Urmia University

Forest Research and Development

Vol. 11, Issue 1, 2025, 87-108

Research Paper

The effects of forest degradation on soil texture, sediment, and biological fertility indicators in semi-arid mountain ecosystems

Yahya Kooch[*,1], Zahra Mohmedi Kartalaei[2], Mojtaba Amiri[3], Mehrdad Zarafshar[4], Saeid Shabani[5] and Majid Mohammady[6]

1,*- (Corresponding author) Faculty of Natural Resources & Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, I. R. Iran. (yahya.kooch@modares.ac.ir)
2- Faculty of Natural Resources & Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, I. R. Iran. (z.mohmedi@modares.ac.ir)
3- Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources, Semnan University, Semnan, I. R. Iran. (mojtabaamiri@semnan.ac.ir)
4- Faculty of Technology, Department of Forestry and Wood Technology, Linnaeus University, 351 95 Växjö, Sweden. (mehrdad.zarafshar@lnu.se)
5- Research Assistant, Research Department of Natural Resources, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, I. R. Iran. (s.shabani@areeo.ac.ir)
6- Associate Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, Semnan University, Semnan, I. R. Iran. (majid.mohammady@semnan.ac.ir)

Received: 03 July 2024 Accepted: 10 November 2024

Extended Abstract

Background and Objective: Forests provide a wide range of ecosystem services, but the expansion of human populations has led to the degradation and conversion of these ecosystems. Land cover change alters the physical, chemical, and biological properties of soil. Soil texture is a key factor in assessing soil fragility and susceptibility to erosion, and indicators such as the Clay Ratio (CR), Modified Clay Ratio (MCR), and Critical Level of Soil Organic Matter (CLOM) can offer valuable insights into soil erodibility. Land-use changes and vegetation loss reduce soil fertility and disrupt biogeochemical cycles. Therefore, comprehensive monitoring of biological indicators is essential for accurately assessing soil fertility. This study aimed to examine the effects of forest degradation on soil texture, sediment yield, and biological fertility across three land uses—forest, forest–rangeland ecotone, and rangeland—under semi-arid mountainous conditions.

Material and Methods: The study was conducted in the summer pastures of Mikhsaaz village, Kojur District, Nowshahr County, Mazandaran Province, northern Iran. During the summer of 2023 (1402 in the Persian calendar), a total of 20 soil samples were collected from each land-use type at two depths (0–15 cm and 15–30 cm). Soil texture indicators, including CR, MCR, and CLOM, were analyzed. Soil sediment yield was also measured across the three land uses. Soil fertility was assessed using the Biological Fertility Index (BFI), a widely recognized global indicator. To evaluate trends in soil fertility and related variables across the different treatments, Principal Component Analysis (PCA) was performed using PC-ORD software under Windows.

Results: The analysis of soil texture indicators across the different land uses (forest, ecotone, and rangeland) revealed that the highest and lowest CR and MCR values at both soil depths were found in rangeland and forest areas, respectively, with statistically significant differences ($P < 0.05$). CLOM was highest in forest soils at both depths. Additionally, the greatest amount of soil sediment

was recorded in the rangeland (3.85 g/m²), while the lowest was observed in the forest (1.35 g/m²). The BFI results indicated that the forest ecosystem maintained a moderate fertility level (total score of 14), while the ecotone and rangeland (with scores of 12 and 11, respectively) were in warning or pre-stress conditions. Furthermore, at the deeper soil layer, all three land uses in the semi-arid mountainous ecosystem were in pre-stress or warning conditions. PCA results showed that among the biological properties of soil, basal respiration, cumulative respiration, and microbial biomass carbon were positively correlated with both organic matter content and CLOM.

Conclusion: This study demonstrated that deforestation and land-use change, by altering soil texture and increasing sediment yield, contribute to a decline in biological soil fertility. Except for the upper layer of soil in the forest land use, all other land uses and depths were classified as being in warning or pre-stress conditions regarding fertility. These findings highlight the urgent need for management interventions to conserve and restore ecosystems, particularly in semi-arid mountainous regions. Given the slow pace of natural regeneration, protecting existing vegetation should be a top priority in natural resource management. Additionally, degraded areas should undergo active restoration, supported by targeted management strategies. Forest conservation and sustainable resource management play a critical role in maintaining soil quality and fertility. These findings can help optimize management strategies and deepen our understanding of vulnerable ecosystem dynamics.

Keywords: forest degradation, land use, semi-arid mountain climate, soil biological indicators.

How to Cite This Article: Kooch, Y., Mohmedi 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

Copyright ©2024 Kooch et al. Published by Urmia University.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

پژوهش و توسعه جنگل
جلد ۱۱، شماره ۱، صفحه ۱۰۸-۸۷، (۱۴۰۴)

DOI: https://doi.org/10.30466/jfrd.2024.55525.1736
DOR:

مقالهٔ پژوهشی

اثر تخریب جنگل بر شاخص‌های بافت خاک، رسوب و حاصلخیزی زیستی خاک در بوم‌سازگان‌های کوهستانی نیمه‌خشک

یحیی کوچ*[۱]، زهرا مهمدی کرتلایی[۲]، مجتبی امیری[۳]، مهرداد زرافشار[٤]، سعید شعبانی[٥] و مجید محمدی[٦]

۱- دانشیار، گروه مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی نور، دانشگاه تربیت مدرس، ایران. (yahya.kooch@modares.ac.ir)
۲- دکتری علوم و مهندسی مرتع، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی نور، دانشگاه تربیت مدرس، ایران. (z.mohmedi@modares.ac.ir)
۳- دانشیار، گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. (mojtabaamiri@semnan.ac.ir)
٤- دانشیار، گروه جنگلداری و تکنولوژی چوب، دانشکده تکنولوژی، دانشگاه لینه، وکخو، سوئد. (mehrdad.zarafshar@lnu.se)
٥- استادیار پژوهشی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران. (s.shabani@areeo.ac.ir)
٦- دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. (majid.mohammady@semnan.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱٤۰۳/۰٤/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱٤۰۳/۰۸/۲۰

چکیده

مقدمه و هدف: جنگل‌ها خدمات اکوسیستمی گسترده‌ای ارائه می‌دهند، اما گسترش جمعیت انسانی موجب تخریب و تغییر کاربری این بوم‌سازگان‌ها شده است. تغییر پوشش زمین، خواص فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بافت خاک از جمله ویژگی‌های مهم در ارزیابی شکنندگی و فرسایش‌پذیری خاک است و شاخص‌هایی مانند نسبت رس (CR)، نسبت رس اصلاح‌شده (MCR) و سطح بحرانی ماده آلی خاک (CLOM) می‌توانند در درک بهتر فرسایش‌پذیری خاک مؤثر باشند. تغییرات کاربری و کاهش پوشش گیاهی حاصلخیزی خاک را کاهش داده و چرخه‌های بیوژئوشیمیایی را مختل می‌کنند. در این میان، پایش جامع شاخص‌های زیستی برای ارزیابی دقیق وضعیت حاصلخیزی خاک ضروری است. هدف این پژوهش، بررسی اثر تخریب جنگل بر ویژگی‌های بافت خاک، میزان رسوب و حاصلخیزی زیستی در سه کاربری جنگل، اکوتون جنگل-مرتع و مرتع در شرایط کوهستانی نیمه‌خشک است.

مواد و روش‌ها: منطقه مورد بررسی در بخش ییلاقی روستای میخساز کجور از توابع شهرستان نوشهر در استان مازندران قرار دارد. برای انجام این پژوهش در هر یک از این کاربری‌ها، در فصل تابستان (۱٤۰۲) در مجموع ۲۰ نمونه خاک (از دو عمق صفر-۱۵ و ۱۵-۳۰ سانتی‌متری) نمونه‌برداری شد. شاخص‌های بافت خاک شامل نسبت رس، شاخص نسبت رس اصلاح‌شده و سطح بحرانی ماده آلی خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. مقدار رسوب خاک در سه کاربری جنگل، اکوتون جنگل- مرتع و مرتع اندازه‌گیری شد. درنهایت

برای اندازه‌گیری مقدار حاصلخیزی خاک از شاخص حاصلخیزی زیستی خاک (Biological Fertility Index; BFI) که یکی از شاخص‌های کارآمد در جهان است استفاده شد. همچنین برای بررسی روند تغییرات متغیرهای حاصلخیزی و متغیرهای خاک در تیمارهای مختلف، تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) با ایجاد ماتریس حاصله در برنامه PC – ORD تحت Windows مورد استفاده قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج حاصل از بررسی تغییرات شاخص‌های بافت خاک در کاربری‌های مختلف مورد بررسی (جنگل، اکوتون جنگل و مرتع، مرتع) نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار شاخص نسبت رس و شاخص نسبت رس اصلاح‌شده در هر دو عمق به‌ترتیب مربوط به کاربری مرتع و جنگل بوده است و این اختلاف به لحاظ آماری معنی‌دار (P<۰/۰۵) ارزیابی شد. نتایج حاصل از بررسی سطح بحرانی ماده آلی نشان داد که کاربری جنگل بیشترین مقدار را در دو عمق به خود اختصاص داده بود. همچنین بیشترین مقادیر رسوب خاک در مرتع (۳/۸۵ گرم بر مترمربع) و کمترین مقدار در کاربری جنگل (۱/۳۵ گرم بر مترمربع) مشاهده شد. نتایج نشان داد که بوم‌سازگان جنگل در شرایط حاصلخیزی متوسط (با مجموع امتیاز ١٤) و دو کاربری اکوتون و مرتع (با مجموع امتیاز ۱۲ و ۱۱) در شرایط هشدار و پیش از استرس به لحاظ شاخص حاصلخیزی زیستی خاک قرار داشتند. علاوه‌بر این، نتایج حاصل از بررسی شاخص حاصلخیزی خاک در عمق دوم نشان داد که هر سه کاربری در بوم‌سازگان نیمه‌خشک کوهستانی در شرایط پیش از استرس و هشدار قرار دارند. همچنین تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان داد، در بین مشخصه‌های زیستی خاک تنفس پایه، تنفس تجمعی و زیتوده میکروبی کربن رابطه مثبتی با مقدار ماده آلی و سطح بحرانی خاک دارد.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که جنگل‌زدایی و تغییر کاربری اراضی با تغییر شاخص‌های بافت خاک و افزایش رسوب، موجب کاهش حاصلخیزی زیستی خاک می‌شود. به‌جز کاربری جنگل در عمق اول، در سایر کاربری‌ها و عمق‌ها، شاخص حاصلخیزی در وضعیت هشدار یا پیش از استرس قرار دارد. این شرایط، به‌ویژه در اقلیم نیمه‌خشک کوهستانی، نیازمند مداخلات مدیریتی برای حفاظت و احیای بوم‌سازگان‌هاست. با توجه به زمان‌بر بودن احیای طبیعی، حفاظت از پوشش گیاهی باید در اولویت مدیریت منابع طبیعی قرار گیرد. همچنین، مناطق تخریب‌شده باید تحت بازسازی قرار گرفته و این روند با مداخلات انسانی و راهبردهای مدیریتی تسریع شود. حفظ جنگل‌ها و مدیریت صحیح منابع طبیعی نقش مهمی در حفاظت از کیفیت و حاصلخیزی خاک دارد. این یافته‌ها می‌توانند در بهینه‌سازی برنامه‌های مدیریتی و درک بهتر رفتار بوم‌سازگان‌های آسیب‌پذیر مؤثر باشند.

واژه‌های کلیدی: اقلیم کوهستانی نیمه‌خشک، تغییرات کاربری، حاصلخیزی زیستی خاک، جنگل‌زدایی.

* نویسنده مسئول شمارهٔ تماس: ۰۹۱۱۲۹۳۲۳۱۳

مقدمه

بوم‌سازگان‌های جنگلی حدود ٤/١ میلیارد هکتار از زمین‌های جهانی را به خود اختصاص داده‌اند و طیف گسترده‌ای از خدمات بوم‌سازگانی مانند کاهش تغییرات آب‌وهوا، ترسیب کربن و جلوگیری از فرسایش خاک را ارائه می‌دهند (Lal, 2005; Taghipour et al., 2022). بنابراین، حفظ مدیریت پایدار جنگل برای تداوم و تضمین این خدمات حیاتی است. با وجود ارزش بالای جنگل‌ها، رشد سریع جمعیت منجر به ازبین رفتن بخش قابل‌توجهی از پوشش جنگلی یا تبدیل جنگل‌ها به دیگر کاربری‌ها شده است (Han and Zhu, 2020, Dalal et al., 2021). امروزه موضوع تغییر پوشش زمین و تأثیر آن بر بوم‌سازگان‌های زمینی از اهمیت بسیاری برخوردار است و ضرورت حفاظت از جنگل‌های طبیعی در شرایط تغییرات آب‌وهوای جهانی و گرم شدن زمین بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Sloan and Sayer, 2015). تخریب جنگل‌ها درنتیجه تغییرات شرایط اجتماعی-اقتصادی و محیطی یک موضوع مهم در سراسر جهان و جزء اصلی تغییرات جهانی محسوب می‌شود (Parsapour et al., 2018). با توجه به افزایش تقاضا برای سوخت، الوار، سرپناه و غذا، تخریب جنگل به نرخ هشداردهنده‌ای رسیده است (Eriksson et al., 2018, Dos Santos et al., 2019).

این دگرگونی‌ها، تعامل هوای زمین، چرخه هیدرولوژیکی خاک و عملکرد بوم‌سازگان را در مقیاس‌های مختلف دچار تغییر می‌کند (Roy et al., 2022). جدی‌ترین آسیب وارده به خاک که ناشی از تغییرات کاربری است پس از جنگل‌زدایی اتفاق می‌افتد (Samec et al., 2023). تخریب خاک‌های جنگلی نشان می‌دهد که توسعه پوشش گیاهی طبیعی به‌صورت بالقوه درخطر است. تخریب و ازبین‌رفتن جنگل منجر به کاهش ورودی‌های ماده آلی خاک و همچنین کاهش در فعالیت زیستی و چرخه مواد مغذی خاک می‌شود (Kooch et al., 2020; Heydari et al., 2024) که بر کیفیت و سلامت خاک تأثیر می‌گذارد (Marzaioli et al., 2010; Leul et al., 2023). در بوم‌سازگان‌های جنگلی، محتوای کربن و نیتروژن خاک نسبت به جنگل‌زدایی و فرسایش خاک بسیار حساس است (Atucha et al., 2013). بنابراین تغییرات پوشش گیاهی و کاربری، تأثیر مستقیمی بر خواص شیمیایی، فیزیکی و زیستی خاک دارد (Vinhal-Freitas et al., 2013).

بافت خاک که به درصد حضور هر یک از اجزاء خاک اطلاق می‌شود، بر عملکردهای مختلف خاک اثرگذار بوده و شدت فرآیندهای بوم‌شناسی خاک را تغییر می‌دهد. بافت خاک با تأثیر مستقیم بر محتوای آب و دمای خاک بر فعالیت میکروبی تأثیر می‌گذارد (Chodak and Niklińska, 2010; Sugihara et al., 2010). علاوه‌بر این، بافت خاک نقش کلیدی در تبادل گاز (تنفس ریشه‌ها و میکروارگانیسم‌ها) بین خاک و جو دارد. خاک‌ها با بافت سنگین فعالیت میکروبی و ذخایر کربن بیشتری نسبت به خاک‌های با بافت سبک دارند. بنابراین، بافت خاک یک مؤلفه مهم در ارزیابی شکنندگی خاک برای کاربری‌های مختلف زمین در بوم‌سازگان‌های مختلف محسوب می‌شود (Dieckow et al., 2009; Wei et al., 2014). علاوه براین بررسی‌ها نشان داده‌اند که مشخصه‌های فیزیکی خاک، به‌ویژه بافت خاک را می‌توان در تعیین حساسیت خاک در برابر فرسایش مورد استفاده قرار داد (Cammeraat & Imeson, 1998). نوع خاک، بافت،

ساختار و محتوای مواد آلی به‌طور مستقیم اندازه، تعداد و اتصال منافذ خاک را تعیین می‌کند و در این راستا، کنترل فرآیندهای نفوذ و فرسایش خاک به‌شدت تحت تأثیر فرایندهای فوق قرار دارد (Oruk et al., 2012). در این میان شاخص نسبت رس اصلاح‌شده، شاخص نسبت رس و سطح بحرانی ماده آلی خاک مانند شاخص‌های مؤثر برای درک مقدار فرسایش‌پذیری خاک است (Olaniya et al., 2020). تغییر شاخص‌های بافت خاک در برابر تغییرات پوشش روزمینی با تأثیر بر دیگر مشخصه‌های خاک منجر به تغییر مقدار رواناب و رسوب در خاک می‌شود (Oruk et al., 2012). در این راستا جنگل‌زدایی، چرای بی‌رویه و شیوه‌های کشاورزی نامناسب علل اصلی فرسایش خاک محسوب می‌شود که منجر به افزایش سیلاب، تغییرات آب‌وهوا، کاهش تنوع زیستی، کاهش مواد مغذی، از دست دادن ذخایر کربن و درنهایت کاهش حاصلخیزی خاک می‌شود (Amundson et al., 2015). این مسئله به‌وضوح نشان می‌دهد که تغییر کاربری اراضی و حذف پوشش گیاهی می‌تواند اثرهای شدیدی بر حاصلخیزی خاک داشته باشد (Rolando et al., 2018)، که توسط بررسی‌های مختلف نیز تائید شده است (Kassa et al., 2017; Bakhshandeh et al., 2019). بنابراین لازم است از یک سیستم شاخص جامع برای پایش حاصلخیزی خاک در بین انواع شاخص‌های زیستی و چرخه‌های بیوژئوشیمیایی استفاده شود (Francaviglia et al., 2017). در این راستا، شاخص حاصلخیزی زیستی خاک (BFI) توسط Renzi et al. (2017) معرفی شد. این شاخص از برخی شاخص‌های بیوشیمیایی خاک، مانند ماده آلی، کربن زیتوده میکروبی، تنفس پایه، تنفس تجمعی، ضریب متابولیک و ضریب کانی‌سازی استفاده می‌کند. بر اساس پژوهش‌های گذشته، شاخص حاصلخیزی زیستی خاک کارآمدتر از بررسی زی‌توده و فعالیت میکروبی خاک به تنهایی عمل می‌کند و می‌تواند برای ارزیابی کیفیت خاک در سطوح مختلف اختلالات انسانی مورد استفاده قرار گیرد (Francaviglia et al., 2017; Renzi et al., 2017).

بوم‌سازگان‌های کوهستانی نیمه‌خشک به‌دلیل شرایط اقلیمی خاص، بسیار حساس و شکننده است و خدمات اکوسیستمی آنها بسیار مهم است. خاک در مناطق کوهستانی به دلیل شرایط اقلیمی متمایز، بسیار مستعد تخریب است. ویژگی‌های کلی مناطق خشک و نیمه‌خشک شامل بارندگی کم و دماهای بالا و درنتیجه تبخیر زیاد با رژیم رطوبتی خشک است (Loeffler et al., 2011). درنتیجه، خاک در این مناطق به دلیل کمبود آب، از بهره‌وری اولیه پایین و حاصلخیزی محدودی برخوردار است. حاصلخیزی خاک در شرایط خشک و نیمه‌خشک به دلیل نوسانات شدید محیطی و همچنین دسترسی کم آب محدود است. به‌استثنای برخی موارد، این خاک‌ها ذاتاً با حاصلخیزی پایین، در دسترس بودن کم نیتروژن و فسفر، ظرفیت نگهداری پایین آب، اسیدیته بالا، مواد آلی پایین مواجه هستند (Sahrawat et al., 2016; Husein et al., 2019). این مسئله به علت کمبود ورودی مواد آلی از طریق منابع روزمینی است که به دلیل بارندگی کم و دماهای بالا منطقه بیشتر دارای پوشش گیاهی پراکنده و اندک است. این مناطق به‌نسبت گسترده هستند و حدود ۳۰ تا ٤۰ درصد از سطح زمین را پوشش می‌دهند. با توجه به آسیب‌پذیری این سرزمین‌ها در برابر تخریب، تخمین زده می‌شود که حدود ٤٤ میلیون کیلومترمربع، که معادل ۳٤ درصد از مساحت کل جهان

است و ۲/٦ میلیارد نفر را پشتیبانی می‌کند، درمعرض خطر بیشتری قرار دارند (Hag Husein et al., 2021). بنابراین هرگونه پژوهش در این مناطق از اهمیت جهانی برخوردار است. بر این اساس و با توجه به اینکه پوشش جنگلی در ایران نیز به دلیل تخریب و استفاده نادرست از منابع جنگلی از ۱۸ میلیون هکتار به کمتر از ۱۲ میلیون هکتار در طول نیم‌قرن اخیر رسیده است (Marvi Mohajer, 2005)، و با توجه به شرایط خاص و اهمیت مناطق خشک کوهستانی، تاکنون پژوهشی در رابطه با اثرها تخریب جنگل بر شاخص‌های بافت، رسوب و حاصلخیزی زیستی خاک در ایران انجام نشده است. از این‌رو، بررسی شاخص‌های بافت و حاصلخیزی زیستی خاک می‌تواند به درک بهتر فرآیندهای بوم‌شناسی و عملکرد خاک منجر شود. بر این اساس، فرضیه این پژوهش بیان می‌کند که تخریب جنگل و تغییرات کاربری‌های زمین موجب تغییر شاخص‌های بافت و رسوب خاک می‌شود، که این مسئله نقش مؤثری در تغییر شاخص حاصلخیزی خاک در کاربری‌های مختلف ایفا می‌نماید. بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی اثرها تخریب جنگل بر شاخص‌های بافت، رسوب و حاصلخیزی خاک در سه کاربری جنگل، اکوتون جنگل- مرتع و مرتع در بوم‌سازگان‌های کوهستانی نیمه‌خشک انجام شد.

مواد و روش‌ها

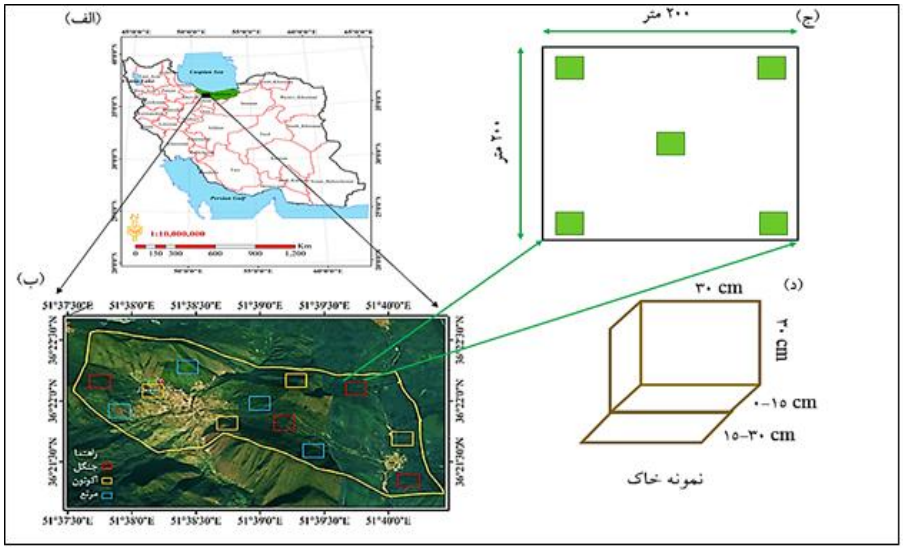
منطقه مورد بررسی

منطقه مورد بررسی در بخش ییلاقی روستای میخساز کجور از توابع شهرستان نوشهر در استان مازندران قرار دارد (شکل ۱ الف). این منطقه در محدوده ارتفاعی ۱٦۰۰ تا ۱۷۰۰ متر از سطح دریا قرار داشته و دارای بازه شیب بین ۱۰ تا ۲۰ درصد است. بارندگی سالانه ۳٦۵ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۱ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. منطقه مورد پژوهش بر اساس طبقه‌بندی خاک (وزارت کشاورزی ایالات متحده، ۲۰۱٤) دارای خاک لوم رسی است و در گروه خاک‌های Alfisoils طبقه‌بندی می‌شوند. سنگ بستر شامل سنگ آهک دولومیتی از اوایل کرتاسه تا اواخر ژوراسیک است. منطقه مورد بررسی، از نظر فیزیوگرافی، سنگ بستر، اقلیم و سیستم مدیریتی شرایط مشابهی داشتند منطقه مورد پژوهش دارای قابلیت اراضی جنگلی شامل تیپ‌های درختی لور (*Carpinus orientalis* Mill.) و اوری (*Quercus macranthera* F&M.) و مرتعی شامل تیپ‌های گیاهی درمنه (*Artemisia aucheri* Boiss.) و گون (*Astragalus podolobus* Boiss. & Hohen) بوده است، اما با توجه به تغییر کاربری‌های انجام‌شده در این منطقه، هم‌اکنون به‌شکل کاربری‌های جنگل طبیعی، اکوتون جنگل- مرتع و مرتع مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱ ب).

خلاصه‌ای از مشخصه‌های پوشش‌های گیاهی مورد بررسی در متن زیر (Sohrabzadeh, 2024; Mohmedi, 2024) ارائه شده است:

در تیپ پوشش جنگل، گونه غالب *Quercus macranthera* با تراکم ۱۹٤ اصله در هکتار حضور داشت. میانگین قطر برابرسینه این گونه ٤۵/۱۳ سانتی‌متر و میانگین ارتفاع آن ۲۲//۳۲ متر بود. درصد تاج‌پوشش برای این گونه به ۵۷ درصد می‌رسید. گونه‌های غالب همراه در این تیپ شامل *Astragalus podolobus* (۷ درصد)، *Artemisia aucheri* (۷ درصد)، *Bromus danthoniae* (۵ درصد) و گونه‌هایی با درصد کمتر از ۵ مانند *Rhamnus pallasii*، *Xanthium spinosum*،

Crataegus melanocarpa، *Berberis integerrima* و *Astragalus gossypinus* بودند. خاک این تیپ دارای بافتی متشکل از ۴۲/۷۵ درصد رس، ۲۱/۶۰ درصد شن و ۳۵/۶۰ درصد سیلت بوده و میانگین ماده آلی آن ۷/۳۸ درصد اندازه‌گیری شد.



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

Figure 1. The location of the studied area in the north of Iran, Mazandaran province (a), showing plots in the area (b), sampling plan for each studied site (c), soil sample (d)

در تیپ اکوتون جنگل-مرتع، گونه‌های غالب شامل *Berberis integerrima*، *Astragalus podolobus*، *Amygdalus lycioides* و *Juniperus excelsa* بودند. درصد تاج‌پوشش این گونه‌ها بین ۵ تا ۵۰ درصد متغیر بود. گونه‌های همراه غالب نیز شامل *Malus orientalis*، *Bromus danthoniae* و *Thymus transcaspicus* با سهمی کمتر از ۵ درصد بودند. بافت خاک این تیپ دارای ۴۲ درصد رس، ۲۳/۷۰ درصد شن و ۳۴/۳۰ درصد سیلت بود و ماده آلی آن به‌طور میانگین ۶/۶۶ درصد گزارش شد.

در تیپ مرتعی، گونه‌های اصلی شامل *Artemisia aucheri* (با ۵۰ درصد تاج‌پوشش)، *Astragalus podolobus* (۲۵ درصد)، و *Thymus transcaspicus* (۱۰ درصد) بودند. گونه‌های همراه این تیپ نیز شامل *Dichanthium annulatum* (۸ درصد)، *Medicago minima*، *Sanguisorba minor*، *Crataegus melanocarpa* و *Berberis integerrima* با درصدهای کمتر از ۵ بودند. خاک این ناحیه دارای ۳۹/۱۵ درصد رس، ۲۷/۵۰ درصد شن، ۳۳/۳۵ درصد سیلت و ۵/۷۳ درصد ماده آلی بود.

روش پژوهش

روش نمونه‌برداری

در هر یک از پوشش‌های جنگلی، اکوتون جنگل- مرتع و مرتعی (با شرایط فیزیوگرافی تقریباً مشابه) تعداد ۲۰

نمونه خاک در فصل رویش، از دو عمق ۱۵-صفر و ۱۵-۳۰ سانتی‌متری برداشت شد. نقاط موردبررسی ازنظر ویژگی‌های توپوگرافی (ارتفاع ۱۶۰۰ متر از سطح دریا، شیب ۲۰ تا ۱۰ درصد و جهت جغرافیایی شمالی) در سه کاربری جنگل طبیعی، اکوتون جنگل-مرتع و مرتع مشابه است. برای کاهش اثرها مرزی، نمونه‌برداری‌ها متمایل به بخش مرکزی هر کاربری اراضی باشد (شکل ۱ ج و د). نمونه‌های جمع‌آوری شده خاک برای انجام آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی به محیط آزمایشگاه انتقال داده شدند. یک بخش از نمونه‌های خاک برای انجام آزمایش-های فیزیکی و شیمیایی، پس از هوا خشک شدن از الک دو میلی‌متری عبور داده شده و بخش دوم نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های زیستی تا زمان آزمایش در دمای چهار درجه سانتی‌گراد (به مدت یک هفته) نگهداری شد.

اندازه‌گیری شاخص بافت خاک

برای برآورد شاخص‌های بافت خاک، مقادیر شن، سیلت و رس با استفاده از روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962) محاسبه شد. کربن آلی به روش اکسیداسیون تر والکی‌بلاک اندازه‌گیری شد (Nelson and Sommers, 1982). مواد آلی خاک (SOM) با استفاده از رابطه بین مواد آلی و کربن آلی خاک (ماده آلی خاک= کربن آلی خاک× ۱/۷۲٤) برآورد شد (Ezeigbo et al., 2013). سپس شاخص نسبت رس (CR)، شاخص نسبت رس اصلاح‌شده (MCR) و سطح بحرانی ماده آلی خاک (CLOM) با توجه به روش‌های گزارش‌شده توسط Olaniyi et al. (2020) با استفاده از فرمول‌های زیر (۱، ۲ و ۳) محاسبه شد:

رابطهٔ (۱) رس / (سیلت + شن) = نسبت رس

رابطهٔ (۲) (رس + ماده آلی) / (سیلت + شن) = نسبت رس اصلاح‌شده

رابطهٔ (۳) (سیلت + رس) / ماده آلی = نسبت بحرانی ماده آلی

اندازه‌گیری مقدار **رسوب خاک**

پس از جانمایی قطعات نمونه فرسایش، اقدام به نصب دیواره‌های چوبی به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر در اطراف قطعات نمونه شد تا از این طریق از ورود رواناب بالادست به داخل قطعات نمونه و نیز خروج رواناب به بیرون از پلات‌ها ممانعت به‌عمل آید. همچنین در انتهای هر قطعه‌نمونه اقدام به لوله‌گذاری کرده تا رسوب جمع-آوری شده به درون مخزن تعبیه‌شده در انتهای هر قطعه-نمونه هدایت شود. نمونه‌های جمع‌آوری‌شده پس از برچسب خوردن به آزمایشگاه منتقل شده و در آنجا نمونه‌ها ابتدا از کاغذ صافی عبور داده شده تا تمام رسوب موجود در نمونه جمع‌آوری شود. سپس نمونه رسوب به همراه کاغذ صافی به مدت ٤٨ ساعت تحت دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده شد. سپس نمونه خشک‌شده به همراه کاغذ صافی وزن شده و از وزن کاغذ صافی کسر شد. درنهایت وزن رسوب در هر لیتر از رواناب جمع‌آوری‌شده به‌دست آمد (Solgi et al., 2014).

اندازه‌گیری شاخص حاصلخیزی خاک

یکی از شاخص مؤثر در برآورد حاصلخیزی زیستی خاک (Biological Fertility Index) توسط Pompili et al. (2008) و Renzi et al. (2017) برای پایش حاصلخیزی خاک در ایتالیا پیشنهاد شد. این شاخص بر اساس ماده آلی خاک (ماده آلی خاک= کربن آلی خاک× ۱/۷۲٤)، تنفس پایه، کربن زی‌توده میکروبی کربن، ضریب متابولیک و نرخ معدنی‌شدن محاسبه می‌شود. برای برآورد این شاخص برای اندازه‌گیری تنفس پایه (BR) خاک از روش بطری بسته استفاده شد. تنفس برانگیخته (SIR) خاک، همانند روش تنفس پایه اندازه‌گیری شد. با این تفاوت که به نمونه خاک، مواد غذایی (۰/۵ گرم گلوکز +

۰/۰۱ گرم دی پتاسیم فسفات + ۰/۰۷۵ گرم کلرید آمونیوم) افزوده و پس از سه روز، سود درون جارها با اسیدکلریدریک ۰/۲ نرمال تیتر شد. زی‌توده‌های میکربی به روش تدخین- استخراج در محیط آزمایشگاه مورد سنجش قرار گرفت (Brookes et al., 1985). تخمین ضریب متابولیک (qCO_2) بر اساس تقسیم تنفس پایه بر و زیتوده میکروبی کربن محاسبه شد (Anderson and Domsch, 1990). نرخ معدنی شدن کربن (Cmin) و نیتروژن (Nmin) با استفاده از روش انکوباسیون آزمایشگاهی تعیین شد (Raiesi et al., 2012a, b). جدول امتیازدهی برای برآورد این شاخص در جدول ۲ آورده شده است. هر شاخص بر اساس مقادیر عددی اندازه‌گیری شده امتیاز بین ۱-۵ را دریافت کردند. مجموع امتیازات برای هر شاخص ارائه‌دهنده طبقات پیشنهادی شاخص حاصلخیزی خاک است که در جدول ۳ نشان داده شده است.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

در اولین مرحله، 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 ۲۰ 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 ویژگی‌های مختلف، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. به‌منظور بررسی روند تغییرات متغیرهای حاصلخیزی و متغیرهای خاک در تیمارهای مختلف، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) با ایجاد ماتریس حاصله در برنامه PC – ORD تحت Windows مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲- امتیازات فواصل مقادیر برای مشخصه‌های مختلف

Table 2. Scores of value intervals for different parameters

مشخصه‌های خاک Soil Parameter	امتیاز Score				
	1	2	3	4	5
ماده آلی خاک (درصد) Soil organic matter SOM(٪)	<0.1	≥0.1 ≤15	>1.5 ≤2	>2 ≤3	>0.3
تنفس پایه (میلی‌گرم کربن در کیلوگرم خاک) Basal respiration (mg CO2–C kg^{-1} soil d^{-1})	<5	≥5 ≤10	>10 ≤15	>15 ≤20	>20
تنفس تجمعی (میلی‌گرم کربن در کیلوگرم خاک) Cumulative respiration (mg CO^2–C kg^{-1} soil)	<100	≥100 ≤250	>250 ≤400	>400 ≤600	>600
زی‌توده میکروبی کربن (میلی‌گرم بر کربن) Microbial biomass C (mg kg^{-1})	<100	≥100 ≤200	>200 ≤300	>300 ≤400	>400
ضریب متابولیک Metabolic quotient (qCO_2)	≤ 0.4	<0.4 ≥0.3	<0.3 ≥0.2	<0.2 ≥0.1	<0.01
ضریب معدنی شدن Mineralization quotient	<1	≥1 ≤2	>2 ≤4	>3 ≤4	>4

جدول ۳- طبقه‌بندی شاخص حاصلخیزی خاک

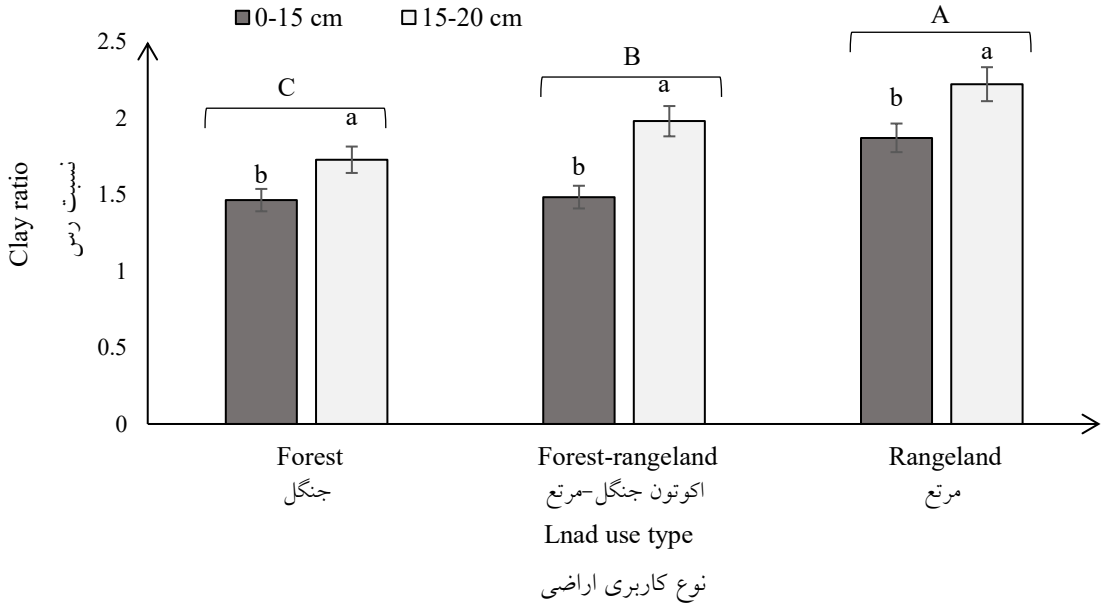
Table 3. Classes of the Biological Fertility Index (BFI)

V	IV	III	II	I	
زیاد	خوب	متوسط	پیش از استرس (هشدار)	استرس	
High	Good	Medium	Pre-stress (alarm)	Stress	
25-30	19-24	13-18	7-12	6	مجموع شاخص حاصلخیزی خاک BFI scores sum

نتایج

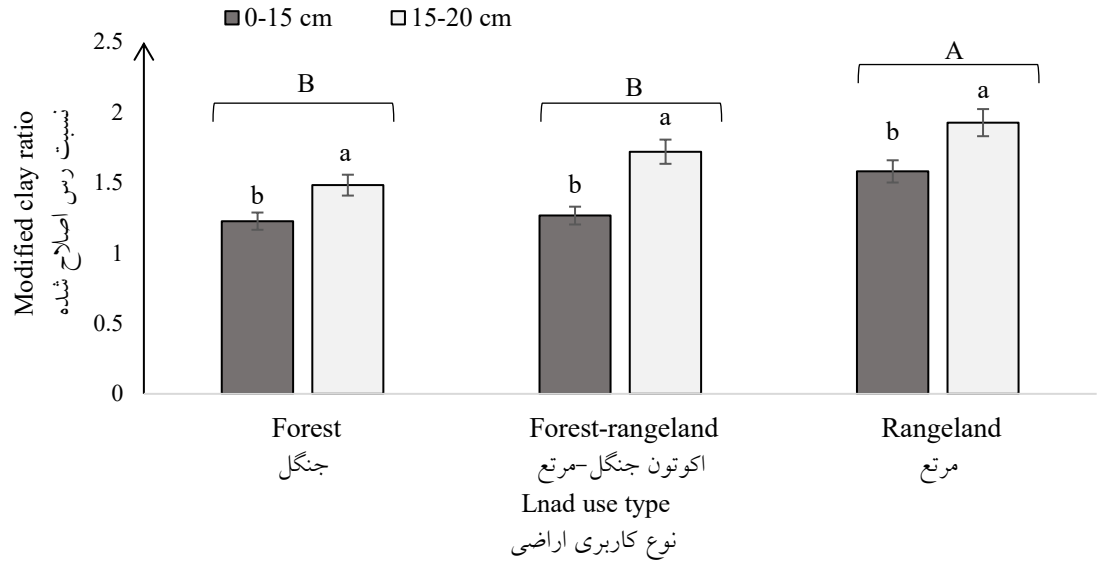
نتایج حاصل از بررسی تغییرات شاخص‌های بافت خاک در کاربری‌های مختلف مورد بررسی (جنگل، اکوتون جنگل و مرتع، مرتع) نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار شاخص نسبت رس در هر دو عمق به‌ترتیب مربوط به کاربری مرتع و جنگل بوده است و این اختلاف به لحاظ آماری معنی‌دار (P<۰/۰۵) ارزیابی شد (شکل ۲). در رابطه با شاخص نسبت رس اصلاح‌شده، بیشترین مقدار این شاخص در کاربری مرتع و کمترین مقدار مربوط به کاربری جنگل بود (شکل ۳). نتایج حاصل از بررسی سطح بحرانی ماده آلی نشان داد که کاربری جنگل بیشترین مقدار را در دو عمق به خود اختصاص داده بود و این اختلاف به لحاظ آماری معنی‌دار (P<۰/۰۵) بوده است، این درحالی است که کاربری مرتع کمترین مقادیر را به نمایش گذاشت (شکل ٤).

شاخص‌های بافت خاک در کاربری‌های مختلف



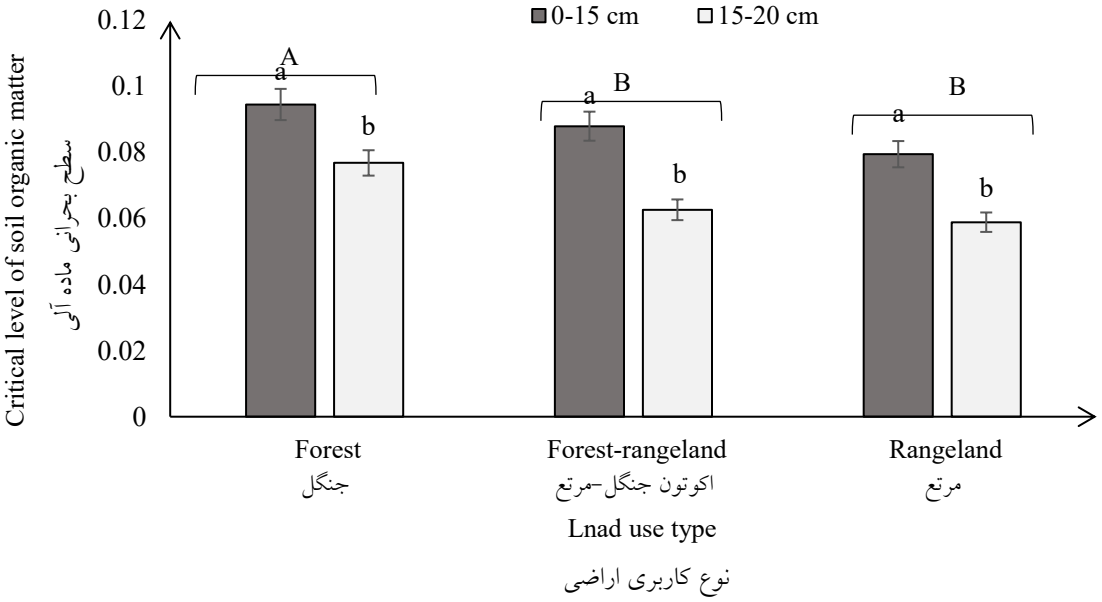
شکل ۲- میانگین ± (اشتباه معیار) نسبت رس در کاربری‌های مورد بررسی (حروف بزرگ مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار P<۰/۰۵ در کاربری‌های مختلف؛ حروف کوچک مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار (P<۰/۰۵) در دو عمق).

Figure 2. Mean ± standard error of clay content across the studied land uses (different capital letters indicate significant differences among land uses at P < 0.05; different lowercase letters indicate significant differences between the two soil depths at P < 0.05).



شکل ۳- میانگین ± (اشتباه معیار) نسبت رس اصلاح‌شده در کاربری‌های مورد بررسی (حروف بزرگ مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار (P<۰/۰۵ در کاربری‌های مختلف؛ حروف کوچک مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار (P<۰/۰۵) در دو عمق).

Figure 3. Mean ± standard error of modified clay ratio across the studied land uses (different capital letters indicate significant differences among land uses at P < 0.05; different lowercase letters indicate significant differences between the two soil depths at P < 0.05).

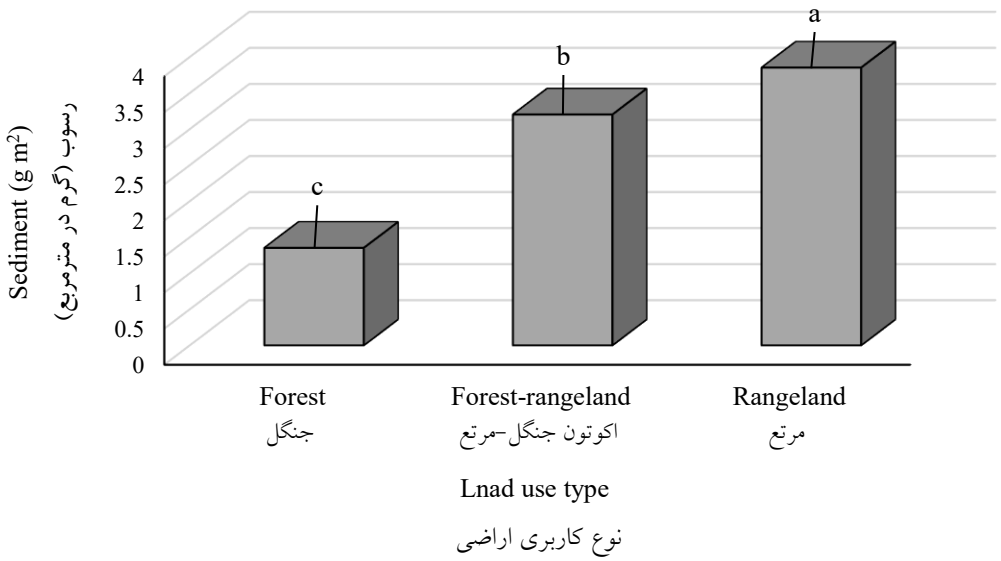


شکل ٤- میانگین ± (اشتباه معیار) سطح بحرانی ماده آلی در کاربری‌های مورد بررسی (حروف بزرگ مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار (P<۰/۰۵ در کاربری‌های مختلف؛ حروف کوچک مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار (P<۰/۰۵) در دو عمق).

Figure 3. Mean ± standard error of critical level of soil organic matter across the studied land uses (different capital letters indicate significant differences among land uses at P < 0.05; different lowercase letters indicate significant differences between the two soil depths at P < 0.05).

مقادیر رسوب خاک در کاربری‌های مختلف

نتایج حاصل از بررسی مقدار رسوب خاک در سه کاربری نشان داد که بیشترین مقادیر رسوب خاک در مرتع و کمترین مقدار در کاربری جنگل مشاهده شد که این اختلاف به لحاظ آماری معنی‌دار (P<۰/۰۵) ارزیابی شد (شکل ۵).



شکل ۵- میانگین ± (اشتباه معیار) رسوب خاک در کاربری‌های مورد بررسی (حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار (P<۰/۰۵) در کاربری‌های مختلف)

Figure 5. Mean ± (standard error) of soil sediment in different land uses (different letters indicate significant differences among land uses at P < 0.05)

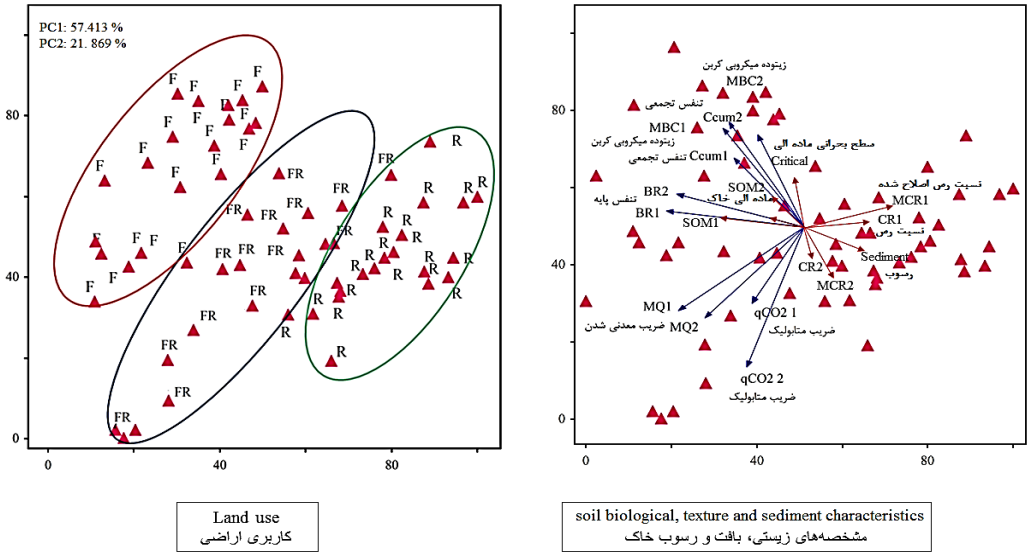
شاخص حاصلخیزی زیستی خاک در کاربرهای مختلف

نتایج حاصل از بررسی شاخص حاصلخیزی زیستی خاک در سه کاربری متمایز در عمق اول نشان داد که بوم‌سازگان جنگل در شرایط حاصلخیزی متوسط (با مجموع امتیاز ١٤) و دو کاربری اکوتون و مرتع (با مجموع امتیاز ١٢ و ١١) در شرایط هشدار و پیش از استرس به لحاظ شاخص حاصلخیزی خاک قرار دارند. علاوبر این، نتایج حاصل از بررسی شاخص حاصلخیزی خاک در عمق دوم نشان داد که هر سه کاربری در بوم‌سازگان نیمه‌خشک کوهستانی در شرایط پیش از استرس و هشدار است (جدول ٤).

ارتباط کاربری اراضی و مشخصه‌های خاک

نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) در ارتباط با کاربری اراضی مورد بررسی و مشخصه‌های خاک نشان می‌دهد که محورهای اول و دوم در مجموع ٧٩/٢٧ درصد از تغییرات واریانس کل را توجیه می‌کند (شکل ٦)، به‌طوری که کاربری اراضی مورد بررسی و مشخصه‌های خاک پراکنش متفاوتی را نشان می‌دهد. همچنین نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان می‌دهد، در بین مشخصه‌های زیستی خاک تنفس پایه، تنفس تجمعی و زی‌توده میکروبی کربن رابطه مثبتی با مقدار ماده آلی و سطح بحرانی خاک دارد به‌طوری که افزایش ویژگی‌های مذکور در خاک جنگل موجب بهبود حاصلخیزی خاک

شده است. درحالی‌که نسبت رس اصلاح‌شده، نسبت رس و رسوب خاک رابطه منفی با مشخصه‌های زیستی نشان داد که موجب کاهش حاصلخیزی مرتع شد (شکل ٦).



شکل ٦- ارتباط کاربری‌های اراضی مورد بررسی و ویژگی‌های خاک در آنالیز PCA. F: جنگل، FR: اکوتون جنگل-مرتع، R: مرتع.

Figure 6. Relationship between studied land uses and soil characteristics in PCA analysis. F: Forest, FR: Forest-rangeland, R: Rangeland.

جدول ٤- شاخص حاصلخیزی زیستی خاک در کاربری‌های مورد بررسی

Table 4. Biological Fertility Index (BFI) for the studied land use.

	عمق خاک Soil depth	کاربری اراضی Land use		
		جنگل Forest	جنگل- مرتع Forest- rangeland	مرتع Rangeland
مجموع امتیازات شاخص حاصلخیزی زیستی خاک BFI score sum	۱۵-۰ سانتی‌متر 0-15 cm	14	12	11
	۳۰-۱۵ سانتی‌متر 15-30 cm	12	12	11
طبقه‌بندی شاخص حاصلخیزی زیستی خاک BFI class	۱۵-۰ سانتی‌متر 0-15 cm	متوسط III Medium	پیش از استرس (هشدار) II Pre-stress (alarm)	پیش از استرس (هشدار) II Pre-stress (alarm)
	۳۰-۱۵ سانتی‌متر 15-30 cm	پیش از استرس (هشدار) II Pre-stress (alarm)	پیش از استرس (هشدار) II Pre-stress (alarm)	پیش از استرس (هشدار) II Pre-stress (alarm)

جدول ۵- همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های مختلف خاک

Table 5. Pearson correlation between different soil properties

مشخصه‌های خاک Soil properties	رسوب Sediment	سطح بحرانی ماده آلی Critical level of soil organic matter	نسبت رس اصلاح شده Modified	نسبت رس Clay ratio	ضریب معدنی شدن Mineralization quotient	ضریب متابولیک Metabolic quotient (qCO_2)	زی‌توده میکروبی کربن Microbial biomass C	تنفس تجمعی Cumulative respiration	تنفس پایه Basal respiration
ماده آلی خاک Soil organic matter SOM	0.215	-.299*	-.346**	-0.249	0.008	.330*	.274*	0.183	.476**
تنفس پایه Basal respiration	0.16	-.319*	-.273*	-0.245	.844**	.551**	.487**	0.213	1
تنفس تجمعی Cumulative respiration	0.098	-0.228	-0.223	-0.231	0.142	-0.006	.395**	1	
زی‌توده میکروبی کربن Microbial biomass C	0.169	-.377**	-.274*	-.259*	.384**	-.352**	1		
ضریب متابولیک Metabolic quotient (qCO_2)	0	0.015	-0.062	-0.039	.435**	1			
ضریب معدنی شدن Mineralization quotient	0.126	-0.194	-0.182	-0.202	1				
نسبت رس Clay ratio	-.935**	.364**	.992**	1					
نسبت رس اصلاح شده Modified clay ratio	-.939**	.386**	1						
سطح بحرانی ماده آلی Critical level of soil organic matter	-.332**	1							

** و * به‌ترتیب معنی‌داری در سطح اطمینان یک و پنج درصد.

** and * indicate significance at the 1% and 5% confidence levels, respectively.

بحث

اگرچه ویژگی‌های فیزیکی ویژگی‌های ذاتی و دائمی خاک هستند، اما فرآیندها و فعالیت‌هایی مانند تخریب پوشش گیاهی، برداشت درختان و تغییر کاربری زمین سبب تغییرات سریع در ویژگی‌های فیزیکی‌های می‌شوند (Scheibe et al., 2015; Heidari et al., 2024). نتایج حاصل از بررسی تغییرات شاخص‌های بافت خاک در کاربری‌های مختلف مورد بررسی (جنگل، اکوتون جنگل و مرتع، مرتع) نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار شاخص نسبت رس و شاخص نسبت رس اصلاح‌شده در هر دو عمق به ترتیب مربوط به کاربری مرتع و جنگل بود. در این راستا، به غیر از شاخص‌های کمی که برای تخمین فرسایش خاک محاسبه می‌شوند، برخی از شاخص‌های دیگر نیز توسط پژوهشگران برای درک استعداد فرسایش خاک مورداستفاده قرار می‌گیرند. در این میان شاخص نسبت رس و شاخص نسبت رس اصلاح‌شده مانند شاخص‌های مؤثر برای درک مقدار فرسایش‌پذیری خاک است (Olaniya et al., 2020). مقادیر بالاتر شاخص نسبت رس برای خاک مرتع به دلیل محتوای بیشتر ماسه در این مناطق بود. این درحالی است که مقادیر پایین‌تر شاخص رس در کاربری جنگل به دلیل محتوای کمتر سیلت و ماسه در خاک‌های جنگلی در مقایسه با دیگر سیستم‌های کاربری زمین بوده است. در این پژوهش مقادیر بالای شاخص نسبت رس در عمق دوم نسبت به عمق اول نشان‌دهنده حساسیت بیشتر عمق دوم نسبت به عمق اول به فرسایش است (Ruxton et al., 1968). افزایش بیشتر مقادیر شن در عمق دوم نسبت به عمق اول منجر به کاهش ظرفیت ذخیره آب و نهایتاً افزایش فرسایش خاک می‌شود. عمق اول به دلیل ورودی مواد آلی بیشتر، تخلخل بیشتر و افزایش ظرفیت نگهداری آب دارای شرایط مناسب‌تری از نظر مقدار فرسایش است (شهریور و همکاران، ۱۳۹۶). از آنجایی که این نسبت در کاربری مرتع بیشتر بوده است نشان می‌دهد که فرسایش خاک در این کاربری بیشتر از مناطق جنگلی است. در این رابطه Larsson and Eliasson (2006) با بررسی تفاوت میان نرخ نفوذپذیری خاک در کاربری جنگل طبیعی، مرتع و زمین کشاورزی نشان دادند کـه نرخ نفوذپذیری خاک در مرتع از زمین کشاورزی و جنگل کمتر است که این مسئله بر مقدار فرسایش خاک اثرگذار است.

نتایج حاصل از بررسی سطح بحرانی ماده آلی نشان داد که کاربری جنگل بیشترین مقدار را در دو عمق به خود اختصاص داده بود. در این رابطه اگر سطح بحرانی ماده آلی در محدوده پنج تا هفت درصد باشد، خاک‌ها به‌نسبت مستعد فرسایش هستند، درحالی‌که مقادیر بیش از نه درصد نشان‌دهنده ساختار پایدار و مقاومت بهتر در برابر فرسایش است (Mishra et al., 2024). بنابراین بر اساس شاخص سطح بحرانی ماده آلی، خاک‌های منطقه مورد بررسی بسیار مستعد فرسایش هستند. بوم‌سازگان‌های کوهستانی نیمه‌خشک به دلیل شرایط اقلیمی منحصربه‌فرد خود بسیار شکننده هستند. این بوم‌سازگان‌ها تضاد فصلی مشخصی را نشان می‌دهند، با آب‌وهوای خشک و گرم تابستان که بر فرسایش‌پذیری خاک تأثیر می‌گذارد. این امر در درجه اول به دلیل کاهش پوشش گیاهی است (Le Bissonnais et al., 2007). علاوه‌بر این، شدت رویدادهای بارندگی، به‌ویژه در طول فصل پاییز، نقش مهمی در فرسایش خاک ایفا می‌کند (Martínez-Casasnovas and Ramos, 2009). با توجه به موارد فوق، تغییرات کاربری و از بین رفتن پوشش گیاهی اثرهای مضاعفی را در این بوم‌سازگان‌ها به نمایش

می‌گذارد (Sadeghi et al., 2024). تخریب جنگل‌ها و تغییر در پوشش گیاهی، منجر به تغییر در کمیت و کیفیت ورودی لاشبرگ، کاهش مواد آلی خاک (به‌عنوان موتور خاک)، تغییر ریزاقلیم (به‌عنوان مثال، رطوبت و دما) و کاهش جمعیت جانوران خاک می‌شود، که منجر به کاهش تخلخل و هوادهی خاک می‌شود (Corral-Fernández et al., 2013) و می‌تواند به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر ویژگی‌های خاک، به‌ویژه عناصر غذایی و سطوح ماده آلی خاک تأثیر بگذارد (Aduhene-Chinbuah et al., 2022).

نتایج حاصل از بررسی مقدار رسوب خاک در سه کاربری نشان داد که بیشترین مقادیر رسوب خاک در مرتع و کمترین مقدار در کاربری جنگل مشاهده شد. در این رابطه نتایج پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که تغییر کاربری زمین خطر فرسایش و تولید رسوب را افزایش می‌دهد (Bezbradica et al., 2023). تخریب جنگل اثرهای قابل‌توجهی بر افزایش مواد فرسایش یافته و حمل‌ونقل به سمت رودخانه‌ها و دریاچه‌ها دارد (Abdullah et al., 2019). فعالیت‌های جنگل‌زدایی و حذف پوشش گیاهی در زمین‌های شیب‌دار و بوم‌سازگان‌های کوهستانی، منجر به تخریب لایه‌های سطحی خاک و ظهور مقادیر زیادی رسوب می‌شود (Ristic et al., 2015). پوشش جنگلی همچنین با مهار بارندگی و رواناب، افزایش هوموس و مواد آلی و بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به کنترل فرسایش کمک می‌کند که می‌تواند سرعت قطرات باران، رواناب، رسوبات و ازدست‌دادن عناصر غذایی را کاهش دهد (Sadeghi et al., 2022).

نتایج حاصل از بررسی شاخص حاصلخیزی زیستی خاک در سه کاربری متمایز در عمق اول نشان داد که بوم‌سازگان جنگل در شرایط حاصلخیزی متوسط و دو کاربری اکوتون و مرتع در شرایط هشدار و پیش از استرس قرار دارند. علاوه بر این، شاخص حاصلخیزی زیستی خاک در عمق دوم در هر سه کاربری در بوم‌سازگان نیمه‌خشک کوهستانی در شرایط پیش از استرس و هشدار است. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که حاصلخیزی زیستی خاک متناسب با فعالیت میکروبی و ماده آلی خاک است که شرایط محیطی و پوشش روزمینی مقادیر این شاخص را تغییر می‌دهد (Willy et al., 2019). همچنین ثابت شده است که بقایای گیاهی و پوششی روزمینی موجب افزایش زی‌توده و فعالیت میکروبی خاک و بهبود جذب کربن آلی خاک در درازمدت می‌شود (Ghimire et al., 2017). بنابراین، پوشش گیاهی روزمینی در مناطق جنگلی چرخه کربن آلی خاک را بهبود می‌بخشد، که منجر به افزایش حاصلخیزی زیستی خاک می‌شود. درواقع، مناطق جنگلی دارای پتانسیل بیشتر برای بهبود ذخیره کل کربن در خاک، با توجه به ورودی آلی و اختلال کمتر خاک است. از سوی دیگر، امتیاز حاصلخیزی زیستی خاک در مرتع کمتر از دیگر کاربری‌ها بود. این امر به دلیل حذف پوشش گیاهی روزمینی است که بر فعالیت میکروبی و چرخه کربن آلی خاک و مقدار فرسایش اثرگذار بوده و می‌تواند منجر کاهش به حاصلخیزی زیستی خاک شود (Yaghoubi Khanghahi et al., 2019). علاوه‌براین درختان جنگلی به دلیل حجم بیشتری از اجزای گیاهان مانند برگ‌ها، شاخه‌ها، پوست و قسمت‌های زیرزمینی در انباشت مواد آلی در خاک کارآمدتر هستند (Zhang et al., 2015; Kooch et al., 2022). گونه‌های درختی در رویشگاه جنگلی منطقه مورد بررسی (به‌عنوان مثال، بلوط اوری و لور از خانواده ممرز) برگ‌ریز با کیفیت بستر بالا (محتوای مواد مغذی بالا، نسبت C/N پایین) هستند

(Aubert et al., 2003) که حاصلخیزی خاک را در زیر جنگل در مقایسه با دیگر کاربری‌ها افزایش می‌دهد. اثرهای تبدیل جنگل به مرتع بر جوامع زیستی خاک مستقیم و غیرمستقیم است. اثرهای مستقیم ناشی از تبدیل جنگل به مرتع در زیستگاه موجودات خاکی مانند فشرده شدن خاک، فرسایش، شستشوی مواد غذایی و اختلاط لایه‌های مختلف خاک است که بر مشخصات زیستی خاک اثر می‌گذارد. اثرهای غیرمستقیم منجر به تغییر در شرایط ریز اقلیم خاک (یعنی رژیم‌های رطوبت و دما) به دلیل حذف پوشش درختان در بوم‌سازگان است. همچنین، با توجه به تخریب رویشگاه‌های جنگلی و تغییر پوشش‌های زمین، مقدار مواد آلی وارد شده به خاک و همچنین کیفیت بقایای گیاهی به‌طور چشمگیری تغییر می‌کند، که بر فعالیت میکروبی خاک و متعاقب آن بر مقدار حاصلخیزی زیستی اثرگذار است (Francaviglia et al., 2017; Sun et al., 2021; Kooch et al., 2023).

نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان می‌دهد، در بین مشخصه‌های زیستی خاک تنفس پایه، تنفس تجمعی و زی‌توده میکروبی کربن رابطه مثبتی با مقدار ماده آلی و سطح بحرانی خاک دارد. بر اساس این نتایج، می‌توان نتیجه گرفت که کاربری اراضی تأثیر زیادی بر ویژگی‌های زیستی و شیمیایی خاک دارد. تغییرات در نوع پوشش گیاهی و نوع بوم‌سازگان، به‌ویژه تبدیل جنگل به مرتع، سبب تغییرات چشمگیر در ترکیب و کیفیت خاک می‌شود (Kooch et al., 2022). کاهش مواد آلی تأثیرات منفی زیادی بر جوامع میکروبی خاک دارد و موجب کاهش فعالیت‌های زیستی و در نتیجه کاهش حاصلخیزی خاک می‌شود (Willy et al., 2019). از طرفی، جنگل‌ها به دلیل داشتن پوشش گیاهی متراکم و تجزیه نشدن سریع بقایای گیاهی، به افزایش محتویات مواد آلی و بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک کمک می‌کنند، که این امر منجر به افزایش حاصلخیزی خاک و بهبود شرایط رشد گیاهان می‌شود. بنابراین، مدیریت صحیح منابع طبیعی و حفظ جنگل‌ها برای حفاظت از کیفیت خاک و حفظ حاصلخیزی آن ضروری است.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که جنگل‌زدایی و تغییرات کاربری با تأثیر بر شاخص‌های بافت و افزایش مقدار رسوب بر شاخص حاصلخیزی زیستی خاک اثرگذار است. منطقه مورد بررسی در رابطه با شاخص حاصلخیزی به‌جزء برای کاربری جنگل در عمق اول که دارای شاخص حاصلخیزی متوسط بوده است، در دیگر کاربری‌ها و اعماق خاک در شرایط هشدار و پیش از استرش قرار دارد. درنتیجه با توجه به زمان مورد نیاز برای احیای طبیعی در کاربری‌های مختلف و شرایط شکننده و حساس اقلیم نیمه‌خشک کوهستانی، اولویت‌بندی حفاظت از پوشش گیاهی و بهبود فرآیند احیای بوم‌سازگان با مداخلات مدیریتی کافی ضروری به‌نظر می‌رسد. درنهایت نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که باید از تخریب پوشش گیاهی به‌ویژه در مناطق با شرایط کوهستانی و اقلیمی خشک جلوگیری شود و حفاظت پوشش گیاهی باید از وظایف اصلی مدیران منابع طبیعی در این مناطق باشد. علاوه‌بر این، مناطقی که از قبل تخریب‌شده باید تحت مدیریت احیا قرار گیرند و این فرایند باید با استفاده از مداخلات انسانی و استراتژی‌های مدیریتی تسریع شود. روش ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند در دیگر بوم‌سازگان‌ها برای برآورد دقیق از وضعیت فرسایش و حاصلخیزی خاک مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شماره «۴۰۱۴۷۷۸» انجام شده است.

References

Abdullah, H.M., Islam, I., Miah, M.G. and Ahmed, Z., Quantifying the spatiotemporal patterns of forest degradation in a fragmented, rapidly urbanizing landscape: A case study of Gazipur, *Bangladesh. Remote Sensing Applications: Society and Environment* **2019**, 13, pp.457-465.

Aduhene-Chinbuah, J., Sugihara, S., Komatsuzaki, M., Nishizawa, T. and Tanaka, H., No tillage increases SOM in labile fraction but not stable fraction of andosols from a long-term experiment in Japan. *Agronomy* **2022**, 12(2), p.479.

Amundson, R., Berhe, A.A., Hopmans, J.W., Olson, C., Sztein, A.E. and Sparks, D.L., Soil and human security in the 21st century. *Science* **2015**و 348(6235), p.1261071.

Anderson, T.H., and Domsch, K.H. Application of eco-physiological quotients (qCO_2 and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biology and Biochemistry* **1990**, 22, pp. 251-255.

Atucha, A., Merwin, I.A., Brown, M.G., Gardiazabal, F., Mena, F., Adriazola, C. and Lehmann, J., Soil erosion, runoff and nutrient losses in an avocado (Persea americana Mill) hillside orchard under different groundcover management systems. *Plant and Soil* **2013**, 368, pp.393-406.

Aubert, M., Hedde, M., Decaensm T., Bureau, F., Margerie, P., and Alard, D., Effects of tree canopy composition on earthworms and other macro-invertebrates in beech forests of upper Normandy (France). *Pedobiologia*, **2003**, 47, pp.904-912.

Bakhshandeh, E., Hossieni, M., Zeraatpisheh, M. and Francaviglia, R., Land use change effects on soil quality and biological fertility: A case study in northern Iran. European *Journal of Soil Biology* **2019**, 95, p.103119.

Bezbradica, L., Josimović, B. and Milijić, S., Impact of repurposing Forest land on Erosion and sediment production—Case study: Krupanj municipality—Serbia. *Forests* **2023**, 14, p.1127.

Bouyoucos, G.J., Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy journal* **1962**, 54(5), pp.464-465.

Brookes, P. C., Powlson, D. S. and Jenkinson, D. S., Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. Soil Biology and *Biochemistry* **1982**, 14: 319-329.

Cammeraat, L.H. and Imeson, A.C., Deriving indicators of soil degradation from soil aggregation studies in southeastern Spain and southern France. *Geomorphology* **1998**, 23, pp.307-321.

Chodak, M. and Niklińska, M., The effect of different tree species on the chemical and microbial properties of reclaimed mine soils. *Biology and fertility of soils* **2010**, 46, pp.555-566.

Corral-Fernández, R., Parras-Alcántara, L. and Lozano-García, B., Stratification ratio of soil organic C, N and C: N in Mediterranean evergreen oak woodland with conventional and organic tillage. *Agriculture, ecosystems & environment* **2013**, 164, pp.252-259.

Dalal, R.C., Thornton, C.M., Allen, D.E., Owens, J.S. and Kopittke, P.M., Long-term land use change in Australia from native forest decreases all fractions of soil organic carbon, including resistant organic carbon, for cropping but not sown pasture. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **2021**, 311, p.107326.

Dieckow, J., Bayer, C., Conceição, P.C., Zanatta, J.A., Martin-Neto, L., Milori, D.B.M., Salton, J.C., Macedo, M.M., Mielniczuk, J. and Hernani, L.C., Land use, tillage, texture and organic matter

stock and composition in tropical and subtropical Brazilian soils. *European Journal of Soil Science* **2009**, 60(2), pp.240-249.

Dos Santos, C.A., Rezende, C.D.P., Pinheiro, É.F.M., Pereira, J.M., Alves, B.J., Urquiaga, S. and Boddey, R.M., Changes in soil carbon stocks after land-use change from native vegetation to pastures in the Atlantic forest region of Brazil. *Geoderma* **2019**, 337, pp.394-401.

Eriksson, M., Samuelson, L., Jägrud, L., Mattsson, E., Celander, T., Malmer, A., Bengtsson, K., Johansson, O., Schaaf, N., Svending, O. and Tengberg, A., Water, Forests, people: the Swedish experience in building resilient landscapes. *Environmental Management* **2018**, 62, pp.45-57.

Ezeigbo, O. R., Ukpabi, C. F., Abel-Anyebe, O., Okike-Osisiogu, F. U., Ike-Amadi, C. A., and Agomoh, N. G. Physico-chemical properties of soil contaminated with refined petroleum oil in Eluama Community, Abia State, Nigeria. International Journal of *Scientific Research and Management* **2013**, 1: 405-413.

Francaviglia, R., Renzi, G., Ledda, L. and Benedetti, A., Organic carbon pools and soil biological fertility are affected by land use intensity in Mediterranean ecosystems of Sardinia, Italy. *Science of the Total Environment* **2017**, 599, pp.789-796.

Ghimire, B., Ghimire, R., VanLeeuwen, D. and Mesbah, A., Cover crop residue amount and quality effects on soil organic carbon mineralization. *Sustainability* **2017**, 9(12), p.2316.

Hag Husein, H., Lucke, B., Bäumler, R. and Sahwan, W., A contribution to soil fertility assessment for arid and semi-arid lands. *Soil Systems* **2021**, 5(3), p.42.

Han, M. and Zhu, B., Changes in soil greenhouse gas fluxes by land use change from primary forest. *Global Change Biology* **2020**, 26(4), pp.2656-2667.

Husein, H.H., Mousa, M., Sahwan, W., Bäumler, R. and Lucke, B., Spatial distribution of soil organic matter and soil organic carbon stocks in semi-arid area of northeastern Syria. *Natural Resources* **2019**, 10(12), p.415.

Kassa, H., Dondeyne, S., Poesen, J., Frankl, A. and Nyssen, J., Impact of deforestation on soil fertility, soil carbon and nitrogen stocks: the case of the Gacheb catchment in the White Nile Basin, Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **2017**, 247, pp.273-282.

Kooch, Y., Amani, M. and Abedi, M., The effect of shrublands degradation intensity on soil organic matter-associated properties in a semi-arid ecosystem. *Science of the Total Environment* **2022**, 853, p.158664.

Kooch, Y., Ghorbanzadeh, N., Haghverdi, K. and Francaviglia, R., Soil quality cannot be improved after thirty years of land use change from forest to rangeland. *Science of The Total Environment* **2023**, 856, p.159132.

Kooch, Y., Heidari, F., Nouraei, A., Wang, L., Ji, Q.Q., Francaviglia, R. and Wu, D., Can soil health in degraded woodlands of a semi-arid environment improve after thirty years? *Science of The Total Environment* **2024**, 928, p.172218.

Lal, R., Forest soils and carbon sequestration. *Forest ecology and management* **2005**, 220(1-3), pp.242-258.

Larsson, M. and Eliasson, S., The influence of land-use changes, root abundance and macropores on saturated infiltration rate-a field study on Western Java, Indonesia **2006**.

Le Bissonnais, Y., Blavet, D., De Noni, G., Laurent, J.Y., Asseline, J. and Chenu, C, Erodibility of Mediterranean vineyard soils: relevant aggregate stability methods and significant soil variables. European *Journal of Soil Science* **2007**, 58(1), pp.188-195.

Loeffler, J., Anschlag, K., Baker, B., Finch, O.D., Diekkrueger, B., Wundram, D., Schroeder, B., Pape, R. and Lundberg, A., Mountain ecosystem response to global change. *Erdkunde* **2011**, pp.189-213.

Leul, Y., Assen, M., Damene, S. and Legass, A., Effects of land use types on soil quality dynamics in a tropical sub-humid ecosystem, western Ethiopia. *Ecological Indicators* **2023**, 147, p.110024.

Marvi Mohajer, M. R., Forestry and forest cultivation. *Tehran University Publications* **2005**. 388 p.

Martínez-Casasnovas, J.A., Ramos, M.C. and García-Hernández, D., Effects of land-use changes in vegetation cover and sidewall erosion in a gully head of the Penedès region (northeast Spain). Earth Surface Processes and Landforms: *The Journal of the British Geomorphological Research Group* **2009**, 34(14), pp.1927-1937.

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

Mishra, G., Jangir, A. and Dash, B., Soil organic carbon stock and erodibility indices under different land uses of Nagaland, India. *Current Science* **2024**, (00113891), 126(9).

Mohmedi, Z. 2024. Biogeochemical cycling of carbon and nitrogen in wooded and non-wooded lands of Kojur region, Nowshahr. PhD thesis of Range Management. Tarbiat Modares University, 153p.

Nelson, D.W. and Sommers, L.E., Total carbon, organic carbon, and organic matter. Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties **1982**, 9, pp.539-579.

Olaniya, M., Bora, P. K., Das, S., and Chanu, P. H., Soil erodibility indices under different land uses in Ri-Bhoi district of Meghalaya (India). *Scientific reports* **2020**, 10(1): 14986.

Oruk, E.O., Eric, N.J. and Ogogo, A.U., Influence of soil textural properties and land use cover type on soil erosion of a characteristic ultisols in Betem, Cross River Sate, Nigeria. *Journal of Sustainable Development* **2012**, 5(7), p.104.

Parsapour, M.K., Kooch, Y., Hosseini, S.M. and Alavi, S.J., Litter and topsoil in Alnus subcordata plantation on former degraded natural forest land: a synthesis of age-sequence. *Soil and Tillage Research* **2018**, 179, pp.1-10.

Pompili, L., Mellina, A.S., Benedetti, A. and Bloem, J., Microbial indicators in three agricultural soils with different management **2008,** 1128-1136.

Raiesi, F. Land abandonment effect on N mineralization and microbial biomass N in a semi-arid calcareous soil from Iran. *Journal of Arid Environments* **2012a**, 76: 80-87.

Raiesi, F. Soil properties and C dynamics in abandoned and cultivated farmlands in a semi-arid ecosystem. *Plant and Soil* **2012b**, 351:161–175.

Renzi, G., Canfora, L., Salvati, L. and Benedetti, A., Validation of the soil Biological Fertility Index (BFI) using a multidimensional statistical approach: A country-scale exercise. *Catena* **2017**, 149, pp.294-299.

Ristic, R., Radic, B., Milcanovic, V., Maluševic, I. and Polovina, S., Zaštita od erozije kao preduslov razvoja skijališta na Staroj planini. Pirot **2015**. Zb, 40, pp.1-27.

Rolando, J.L., Dubeux Jr, J.C., Ramirez, D.A., Ruiz-Moreno, M., Turin, C., Mares, V., Sollenberger, L.E. and Quiroz, R., Land Use Effects on Soil Fertility and Nutrient Cycling in the Peruvian High-Andean Puna Grasslands. *Soil Science Society of America Journal* **2018**, 82(2), pp.463-474.

Roy, P.S., Ramachandran, R.M., Paul, O., Thakur, P.K., Ravan, S., Behera, M.D., Sarangi, C. and Kanawade, V.P., Anthropogenic land use and land cover changes—A review on its environmental consequences and climate change. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* **2022**, 50(8), pp.1615-1640.

Ruxton, B.P., Measures of the degree of chemical weathering of rocks. *The*

Journal of Geology **1968**, 76(5), pp.518-527.

Sadeghi, A., Salehi, A., Pourbabaei, H., Kooch, Y. Investigation of changes in soil properties in pure and mixed beech type in the western forests of Guilan. *Forest Research and Developmen* 2024, 9 (4), pp. 571-591.

Sadeghi, S.H.R., Khazayi, M. and Mirnia, S.K., Effect of soil surface disturbance on overland flow, sediment yield, and nutrient loss in a hyrcanian deciduous forest stand in Iran. *Catena* **2022**, 218, p.106546.

Sahrawat, K.L., How fertile are semi-arid tropical soils? *Current Science* **2016**, pp.1671-1674.

Scheibe, A., Steffens, C., Seven, J., Jacob, A., Hertel, D., Leuschner, C. and Gleixner, G., Effects of tree identity dominate over tree diversity on the soil microbial community structure. *Soil Biology and Biochemistry* **2015**, 81, pp.219-227.

Shahrivar, A., Noor, H., Khazaei, M, Environmental issues of soil erosion. *Tehran: Arshadan Educational Institute*, **2016**, 151 pages.

Sloan, S. and Sayer, J.A., Forest Resources Assessment of 2015 shows positive global trends but forest loss and degradation persist in poor tropical countries. *Forest Ecology and Management* **2015**, 352, pp.134-145.

Solgi, A., Najafi, A. and Sadeghi, S.H., Effects of traffic frequency and skid trail slope on surface runoff and sediment yield. *International Journal of Forest Engineering* **2014**, 25(2), pp.171-178.

Samec, P., Volánek, J., Holík, L., Rychtecká, P., Balková, M. and Vranová, V., The effect of soil conditions on submountain site suitability for Norway spruce (Picea abies Karst.) in Central Europe. *iForest-Biogeosciences and Forestry* **2023**, 16(4), p.210.

Sun, X., Ye, Y., Ma, Q., Guan, Q. and Jones, D.L., Variation in enzyme activities involved in carbon and nitrogen cycling in rhizosphere and bulk soil after organic mulching. *Rhizosphere* **2021**, 19, p.100376.

Sohrabzadeh, Z. 2024. Analysis of the effect of some shrub covers on soil functional indicators in a semi-arid climate. M.Sc. thesis of Range Management. Tarbiat Modares University, 124p.

Sugihara, S., Funakawa, S., Kilasara, M. and Kosaki, T., Effect of land management and soil texture on seasonal variations in soil microbial biomass in dry tropical agroecosystems in Tanzania. *Applied Soil Ecology* **2010**, 44(1), pp.80-88.

Taghipour, K., Heydari, M., Kooch, Y., Fathizad, H., Heung, B. and Taghizadeh-Mehrjardi, R., Assessing changes in soil quality between protected and degraded forests using digital soil mapping for semiarid oak forests, Iran. *Catena* **2022**, 213, p.106204.

Vinhal-Freitas, I.C., Ferreira, A.S., Corrêa, G.F. and Wendling, B., Land use impact on microbial and biochemical indicators in agroecosystems of the Brazilian Cerrado. *Vadose Zone Journal* **2013**, 12(1), pp.1-8.

Willy, D.K., Muyanga, M., Mbuvi, J. and Jayne, T., The effect of land use change on soil fertility parameters in densely populated areas of Kenya. *Geoderma* **2019**, 343, pp.254-262.

Zhang, W., Yuan, S., Hu, N., Lou, Y. and Wang, S., Predicting soil fauna effect on plant litter decomposition by using boosted regression trees. *Soil Biology and Biochemistry* **2015**, *82*, pp.81-86.

Yaghoubi Khanghahi, M., Murgese, P., Strafella, S. and Crecchio, C., Soil biological fertility and bacterial community response to land use intensity: A case study in the Mediterranean Area. *Diversity* **2019**, 11(11), p.211.