرضیهٔ اول ما حمایت می‌کند که تیپ‌های جنگلی مختلف تأثیر قابل‌توجهی بر متغیرهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک دارند. نیتروژن و فسفر به‌دلیل

جدول ۳- انتخاب مجموعه حداقل داده با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی

ویژگی‌های خاک	PC1	PC2	PC3	PC4	Communality
شن	-۰/۰۵۷	-۰/۰۰۹۷	۰/۰۳۴۸	۰/۵۳۶۳	۰/۲۸۹
سیلت	۰/۰۰۹۳	۰/۰۳۳۰	-۰/۰۱۱۳	-۰/۷۹۲	۰/۶۲۹
رس	-۰/۰۰۳۶	-۰/۰۲۳۳	۰/۰۲۳۵	۰/۲۵۵	۰/۲۶۷
جرم مخصوص ظاهری (g/cm3)	-۰/۰۷۴	-۰/۰۰۰۷	-۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۷	۰/۴۵۸
pH	-۰/۰۰۰۲	-۰/۰۰۰۱	-۰/۰۰۱۵	-۰/۰۰۲	۰/۳۱۰
کربن آلی خاک (درصد)	۰/۰۶۵۴	-۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۰۹	-۰/۰۰۱	۰/۴۱۴
نیتروژن خاک (درصد)	۰/۰۸۷۹	۰/۹۰۷۰	۰/۰۰۲۰	-۰/۰۱۰	۰/۸۳۱
فسفر قابل‌جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۰/۰۲۰	-۰/۰۸۶۷	۰/۹۹۱۶	-۰/۰۲۷	۰/۹۹۲
پتاسیم قابل‌جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۰/۹۹۹	۰/۰۱۷۶	-۰/۰۱۸۶	-/۰۱۱۵	۰/۹۹۰
کلسیم تبادلی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	-۰/۰۷۶۸	۰/۰۱۵	۰/۳۳۷
منیزیم تبادلی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۰/۰۰۶	۰/۰۳۳۶	۰/۰۳۰۹	۰/۱۳۲۲	۰/۲۲۰
نسبت زیست‌تودهٔ میکروبی کربن به زیست‌تودهٔ میکروبی نیتروژن	-۰/۷۲۱	۰/۰۰۳۱	-۰/۰۱۰۹	۰/۰۰۶۰	۰/۵۰۷
بهرهٔ میکروبی	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۲۹	-۰/۰۰۱۷	-۰/۰۰۸۵	۰/۴۶
بهرهٔ متابولیکی	-۰/۰۱۶	۰/۰۳۳۰	۰/۰۸۶۳	۰/۹۹۲۴	۰/۹۹۸
تنفس میکروبی	-۰/۰۸۰	-۰/۷۲۸۶	۰/۳۲۹۴	۰/۰۰۰۶	۰/۶۴۶
Eigenvalue	۳/۳۱	۲/۵۸	۱/۹۵	۱/۴۹	
% of variance	۲۳/۶۶	۱۸/۴۴	۱۳/۹۷	۱۱/۳۱	
Cumulative variance (%)	۲۵/۳۸	۴۳/۸۲	۵۷/۱۷	۶۸	

جدول ٤- ضرایب همبستگی پیرسون برای ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک

	شن	سیلت	رس	جرم مخصوص ظاهری	pH	کربن آلی	نیتروژن	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	کلسیم تبادلی	منیزیم تبادلی	نسبت زیتوده میکروبی C/N	بهره میکروبی	بهرهٔ متابولیکی	تنفس میکروبی
شن	۱														
سیلت	-۰/۷**	۱													
رس	-۰/۱۳	-۰/۵**	۱												
جرم مخصوص ظاهری	۰/۱۴	-۰/۲۷	۰/۲۱	۱											
pH	۰/۳۳	-۰/۴*	۰/۲۵	۰/۳۳	۱										
کربن آلی	۰/۳۵	-۰/۱۷	-۰/۱۷	۰/۴۵*	-۰/۱	۱									
نیتروژن	۰/۳۳	۰/۵۴*	-۰/۳۴	۰/۰۷	-۰/۳۸	۰/۱۵	۱								
فسفر قابل‌جذب	۰/۰۶	۰/۰۱	-۰/۰۹	-۰/۱۳	-۰/۵۱*	۰/۳۱	۰/۵۹*	۱							
پتاسیم قابل‌جذب	-۰/۲۱	۰/۲۹	-۰/۱۶	-۰/۲۹	-۰/۵۴*	-۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۲۱	۱						
کلسیم تبادلی	-۰/۰۳	۰/۰۶	-۰/۰۵	-۰/۰۳	۰/۰۴	-۰/۲۴	-۰/۴۰	-۰/۳۹	۰/۱۷	۱					
منیزیم تبادلی	۰/۱۰	-۰/۰۸	-۰/۰۰	-۰/۱۸	-۰/۰۶	-۰/۲۷	۰/۲۲	۰/۱۹	۰/۳۹	۰/۲۰	۱				
نسبت زیست‌تودهٔ میکروبی C/N	۰/۱۱	-۰/۰۰	-۰/۱۱	-۰/۳۷	۰/۴۶	-۰/۴۲	-۰/۲۹	-۰/۳۶	-۰/۰۲	۰/۳۹	-۰/۰۰	۱			
بهرهٔ میکروبی	-۰/۴*	۰/۲۸	۰/۱۵	۰/۳۰	-۰/۲۸	۰/۲۲	-۰/۲۸	۰/۰۲	۰/۴۱	۰/۰۹	-۰/۳۱	-۰/۲۵	۱		
بهرهٔ متابولیکی	-۰/۰۳	۰/۱۵	-۰/۱۷	-۰/۴۸*	-۰/۰۴	-۰/۶**	-/۰۸	-۰/۱۴	-۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۳۵	۰/۱۷	-۰/۵۶**	۱	
تنفس میکروبی	۰/۱۱	-۰/۳۴	۰/۳۶	۰/۰۷	۰/۲۴	-۰/۱۵	۰/۲۴	۰/۰۳	-۰/۰۹	-۰/۲۳	-۰/۲	-۰/۰۵	۰/۱۵	-۰/۱۴	۱

* و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد

نقش حیاتی آن‌ها در چرخهٔ مواد مغذی و واکنش‌های بیوشیمیایی در پوشش گیاهی به‌طور گسترده به‌عنوان شاخص‌های کلیدی برای برآورد کیفیت خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Marty *et al*., 2017). مطابق با تحقیقات Gong و همکاران (۲۰۱۵) و Zhijun و همکاران (۲۰۱۸) نیتروژن و فسفر به‌عنوان شاخص‌های مجموعه حداقل داده در مطالعهٔ ما شناسایی و انتخاب شدند (Gong *et al*., 2015; Zhijun *et al*., 2018). نقش پتاسیم در گیاهان و در بررسی روابط بین خاک، گیاه، عناصر غذایی، تشخیص خاک و ارزیابی حاصلخیزی جزء مهم‌ترین مسائل محسوب می‌شود؛ بنابراین پتاسیم می‌تواند کیفیت حاصلخیزی خاک توده‌های جنگلی مختلف را منعکس کند. شاخص‌های خاک موجود در مجموعه حداقل داده از کل ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک انتخاب شدند و تعداد شاخص‌ها از ۱۵ (TDS) به ۴ (MDS) کاهش یافت. توسعهٔ شاخص کیفیت خاک با استفاده از کل ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک می‌تواند نتایج جامع‌تری نسبت به روش مجموعه حداقل داده ایجاد کند (Yao *et al*., 2014) و برخی از اطلاعات مهم کیفیت خاک ممکن است در طول روش PCA از بین برود. با این حال، روش مجموعه حداقل داده به‌طور گسترده‌ای پذیرفته شده است، زیرا کاهش تعداد کل شاخص‌ها در کل ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک می‌تواند باعث بهبود کارایی کار، کاهش زمان و هزینه شود (Nabiollahi *et al*., 2017).

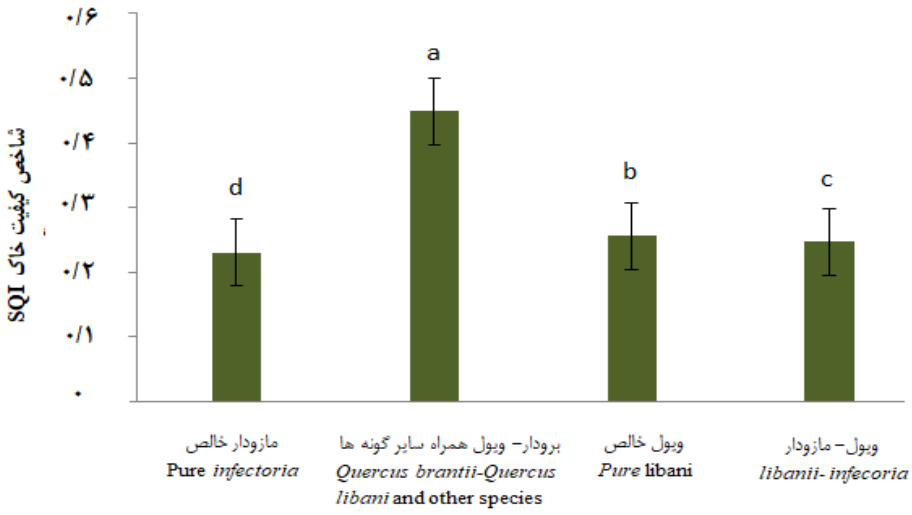
شاخص کیفیت خاک: با توجه به توابع هر چهار ویژگی خاک شاخص مجموعه حداقل داده انتخاب شده با استفاده از تابع امتیازدهی (بیشتر بهتر است) امتیازدهی شدند (رابطهٔ ۱ و ۲). وزن شاخص‌ها با استفاده از رابطهٔ ۳ محاسبه شد. وزن این مقادیر در جدول ۵ ارائه شده است. مقدار شاخص کیفیت خاک با استفاده از رابطهٔ ۵ محاسبه شد. براساس امتیاز شاخص و وزن‌های تعلق گرفته شاخص کیفیت خاک از ۰/۲۳ تا ۰/۴۴ متغیر بود (شکل ۲). نتایج شاخص کیفیت خاک نشان داد که تیپ جنگلی برودار–ویول همراه سایر گونه‌ها دارای بالاترین کیفیت خاک (به‌طور معنی‌داری) و مازودار خالص دارای کمترین کیفیت خاک در بین ۴ تیپ مورد مطالعه بود. سهم نسبی هر ویژگی در شاخص کیفیت خاک در تیپ‌های جنگلی مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. در بین شاخص‌های انتخاب شده در مجموعه حداقل داده، پتاسیم بالاترین سهم و فسفر کمترین سهم را در شاخص کیفیت خاک داشتند. همبستگی مثبت بین پتاسیم، فسفر و نیتروژن نیز در سایر مطالعات گزارش شده است که می‌توان به نتایج مطالعات Qu و همکاران (۲۰۱۴) و Baushan و همکاران (۲۰۱۰) اشاره کرد.

نتایج نشان داد که شاخص کیفیت خاک به‌طور کلی در تیپ آمیخته بیشتر از تیپ‌های خالص است. تیپ برودار–ویول همراه سایر گونه‌ها بالاترین کیفیت خاک را نشان داد، زیرا دارای فسفر، پتاسیم، کلسیم، نسبت زیست‌تودهٔ کربن به نیتروژن و تنفس میکروبی بالاتری بود. از طرف دیگر تیپ مازودار خالص کیفیت خاک کمتری داشت که ممکن است به‌دلیل نزدیکی تیپ جنگلی به مناطق مسکونی باشد که بیشتر توسط فعالیت‌های انسانی مختل شده است. کربن آلی خاک منبع عظیمی از مواد مغذی برای درختان بوده و به‌عنوان عاملی فعال در گسترش ساختمان خاک، نقش مهمی در بهبود حاصلخیزی خاک‌های جنگلی دارد (Memoli *et al*., 2019). در مطالعهٔ حاضر کربن آلی با فسفر، ضریب متابولیک و نیتروژن همبستگی مثبت را نشان داد، اگرچه کربن آلی به‌دلیل پایین بودن وزن در مجموعه حداقل داده گنجانده نشد.

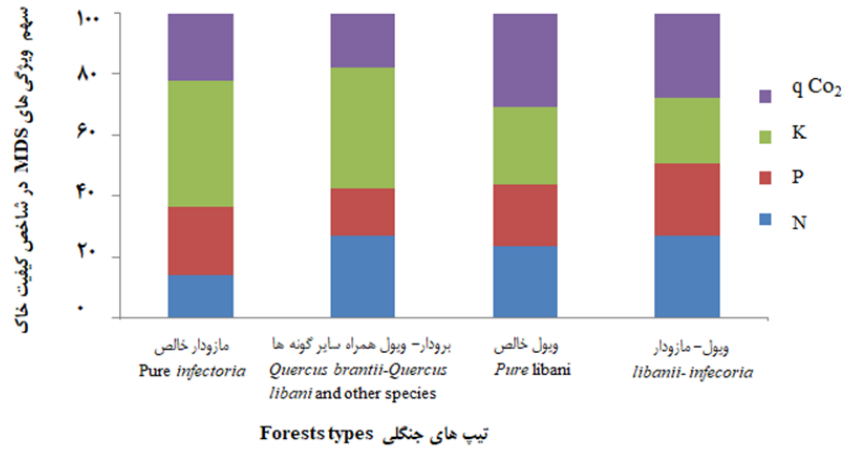
در پاسخ به سوال دیگر این پژوهش که آیا می‌توان برای تعیین کیفیت خاک از مجموعه حداقل داده به‌جای مجموعه کل داده‌ها استفاده نمود. باید اذعان داشت که رابطهٔ بین این دو مجموعه بایستی بررسی شود. شکل ۴ رابطهٔ بین مجموعه کل داده‌ها و مجموعه حداقل داده را برای شاخص کیفیت نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود برای شاخص کیفیت ضریب تبیین رابطهٔ بین دو سری داده ۰/۸۰۶ است که بیانگر رابطهٔ خوب این دو مجموعه برای شاخص کیفیت خاک است. همچنین بیانگر کارایی بهتر این شاخص برای ارزیابی کیفیت خاک منطقهٔ مورد مطالعه است؛ بنابراین می‌توان به‌جای اندازه‌گیری مجموعه کل خصوصیات اندازه‌گیری شده در این منطقهٔ مطالعاتی، از مجموعه حداقل داده استفاده نمود و با ضریب اطمینان ۸۰ درصد به همان نتایج دست یافت؛ این یافته با نتایج Qi و همکاران (۲۰۰۹) و Shao و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد، بنابراین با استفاده از شاخص‌های کیفیت خاک حاصل از مجموعه حداقل داده، با اطمینان قابل قبولی می‌توان کیفیت خاک را ارزیابی نمود. تعیین حداقل و یا بهینه‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک در موقعیت‌های گوناگون می‌تواند، راهنمایی برای تعیین کیفیت خاک هر منطقه با کمترین هزینه و حداقل زمان باشد.

جدول ۵- مقادیر سهم هر ویژگی بر کیفیت خاک در مجموعه‌های TDS و MDS

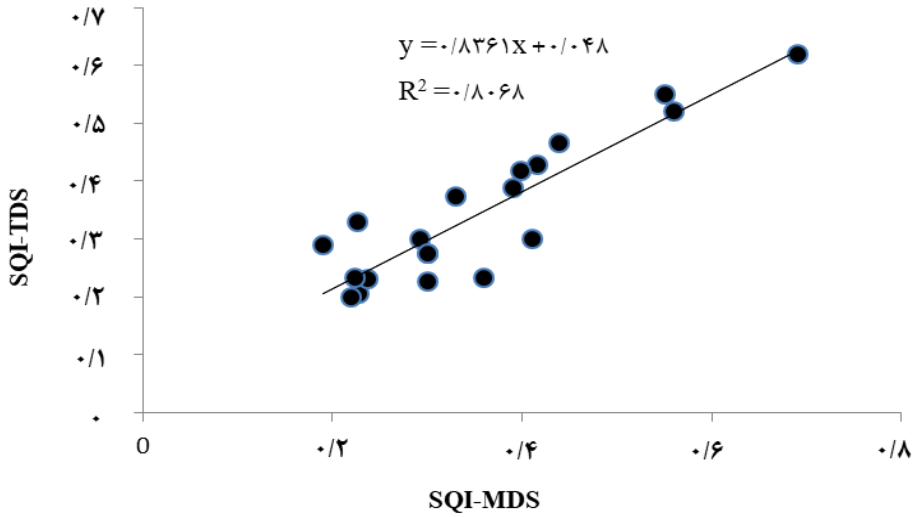
ویژگی‌های خاک	Communality	وزن در TDS	وزن در MDS
شن	۰/۲۸۹	۰/۰۳۶	
سیلت	۰/۶۲۹	۰/۰۵۷	
رس	۰/۲۶۷	۰/۰۴۹	
جرم مخصوص ظاهری (g/cm3)	۰/۴۵۸	۰/۰۵۶	
pH	۰/۳۱۰	۰/۰۴۵	
کربن آلی خاک (درصد)	۰/۴۱۴	۰/۰۵۶	
نیتروژن خاک (درصد)	۰/۸۳۱	۰/۰۷۵	۰/۲۵۱
فسفر قابل‌جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۰/۹۹۲	۰/۰۸۲	۰/۲۳۵
پتاسیم قابل‌جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۰/۹۹۰	۰/۰۸۲	۰/۲۵۵
کلسیم تبادلی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۰/۳۳۷	۰/۰۳۵	
منیزیم تبادلی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۰/۲۲۰	۰/۰۳۴	
نسبت زیست‌تودهٔ میکروبی کربن به زیست‌تودهٔ میکروبی نیتروژن	۰/۵۰۷	۰/۰۶۸	
بهرهٔ میکروبی	۰/۴۶۰	۰/۰۶۷	
بهرهٔ متابولیکی	۰/۹۹۸	۰/۰۹۳	۰/۲۴۷
تنفس میکروبی	۰/۶۴۶	۰/۰۷۵	



شکل ۲- میانگین شاخص کیفیت خاک در تیپ‌های جنگلی مختلف



شکل ۳- سهم انفرادی ویژگی‌های انتخاب شده در مجموعه حداقل داده‌ها در شاخص کیفیت خاک در تیپ‌های جنگلی مختلف (بر حسب درصد)



شکل ٤- رابطهٔ خطی مجموعه کل داده‌ها و مجموعه حداقل داده برای تعیین شاخص کیفیت خاک

نتیجه‌گیری

برای ارزیابی کیفیت خاک چهار تیپ جنگلی در آرمرده، ۱۵ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک اندازه‌گیری و همبستگی معنی‌داری بین آن‌ها نشان داده شد. مقدار شاخص کیفیت خاک با استفاده از نیتروژن کل، فسفر، پتاسیم و بهرهٔ متابولیکی پس از تجزیه مؤلفه‌های اصلی محاسبه شد. نتایج حاصل از شاخص کیفیت خاک نشان داد که تیپ آمیخته برودار–ویول همراه سایر گونه ها کیفیت خاک بالاتری نسبت به سایر تیپ‌ها داشت. به‌نظر می‌رسد با توجه به همبستگی مثبت این پارامترها در جدول ۴، نیتروژن کل، فسفر، پتاسیم و بهرهٔ متابولیکی عوامل اصلی محدودکنندهٔ خاک باشند. با توجه به سهم پتاسیم در شاخص کیفیت خاک در تیپ آمیخته برودار–ویول همراه سایر گونه‌ها می‌توان به تأثیر تاج پوشش و تعداد در هکتار این تیپ بر روی عنصر ذکر شده اشاره کرد. در نهایت شاخص کیفیت خاک براساس روش مجموعه حداقل داده می‌تواند ابزار مفیدی برای ارزیابی جامع کیفیت خاک سیستم‌های جنگلی باشد، شاخص کیفیت خاک می‌تواند به‌عنوان شاخص اولیه مدیریت جنگلداری پایدار در نظر گرفته شود. این مطالعه تغییر کیفیت خاک در تیپ‌های مختلف جنگلی را نشان داد و پیشنهاد می‌کند که کیفیت خاک باید در روش‌های مدیریتی پایدار مناطق جنگلی برای بهبود و حفظ کیفیت خاک در نظر گرفته شود. با این حال تحقیقات بیشتر باید کیفیت خاک منطقهٔ مورد مطالعه را در دراز مدت بررسی کنند.

References

Anderson, J.P., 1983. Soil respiration. Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties 9, 831-871.

Bandyopadhyay, S., Novo, L.A., Pietrzykowski, M., Maiti, S.K., 2020. Assessment of forest ecosystem development in coal mine degraded land by using integrated mine soil quality index (IMSQI): the evidence from India. Forests 11, 1310.

Baoshan, C., Hui, Z., Xia, L., Kejiang, Z., Huali, R & Junhong, B., 2010. Temporal and spatial distributions of soil nutrients in Hani terraced paddy fields, Southwestern China. Procedia Environmental Sciences pp. 1032-1042.

Black, C.A., 1979. Methods of soil analysis. American Society of Agronomy 20, 771-1572.

Bradstreet, R.B., 1954. Kjeldahl method for organic nitrogen. Analytical Chemistry, 26(1), pp.185-187.

Kalra, Y.P. and Maynard, D.G., 1991. Methods manual for forest soil and plant analysis. Forestry of Canada, Northwest Region, Northern Forest Center, Edmonton, AB. Information Report, NORX-311, 116 p.

Brejda, J.J., Karlen, D.L., Smith, J.L., Allan, D.L., 2000. Identification of regional soil quality factors and indicators II. Northern Mississippi Loess Hills and Palouse Prairie. Soil Science Society of America Journal 64(6), 2125-2135.

De são josé, J.F B., Cherubin, M.R., Vargas, L.K., Lisboa, B.B., Zanatta, J.A., Araújo, E.F., Bayer, C., 2023. A soil quality index for subtropical sandy soils under different Eucalyptus harvest residue managements. Journal of Forestry Research 34, 243-255.

Doran, J.W., Parkin, T.B., 1994. Defining and assessing soil quality. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment 35, 1-21.

Dipietro, E.S., Bashor, M.M., Stroud, P.E., Smarr, B.J., Burgess, B.J., Turner, W.E., Neese, J.W., 1988. Comparison of an inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry method for the determination of calcium, magnesium, sodium, potassium, copper and zinc with atomic absorption spectroscopy and flame photometry methods. Science of the Total Environment 74, 249-262.

Gee, G.W., D.Or., 2002. Particle–size analysis. In "Methods of Soil Analysis: Part 4. Physical Methods", ed. by J. H. Dane and G. C. Topp, SSSA, Madison, Wisconson. pp. 255-293.

Gong, L., Ran, Q., He, G. & Tiyip, T., 2015. A soil quality assessment under different land use types in Keriya river basin, Southern Xinjiang, China. Soil and Tillage Research 146**,** 223-229.

Guillaume, T., Makowski, D., Libohova, Z., Bragazza, L., Sallaku, F., Sinaj, S., 2022. Soil organic carbon saturation in cropland-grassland systems: Storage potential and soil quality. Geoderma, 406**,** 115529.

Guo, L., Sun, Z., Ouyang, Z., Han, D., Li, F., 2017. A comparison of soil quality evaluation methods for Fluvisol along the lower Yellow River. Catena 152, 135-143.

Heidari, M., Namiranian, M., Zobeiri, M., Gharamani, L., 2013. Investigation on appropriate inventory method for determining structure of Northern Zagros Forests (Case study: Blake Forests, Baneh). Iranian Journal of Forest and Poplar Research 21, 467-480.

Hesse, P.R., Hesse, P.R., 1971. A textbook of soil chemical analysis. pp. 520.

Isong, I. A., John, K., Okon, P.B., Ogban, P.I., Afu, S.M., 2022. Soil quality estimation using environmental covariates and predictive models: an example from tropical soils of Nigeria. Ecological Processes 11, 1-22.

Kalu, S., Koirala, M., Khadka, U.R., Anup, K., 2015. Soil quality assessment for different land use in the Panchase area of western Nepal. International Journal of Environmental Protection 5, 38-43.

Khezri, M., Nosrati, K., Mohammadi Reygani, Z., 2022. Impact of Geomorphic Hillslope Components on Soil Erodibility and Soil Quality (Case Study: Hashtian Catchment, Urmia Lake). Quantitative Geomorphological Research 11(1), 230-243. (In Persian)

Lee, S., Kim, H., Yang, J. E., Ryu, H.-S., Moon, J., Lee, J.-Y., Lee, H., 2021. Comparison of microbial gene diversity in grassland topsoil depending on soil quality. Applied Sciences 11, 9569.

Li, T., LI, L., Chen, X., Zhang, S., Wang, H., Pu, Y., Xu, X., Wang, G., Jia, Y., Li, H., 2023a. Soil quality assessment of cropland in China and its relationships with climate and topography. Land Degradation & Development 34, 637-652.

Li, M., Kan, Y., Su, H., Pöschl, U., Parekh, S.H., Bonn, M., Cheng, Y., 2023. Spatial homogeneity of pH in aerosol microdroplets. Chem 9(4), 1036-1046.

Li, X., Li, H., Yang, L., Ren, Y., 2018. Assessment of soil quality of croplands in the Corn Belt of Northeast China. Sustainability 10, 248.

Li, Y., Wang, Z., Tian, H., Megharaj, M., Jia, H., He, W. 2023b. Using soil enzyme Vmax as an indicator to evaluate the ecotoxicity of lower-ring polycyclic aromatic hydrocarbons in soil: Evidence from fluorescein diacetate hydrolase kinetics. Science of The Total Environment 162521.

Liu, S., Zhang, Q., Li, Z., Tian, C., Qiao, Y., Du, K., Cheng, H., Chen, G., Li, X., Li, F., 2023., Soil Salinity Weakening and Soil Quality Enhancement after Long-Term Reclamation of Different Croplands in the Yellow River Delta. Sustainability 15, 1173.

Maleki, S., Pilehvar, B., Mahmoodi, M.A., 2022. Daily and seasonal changes of soil respiration under the influence of temperature and moisture factors in different types of oak. Journal of Wood and Forest Science and Technology 29, 59-73. (In Persian)

Maleki, S., Pilehvar, B., Mahmoodi, M.A., 2023a. Assessing the vegetation diversity of different oak types in relation with soil characteristics in the forests of north Zagros (Case study: Armardeh Baneh). Journal of Natural Environment 76**,** 413-428. (In Persian)

Maleki, S., Pilehvar, B., mahmoodi, M.A., 2023b. Response of soil microbial respiration to environmental factors of temperature and moisture in five forest types of Zagros (case study: Armardeh Baneh forests). Forest Research and Development 9, 275-289. (In Persian)

Maroufi, H., Sadri, M., Sagheb, T.K., Fatahi, M., 2005. Site demands and some quantitative characteristics of Lebanon oak (*Quercus libani* Oliv.) in Kurdistan province. Forest and Poplar Research Journal 13(4), 22. 417-446. (In Persian)

Marty, C., Houle, D., Gagnon, C., Courchesne, F., 2017. The relationships of soil total nitrogen concentrations, pools and C: N ratios with climate, vegetation types and nitrate deposition in temperate and boreal forests of eastern Canada. Catena 152, 163-172.

Marzaioli, R., D'Ascoli, R., De Pascale, R.A., Rutigliano, F.A., 2010. Soil quality in a Mediterranean area of Southern Italy as related to different land use types. Applied Soil Ecology 44(3), 205-212.

Memoli, V., De marco, A., Esposito, F., Panico, S.C., Barile, R., Maisto, G., 2019. Seasonality, altitude and human activities control soil quality in a national park surrounded by an urban area. Geoderma 337, 1-10.

Mohammad, D., Hooman, R., Alireza, M., Mojtaba, A., Mohammad Kia, K., 2019. Forest types of Gzoo Taxus baccata L. researve and the analysis of vegetation in relation to environmental variables (Savadkooh, Mazandaran). Journal of Plant Ecosystem Conservation 7, 237-252.

Mohammadi samani, K., Hosseini, V., Rostami, H., 2022. Physical and chemical properties of soil in sacred groves and surrounding oak woodlands in Baneh County. Forest and Wood Products 74, 383-394. (In Persian)

Moradi, M., Jorfi, M. R., Basiri, R., Yusef naanaei, S., Heydari, M., 2022., Beneficial effects of livestock exclusion on tree regeneration, understory plant diversity, and soil properties in semiarid forests in Iran. Land Degradation & Development 33, 324-332.

Mulat, Y., Kibret, K., Bedadi, B., Mohammed, M., 2021. Soil quality evaluation under different land use types in Kersa sub-watershed, eastern Ethiopia. Environmental Systems Research 10, 1-11.

Nabiollahi, K., Taghizadeh-mehrjardi, R., Kerry, R., Moradian, S., 2017. Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. Ecological indicators 83**,** 482-494.

Namiranian, M., Henareh khalyani, A., Zahedi amiri, G. & Ghazanfari, H., 2007. Study of different restoration and regeneration techniques in northern Zagros (Case study: Armardeh oak forest, Baneh). Iranian Journal of Forest and Poplar Research 15, 397-386. (In Persian)

Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., Dean, L.A.,1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. Circular No. 939. US Department of Agriculture, Washinton, DC.

Omer, M., Idowu, O.J., Pietrasiak, N., Vanleeuwen, D., Ulery, A.L., Dominguez, A.J., Ghimire, R., Marsalis, M., 2023. Agricultural practices influence biological soil quality indicators in an irrigated semiarid agro-ecosystem. Pedobiologia 96, 150862.

Paudel, A. & Yadav, A. B. P. k. 2021. Soil conservation practices in forest of Nepal. Journal Clean WAS (JCleanWAS) 5, 73-77.

Qu, M., Li, W., Zhang, C., 2014. County-Scale Spatial Variability of Macronutrient Availability Ratios in Paddy Soils. Applied and Environmental Soil Science pp. 1-10.

Rad, J.E., Valadi, G., Zargaran, M.R., 2017. Effect of manmade disturbances on understory plant richness of oak forests in Iran. Folia Oecologica 44, 61-68.

Sadeghi, S., Mohammadi samani, K., Hosseini, V., Shakeri, Z., 2019. Effect of grazing intensity and type of livestock on physical and chemical properties of forest soil (Case study: Armardeh Forest, Baneh, Iran). Iranian Journal of Forest and Poplar Research 27, 349-363. (In Persian)

Selmy, S. A., Al-aziz, S.H.A., Jiménez-ballesta, R., García-navarro, F. J. & Fadl, M. E., 2021. Soil Quality Assessment Using Multivariate Approaches: A Case Study of the Dakhla Oasis Arid Lands. Land 10, 1074.

Tavares, R.L.M., Farhate, C.V.V., de Souza, Z.M., Júnior, N.L.S., Torres, J.L.R., Campos, M.C.C., 2015. Emission of CO_2 and soil microbial activity in sugarcane management systems. African Journal of Agricultural Research 10(9), 975-982.

Yao, R.J., Yang, J.S., Gao, P., Zhang, J.B., Jin, W.H., Yu, S.P., 2014. Soil-quality-index model for assessing the impact of groundwater on soil in an intensively farmed coastal area of E China. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 177, 330-342.

Yu, H., Song, W., 2023. Research Progress on the Impact of Land Use Change on Soil Carbon Sequestration. Land, 12, 213.

Yu, P., Han, D., Liu, S., Wen, X., Huang, Y., Jia, H., 2018. Soil quality assessment under different land uses in an alpine grassland. Catena, 171, 280-287.

Zahedifar, M., 2023. Assessing alteration of soil quality, degradation, and resistance indices under different land uses through network and factor analysis. Catena 222, 106-807.

Zhang, G., Bai, J., Xi, M., Zhao, Q., Lu, Q., Jia, J. 2016., Soil quality assessment of coastal wetlands in the Yellow River Delta of China based on the minimum data set. Ecological Indicators 66, 458-466.

Zhang, Z., Han, J., Yin, H., Xue, J., Jia, L., Zhen, X., Chang, J., Wang, S., Yu, B., 2022. Assessing the effects of different long-term ecological engineering enclosures on soil quality in an alpine desert grassland area. Ecological Indicators 143, 109-426.

Zhijun, H., Selvalakshmi, S., Vasu, D., Liu, Q., Cheng, H., Guo, F., Ma, X., 2018. Identification of indicators for evaluating and monitoring the effects of Chinese fir monoculture plantations on soil quality. Ecological Indicators 93, 547-554.

Zobairi, M., 2002. Forest biometry. Tehran. University Press. p 416. (In Persian).

Ungaro, F., Maienza, A., Ugolini, F., Lanini, G., Baronti, S., Calzolari, C., 2022. Assessment of joint soil ecosystem services supply in urban green spaces: A case study in Northern Italy. Urban Forestry & Urban Greening 67, 127455.