

The effect of vegetation cover degradation and restoration on biological fertility indices and soil texture in temperate ecosystems of the Caspian region

Extended Abstract

Introduction

In temperate ecosystems, degradation and restoration of vegetation cover can profoundly influence ecological processes, particularly soil properties and functions. Soil serves as a fundamental component of terrestrial ecosystems, regulating nutrient cycling, organic matter dynamics, microbial activity, and hydrological processes. Over recent decades, extensive deforestation, land-use change, and unsustainable exploitation of forest resources in northern Iran, especially within the Hyrcanian region, have resulted in substantial alterations in vegetation structure and composition. Vegetation degradation and subsequent restoration practices exert strong impacts on soil fertility by modifying organic matter inputs, microbial communities, and nutrient availability. Therefore, implementing integrated systems for monitoring soil fertility, particularly biological indicators, is essential for evaluating ecosystem health and restoration success. Among soil attributes, texture represents a key factor in assessing soil vulnerability across different land uses. Changes in soil texture induced by vegetation loss or recovery can influence other soil properties, thereby affecting runoff generation and erosion rates. Although numerous studies have addressed the effects of vegetation degradation and restoration on soil physical and chemical properties, relatively limited attention has been given to biological fertility indices and soil texture dynamics under different vegetation covers. Biological indicators such as microbial biomass carbon and soil respiration provide sensitive measures of soil quality and reflect ecosystem functioning more rapidly than conventional chemical parameters. Accordingly, the present study aimed to evaluate the effects of vegetation degradation and restoration on soil biological fertility indices and soil texture across seven land-use types in temperate Hyrcanian ecosystems. Specifically, this research sought to (i) compare soil texture-related indices and organic matter status among natural, degraded, and restored vegetation types; (ii) assess soil biological fertility at different depths; and (iii) identify relationships between biological indicators and organic matter content.

Method

The study area is located in the western part of Mazandaran Province, within the Kelarabad regions. In this research, seven different land-use types were selected across the study region, including: (1) natural forest, (2) degraded forest, (3) afforestation with *Alnus subcordata* C. A. Mey., (4) afforestation with *Acer insigne* Boiss, (5) mixed afforestation with *Alnus subcordata* C. A. Mey.– *Acer insigne* Boiss, (6) afforestation with the non-native coniferous species *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl, and (7) grassland. Soil sampling was carried out during the summer of 2025. Within each vegetation type, three one-hectare plots (100 × 100 m) were established. In each plot, soil sampling was conducted at the four corners at three depths (0–10, 10–20, and 20–30 cm) within a 30 × 30 cm sampling area. In total, 36 soil samples were collected from three depths (0–10, 10–20, and 20–30 cm), with 12 samples obtained from each depth across the studied land uses. Samples were air-dried, sieved, and transferred to the laboratory for analysis. Soil texture fractions were determined using standard procedures, and indices such as clay ratio and modified clay ratio were calculated. Soil organic matter content was measured, and critical organic matter thresholds were assessed. Soil biological fertility was evaluated using indicators including basal respiration, cumulative respiration, and microbial biomass carbon. A composite biological fertility indices was derived by scoring individual biological parameters and summing their values to classify fertility status. All statistical analyses were performed using SPSS software (version 22). Statistical analyses were performed using analysis of variance (ANOVA) to test for significant differences among vegetation types and soil depths. Duncan's multiple range test was applied to compare mean values at a significance level of $p < 0.05$. Principal component analysis (PCA) was employed to explore relationships among biological indicators, organic matter content, and critical organic matter levels.

Results

The results revealed significant differences in soil texture-related indices among vegetation types. The highest values of clay ratio and modified clay ratio were observed in the grassland site, whereas the lowest values were recorded in the *Acer insigne* plantation. These findings indicate greater soil structural vulnerability in grassland areas compared to forested and restored sites. Regarding critical organic matter levels, the *Sequoia* plantation exhibited the highest values at the 0–10 and 10–20 cm depths, while the mixed *Al. subcordata* – *Ac. insigne* plantation showed the highest critical organic matter at the 20–30 cm depth. In contrast, grassland consistently displayed the lowest critical organic matter across all soil depths, reflecting reduced organic inputs and limited biological activity. Assessment of soil biological fertility demonstrated clear variation among land uses and depths. At the surface layer (0–10 cm), natural forest and *Al. subcordata* plantation exhibited good fertility status, with total scores of 20 and 19, respectively. These sites were characterized by higher microbial activity and organic matter content. All other land uses, across all depths, fell within the moderate fertility category. Degraded forest and grassland showed comparatively lower biological scores, highlighting the negative impacts of vegetation removal on soil biological functioning. Principal component analysis indicated strong positive relationships between soil organic matter, critical organic matter level, and key biological indicators, including basal respiration, cumulative respiration, and microbial biomass carbon. These variables clustered closely, suggesting that organic matter availability plays a central role in regulating microbial activity and overall soil biological fertility.

Conclusions

The findings of this study demonstrate that vegetation degradation and restoration significantly influence soil biological fertility and texture-related indices in temperate Hyrcanian ecosystems. Natural forest and *Al. subcordata* plantations were

particularly effective in enhancing soil biological quality, especially in surface layers, whereas grassland exhibited the poorest soil conditions. The strong associations between organic matter content and biological indicators underscore the importance of organic inputs in sustaining soil microbial processes. Based on the observed changes in soil biological fertility following degradation and restoration, it is recommended that biological fertility indices be incorporated alongside conventional soil properties as key criteria for evaluating the success of land restoration programs under similar ecological conditions. Moreover, planting *Al. subcordata* species appears to be a promising strategy for improving soil biological status and accelerating ecosystem recovery in degraded temperate landscapes.

Keywords: *Temperate climate, afforestation, biological soil fertility, soil depth.*

پیراسته‌های نشانه

اثر تخریب و احیاء پوشش‌های گیاهی بر شاخص‌های حاصلخیزی زیستی و بافت خاک در اکوسیستم‌های معتدل ناحیه خزری

چکیده

تغییرات پوشش گیاهی ناشی از بهره‌برداری جنگل می‌تواند بر فرآیندهای اکولوژیکی و ویژگی‌های خاک اثرگذار باشد. با توجه به اهمیت خاک در حفظ عملکرد اکوسیستم، پایش شاخص‌های زیستی خاک در کنار ویژگی‌های فیزیکی، به‌ویژه بافت خاک، ضروری است. با وجود مطالعات متعدد درباره ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، شاخص‌های زیستی حاصلخیزی خاک کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این پژوهش با هدف بررسی اثر تخریب و احیاء پوشش گیاهی بر شاخص‌های حاصلخیزی زیستی و بافت خاک در هفت رویشگاه شامل جنگل طبیعی، جنگل تخریب‌یافته، جنگل کاری توسکا، پلت، پلت-توسکا، سکویا و گراسلند در اکوسیستم‌های معتدل ناحیه خزری انجام شد. تعداد ۳۶ نمونه خاک از سه عمق ۱۰-۰، ۲۰-۱۰ و ۳۰-۲۰ سانتی‌متر برداشت و پس از انتقال به آزمایشگاه تجزیه شد. داده‌ها با استفاده از آزمون آنالیز واریانس و دانکن تحلیل شدند. نتایج نشان داد بیشترین شاخص نسبت رس در گراسلند و کمترین آن در رویشگاه پلت مشاهده شد. رویشگاه‌های سکویا و پلت-توسکا بیشترین سطح بحرانی ماده آلی را داشتند، در حالی که گراسلند کمترین مقدار را نشان داد. شاخص حاصلخیزی زیستی در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر برای جنگل طبیعی و توسکا در سطح خوب و سایر کاربری‌ها در سطح متوسط قرار گرفت. تحلیل مؤلفه‌های اصلی ارتباط مثبت تنفس خاک و زی‌توده میکروبی کربن با ماده آلی را نشان داد. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود شاخص حاصلخیزی زیستی به‌عنوان معیار ارزیابی احیاء اراضی تخریب‌یافته استفاده شده و کاشت توسکا به‌عنوان گزینه‌ای مؤثر در بهبود کیفیت زیستی خاک مدنظر قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: اقلیم معتدل، تغییرات کاربری، جنگل‌زدایی، جنگل‌کاری، عمق خاک.

مقدمه

حفاظت از آب و خاک و تأمین بخشی از نیازهای انسانی، از جمله مهم‌ترین دلایلی بوده که جنگل‌ها و مراتع از گذشته تاکنون مورد توجه قرار گرفته‌اند. پوشش گیاهی و اکوسیستم‌های طبیعی، بویژه جنگل‌ها و مراتع، در برگیرنده منابع عظیمی از ذخایر ژنتیکی و تنوعی از گونه‌های گیاهی هستند که بخش بزرگی از تنوع زیستی را در خود جای داده‌اند و نقشی حیاتی در حفظ تعادل زیست‌بومی ایفا می‌کنند (کیاپاشا و همکاران، ۱۳۹۶؛ Košanin et al., 2023). جنگل‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های کره زمین، قادر به بهبود کیفیت هوا، حفظ خاک و تنوع زیستی هستند، لذا مدیریت پایدار جنگل‌ها برای بهره‌برداری بهینه از خدمات ارزشمند آن‌ها امری حیاتی است (اعظمی و همکاران، ۱۳۹۷). تخریب و تغییر کاربری اراضی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین دخالت‌های انسانی در طبیعت، به‌طور مستقیم بر فرآیندهای اکولوژیکی، بویژه خاک، تأثیر می‌گذارد (بهشتی آل‌آقا و همکاران، ۱۳۹۰). مسأله تغییرات پوشش زمین و تأثیرات آن بر اکوسیستم‌های زمینی از اهمیت فراوانی برخوردار است و اهمیت حفاظت از جنگل‌های طبیعی در مواجهه با تغییرات اقلیمی جهانی و گرمایش زمین، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است (Sloan and Sayer, 2015). تخریب پوشش گیاهی و کاهش مساحت جنگل‌ها و مراتع منجر به عواقب اکولوژیکی منفی از جمله کاهش تنوع زیستی و بافت کیفیت خاک می‌شود. این تغییرات باعث تغییر در شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک شده و منجر به کاهش کیفیت خاک از طریق کاهش میزان ماده آلی، تنفس میکروبی، پایداری خاکدانه‌ها، هدایت هیدرولیکی و افزایش جرم مخصوص ظاهری می‌شود (Moges et al., 2013; Adugna and Abegaz, 2016). تخریب اکوسیستم‌های طبیعی سبب تغییرات قابل توجهی در شاخص‌های فیزیکی خاک می‌شود این تغییرات شامل تغییر بافت خاک، کاهش پایداری خاکدانه‌ها و کاهش رطوبت خاک است (امانی و همکاران، ۱۴۰۱). تخریب خاک‌های جنگلی نشان‌دهنده تهدید بالقوه برای توسعه پوشش گیاهی طبیعی است. از بین رفتن جنگل‌ها باعث کاهش ورودی‌های ماده آلی به خاک و تضعیف فعالیت‌های زیستی و چرخه مواد مغذی خاک می‌شود (حیدری و همکاران، ۱۴۰۳ Kooch et al., 2020). تغییرات کاربری و پوشش گیاهی، تأثیر مستقیمی بر مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک دارد (Vinh et al., 2013).

بافت خاک، که میزان حضور هر یک از اجزای مختلف آن را بیان می‌کند، بر ویژگی‌های عملکردی خاک تأثیر گذاشته و می‌تواند فرآیندهای اکولوژیکی را تغییر داده و شدت آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. بافت خاک نه تنها بر محتوای آب و دمای خاک تأثیر دارد که این عوامل بر فعالیت‌های میکروبی در خاک تأثیر می‌گذارند (Sugihara et al., 2010; Chodak and Niklińska, 2010)، بلکه نقش کلیدی در فرآیند تبادل گازهای تنفسی بین خاک و جو، به‌ویژه تنفس ریشه‌ها و میکروارگانیسم‌ها، ایفا می‌کند. خاک‌های دارای بافت سنگین در مقایسه با خاک‌های سبک، از فعالیت میکروبی بالاتر و ظرفیت بیشتری برای ذخیره کربن برخوردارند. از این‌رو، بافت خاک به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در سنجش میزان شکندگی خاک برای کاربری‌های گوناگون زمین در اکوسیستم‌های مختلف شناخته می‌شود. نوع خاک، بافت، ساختار و محتوای مواد آلی به‌طور مستقیم بر اندازه، تعداد و اتصال منافذ خاک تأثیر می‌گذارند. این عوامل در نهایت فرآیندهای نفوذ و فرسایش خاک را تحت تأثیر قرار داده و کنترل آن‌ها به‌شدت وابسته به ویژگی‌های مذکور است (Oruk et al., 2012). در این زمینه، شاخص نسبت رس اصلاح‌شده، شاخص نسبت رس و سطح بحرانی ماده آلی خاک به‌عنوان شاخص‌های مؤثر برای ارزیابی پتانسیل فرسایش‌پذیری خاک به‌کار گرفته می‌شوند (Olaniya et al., 2020).

تغییر کاربری اراضی و حذف پوشش گیاهی می‌تواند اثرهای شدیدی بر حاصلخیزی خاک داشته باشد (Rolando et al., 2018)، که این نتایج توسط مطالعات مختلف نیز تأیید شده است (Bakhshandeh et al., 2019; Kooch et al., 2024). در میان انواع شاخص‌های زیستی و چرخه‌های بیوشیمیایی، حاصلخیزی خاک تابعی از فعالیت میکروبی و ماده آلی خاک است که به تغییرات مکانی در ویژگی‌های محیطی و نحوه استفاده و مدیریت زمین بستگی دارد (اسدیان و همکاران، ۱۳۹۱). بنابراین، استفاده از یک سیستم شاخص جامع برای نظارت بر حاصلخیزی خاک ضروری است (Francaviglia et al., 2017). در این راستا، به منظور ارزیابی و پایش میزان حاصلخیزی خاک، شاخص حاصلخیزی زیستی خاک (Biological Fertility Index; BFI) توسط (Renzi et al., 2017) معرفی شد. این شاخص از ۶ پارامتر، ماده آلی خاک (SOM)، تنفس پایه خاک (CbasR)، تنفس تجمعی خاک (CumR)، کربن زیست توده میکروبی (Cmic)، ضریب متابولیک (qCO_2) و ضریب معدنی شدن (MQ) خاک استفاده می‌کند. شاخص‌های میکروبی خاک جزء ویژگی‌های حساس و مهم هستند که نسبت به تغییرات محیطی و مدیریت به سرعت عکس‌العمل نشان می‌دهند که مشخصه‌های تنفس پایه و برانگیخته، زیستوده میکروبی (کربن)، ضریب متابولیکی یا تنفس ویژه و سهم میکروبی از مهمترین این شاخص‌ها هستند (Allegrini et al., 2017). براساس پژوهش‌های پیشین، شاخص حاصلخیزی زیستی خاک به‌عنوان ابزاری کارآمدتر از بررسی‌های جداگانه زیست‌توده و فعالیت میکروبی خاک عمل می‌کند و می‌تواند برای ارزیابی کیفیت خاک در سطوح مختلف اختلالات ناشی از فعالیت‌های انسانی مفید واقع شود (Francaviglia et al., 2017; Renzi et al., 2017).

با توجه به تخریب گسترده جنگل‌ها و مراتع، ضرورت احیاء و توسعه این منابع ارزشمند بیش از پیش احساس می‌شود. در این زمینه، یکی از اولویت‌های جهانی کنونی، مهار تخریب زمین و احیای عملکردها و خدمات اکولوژیکی است (Yin et al., 2025). جنگل‌کاری به عنوان راهکاری مؤثر برای حفاظت از خاک و آب، مقابله با بیابان‌زایی و افزایش کیفیت و حاصلخیزی خاک، از اهمیت بالایی برخوردار است (وطنی و همکاران، ۱۴۰۰). احیای سطوح جنگلی تخریب‌یافته، بواسطه جنگل‌کاری، اثرات معنی‌داری بر تغییرپذیری مشخصه‌های خاک بخصوص مشخصه‌های زیستی ایجاد می‌نماید و برخی از خدمات اکوسیستم شامل فرآیندهای بیولوژیکی و بیوشیمیایی را بهبود می‌بخشد (Li et al., 2012). در این زمینه، بین گونه‌های بومی و غیربومی و همچنین گونه‌های پهن‌رگ و سوزنی‌برگ تفاوت اساسی وجود دارد و گونه‌های مختلف اثرات متفاوتی بر مشخصه‌های خاک می‌گذارند (Hoogmoed et al., 2014).

از سوی دیگر تخریب زیست‌بوم‌های طبیعی و انتخاب نامناسب گونه‌های گیاهی برای احیای مناطق تخریب شده، به شدت بر حاصلخیزی زیستی و شاخص‌های بافت خاک اثرگذار است. مرور منابع حاکی از آن است که مطالعات پیشین بیشتر بر مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تمرکز داشته‌اند (Allek et al., 2022; Gao et al., 2025)؛ مهمدی کرتلایی و همکاران، ۱۴۰۳ و با وجود انجام پژوهش‌های متعدد درباره اثر تخریب و احیای پوشش گیاهی بر ویژگی‌های خاک، اغلب این مطالعات به بررسی جداگانه

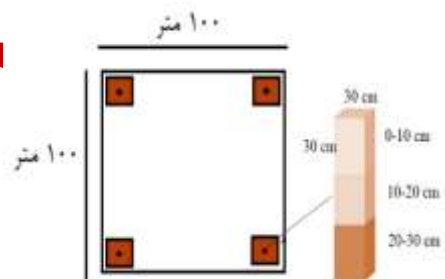
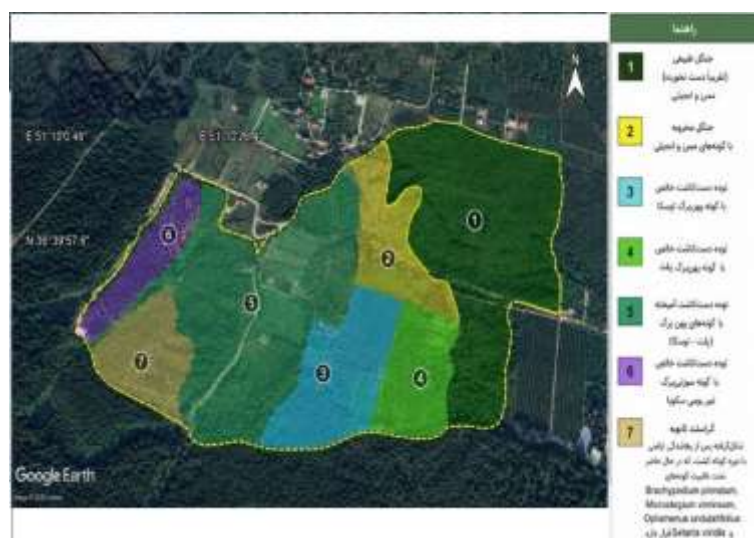
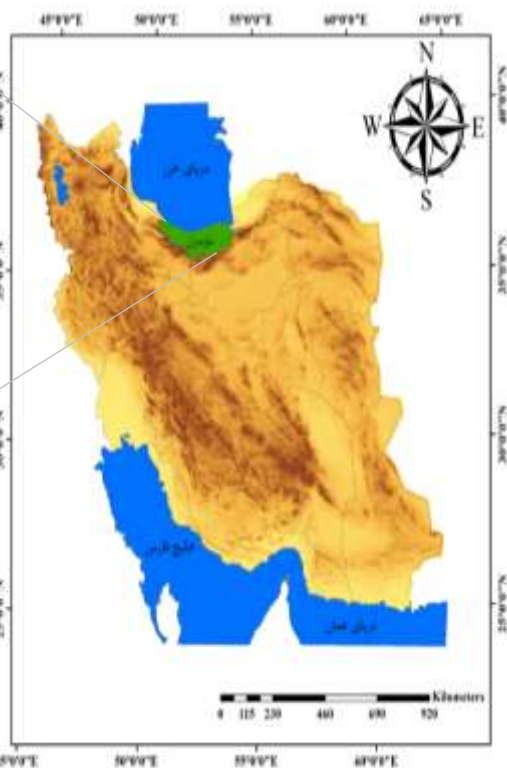
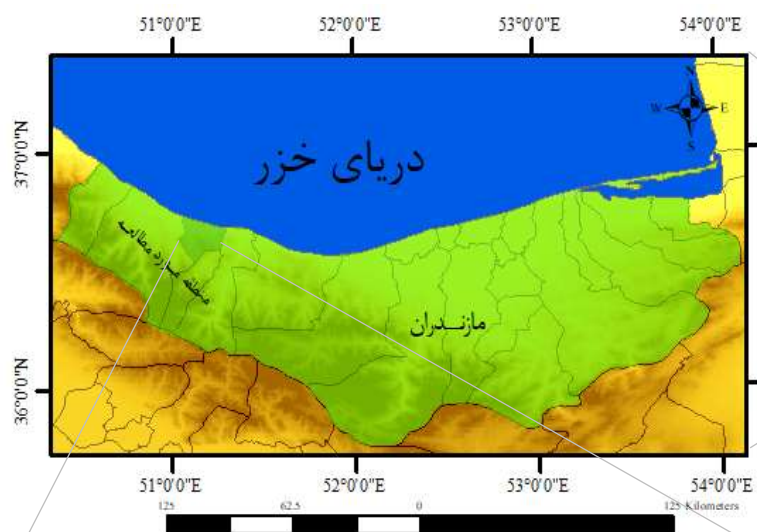
شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی یا برخی شاخص‌های زیستی محدود شده‌اند. در این میان، ارزیابی یکپارچه شاخص‌های کمی وضعیت بافت خاک شامل شاخص نسبت رس (CR)، شاخص نسبت رس اصلاح‌شده (MCR) و سطح بحرانی ماده آلی خاک (CLOM)، در کنار شاخص تلفیقی حاصلخیزی زیستی خاک (BFI)، در پاسخ به تغییرات پوشش گیاهی در شرایط تخریب‌یافته و احیاشده، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، هدف این پژوهش بررسی اثر انواع کاربری اراضی بر شاخص‌های حاصلخیزی زیستی و شاخص‌های کمی بافت خاک در شرایط تخریب و احیا در جنگل‌های ناحیه خزری است. نوآوری این مطالعه در به‌کارگیری هم‌زمان شاخص‌های ساختاری بافت خاک (CR، CLOM، MCR) در کنار شاخص تلفیقی BFI و ارائه یک ارزیابی یکپارچه از وضعیت فیزیکی و زیستی حاصلخیزی خاک در اکوسیستم‌های جنگلی ناحیه خزری تعریف می‌شود. جنگل‌های ناحیه خزری به‌عنوان یکی از کانون‌های مهم تنوع زیستی و تولید زیست‌توده در ایران، نقش اساسی در پایداری فرآیندهای اکولوژیکی و چرخه عناصر غذایی و حفظ عملکرد اکوسیستم دارند. با این حال، در دهه‌های اخیر، تشدید مداخلات انسانی و بهره‌برداری غیراصولی منجر به زوال بخشی از این جنگل‌ها و شکل‌گیری عرصه‌هایی با پوشش گیاهی تنک یا حذف‌شده شده است. از این‌رو، این پژوهش با رویکردی تلفیقی، به بررسی پیامدهای تخریب و احیای پوشش گیاهی بر شاخص‌های حاصلخیزی زیستی و بافت خاک می‌پردازد و می‌تواند درک دقیق‌تری از ارتباط بین فعالیت‌های زیستی خاک و ترکیب گونه‌ای گیاهان ارائه دهد. این نتایج همچنین می‌تواند مبنایی برای پایش تخریب و طراحی راهبردهای احیای جنگل‌های خزری فراهم سازد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، جنگل‌های واقع در محدوده جغرافیایی حوزه کلارآباد است. براساس طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه، این منطقه در کلاسه مناطق خیلی مرطوب با زمستان‌های معتدل قرار می‌گیرد (شکل ۱ الف). برای منطقه مورد مطالعه، بارندگی سالانه ۱۱۰۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر و محدوده ارتفاعی ۳۷۰ متر از سطح دریا گزارش شده است. مطالعات خاک‌شناسی نشان می‌دهد که خاک‌های غالب در این منطقه از نوع راندزین‌های قهوه‌ای جنگلی ناقص و خاک‌های قهوه‌ای شسته شده با افق آرژلیک و pH اسیدی هستند. توده‌های جنگل کاری مورد بررسی مربوط به سال ۱۳۶۸ بوده که به منظور حفاظت از عرصه‌های جنگلی و باغ‌ها در برابر تصرفات غیرمجاز در قالب طرح جنگل کاری در اراضی حاشیه شمالی پارسل ۱۱۲ (خرماچال) واقع در سری ۱ حوزه ۳۸ طرح جنگلداری تپله کنار سلمان‌شهر ایجاد شده‌اند و در زمان نمونه‌برداری (۱۴۰۳) حدود ۳۵ سال سن داشته‌اند. کاربری‌های مورد مطالعه براساس مطالعات پیشین انجام‌شده در منطقه، اطلاعات موجود از وضعیت مدیریتی عرصه و بررسی‌های میدانی اولیه شناسایی و انتخاب شدند (غیبی و همکاران، ۱۳۹۳؛ مقیمیان و همکاران، ۱۳۹۷؛ حاجی میرزا آقایی و همکاران، ۱۳۹۸). در این پژوهش، به بررسی هفت نوع کاربری مختلف در منطقه مورد مطالعه می‌پردازیم.

۱. جنگل طبیعی (تقریباً دست نخورده) ممز و انجیلی
۲. جنگل مخروبه با گونه‌های ممز و انجیلی
۳. توده دست‌کاشت خالص با گونه پهن‌برگ توسکا
۴. توده دست‌کاشت خالص با گونه پهن‌برگ پلت
۵. توده دست‌کاشت آمیخته با گونه‌های پهن‌برگ پلت - توسکا
۶. توده دست‌کاشت خالص با گونه سوزنی‌برگ غیربومی سکویا
۷. گراسلند ثانویه شکل‌گرفته پس از رهاشدگی اراضی با دوره کوتاه کشت، که در حال حاضر تحت غالبیت گونه‌های *Brachypodium pinnatum*، *Microstegium vimineum*، *Oplismenus undulatifolius* و *Setaria viridis* قرار دارد.



(الف)

(ب)

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان مازندران، شمال ایران (الف)، نمایش قطعات نمونه در منطقه و طرح نمونه‌گیری برای هر رویشگاه مورد بررسی (ب)

روش نمونه‌برداری و تجزیه آزمایشگاهی

به منظور بررسی اثر انواع کاربری اراضی بر مشخصه‌های مختلف لایه آلی و معدنی خاک، پس از بررسی‌های اولیه و بازدیدهای میدانی، کاربری‌های مورد مطالعه شناسایی شدند. سپس ویژگی‌های توپوگرافی شامل ارتفاع از سطح دریا، درصد شیب و جهت دامنه در هر بخش از اراضی اندازه‌گیری و ثبت شد. ارتفاع با استفاده از ارتفاع‌سنج، جهت دامنه با استفاده از قطب‌نما و درصد شیب با استفاده از کلینومتر (Clinometer) تعیین گردید. در ادامه، بخش‌هایی از اراضی که کمترین اختلاف را از نظر ویژگی‌های توپوگرافی داشتند، به‌عنوان واحدهای نمونه‌برداری انتخاب شدند (شکل ۱الف). شرح تفصیلی هر رویشگاه در جدول ۱ گزارش شده است. در هر یک از رویشگاه‌های مورد مطالعه، سه قطعه یک هکتاری (۱۰۰ متر × ۱۰۰ متر) با فواصل حداقل ۵۰۰ متر انتخاب شدند. در هر یک از قطعات یک هکتاری، تعداد ۴ نمونه (از چهار گوشه قطعات نمونه یک هکتاری) از لایه معدنی خاک (سطح ۳۰ سانتی‌متر × ۳۰ سانتی‌متر از سه عمق ۱۰-، ۲۰- و ۳۰- سانتی‌متری) برداشت شد (شکل ۱ب). در مجموع از هر یک از رویشگاه‌های مورد مطالعه ۳۶ نمونه خاک جهت تجزیه و تحلیل به آزمایشگاه انتقال داده شد. نمونه‌های جمع‌آوری شده خاک جهت انجام آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی به محیط آزمایشگاه انتقال داده شدند. یک بخش از نمونه‌های خاک برای انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی، پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شده و بخش دوم نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های زیستی تا زمان آزمایش در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد (به مدت یک هفته) نگهداری شد.

جدول ۱- توصیف کاربری اراضی و ویژگی‌های فیزیوگرافی منطقه مورد مطالعه

انواع کاربری اراضی	گونه‌های غالب	ارتفاع	شیب	جهت	مشخصه‌های فیزیوگرافی
جنگل طبیعی	<i>Carpinus betulus</i> L. (143 n/ha) <i>Parrotia persica</i> C.A. Meyer. (91 n/ha)	۱۰۵-۱۱۱	۱-۴	شمال	
جنگلکاری با گونه پلت-توسکا	<i>Alnus subcordata</i> C.A.Mey. + <i>Acer insigne</i> Boiss.	۱۱۰-۱۱۶	۳-۵	شمال	
جنگلکاری با گونه درختی توسکا	<i>Alnus subcordata</i> C.A.Mey.	۹۸-۱۰۶	۲-۵	شمال	
جنگلکاری با گونه درختی پلت	<i>Acer insigne</i> Boiss	۱۰۷-۱۱۵	۱-۴	شمال	
جنگلکاری با گونه درختی سکویا	<i>Sequoia sempervirens</i> (D. Don) Endl.	۱۰۳-۱۰۹	۳-۵	شمال	
جنگل تخریب یافته	<i>Carpinus betulus</i> L. (18 n/ha) <i>Parrotia persica</i> C.A. Meyer. (10 n/ha)	۹۹-۱۰۰	۲-۵	شمال	
گراسلند	<i>Brachypodium pinnatum</i> , <i>Microstegium vimineum</i> , <i>Oplismenus undulatifolius</i> , <i>Setaria viridis</i>	۱۰۶-۱۱۳	۱-۴	شمال	

برای تعیین شاخص مربوط به کلاسه بافت خاک، مقادیر اجزای بافت خاک (شن، رس و سیلت) به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1996) محاسبه شد. با استفاده از روش اکسیداسیون تر و والکی بلاک میزان کربن خاک اندازه‌گیری شد (Nelson and Sommers, 1982). مواد آلی خاک با استفاده از فرمول (ماده آلی خاک = کربن آلی خاک × ۱/۷۲۴) برآورد شد (Ezeigbo et al., 2013). به منظور اندازه‌گیری شاخص‌های بافت خاک، با استفاده از فرمول‌های زیر نسبت شاخص رس (Clay ratio, CR)، شاخص نسبت رس اصلاح شده (Modified clay ratio, MCR) و شاخص سطح بحرانی ماده آلی خاک (Critical level of soil organic matter, CLOM) محاسبه شد.

$$\text{نسبت رس} = \frac{(\text{سیلت} + \text{شن})}{\text{رس}}$$

فرمول ۱

$$\text{نسبت رس اصلاح شده} = \frac{(\text{سیلت} + \text{شن})}{(\text{رس} + \text{ماده آلی})}$$

فرمول ۲

$$\text{ماده آلی} = \frac{\text{سطح بحرانی ماده آلی}}{(\text{سیلت} + \text{رس})}$$

شاخص حاصلخیزی بیولوژیکی (BFI) یکی از شاخص‌های مطرح برای پایش میزان حاصلخیزی خاک است. این شاخص براساس ۶ پارامتر، ماده آلی خاک (SOM)، تنفس پایه خاک (CbasR)، تنفس تجمعی خاک (CumR)، کربن زیست توده میکروبی (Cmic)، ضریب متابولیک (qCO_2) و ضریب معدنی شدن (MQ) خاک محاسبه می‌شود. از روش بطری بسته برای اندازه گیری میزان تنفس پایه خاک استفاده شد (Alef, 1995). زیتوده میکروبی کربن به روش تدخین- استخراج در محیط آزمایشگاه مورد سنجش قرار گرفت (Brookes et al., 1985). تخمین ضریب متابولیک (qCO_2) براساس تقسیم تنفس پایه بر زیتوده میکروبی کربن محاسبه شد (Anderson and Domsch, 1990). نرخ معدنی شدن کربن (Cmin) با استفاده از روش انکوباسیون آزمایشگاهی تعیین شد (Raiesi et al., 2012 a, b). ضریب معدنی شدن (MQ) از تقسیم نرخ معدنی شدن کربن بر میزان کربن آلی خاک تعیین شد. برای هر یک از پارامترها، پنج بازه مقدار تعیین شده و بر اساس شواهد حاصل از مطالعات پیشین موجود در منابع علمی، به هر بازه، نمره‌ای افزایشی از ۱ تا ۵ اختصاصی داده شد. مجموع جبری نمرات مربوط به هر پارامتر، طبقات پیشنهادی حاصلخیزی ریستی را ارائه می‌دهد که در جداول (۲ و ۳) نشان داده شده است (Vance et al., 1987; Höper and Oberholzer, 2000; Bloem et al., 2006).

جدول ۲- امتیازات فواصل مقادیر برای مشخصه‌های مختلف

مشخصه‌های خاک					امتیاز
۱	۲	۳	۴	۵	
ماده آلی خاک (درصد)	< 0.1	≥ 0.1	$> 1/5$	$>$	> 0.3
تنفس پایه (میلی گرم کربن در کیلوگرم خاک)	< 5	≥ 5	> 10	$>$	$>$
تنفس تجمعی (میلی گرم کربن در کیلوگرم خاک)	< 100	≥ 100	> 250	$>$	$>$
زیتوده میکروبی کربن (میلی گرم بر کربن)	< 100	≥ 100	> 200	$>$	> 400
ضریب متابولیک	≤ 0.4	≥ 0.4	> 0.3	$>$	> 0.1
ضریب معدنی شدن	< 1	≥ 1	> 2	$>$	> 4

جدول ۳- کلاسه‌بندی شاخص حاصلخیزی خاک

I	II	III	IV	V	
استرس	پیش از استرس (هشدار)	متوسط	خوب	زیاد	
۶	۷-۱۲	۱۳-۱۸	۱۹-۲۴	۲۵-۳۰	مجموع شاخص حاصلخیزی خاک

تحلیل آماری داده‌ها

ابتدا، نرمال بودن داده‌ها به‌وسیله آزمون کولموگروف- اسمیرنوف و همگن بودن واریانس داده‌ها با استفاده از آزمون لون مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل آماری کلیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ صورت گرفت. همچنین، ارتباط بین کاربری‌های اراضی و مشخصه‌های خاک با استفاده از ترسیم نمودارها، از طریق نرم‌افزار Excel انجام شد. برای بررسی رابطه و همبستگی بین خصوصیات مختلف، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. به‌منظور بررسی روند تغییرات متغیرهای حاصلخیزی زیستی و بافت

خاک در تیمارهای مختلف، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) با ایجاد ماتریس حاصله در برنامه ORD – PC تحت Windows مورد استفاده قرار گرفت.

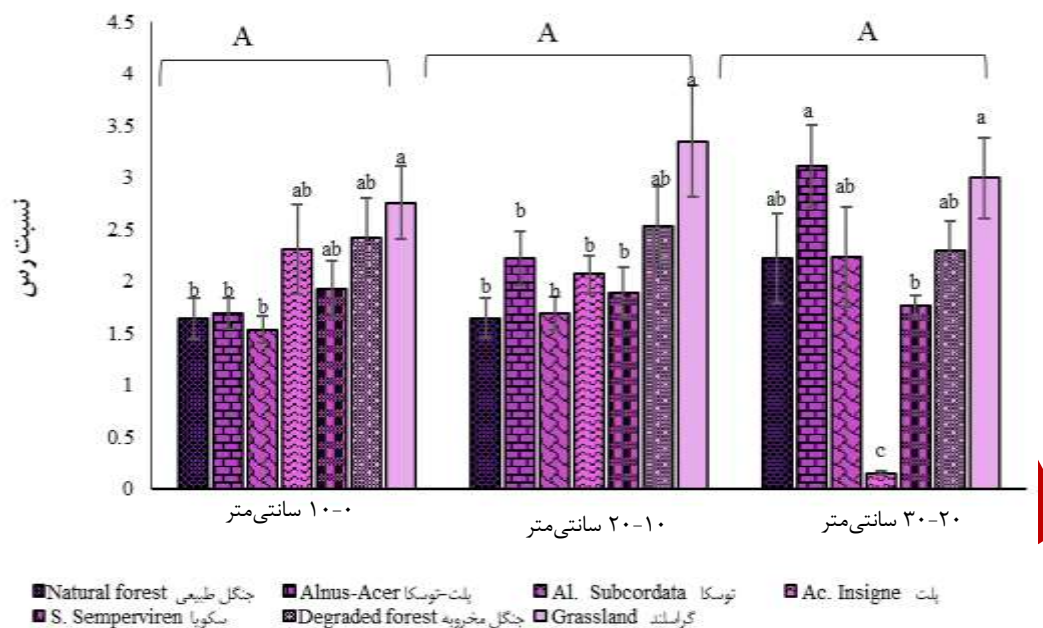
نتایج

شاخص‌های بافت خاک تحت کاربری‌های مختلف

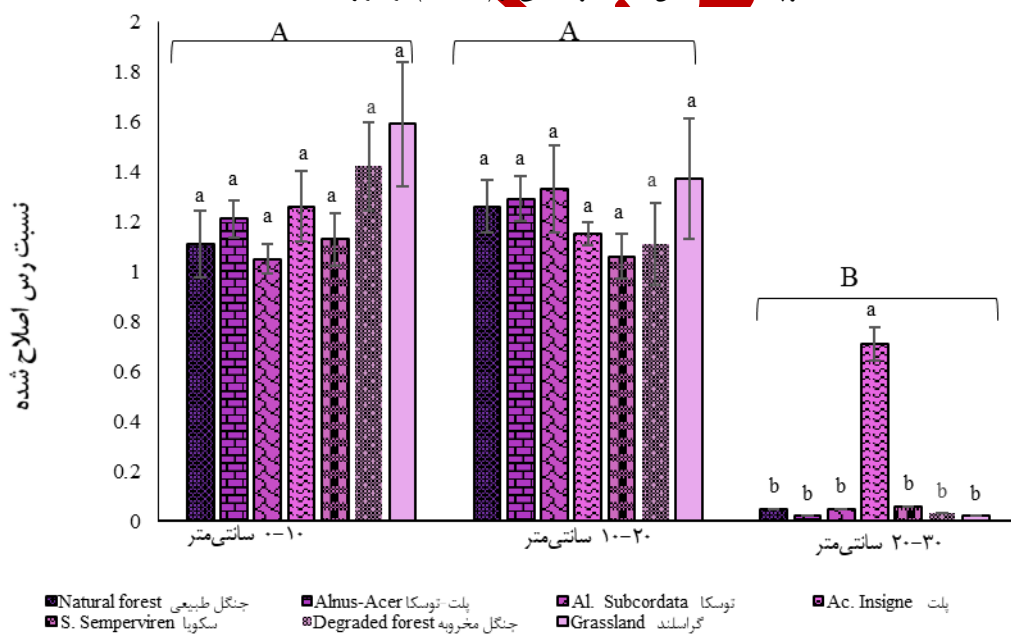
نتایج حاصل از تجزیه واریانس حاکی از آن است که شاخص نسبت رس در بین کاربری‌های مورد مطالعه تفاوت معنی‌داری را نشان می‌دهد در حالی که میزان شاخص نسبت رس در عمق‌های مختلف خاک تفاوت آماری معنی‌داری را نشان نداد. بیشترین و کمترین میزان شاخص نسبت رس در هر سه عمق مورد بررسی به ترتیب مربوط به کاربری گراسلند و جنگل کاری پلت بوده است (جدول ۴ و شکل ۲). در ارتباط با میزان تأثیر کاربری و عمق‌های مورد مطالعه بر شاخص نسبت رس اصلاح شده، بیشترین میزان این شاخص در دو عمق ۰-۱۰ و ۱۰-۲۰ سانتی‌متر مربوط به کاربری گراسلند بود، در حالی که در عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متر رویشگاه احیا شده با پلت بیشترین شاخص نسبت رس اصلاح شده را نشان داد. همچنین کمترین میزان این شاخص در عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متر مشاهده شد و این اختلاف به لحاظ آماری معنی‌دار ($P < 0.05$) بوده است (جدول ۴ و شکل ۳). نتایج به‌دست آمده از شاخص سطح بحرانی ماده آلی، اختلاف معنی‌داری را در کاربری‌های مختلف و عمق‌های مختلف خاک نشان داده است. بر این اساس بیشترین میزان شاخص سطح بحرانی ماده آلی در دو عمق ۰-۱۰ و ۱۰-۲۰ سانتی‌متری متعلق به رویشگاه احیا شده سکویا بوده است اما در عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متری بیشترین میزان این شاخص در رویشگاه پلت-توسکا مشاهده شد و در هر سه عمق مورد مطالعه کمترین میزان شاخص سطح بحرانی ماده آلی در کاربری گراسلند مشاهده شد. در ارتباط با عمق خاک، عمق خاک سطحی ۰-۱۰ سانتی‌متر بیشترین میزان شاخص سطح بحرانی ماده آلی را نشان داد (جدول ۴ و شکل ۴).

جدول ۴- تجزیه واریانس شاخص‌های بافت خاک تحت کاربری و عمق‌های مختلف

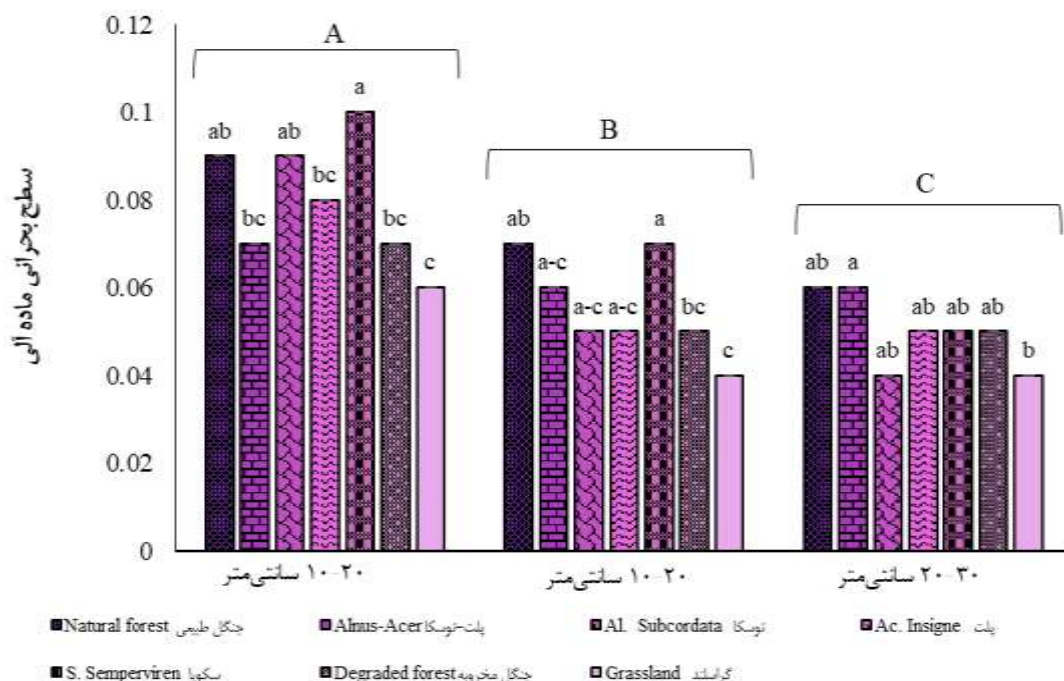
شاخص‌های بافت خاک		کاربری		عمق خاک		کاربری × عمق خاک	
	F	معنی‌داری		F	معنی‌داری	مقدار F	معنی‌داری
نسبت رس	۷/۹۹۰	۰/۰۰۰		۰/۴۶۲	۰/۶۳۱	۳/۷۶۰	۰/۰۰۰
نسبت رس اصلاح شده	۰/۵۷۱	۰/۷۵۳		۲۶/۸۵۸	۰/۰۰۰	۰/۶۸۷	۰/۷۶۳
سطح بحرانی ماده آلی	۵/۵۷۴	۰/۰۰۰		۴۰/۶۶۷	۰/۰۰۰	۰/۹۸۷	۰/۴۶۲



شکل ۲- میانگین $\pm$ (اشتباه معیار) نسبت رس در کاربری‌های مورد بررسی. حروف بزرگ مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < 0.05$) در عمق‌های مختلف؛ حروف کوچک مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < 0.05$) در کاربری‌های مختلف.



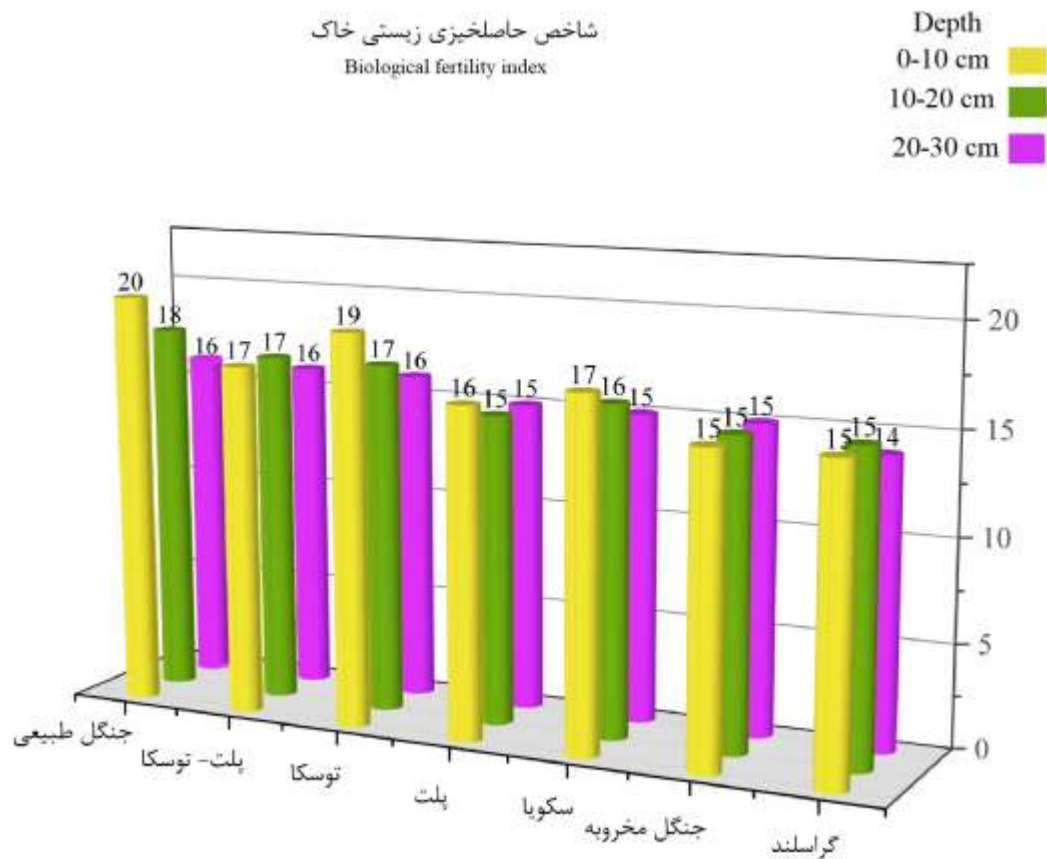
شکل ۳- میانگین $\pm$ (اشتباه معیار) نسبت رس اصلاح شده در کاربری‌های مورد بررسی. حروف بزرگ مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < 0.05$) در عمق‌های مختلف؛ حروف کوچک مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < 0.05$) در کاربری‌های مختلف.



شکل ۴- میانگین $\pm$ (اشتباه معیار) سطح بحرانی ماده آلومین در کاربری‌های مورد بررسی. حروف بزرگ مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < 0.05$) در عمق‌های مختلف؛ حروف کوچک مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < 0.05$) در کاربری‌های مختلف.

شاخص حاصلخیزی زیستی خاک تحت کاربری‌های مختلف

نتایج بررسی شاخص حاصلخیزی زیستی خاک در ۷ کاربری متمایز در عمق اول (۰-۱۰ سانتی‌متر) نشان داد که کاربری جنگل طبیعی و رویشگاه توسکا در شرایط حاصلخیزی خوبی (با مجموع امتیاز ۲۰ و ۱۹) و سایر کاربری‌ها در شرایط حاصلخیزی متوسط (مجموع امتیاز از ۱۸ تا ۱۴) قرار دارند و در دو عمق دیگر ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ سانتی‌متر نیز تمامی کاربری‌ها در شرایط حاصلخیزی متوسط قرار دارند و بیشترین مجموع امتیاز شاخص حاصلخیزی زیستی خاک متعلق به عمق سطحی (۰-۱۰ سانتی‌متر) در مقایسه با دو عمق دیگر است (شکل ۵ و جدول ۵).



شکل ۵- مجموع امتیازات شاخص حاصلخیزی زیستی خاک در کاربری‌های مختلف

ارتباط کاربری اراضی و مشخصه‌های خاک

تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) بر روی کاربری اراضی و ویژگی‌های خاک نشان داد که محورهای اول و دوم در مجموع ۳۲/۸ درصد از تغییرات واریانس کل را توجیه می‌کند (شکل ۶)، این موضوع نشان می‌دهد که کاربری اراضی و ویژگی‌های خاک، توزیع مکانی متفاوتی دارند. نتایج PCA همچنین نشان داد که بین ویژگی‌های بیولوژیکی خاک (تنفس پایه، تنفس تجمعی و زیست توده میکروبی کربن) با مقدار ماده آلی و سطح بحرانی ماده آلی خاک رابطه مثبت وجود دارد. به عبارت دیگر، افزایش این ویژگی‌ها در خاک باعث بهبود حاصلخیزی خاک می‌شود. در مقابل، نسبت رس اصلاح شده، نسبت رس با ویژگی‌های بیولوژیکی رابطه منفی داشتند که این امر منجر به کاهش حاصلخیزی خاک شده است (جدول ۶ و شکل ۶).

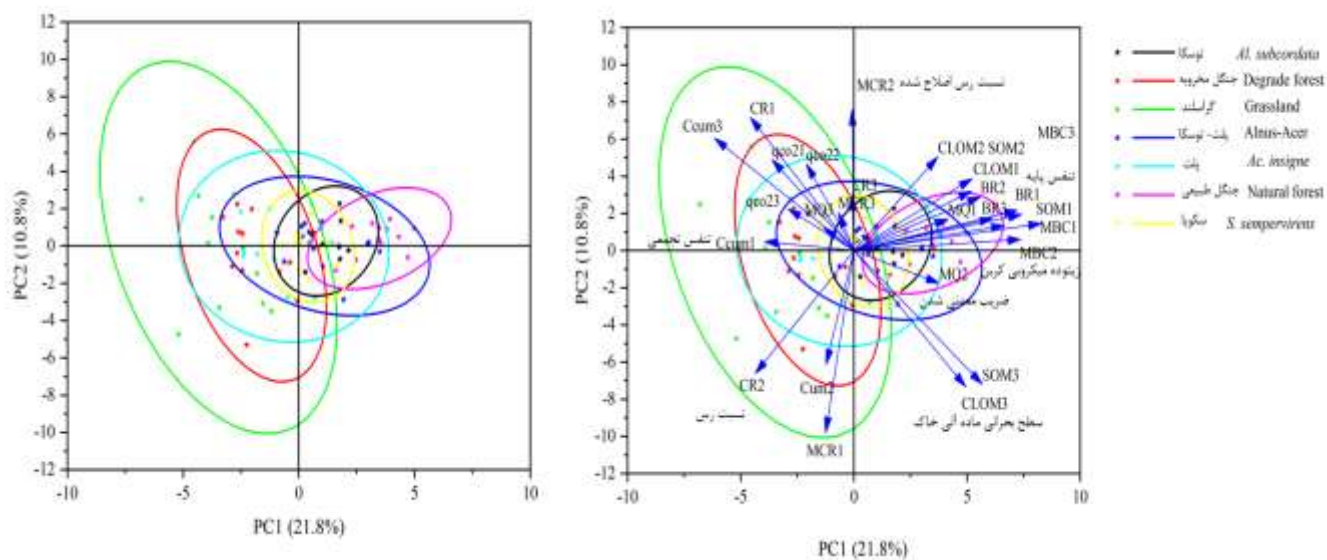
جدول ۵- شاخص حاصلخیزی زیستی خاک در کاربری‌های مورد مطالعه

عمق خاک (سانتی‌متر)							انواع کاربری	
کلاسه‌بندی شاخص حاصلخیزی زیستی خاک	۰-۱۰	خوب	متوسط	پلت - توسکا	توسکا	پهن برگ گونه	جنگل کاری با گونه سوزنی‌برگ غیربومی	جنگل مخروبه با گونه‌های ممرز و انجیلی
متوسط	III	IV	III	خوب	IV	متوسط	متوسط	متوسط
۱۰-۲۰	III	متوسط	متوسط	متوسط	III	متوسط	متوسط	متوسط
۲۰-۳۰	III	متوسط	متوسط	متوسط	III	متوسط	متوسط	متوسط

جدول ۶- همبستگی پیرسون بین خصوصیات مختلف خاک

مشخصه‌های خاک	ماده آلی خاک	تنفس پایه	تنفس تجمع	زیتوده میکروبی کربن	ضریب متابولیک	ضریب معدنی شدن	نسبت رس	نسبت رس اصلاح شده	سطح بحرانی ماده آلی
ماده آلی خاک	۱	۰/۲۸۳**	۰/۳۸۳**	۰/۳۹۳**	-۰/۱۳۷*	۰/۳۱۰**	۰/۱۲۳	۰/۰۹۵	۰/۹۳۴**
تنفس پایه	۰/۳۸۳**	۱	۰/۰۸۹	۰/۵۹۲**	۰/۱۲۵*	۰/۲۶۶**	-۰/۱۵۹*	۰/۱۳۰*	۰/۲۹۴**
تنفس تجمع	-۰/۳۸۳**	-۰/۰۸۹	۱	-۰/۰۴۷	۰/۰۰۷	۰/۲۸۴**	۰/۰۸۰	۰/۰۳۵	-۰/۳۶۳**
زیتوده میکروبی کربن	۰/۳۹۳**	۰/۵۹۲**	-۰/۰۴۷	۱	-۰/۳۲۰**	۰/۴۰۷**	-۰/۱۶۰*	۰/۰۹۰	۰/۳۳۸*
ضریب متابولیک	-۰/۱۳۷*	۰/۱۲۵*	۰/۰۰۷	-۰/۳۲۰**	۱	-۰/۱۴۷*	۰/۰۷۹	-۰/۱۲۳	-۰/۱۳۸*
ضریب معدنی شدن	۰/۳۱۰**	۰/۲۶۶**	۰/۲۸۴**	۰/۴۰۷**	۰/۱۴۷*	۱	۰/۰۵۲	۰/۱۸۴**	۰/۲۹۶**
نسبت رس	-۰/۱۲۳	-۰/۱۵۹*	۰/۰۸۰	-۰/۱۶۰*	۰/۰۷۹	-۰/۰۵۲	۱	-۰/۴۰۰**	-۰/۰۵۷
نسبت رس اصلاح شده	۰/۰۹۵	۰/۱۳۰*	۰/۰۳۵	۰/۰۹۰	-۰/۰۲۳	۰/۱۸۴**	-۰/۴۰۰**	۱	۰/۱۰۴
سطح بحرانی ماده آلی	۰/۹۳۴**	۰/۲۹۴**	-۰/۳۶۳**	۰/۳۳۸**	-۰/۱۲۰*	۰/۲۹۶**	-۰/۰۵۷	۰/۱۰۴	۱

** و * به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد. ** and *, significant at $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$.



شکل ۱- ارتباط کاربری‌های اراضی مورد بررسی و ویژگی‌های خاک در آنالیز PCA.

در دستاوردی نشده

بحث

خاک یکی از منابع طبیعی ارزشمند و تجدیدناپذیر است که فعالیت‌های انسانی، مانند تغییر کاربری زمین و جنگل‌زدایی، بر ویژگی‌های فیزیکی و زیستی آن تأثیر می‌گذارد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که تخریب پوشش گیاهی و بهره‌برداری از منابع چوبی باعث تغییر قابل توجه شاخص‌های حاصلخیزی زیستی و بافت خاک شد، به‌طوری که در رویشگاه‌های تخریب‌شده، نسبت رس و کاهش مواد آلی افزایش یافته و فعالیت میکروبی کاهش یافت. این نتایج با مطالعات قبلی مبنی بر اثر مخرب تغییرات کاربری و چرای بی‌رویه بر فرسایش و کیفیت خاک همسو است (Borrelli et al., 2020; Choudhury et al., 2021) در مقابل، احیا پوشش گیاهی از طریق جنگلکاری با گونه توسکا توانست شاخص‌های حاصلخیزی و فعالیت میکروبی را بهبود دهد، که نشان‌دهنده نقش مستقیم مدیریت و بازسازی پوشش گیاهی در بازگرداندن کارایی زیستی و تثبیت بافت خاک است (حیدری و همکاران، ۱۴۰۳) این تحلیل نشان می‌دهد که مداخلات انسان‌محور نه تنها عامل تخریب، بلکه می‌توانند عامل احیا و ارتقای کیفیت خاک نیز باشند، به شرطی که برنامه‌ریزی و گونه‌های مناسب انتخاب شوند. در این مطالعه، نسبت رس بالا و مقادیر نسبت رس اصلاح شده گزارش شده برای رویشگاه گراسلند می‌تواند نشان‌دهنده افزایش فرسایش‌پذیری خاک در مقایسه با رویشگاه جنگلی باشد، بنابراین، مقادیر بالاتر CR در رویشگاه گراسلند خواهد روشنی را ارائه می‌دهد که خاک‌های زیر این کاربری‌ها بیشتر مستعد فرسایش هستند، همانطور که Olaniya al. (2020) اشاره کردند. در مقایسه با پوشش‌های دیگر، خاک‌های رویشگاه جنگل طبیعی دارای غلظت رس بیشتر و محتوای شن کمتری بود که منجر به کاهش مقدار CR شد. در پژوهشی، Bouyoucos (1935) نشان دادند که مقدار رس تعیین می‌کند که ذرات خاک به خوبی به هم متصل شوند و به آسانی هم توسط فشارهای خارجی جدا می‌شوند. در رویشگاه تخریب شده و گراسلند روند نسبت رس اصلاح شده MCR مشابه روند CR بود و می‌توان آن را به محتوای شن و سیلت بالاتر (که ذرات بسیار فرسایش‌پذیر در مقایسه با خاک رس هستند) در رویشگاه‌های ایش رها شده نسبت داد (Mishra et al., 2017; Kooch et al., 2024a). بالا بودن مقدار سطح بحرانی ماده آلی در رویشگاه‌های طبیعی و احیا شده در مقایسه با رویشگاه‌های تخریب و گراسلند را می‌توان به بالا بودن میزان مواد آلی در این رویشگاه‌ها نسبت داد همانطور که Kooch et al. (2024) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. با توجه به نتایج به دست آمده از سطح بحرانی ماده آلی خاک و قرارگیری این شاخص در بازه عددی ۵۰-۱۰۰ رویشگاه‌های مورد مطالعه در معرض فرسایش هستند، در مقابل، مقادیر بالاتر از ۹ درصد نشان‌دهنده ساختاری پایدار و مقاوم‌تر در برابر فرسایش است (Mishra et al., 2024). که کاهش پوشش گیاهی و تغییر کاربری اراضی و شدت رویدادهای بارندگی بخصوص در فصل پاییز سبب مهیا شدن شرایط برای فرسایش خاک و کاهش سطح بحرانی ماده آلی خاک شده است که با مطالعات Kooch et al. (2025) همراستا می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی شاخص حاصلخیزی زیستی خاک در کاربری‌های مختلف در عمق اول (۰-۱۰ سانتی‌متری) نشان داد که اکوسیستم جنگل طبیعی و جنگل کاری با گونه پهن‌برگ توسکا در شرایط حاصلخیزی خوب و سایر اکوسیستم‌ها در شرایط متوسط قرار دارند. در عمق‌های دوم و سوم، شاخص حاصلخیزی خاک برای تمام رویشگاه‌ها در سطح متوسط قرار دارد که این وضعیت به تغییر کاربری، کاهش پوشش گیاهی و افت ورودی مواد آلی نسبت داده می‌شود. کاهش ماده آلی با افزایش عمق و تضعیف فعالیت‌های میکروبی، روند کاهشی شاخص حاصلخیزی را به دنبال دارد؛ نتیجه‌ای که با یافته‌های Willy et al. (2019) همخوان است. همچنین کاهش شاخص حاصلخیزی خاک در رویشگاه گراسلند در مقایسه با رویشگاه‌های احیا شده را می‌توان به کاهش میزان مواد آلی ورودی و کاهش کمیت و کیفیت لاشبرگ عنوان کرد که سبب کاهش فعالیت‌های موجودات زنده و در نتیجه کاهش حاصلخیزی زیستی خاک همانطور که Liu et al. (2018) و Kooch et al. (2024) نیز به این نتایج دست یافتند. در مطالعه حاضر نمرات شاخص کیفیت خاک و کلاس حاصلخیزی زیستی خاک با تغییر کاربری اراضی تغییر کرد و بالاترین و کمترین نمرات این شاخص به ترتیب مربوط به رویشگاه جنگل طبیعی و گراسلند بود که پوشش گیاهی در رویشگاه جنگل در بهبود چرخه کربن خاک نقش مهمی را ایفا میکند و در نهایت به ارتقای حاصلخیزی زستی خاک منجر می‌شود که علت این تغییرات را می‌توان به تحت تأثیر قرار گرفتن شاخص حاصلخیزی خاک توسط پوشش گیاهی روزمینی و میزان ماده آلی و فعالیت‌های میکروبی

عنوان کرد، همانطور که Kooch et al. (2024) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. این امر بر اهمیت مدیریت پایدار اراضی برای جلوگیری از زوال خاک تاکید دارد (Papini et al., 2011). علاوه بر این، یافته‌های این مطالعه با نتایج به دست آمده از مطالعات یافته‌های این مطالعه با نتایج به دست آمده از مطالعات Bakhshandeh et al. (2019) و Yaghoubi Khanghahi et al. (2019) همسو هستند که دریافتند که شاخص حاصلخیزی زیستی خاک ارتباط معنی‌داری با MBC, CSR, SOM و BR دارد. همسو هستند که دریافتند که شاخص حاصلخیزی زیستی خاک ارتباط معنی‌داری با MBC, CSR, SOM و BR دارد. براساس گزارش‌های قبلی (Willy et al., 2019)، تغییر کاربری اراضی و شرایط محیطی، همراه با ماده آلی خاک و فعالیت میکروبی، از عوامل اصلی تعیین‌کننده حاصلخیزی زیستی خاک به‌شمار می‌روند. افزایش معدنی شدن کربن در اکوسیستم‌های طبیعی و احیاشده، ناشی از محتوای بالاتر کربن آلی و فراهمی بیشتر سوستر برای میکروارگانیسم‌ها است (Anderson et al., 1989) که در نهایت به افزایش ذخیره کربن آلی خاک در بلندمدت منجر می‌شود.

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) وجود همبستگی مثبت میان شاخص‌های زیستی خاک شامل تنفس پایه، تنفس تجمعی و کربن زی‌توده میکروبی با مقدار ماده آلی خاک را نشان داد و تمایز روشنی میان رویشگاه‌های دارای پوشش گیاهی متفاوت ایجاد کرد. یافته‌ها بیانگر آن است که تغییر در ترکیب پوشش گیاهی اثر قابل توجهی بر ویژگی‌های زیستی و شیمیایی خاک دارد، به‌طوری که شاخص‌های حاصلخیزی زیستی با نوع پوشش گیاهی و بافت خاک ارتباط معنی‌داری نشان می‌دهند. به‌طور کلی، PCA توانست الگوی واگرایی مشخصی از خصوصیات انتخاب‌شده خاک را در بین انواع مختلف پوشش گیاهی آشکار سازد. این نتایج با مطالعات پیشین که نقش تعیین‌کننده پوشش گیاهی در تنظیم فرآیندهای زیستی خاک را گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد (He et al., 2022). تغییرات کاربری اراضی، به‌ویژه تبدیل جنگل به مزرعه، تأثیر قابل توجهی بر ترکیب و کیفیت خاک دارد (Kooch et al., 2022). میزان ماده آلی خاک در کاربری‌های مختلف عمدتاً تابع نوع پوشش گیاهی و کمیت و کیفیت لاشبرگ ورودی است و این اثر در لایه‌های مختلف خاک به‌طور مشهود دیده می‌شود (Mao et al., 2010). در رویشگاه‌های تخریب‌شده و گراسلند، مقدار ماده آلی کاهش یافته و به تبع آن فعالیت‌های میکروبی و شاخص‌های زیستی خاک کاهش می‌یابد که منجر به افت حاصلخیزی زیستی می‌شود (Yuan et al., 2018; Willy et al., 2019). بیشترین میزان شاخص حاصلخیزی زیستی و ذخیره ماده آلی در رویشگاه‌های احیاشده و طبیعی مشاهده شد، در حالی که کمترین مقادیر مربوط به رویشگاه‌های تخریب‌شده و گراسلند بود. تراکم پوشش گیاهی و تجزیه آهسته بقایای گیاهی در رویشگاه‌های طبیعی به افزایش ماده آلی و بهبود ویژگی‌های میکروبی و زیستی خاک کمک می‌کند و در نهایت موجب ارتقای حاصلخیزی زیستی می‌شود. بر این اساس، حفظ و مدیریت پایدار جنگل‌ها و احیای اکوسیستم‌های تخریب‌شده برای ارتقای کیفیت خاک و پایداری حاصلخیزی زیستی ضروری است.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که اثرات تخریب و احیا پوشش گیاهی باعث ایجاد تغییرات معنی‌داری در مشخصه‌های حاصلخیزی زیستی و بافت خاک در رویشگاه‌های مورد مطالعه در حوزه کلاراباد، استان مازندران شد. مطابق با یافته‌های پژوهش حاضر، رویشگاه جنگل طبیعی و رویشگاه احیا شده با گونه توسکا در عمق ۰-۱۰ سانتی‌متری به دلیل دارا بودن شرایط مناسب دارای شاخص حاصلخیزی زیستی خوب بوده و در دیگر کاربری‌ها و عمق‌ها به دلیل کاهش مواد آلی و کاهش فعالیت‌های میکروبی این شاخص در شرایط متوسط قرار دارد. همچنین در رویشگاه گراسلند شاخص حاصلخیزی زیستی خاک نزدیک به شرایط پیش از استرس قرار دارد. در رویشگاه جنگل طبیعی و احیا شده توسط گونه‌های درختی به دلیل وجود مواد آلی بیشتر، بالاترین میزان سطح بحرانی مواد آلی مشاهده شد در حالیکه بیشترین میزان نسبت رس و نسبت رس اصلاح شده در رویشگاه‌های تخریب شده و گراسلند مشاهده شد برای بازگرداندن کیفیت خاک و افزایش شاخص حاصلخیزی زیستی در مناطق تخریب‌شده، توصیه می‌شود برنامه‌های احیا با استفاده از گونه‌های بومی درختی مانند توسکا اجرا شود. همچنین مدیریت ویژه

رویشگاه‌های تخریب‌یافته، گراسلند و مناطق با نسبت رس بالا باید در دستور کار قرار گیرد تا از افزایش فرسایش و کاهش فعالیت میکروبی جلوگیری شود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که شاخص‌های بررسی‌شده بافت و حاصلخیزی خاک می‌توانند به عنوان ابزارهای مناسب برای ارزیابی تغییرات کیفیت خاک در اثر تخریب و احیای پوشش گیاهی مورد استفاده قرار گیرند و اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت پایدار اکوسیستم‌های جنگلی فراهم کنند.

منابع

- اسدیان، مریم؛ حجتی، سیدمحمد؛ پورمجیدیان، محمدرضا؛ فلاح، اصغر. (۱۳۹۱). بررسی تنوع زیستی گیاهی و خصوصیات خاک در جنگل کاری‌های کاج سیاه و زبان گنجشک در منطقه الندان - ساری. *تحقیقات جنگل و صنوبر ایران*، ۲۰(۲): ۳۱۲-۲۹۹.
- اعظمی، فاطمه؛ حیدری، مهدی؛ فرامرزی، مرزبان؛ نادری، مصطفی. (۱۳۹۷). واکنش ترکیب و تنوع پوشش گیاهی در رابطه با خصوصیات فیزیکی - شیمیایی و بیولوژیک خاک به تخریب، اکوسیستم جنگلی زاگرس. *مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست شناسی ایران)*، ۳۱(۲): ۲۲۱-۲۳۴.
- امانی، معصومه؛ کوچ، یحیی؛ عابدی، مهدی. (۱۴۰۱). اثر شدت تخریب مراتع مشجر بر شاخص‌های سلامت خاک منطقه کجور نوشهر، پایان نامه کارشناسی ارشد مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس، ۱۸۱ صفحه.
- بهشتی آل آقا، علی؛ رئیس، فایز؛ گلچین، احمد. (۱۳۹۰). تأثیر تغییر کاربری اراضی از مرتع به زمین زراعی بر شاخص‌های میکروبیولوژیکی و بیوشیمیایی خاک در سه منطقه کنگاور، دهنو و سلطانیه. *نشریه آب و خاک*، ۲۵: ۵۴۸-۵۶۲.
- حاجی میرزا اقای، سمانه؛ جلیوند، حمید؛ حجتی، سید محمد؛ کوچ، یحیی. (۱۳۹۸). تنوع پوشش گیاهی زیر آشکوب و پویایی نیتروژن در توده‌های دست کاشت و طبیعی جنگل سردآبرود، استان مازندران. *رساله دکتری علوم جنگل. جنگل شناسی و اکولوژی جنگل*، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ساری، ۱۶۸ صفحه.
- حیدری، مازیار؛ متینی زاده، محمد؛ پوره‌اشمی، مهدی؛ نوری، الهام؛ باقری دلجانی، نسیم. (۱۴۰۳). بررسی تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک توده‌های شاهد و متاثر از زوال در شهرستان مریوان، استان کردستان. *نشریه پژوهش و توسعه جنگل*، ۱۰(۱): ۹۵-۱۱۱.
- غیبی، فاطمه؛ اکبری نیا، مسلم. (۱۳۹۳). اثر توده‌های جنگل کاری خالص و آمیخته سکویا-پلت و توسکای بیلاقی بر شاخص‌های تنوع زیستی گیاهی و حاصلخیزی خاک. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی منابع طبیعی - جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس، ۹۶ صفحه.
- کیاپاشا، خدیجه؛ درویش صفت، علی اصغر؛ ضرغام، نصرت اله؛ عطارد، پدارام؛ نادری، مهدی؛ شهن، مایکل. (۱۳۹۶). روند تغییرات سبزشدگی در جنگل‌های هیرکانی با استفاده از سری زمانی NOAA-NDVI در دوره ۲۰۱۲-۱۹۸۱. *نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب*، ۷۰(۳): ۴۰۹-۴۲۰.
- مقیمیان، نگار؛ حسینی، سید محسن؛ کوچ، یحیی؛ زارعی دارکی، بهروز. (۱۳۹۷). ارزیابی توان اکولوژیک کاربری‌های جنگلی و غیرجنگلی با بکارگیری شاخص‌های اکوشیمی و تنوع سیانوباکترهای خاک. *رساله دکتری مهندسی منابع طبیعی - جنگلداری*، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸ صفحه.
- مهدی کرتلائی، زهرا؛ کوچ، یحیی؛ دیانتی تیلکی، قاسمعلی. (۱۴۰۳). چرخه بیوژئوشیمیایی کربن و نیتروژن در اراضی مشجر و غیرمشجر منطقه کجور نوشهر. *رساله دکتری علوم و مهندسی مرتع*، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۵۲ صفحه.

۱۱. وطنی، لیلا؛ حسینی، سید محسن؛ علوی، سید جلیل؛ رایینی سرجاز، محمود؛ شمسی، سید سعید. (۱۴۰۰). ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک ۲۰ سال پس از جنگلکاری در جنگل‌های شمال ایران (با تأکید بر ذخایر کربن و نیتروژن در جنگل‌های دست‌کاشت با گونه‌های سوزنی‌برگ و پهن‌برگ). فصلنامه علمی پژوهش و توسعه جنگل، ۷(۱): ۹۳-۱۰۵.

References

- Aazami, F., Heydari, M., Faramarzi, M., & Naderi, M. (2018). Response of vegetation composition and diversity to degradation to soil physical, chemical and biological properties, Zagros forest ecosystems. *Journal of Plant Research*. 31: 479-489. (In Persian).
- Adugna, A. & Abegaz, A., (2016). Effects of land use changes on the dynamics of selected soil properties in northeast Wellega, *Ethiopia. Soil*, 2: 63-70.84989.
- Alef, K., 1995. Estimating of soil respiration. In: Alef, K., Nannipieri, P. (Eds.), *Methods in Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, New York, pp. 464-470.
- Allegrini, M., Gomez, E. D. V., & Zabaloy, M. C. (2017). Repeated glyphosate exposure induces shifts in nitrifying communities and metabolism of phenylpropanoids. *Soil Biology and Biochemistry*, 105, 206-215.
- Allek, A., Viany Prieto, P., Korys, K. A., Rodrigues, A. F., Latawiec, A. E., & Crouzeilles, R. (2023). How does forest restoration affect the recovery of soil quality? A global meta-analysis for tropical and temperate regions. *Restoration Ecology*, 31, e13747.
- Amani, M., Kooch, Y., & Abedi, M. (2022). Effect of degradation intensity of wooded rangelands on soil health indicators of Kojur region, Nowshahr. (master's thesis). Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, 181 pages (In Persian).
- Anderson, T. H., & Domsch, K. H. (1990). Application of eco-physiological quotients (qCO₂ and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biology and Biochemistry*, 22, 251-255.
- Asadiyan, M., Hojjati, M., Pormajidian, M. R. & Fallah, A. (2012). Biodiversity and soil properties in Pine (*Pinus nigra* Arnold.) and Ash (*Fraxinus excelsior* L.) plantations (Case study: Alandan Forest, Sari). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 20, 312-299. (In Persian).
- Bakhshandeh, E., Hossieni, M., Zeraatpisheh, M., & Francaviglia, R., (2019). Land use change effects on soil quality and biological fertility: a case study in northern Iran. *European Journal of Soil Biology*. 95, 103119
- Beheshti Ale Agha, A., Raiesi, F. & Golchin, A. (2011). The Effects of Land Use Conversion from Pasturelands to Croplands on Soil Microbiological and Biochemical Indicators. *Water and Soil*, 25:548-562. (In Persian).
- Bloem, J., Hopkins, D. W., & Benedetti, A. (Eds.). (2006). *Microbiological methods for assessing soil quality*. Cabi Publishing.
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J. E., Alewell, C., ... & Ballabio, C. (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117, 21994-22001.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal*, 54, 464-465.
- Brookes, P. C., Landman, A., Pruden, G., & Jenkinson, D. S. (1985). Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil biology and biochemistry*, 17, 837-842.
- Chodak, M., & Niklińska, M. (2010). The effect of different tree species on the chemical and microbial properties of reclaimed mine soils. *Biology and fertility of soils*, 46, 555-566.
- Choudhury, B. U., Ansari, M. A., Chakraborty, M., & Meetei, T. T. (2021). Effect of land-use change along altitudinal gradients on soil micronutrients in the mountain ecosystem of Indian (Eastern) Himalaya. *Scientific Reports*, 11, 14279.
- Ezeigbo, O. R., Ukpabi, C. F., Abel-Anyebe, O., Okike-Osisiogu, F. U., Ike-Amadi, C. A., & Agomoh, N. G. (2013). Physico-chemical properties of soil contaminated with refined petroleum oil in Eluama Community, Abia State, Nigeria. *International Journal of Scientific Research and Management*, 1, 405-413.
- Francaviglia, R., Renzi, G., Ledda, L., & Benedetti, A. (2017). Organic carbon pools and soil biological fertility are affected by land use intensity in Mediterranean ecosystems of Sardinia, Italy. *Science of the Total Environment*, 599, 789-796.

- Gao, M., Hu, W., Li, M., Wang, S., & Chu, L. (2025). Network analysis was effective in establishing the soil quality index and differentiated among changes in land-use type. *Soil and Tillage Research*, 246, 106352.
- Ghibie, F., Akbarinia, M., (2014). Effect of Pure and Mixed Reforested Stands of Redwood-Maple and Alder on Plant Biodiversity and Soil Fertility Indices. (M.Sc. thesis), Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, 96 pages. (In Persian)
- Haidari, M., Matiniazadeh, M., Pourhashemi, M., Nouri, E., & Bagheri Delijani, N. (2024). Investigating changes in the physical and chemical characteristics of soil in control and dieback stands in Marivan county, Kurdistan province in Iran. *Forest Research and Development*, 10, 95-111. (In Persian)
- Hajimirzaaghaee, M., Jalilvand, H., Hojati, S. M., Kooch, Y., (2020). The Plant Diversity Cover Understory and Nitrogen Dynamic in Reforestation and Natural Stands of Sardabrood Forest - Mazandaran Province. (doctoral dissertation). Faculty of Natural Resources, Sari University, 168 pages. (In Persian)
- He, Y., Hong, M., Xu, X., Liang, Z., Jiang, N., Tu, N., & Wu, Z. (2022). Nitrogen deposition changes the keystone taxa of soil microorganisms and indirectly affects plant aboveground biomass in desert steppe regions.
- Hoogmoed, M., Cunningham, S. C., Baker, P. J., Beringer, J., & Cavagnaro, T. R. (2014). Is there more soil carbon under nitrogen-fixing trees than under non-nitrogen-fixing trees in mixed-species restoration plantings?. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 188, 80-84.
- Kiapasha, K., Darvishsefat, A. A., Zargham, N., Attarod, P., Nadi, M., & Schaepman, M. (2017). Greening trend in the Hyrcanian forests using NOAA NADVI time series during 1981-2012. *Journal of Forest and Wood Products*, 70, 409-420. (In Persian)
- Kooch, Y., & Noghre, N. (2020). Nutrient cycling and soil-related processes under different land covers of semi-arid rangeland ecosystems in northern Iran. *Catena*, 193, 104621.
- Kooch, Y., Ghorbanzadeh, N., Kuzyakov, Y., Praeg, N., & Ghaderi, E. (2022). Investigation of the effects of the conversion of forests and rangeland to cropland on fertility and soil functions in mountainous semi-arid landscape. *Catena*, 210, 105951.
- Kooch, Y., Heidari, F., Gómez-Brandón, M., & Meurer, K. H. (2024a). Restoration of soil multifunctional indicators requires more than thirty years in degraded shrubland of a semi-arid mountainous ecosystem. *Journal of Environmental Management*, 371, 123140.
- Kooch, Y., Heidari, F., Haghverdi, K., Gómez-Brandón, M., & Kartalaei, Z. M. (2024b). The type of land cover and management affect differently soil functional indicators in a semi-arid ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 202, 105553.
- Košanin, O., Govedar, Z., Ljubičić, J., & Nešić, M. (2023). The importance of forests in the environment. n: Ilić P, Govedar Z, Pržulj N (eds) Environment. Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska, Banja Luka, Monograph LV:579–621.
- Kooch, Y., Mohammadi Kartalaei, Z., Amiri, M., Zarafshar, M., Shabani, S., & Mohammady, M. (2025). The effects of forest degradation on soil texture, sediment, and biological fertility indicators in semi-arid mountain ecosystems. *Forest Research and Development*, 11(1), 87-108. doi: 10.30466/jfrd.2024.55525.1736
- Li, Y., Awada, T., Zhou, X., Shang, W., Chen, Y., Zuo, X., ... & Feng, J. (2012). Mongolian pine plantations enhance soil physico-chemical properties and carbon and nitrogen capacities in semi-arid degraded sandy land in China. *Applied Soil Ecology*, 56, 1-9.
- Liu, D., Huang, Y., Sun, H., Bhopale, P. & Chen, Z. (2018). Soil physicochemical and microbial characteristics of contrasting land-use types along soil depth gradients. *Catena*, 162, 345-353.
- Mao, R., Zeng, D. H., Yan, A. G., Yang, D., Li, L. J., Liu, Y. X. (2010). Soil microbiological and chemical effects of a nitrogen-fixing shrub in poplar plantations in semi-arid region of Northeast China. *European Journal of Soil Biology*, 46, 325-329.
- Mishra, G., Jangir, A., & Dash, B. (2024). Soil organic carbon stock and erodibility indices under different land uses of Nagaland, India. *Current Science (00113891)*, 126,1166-1172.
- Moges, A., Dagnachew, M. & Yimer, F., (2013). Land use effects on soil quality indicators: a case study of Abo-Wonsho Southern Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*, Article ID 7

- Moghimian, N., Hosseini, S. M., Kooch, Y., Zarei Darki, B. (2018). Ecological Potential Assessment of Forest and non-Forest Land Using Soil Ecochemical Indices and Cyanobacter Diversity. (doctoral dissertation). Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, 138 pages. (In Persian)
- Mohmedi Kartalaei, Z., Kooch, Y., & Dianati Tilaki, Q. (2024). Biogeochemical cycling of carbon and nitrogen in wooded and non-wooded lands of Kojur region, Nowshahr. (doctoral dissertation). Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, 152 pages. (In Persian)
- Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.). *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 539-579.
- Oberholzer, H. R., & Hoper, H. (2000). Reference systems for the microbiological evaluation of soils. *VDLUFA SCHRIFTENREIHE*, 55, 19-34.
- Olaniya, M., Bora, P. K., Das, S., & Chanu, P. H., (2020). Soil erodibility indices under different land uses in Ri-Bhoi district of Meghalaya (India). *Scientific reports*, 10, 14986.
- Oruk, E.O., Eric, N.J. & Ogogo, A.U. (2012). Influence of soil textural properties and land use cover type on soil erosion of a characteristic ultisols in Betem, Cross River State, Nigeria. *Journal of Sustainable Development*, 5(7), 104.
- Papini, R., Valboa, G., Favilli, F., & Abate, G., 2011. Influence of land use on organic carbon pool and chemical properties of Vertic Cambisols in central and southern Italy *Agriculture Ecosystem Environment* 140, 68–79.
- Raiesi, F. (2012 a). Land abandonment effect on N mineralization and microbial biomass N in a semi-arid calcareous soil from Iran. *Journal of Arid Environments*, 76, 80-87.
- Raiesi, F. (2012b). Soil properties and C dynamics in abandoned and cultivated farmlands in a semi-arid ecosystem. *Plant and Soil*, 351, 161–175.
- Renzi, G., Canfora, L., Salvati, L. & Benedetti, A. (2017). Validation of the soil Biological Fertility Index (BFI) using a multidimensional statistical approach: A country-scale exercise. *Catena*, 149, 294-299.
- Rolando, J. L., Dubeux Jr, J. C., Ramirez, D. A., Ruiz-Moreno, M., Turin, C., Mares, V., ... & Quiroz, R. (2018). Land Use Effects on Soil Fertility and Nutrient Cycling in the Peruvian High-Andean Puna Grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 82, 463-474.
- Sloan, S. & Sayer, J.A., (2015). Forest Resources Assessment of 2015 shows positive global trends but forest loss and degradation persist in poor tropical countries. *Forest Ecology and Management*, 352, 134-145.
- Sugihara, S., Funakawa, S., Kilasara, M. and Kosaki, T. (2010). Effect of land management and soil texture on seasonal variations in soil microbial biomass in dry tropical agroecosystems in Tanzania. *Applied Soil Ecology*, 44, 80-88.
- Vance, E. D., Brookes, P. C., & Jenkinson, D. S. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil biology and Biochemistry*, 19, 703-707.
- Vatani, L., Hosseini, S. M., Alavi, S. J., Raeini Sarjaz, M., & Shamsi, S. S. (2021). Soil physico-chemical properties 20 years after plantation in the Iranian northern forests (Emphasizing on carbon and nitrogen stocks in plantation with broadleaved and coniferous species). *Forest Research and Development*, 7: 93-105. (In Persian).
- Vinhal-Freitas, I. C., Ferreira, A. S., Corrêa, G. F. & Wendling, B. (2013). Land use impact on microbial and biochemical indicators in agroecosystems of the Brazilian Cerrado. *Vadose Zone Journal*, 12, 1-8.
- Willy, D.K., Muyanga, M., Mbuvi, J. & Jayne, T. (2019). The effect of land use change on soil fertility parameters in densely populated areas of Kenya. *Geoderma*, 343, 254-262.
- Yaghoubi Khanghahi, M., Murgese, P., Strafella, S., & Crecchio, C., (2019). Soil biological fertility and bacterial community response to land use intensity: a case study in the Mediterranean Area. *Diversity* 11, 211.
- Yin, C., Zhao, W., & Pereira, P. (2025). Ecosystem restoration along the “pattern-process-service-sustainability” path for achieving land degradation neutrality. *Landscape and Urban Planning*, 253, 105227.
- Yuan, Y., Zhao, Z., Li, X., Wang, Y., Bai, Z. (2018). Characteristics of labile organic carbon fractions in reclaimed mine soils: evidence from three reclaimed forests in the Pingshuo opencast coal mine, China. *Science of The. Total Environmental*, 613, 1196-1206.

The effect of vegetation cover degradation and restoration on biological fertility indices and soil texture in temperate ecosystems of the Caspian region

Abstract

Degradation and restoration of vegetation cover strongly influence soil properties and ecological processes in temperate ecosystems. In northern Iran, intensive forest exploitation has altered vegetation structure and soil quality, highlighting the importance of monitoring soil biological indicators together with physical properties such as texture. Although many studies have focused on soil physical and chemical characteristics, biological fertility indices remain relatively understudied. This study examined the effects of vegetation degradation and restoration on soil biological fertility and texture across seven land-use types in the Hyrcanian region: natural forest, degraded forest, *Alnus subcordata* plantation, *Acer insigne* plantation, mixed *Alnus*–*Acer* plantation, *Sequoia sempervirens* plantation, and grassland. During summer 2025, 36 soil samples were collected from three depths (0–10, 10–20, and 20–30 cm) and analyzed using analysis of variance and Duncan's test. Results showed that grassland had the highest clay ratio indices, while *Acer insigne* had the lowest. *Sequoia* and mixed *Alnus*–*Acer* stands exhibited the highest critical organic matter, whereas grassland showed the lowest values at all depths. Soil biological fertility at 0–10 cm was classified as good in natural forest and *Alnus subcordata* plantations, while all other land uses displayed moderate fertility. Principal component analysis revealed positive relationships among basal respiration, cumulative respiration, microbial biomass carbon, and soil organic matter. Overall, vegetation type significantly affected soil biological quality. These results emphasize including soil biological fertility indices in restoration assessments and identify *Alnus subcordata* as an effective option for improving soil biological conditions in similar temperate regions.

Keywords: Temperate climate, afforestation, biological soil fertility, soil depth.