

Aggregate stability and organic carbon distribution in two land uses of pasture and olive orchard : a case study, Rostamabad, Iran

ABSTRACT

Aggregate stability is considered one of the key indicators in evaluating soil structure and is significantly influenced by land use, vegetation cover, and other physical and environmental characteristics of the soil. This study examines aggregate stability indices and aggregate-associated organic carbon in surface soil, as well as the mean weight diameter of aggregates in subsurface soil, across three slope positions. Soil sampling was conducted under two land uses including an olive orchard (with under-canopy and inter-row positions) and the adjacent natural pasture at two depths: 0–10 cm and 30–40 cm. The results of the analysis of variance showed that both land use change and slope position had significant effects on the mean weight diameter, geometric mean diameter, and fractal dimension of aggregates in surface soil. The highest increase in mean weight and geometric mean diameter of aggregates was observed in the under-canopy position of the olive orchard. Additionally, a significant decrease in the fractal dimension of aggregates was found under the olive canopy. In contrast, lower values of mean weight and geometric mean diameter and an increase in fractal dimension were observed in various positions within the pasture and the inter-row spaces. Furthermore, the results regarding the organic carbon associated with surface soil aggregates indicated that larger aggregates are responsible for the stabilization and protection of organic carbon in all three studied sites. The results also confirmed that aggregate stability decreases with increasing soil depth, and this decline was more pronounced in the rangeland area.

key words: land use change, olive orchard, physical properties, soil organic matter

Introduction

The stability of soil aggregates is a key indicator for evaluating soil structure conditions and quality. This indicator is highly influenced by land use type, vegetation cover, soil characteristics, and environmental factors. Land use changes can have significant impacts on the physicochemical properties of soil, including permeability, bulk density, organic matter content, porosity, and aggregate stability. These changes directly affect the soil's ability to maintain health and productivity, playing a fundamental role in the sustainable management of soil resources.

Materials and Methods

The present study investigates the effect of land-use change (natural pasture to olive orchard) and slope position (lower, middle, and upper) on soil aggregate stability indices (mean weight diameter and geometric mean diameter of aggregates and fractal dimension) and aggregate-associated organic carbon. Soil sampling was carried out at two soil depths (0–10 cm and 30–40 cm) in three semi-shade sections (under olive trees), the distance between trees, and natural pasture. Analysis of variance and mean comparison tests using SAS statistical software were used for data analysis. In addition, bulk density, organic matter, electrical conductivity, and soil texture were also measured.

Results and Discussion

The results showed that land-use change and slope position had a significant effect on soil aggregate stability characteristics. The mean weight diameter and geometric mean diameter of aggregates were highest in the semi-shade section under olive trees, while lower values were observed in the natural pasture and the distance between the trees. One of the factors contributing to the higher aggregate stability in the semi-shade section under olive trees could be the increased organic matter inputs from olive trees. Furthermore, the fractal dimension of soil aggregates was lowest in the semi-shade section under olive trees and highest in the inter-tree-spaces and the natural pasture. At the upper slope position, a significant reduction in the mean weight diameter and geometric mean diameter of aggregates was observed. The results also indicated that surface soil organic carbon is

predominantly stabilized and protected by larger aggregates. Finally, the findings revealed that aggregate stability decreased with increasing soil depth, with this trend being more evident in the natural pasture.

Conclusions

The present study confirmed that land-use change from natural pasture to olive orchard, along with different slope positions, has a significant impact on soil stability and quality, particularly on soil aggregate stability and aggregate-associated organic carbon storage. These findings highlight the importance of sustainable land-use management in preventing soil structure degradation and improving soil quality. Specifically, the use of olive trees in this study demonstrated that the semi-shade section under the trees can enhance soil stability and aggregate organic matter storage. It is recommended that land-use changes be carefully studied in soil resource management to minimize soil degradation and ensure the optimal use of soil resources.

Author Contributions

All authors actively participated in the preparation process of this article. The roles of the authors included conceptualization of the research topic, drafting the initial manuscript, and revising and improving subsequent versions. All stages of writing were carried out with close collaboration and thorough reviews to ensure the highest scientific quality of the article.

Data Availability Statement

All reported data in the article have been fully and accurately included in the manuscript, and there is no need for additional information. The data have been organized in a way that provides comprehensive support for the analyses, results, and discussions presented.

Acknowledgements

The authors of this article sincerely thank the Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Guilan, for providing laboratory facilities and supporting fieldwork. The authors would also like to express their special appreciation to the esteemed reviewers who played a significant role in improving the content of the manuscript through their valuable comments and suggestions.

Ethical considerations

The authors have avoided any form of data fabrication, falsification, plagiarism, or unethical behavior.

پایداری خاکدانه‌ها و توزیع کربن آلی در دو کاربری مرتع و باغ زیتون: مطالعه

موردی، رستم آباد، ایران

چکیده

پایداری خاکدانه یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی وضعیت ساختمان خاک به‌شمار می‌رود و به طور قابل توجه تحت تأثیر نوع کاربری اراضی، پوشش گیاهی و سایر ویژگی‌های فیزیکی و محیطی خاک قرار می‌گیرد. این مطالعه به بررسی شاخص‌های پایداری خاکدانه و کربن آلی مرتبط با خاکدانه در خاک سطحی و همچنین میانگین وزنی قطر خاکدانه در خاک زیرسطحی در سه موقعیت شیب پرداخته است. نمونه‌برداری از خاک در دو کاربری شامل باغ زیتون (شامل نیم‌سایه انداز و فاصله بین درختان) و مرتع طبیعی مجاور آن از دو عمق صفر تا ۱۰ و ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر انجام شد. نتایج تحلیل واریانس نشان داد که تغییر کاربری اراضی و موقعیت شیب، تأثیر معناداری بر میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها و همچنین بعد فرکتال آن‌ها در خاک سطحی دارد. در نقاط نمونه‌برداری مرتبط با نیم‌سایه انداز درخت زیتون، بیشترین افزایش در میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها مشاهده شد. همچنین، بعد فرکتال خاکدانه‌ها در نیم‌سایه انداز درخت زیتون کاهش معناداری را نشان داد. در مقابل در نقاط مختلف مرتع و فاصله بین درختان، میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه با کاهش مواجه شد و در پی آن بعد فرکتال افزایش یافت. علاوه بر این نتایج بررسی وضعیت کربن آلی خاک سطحی در خاکدانه‌ها نشان داد که نسبت خاکدانه‌های بزرگ در خاک مسئول تثبیت و حفاظت از کربن آلی در هر سه محل مورد بررسی را دارد. همچنین نتایج این موضوع را تایید کرد که با افزایش عمق خاک پایداری خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد که این کاهش در قسمت مرتع محسوس‌تر بود.

کلیدواژه‌ها: باغ زیتون، پایداری خاکدانه، کربن خاکدانه‌ها، کاربری اراضی

مجله علمی نشریه

مقدمه

کاربری اراضی به عنوان مجموعه‌ای از اقدامات، فعالیت‌ها و ورودی‌هایی تعریف می‌شود که افراد در یک نوع پوشش زمینی خاص انجام می‌دهند تا آن را تولید، تغییر یا حفظ کنند (Ufot et al., 2016). شیوه‌های مختلف کاربری اراضی، تأثیر قابل توجه‌ای بر ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی خاک و بهره‌وری کشاورزی دارند (Chimdi et al., 2012). تخریب اراضی، اثرات جدی بر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک، به ویژه نفوذپذیری، جرم مخصوص ظاهری، مواد آلی، تخلخل و پایداری خاکدانه‌های خاک دارد و منجر به تراکم و فرسایش می‌شود. این مسئله، پیامدهایی برای تولید مواد غذایی، تهدیدات سلامت و اکوسیستم به دنبال دارد (Joseph et al., 2019). سرعت تخریب کیفیت خاک به سیستم‌های کاربری اراضی، انواع خاک، توپوگرافی و شرایط اقلیمی بستگی دارد (Bore & Bedadi, 2015). هم عمق خاک و هم انواع کاربری اراضی بر تنوع جغرافیایی حاصلخیزی خاک، از مقیاس مزرعه تا مناطق وسیع‌تر، تأثیرگذار هستند و آشکارسازی تغییرپذیری مکانی حاصلخیزی خاک و عوامل مؤثر بر آن، برای بهبود راهبردهای پایدار کاربری اراضی، اهمیت دارد (Chemeda et al., 2017). اثر کاربری اراضی در تغییر ویژگی‌های شیمیایی خاک در مطالعات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج یک مطالعه نشان داد که کربن آلی خاک تحت تأثیر نوع کاربری اراضی، عمق خاک و اثر متقابل این دو عامل قرار دارد، درحالی‌که ویژگی‌های نیتروژن کل، فسفر قابل دسترس و ظرفیت تبادل کاتیونی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر هر دو عامل کاربری اراضی و عمق خاک قرار داشتند. همچنین نتایج مطالعه نشان داد که بالاترین اسیدیته، قابلیت هدایت الکتریکی، نیتروژن کل، ظرفیت تبادل کاتیونی در کاربری جنگلی طبیعی مشاهده شد، درحالی‌که کمترین مقادیر این پارامترها در کاربری زراعی مشاهده گردید (Asmare et al., 2023). در مقابل گیسین و همکاران (Geissen et al., 2009) در منطقه جنگل‌های مرتفع پرو (جنگل آمازون) و لیندل و همکاران (Lindell et al., 2010) در خاک‌های مختلف در جنوب شرقی مناطق گرمسیری مکزیک به این نتیجه رسیدند که تغییر کاربری زمین منجر به تغییرات چشمگیری در ویژگی‌های شیمیایی خاک نمی‌شود.

با توجه به پژوهش‌های فراوان انجام شده در مورد اثر کاربری اراضی در تغییر ویژگی‌های شیمیایی خاک، نتایج دیگر پژوهش‌ها نشان داده است، انواع مختلف کاربری اراضی به دلیل تفاوت در پوشش گیاهی و مدیریت خاک باعث تغییر در جمعیت جانوران خاکی، میکروارگانیسم‌ها و مواد آلی سطح خاک می‌شوند که این موضوع به تفاوت در ویژگی‌های خاک و پایداری خاکدانه‌ها منجر می‌شود (Pihlap et al., 2021; Zhu et al., 2018). مطالعات نشان داده است که تشکیل و تخریب خاکدانه‌ها، کیفیت خاک را تنظیم می‌کند و پایداری آن‌ها به سرعت به تغییر کاربری اراضی واکنش نشان می‌دهد (Nie et al., 2014). خاکدانه‌ها در خاک، واحدهای عملکردی تشکیل‌دهنده ساختمان خاک هستند که بر فرآیندهای فیزیکی و بیولوژیکی شیمیایی آن اثر می‌گذارد (Wang et al., 2022). این موضوع با وجود بحث‌های جاری در باره کاربری این مفهوم، همچنان اهمیت دارد (Kravchenko et al., 2019). در این راستا، پایداری خاکدانه‌ها در خاک یا توانایی خاک در حفظ ساختمان خود در برابر نیروهای خارجی مانند باران، آبیاری، تراکم حیوانی و مکانیکی، اصلی‌ترین ویژگی فیزیکی است که فرسایش‌پذیری را تنظیم می‌کند (De Ploey & Poesen, 2020) و شاخص مهمی از کیفیت خاک به شمار می‌رود (Hamel et al., 2021). در نتیجه، بررسی شاخص‌های نشان دهنده وضعیت خاکدانه‌ها در تغییر کاربری اراضی می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد و از نمونه‌های آن می‌توان به پژوهش تانگ و همکاران (Tang et al., 2022) اشاره کرد که نتایج آن نشان داد در مقایسه با اراضی تحت تأثیر فرسایش شیاری، میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها در اراضی درخت‌کاری و برنج‌کاری شده به طور معنی‌داری افزایش یافته است، در حالی که بعد فرکتال خاکدانه‌ها در این کاربری‌ها کاهش یافته است. نتایج نشان داد که عمق خاک بر ویژگی‌های خاکدانه‌ها در اراضی درخت‌کاری شده و مرتفع تأثیر معناداری دارد، اما در اراضی تحت فرسایش شیاری و برنج‌کاری شده چنین تأثیری مشاهده نشد. در مطالعه دیگری که در فریدون شهر استان اصفهان انجام شد، نتایج نشان داد که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها می‌تواند تحت تأثیر موقعیت شیب باشد و مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در موقعیت انتهایی شیب به طور معنی‌داری بیشتر از موقعیت شانه شیب است (ناهیدان و همکاران ۱۳۹۴). علاوه بر بحث اهمیت پایداری، خاکدانه‌ها نقش مهمی در تثبیت کربن آلی و نگهداری آب و مواد مغذی دارند، به‌طوری‌که گیاهان و میکروب‌ها می‌توانند از آن‌ها استفاده کنند (Angst et al., 2017). خاکدانه‌ها در خاک اثر محافظتی فیزیکی بر کربن آلی خاک اعمال می‌کنند و ساختار منافذ درون آن‌ها، تسهیل‌کننده‌ی

ترسیب و تثبیت کربن آلی است (Chen et al., 2025). خاکدانه‌ها معمولاً بر اساس اندازه به سه دسته تقسیم می‌شوند: خاکدانه‌های کوچک (کوچک‌تر از ۲۵۰ میکرومتر)، خاکدانه‌های متوسط (۲۵۰ تا ۲۰۰۰ میکرومتر) و خاکدانه‌های بزرگ (بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ میکرومتر) (Tisdall & OADES, 1982). مطالعات متعددی توزیع اندازه خاکدانه (Zhong et al., 2021) و کربن آلی مرتبط با خاکدانه (Nie et al., 2018) را در انواع کاربری اراضی مختلف بررسی کرده‌اند. مطالعات، ارتباطی بین میزان خاکدانه‌ها و میزان کربن آلی و نیتروژن موجود در خاک را نشان داده‌اند (Wang et al., 2024). برخی مطالعات، همبستگی مثبت معناداری بین میزان خاکدانه‌های بزرگ و میزان کربن آلی و نیتروژن کل خاک نشان داده‌اند (Bai et al., 2024). علاوه بر این، مشخص شده است که خاکدانه‌های بزرگ، اثر مثبتی بر تجمع میکروب‌ها در خاک دارند (Chen et al., 2025). در یک مطالعه پایداری خاکدانه‌ها و همچنین وضعیت کربن در خاکدانه‌ها در کاربری‌های متفاوت زمین مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که خاکدانه‌های بزرگ بین ۸۶ تا ۹۳ درصد از کل خاکدانه‌های خاک را در تمامی انواع کاربری اراضی به جز در زمین‌های خشک (۶۴ درصد) و زمین‌های شالیزاری (۳۵ درصد) تشکیل می‌دهند (Dorji et al., 2020). همچنین نتایج حاکی از این بود که شاخص پایداری خاکدانه‌ها در انواع مختلف کاربری اراضی متفاوت است و بیشترین پایداری در کاربری‌های کشت صنوبر و بوته‌زار و کمترین پایداری در کاربری‌های زمین‌های خشک و اراضی شالیزاری یافت شده است. به علاوه میزان کربن آلی مرتبط با خاکدانه‌ها در خاکدانه‌های بزرگ ۷۶ تا ۹۰ درصد از کل کربن ذخیره شده در خاکدانه‌ها را در تمامی انواع کاربری اراضی به جز در زمین‌های خشک (۶۵ درصد) و زمین‌های شالیزاری (۳۸ درصد) شامل می‌شود. در نتیجه این یافته‌ها نشان می‌دهند که خاکدانه‌ها نقش مهمی در شکل‌گیری ساختمان خاک و تغییرات عملکردهای اکولوژیکی آن دارند (Zhang et al., 2024). در مطالعه‌ای که توسط اوکالو و همکاران (Okolo et al., 2020) در کاربری‌های جنگل، علفزار، مرتع محصور و اراضی زراعی انجام شد، مشخص گردید که در تمام این کاربری‌ها، میزان کربن آلی خاک در خاکدانه‌های کوچک بیشتر از سایر اندازه‌ها است و این یافته به تفاوت در توانایی گونه‌های مختلف درختی و گیاهی برای جذب کربن نسبت داده شد (Guo et al., 2007). در نهایت با توجه به نقش اساسی پایداری خاکدانه‌ها و کربن آلی مرتبط با آن‌ها در تغییر عملکردهای مختلف خاک، بررسی این دو موضوع در کاربری‌های مختلف اراضی از اهمیت زیادی برخوردار است. تغییرات در کاربری و پوشش اراضی چرخه‌های بیوژئوشیمیایی و تعادل انرژی زمین را تغییر می‌دهد و منجر به تغییر خدمات اکوسیستم و ویژگی‌های سطح زمین می‌شود (Afuye et al., 2024). در این رابطه، بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی در اکوسیستم‌های مرتعی می‌تواند بسیار مورد اهمیت باشد، زیرا مراتع بیش از ۳۰ درصد از سطح زمین و بیش از دو برابر سطح زمین‌های زراعی (Lemaire et al., 2011) در سراسر جهان را شامل می‌شوند.

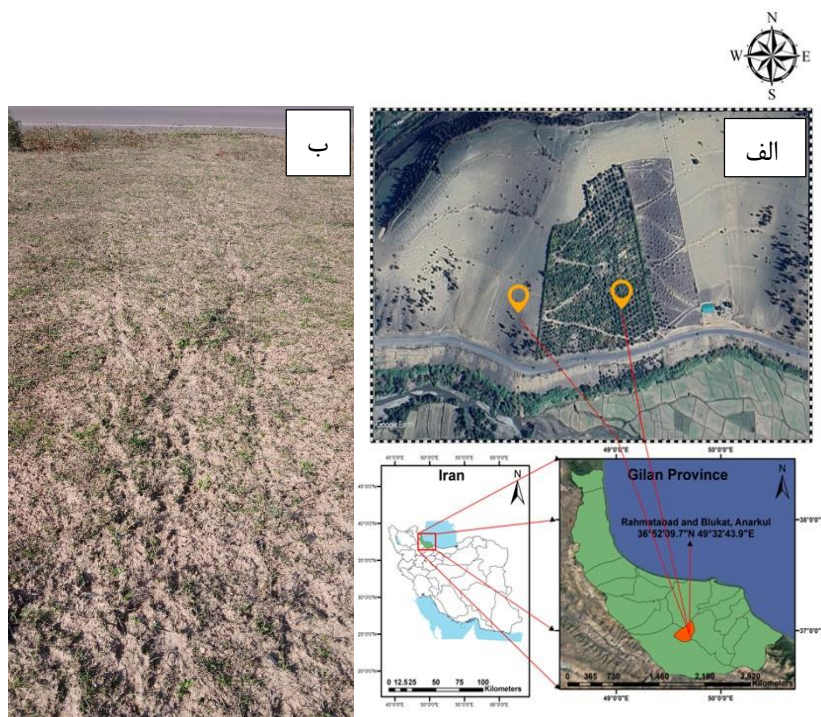
کشت درختان زیتون (*Olea europaea*) در منطقه رودبار استان گیلان با تغییر کاربری اراضی مرتعی همراه است که تاکنون تحقیقات جامعی در مورد اثر تغییر کاربری اراضی مرتعی به باغ زیتون و اثرات احتمالی آن در تغییر ویژگی‌های خاک و به‌ویژه خاکدانه‌ها در این منطقه انجام نشده است. مشخصه مهم مرتع طبیعی مورد بررسی در این پژوهش این است که از نوع غیرمشجر بوده و در فصل چرا به صورت آزادانه برای چرای دام از آن استفاده می‌شود و به علت استفاده نامناسب و چرای دام بیش از حد مجاز، با تخریب مواجه شده و در معرض فرسایش شدید و تولید رواناب قرار دارد. با توجه به این موضوع، هدف از این مطالعه عبارتند از: (۱) بررسی و مقایسه بین شاخص‌های مختلف پایداری خاکدانه‌ها در کاربری مرتع و باغ زیتون و موقعیت شیب متفاوت (۲) بررسی وضعیت کربن در نسبت‌های مختلف خاکدانه‌ها (۳) بررسی تغییر پایداری خاکدانه‌ها با تغییر عمق خاک در کاربری‌های مرتع و باغ زیتون.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه بر روی یک باغ زیتون با سن تقریبی ۲۵ سال با مختصات جغرافیایی ۳۶ درجه، ۵۲ دقیقه، ۰۹/۳۷ ثانیه شمالی و ۴۹ درجه، ۳۲ دقیقه، ۴۱/۸۸ ثانیه شرقی و یک مرتع طبیعی در کنار آن با مختصات جغرافیایی ۳۶ درجه، ۵۲ دقیقه، ۱۳/۷۶ ثانیه شمالی و ۴۹ درجه، ۳۲ دقیقه، ۳۷/۵۲ ثانیه شرقی در شهرستان رودبار - شهر رستم آباد انجام شده است (شکل ۱- الف). هر دو

کاربری مرتع و باغ زیتون در نقاط نمونه‌برداری دارای شیب حدوداً ۵۰ درصد می‌باشند. باغ زیتون دارای سیستم آبیاری قطره‌ای و سیستم کوددهی آن از نوع چال کود بود. گونه‌های گیاهی غالب در مرتع مورد مطالعه شامل گیاه خودرو زولنگ (*Eryngium campestre*) و بوته‌های پراکنده گیاه هندوانه ابوجهل (*Citrullus colocynthis*) است و علاوه بر این نشانه‌های واضحی از فرسایش شیاری در آن مشاهده می‌شود (شکل ۱-ب).

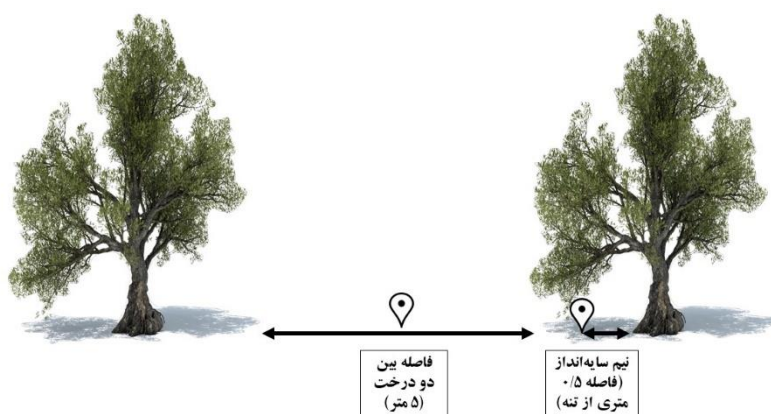


شکل ۱. الف) منطقه مورد مطالعه ب) فرسایش شیاری در مرتع طبیعی مورد مطالعه

روش نمونه برداری

در این مطالعه، نمونه‌های خاک از سه بخش مختلف شامل: (۱) نیم سایه‌انداز زیر درختان زیتون، (۲) فاصله کشت بین دو درخت زیتون و (۳) مرتع طبیعی مجاور برداشت شد و هر کدام از این بخش‌ها دارای سه موقعیت شیب زمین شامل پایین شیب (نقاط DS1-DS2-DS3)، میانه شیب (نقاط MS1-MS2-MS3) و بالای شیب (نقاط US1-US2-US3) بود. در مجموع، از ۱۸ نقطه در باغ زیتون نمونه‌برداری با سه تکرار انجام شد که ۹ نقطه مربوط به نیم سایه‌انداز درختان زیتون (۲۷ نمونه) و ۹ نقطه دیگر مربوط به فاصله بین درختان زیتون (۲۷ نمونه) بود. باغ زیتون مورد مطالعه دارای الگوی کشت ۵×۵ متر بود که الگوی رایج در اکثر باغ‌های زیتون منطقه محسوب می‌شود. نمونه‌برداری در نیم سایه‌انداز درختان از فاصله ۵۰ سانتی‌متری تنه اصلی درخت و در فاصله بین دو درخت از ۲۵۰ سانتی‌متری تنه درخت انجام شد (شکل ۲). برای مرتع طبیعی نیز ۹ نقطه نمونه‌برداری با سه تکرار در نظر گرفته شد (۲۷ نمونه) و سعی شد الگوی نمونه‌برداری مشابه باغ زیتون در این منطقه نیز رعایت شود.

عمق نمونه‌برداری در هر سه محل، صفر تا ۱۰ و ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر بود و خاک‌های مورد مطالعه به دو صورت دست‌خورده و دست‌نخورده برداشت شدند. پس از نمونه‌برداری، کلیه نمونه‌های خاک به صورت کاملاً بسته‌بندی شده به آزمایشگاه منتقل شدند. در آزمایشگاه، بسته به نوع آزمون، نمونه‌ها یا در آون و یا در هوای آزاد خشک شدند و سپس برای بررسی خصوصیات مختلف خاک مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل ۲. نمایی از الگوی نمونه برداری در باغ زیتون

آنالیز خاک

در این پژوهش، برای نمونه خاک‌های برداشت شده از عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متر، بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتری (Gee & Or, 2002)، مقدار پایداری خاکدانه‌ها به روش الک مرطوب (Nimmo & Perkins, 2002)، بعد فرکتال به وسیله داده‌های پایداری خاکدانه‌ها و از مدل تعداد-اندازه (MandelbrotB & Mandelbrot, 1982)، اسیدیت و قابلیت هدایت الکتریکی با استفاده از نسبت خاک به آب (۱ به ۲/۵) (van Reeuwijk, 1995) و مقدار کربن آلی خاک با روش والکی-بلاک (Walkley & Black, 1934) اندازه‌گیری شد.

در نمونه‌های برداشت شده از عمق ۳۰-۴۰ سانتی‌متر فقط آنالیز ماده آلی و پایداری خاکدانه‌های خاک انجام شد. برای تعیین پایداری خاکدانه‌ها از روش الک مرطوب مقدار ۱۰۰ گرم نمونه خاک از الک ۶ میلی‌متری عبور داده شد و سپس به مدت ۲۴ ساعت و به صورت آهسته مرطوب شد. سپس این خاکدانه‌ها بر روی یک سری الک به قطرهای ۴، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱ میلی‌متری قرار گرفت و مجموعه الک‌ها به مدت ۱۰ دقیقه با سیکل عمودی ۳۰ بار در دقیقه در آب الک شدند. همچنین برای تصحیح مقدار شن، پس از خشک و وزن کردن خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک، نمونه‌های باقی‌مانده روی الک ۰/۰۵۳ میلی‌متر شسته شدند تا بخش‌های آن‌ها جدا شود و این وزن‌ها قبل از محاسبه پایداری خاکدانه از وزن خاکدانه‌ها کسر شد. بعد از وزن شدن خاکدانه‌های خشک برای تعیین میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها و بعد فرکتال، اجزای خاکدانه‌های تفکیک شده به دو بخش خاکدانه‌های بزرگ در اندازه ۴-۲ میلی‌متر و خاکدانه‌های متوسط در اندازه ۰/۲۵ - ۲ میلی‌متر تقسیم شدند و این نمونه‌ها مورد آنالیز تعیین کربن آلی قرار گرفتند (Cambardella & Elliott, 1993).

مقدار میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها با استفاده از رابطه ۲ و ۳ تعیین شد.

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad \text{رابطه ۲}$$

$$GMD = \exp \left[\frac{(\sum_{i=1}^n w_i \ln x_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad \text{رابطه ۳}$$

که در روابط بالا، MWD و GMD: به ترتیب میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها (میلی متر)، X_i : میانگین قطر خاکدانه‌هایی که بر روی هر الک باقی مانده است (میانگین الک بالا و پایین) (میلی متر) و W_i : جرم خشک خاکدانه‌ها در هر کلاس اندازه (گرم) و n : تعداد الک به کار برده شده و i : شاخص اندازه کلاس می‌باشد. همچنین با استفاده از داده‌های مرتبط با میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، بعد فرکتال خاک با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه شد.

بعد فرکتال خاکدانه‌ها توسط رابطه ۴ و بر اساس مدل تعداد-اندازه محاسبه شد (MandelbrotB & Mandelbrot, 1982):

$$N > x = k x^{-D} \quad \text{رابطه ۴}$$

که در رابطه بالا $N > x$: تعداد تجمعی خاکدانه‌های بزرگ‌تر از x و k عدد ثابت است. برای تعیین خاکدانه‌های باقیمانده روی الک، وزن خاکدانه‌های روی الک به وزن هر خاکدانه تقسیم خواهد شد و برای محاسبه وزن خاکدانه مکعبی و کروی، به ترتیب از رابطه ۵ و ۶ استفاده شد:

$$M = \rho x^3 \quad \text{رابطه ۵}$$

$$N > x = k x^{-D} \quad \text{رابطه ۶}$$

که در روابط بالا: ρ : چگالی، M : جرم و X : قطر خاکدانه است. با فرض ثابت بودن چگالی خاکدانه‌ها در تمام الک‌ها، برای محاسبه خاکدانه‌های مکعبی و کروی به ترتیب از رابطه ۵ و ۶ استفاده شد:

$$\frac{1}{\rho} \sum_{x=1}^x \frac{M(x)}{x^3} = k x^{-D} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$\frac{6}{\pi \rho} \sum_{x=1}^x \frac{M(x)}{x^3} = k x^{-D} \quad \text{رابطه ۶}$$

علاوه بر این رابطه کلی زیر (رابطه ۷) که نخستین بار توسط تایلر و ویتکرافت (Tyler & Wheatcraft, 1992) ارائه شد، برای خاکدانه‌ها به کار گرفته شده است:

$$\sum_{x=1}^x \frac{M(x)}{x^3} = k x^{-D} \quad \text{رابطه ۷}$$

که در این رابطه $\log \left[\frac{M(x)}{x^3} \right]$ در مقابل $\log x$ رسم گردد، شیب خط بدست آمده، مقدار بعد فرکتال خاکدانه‌ها را محاسبه کرد.

آنالیز آماری

این آزمایش به صورت کرت خرد شده در قالب بلوک کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. جهت بررسی نتایج حاصل از داده‌های مربوط به صفات مورد اندازه‌گیری از نرم افزار SAS نسخه ۹٫۱ استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها از طریق آزمون توکی در سطح احتمال یک و پنج درصد مورد مقایسه قرار گرفتند. همچنین رسم نمودارها در نرم افزار Excel انجام گرفت. برای تجزیه و تحلیل وضعیت کربن آلی در نسبت‌های متفاوت خاکدانه‌ها در هر کاربری نیز از طرح اسپلیت فاکتوریل در قالب بلوک استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های اولیه خاک مورد مطالعه در این پژوهش در جدول ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار ماده آلی خاک در هر دو عمق نمونه‌برداری در کاربری باغ زیتون و در قسمت نیم‌سایه انداز درختان بیشترین مقدار را دارد و بعد از آن به ترتیب بخش فاصله بین درختان و مرتع طبیعی قرار دارد. مطالعات نشان داده است که در مقایسه با کشت گیاهان علفی فصلی، خاک زیر کشت گونه‌های چوبی مانند درختان و درختچه‌ها کمتر دچار آشفته‌گی شده و اغلب بقایای هرس خردشده به آن اضافه می‌شود که این امر منبع قابل توجه از کربن را وارد خاک می‌کند (Montanaro et al., 2010). علاوه بر این، گیاهان چوبی چندساله می‌توانند از طریق ترشحات ریشه و تجدید چرخه ریشه‌ها مانند مرگ و جایگزینی ریشه‌ها، میزان کربن آلی خاک را در لایه‌های عمیق‌تر نیز افزایش دهند (Agnelli et al., 2014). قابلیت هدایت الکتریکی در مرتع طبیعی نسبت به بخش نیم‌سایه انداز و فاصله بین درختان در باغ زیتون کمتر است و میزان واکنش خاک در باغ زیتون در هر دو بخش نمونه‌برداری کمتر از مرتع طبیعی است. کاهش میزان واکنش خاک در باغ زیتون می‌تواند به علت افزایش مقدار ماده آلی در این کاربری نسبت به مرتع طبیعی باشد همانطور که در مطالعات نیز به آن اشاره شده است، مقدار کربن آلی کل و اسیدیته خاک در مقیاس‌های مختلف معمولاً همبستگی منفی دارند و دلیل آن این است که مواد آلی هنگام تجزیه، اسیدهای آلی آزاد می‌کنند که باعث کاهش مقدار اسیدیته خاک می‌شود (Xu & Zhang, 2021). از نظر بافت خاک، در هر دو بخش نمونه‌برداری در باغ زیتون نسبت به مرتع طبیعی مقدار رس خاک بیشتر و در نتیجه بافت خاک در گروه بافت سنگین قرار دارد. علت وجود بیشترین میزان رس در کاربری باغ زیتون احتمالاً

به دلیل پوشش گیاهی و کاهش نرخ فرسایش خاک در این کاربری است که باعث می‌شود ذرات رس در خاک دچار کاهش و فرسایش نشوند (Ufot et al., 2016) علاوه بر این مدیریت شدید خاک که باعث فرآیندهای هوازدگی بیشتر می‌شود (Negasa et al., 2017) می‌تواند دلیل احتمالی افزایش مقدار رس در کاربری باغ زیتون باشد.

جدول ۱. میانگین برخی از ویژگی‌های خاک در کاربری‌های مورد مطالعه

کاربری	ماده آلی (درصد)	قابلیت هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	واکنش خاک	بافت خاک (درصد)
—	عمق ۳۰-۴۰ عمق ۱۰	عمق ۰-۱۰	عمق ۰-۱۰	عمق ۰-۱۰
نیم سایه انداز درختان زیتون	۵/۵۴	۱/۹۵	۱/۰۲	۷/۱۵
فاصله بین درختان	۲/۵۳	۱/۴۱	۰/۵۸	۷/۴۴
مرتع طبیعی	۱/۸۴	۱/۲۲	۰/۷۷	۷/۵۵

بررسی اثر تغییر کاربری بر ویژگی‌های مرتبط با خاکدانه‌ها در خاک سطحی

نتایج تجزیه واریانس اثر تغییر مرتع طبیعی به باغ زیتون در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۲. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تغییر کاربری از مرتع طبیعی به باغ زیتون در شاخص‌های پایداری خاکدانه

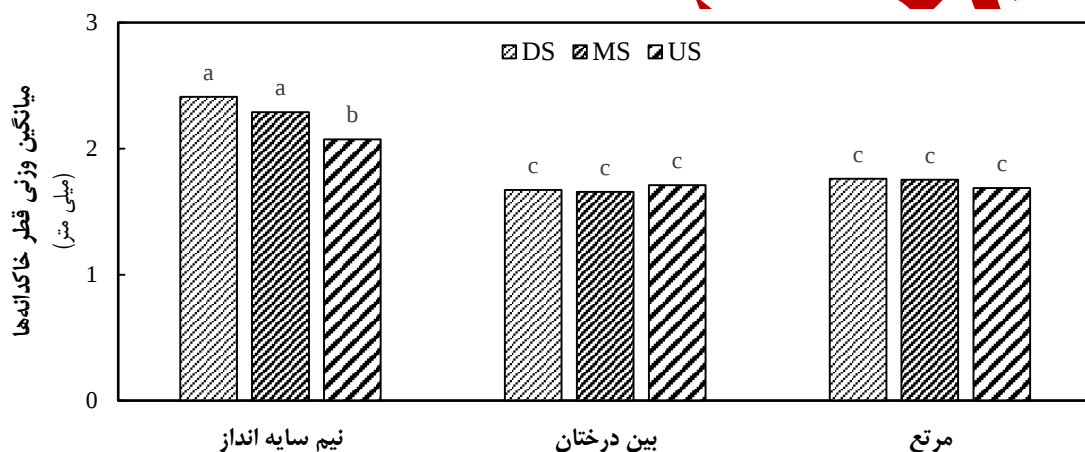
منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین وزنی قطر خاکدانه	میانگین هندسی قطر خاکدانه	بعد فرکتال	میانگین وزنی قطر خاکدانه
—	—	عمق: ۰-۱۰	عمق: ۰-۱۰	عمق: ۰-۱۰	عمق: ۳۰-۴۰
بلوک	۲	۰/۰۰۰۸ ^{ns}	۰/۰۰۴۷ ^{ns}	۰/۰۰۱۹ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}
کاربری	۲	۰/۹۱۵ ^{**}	۰/۵۸۷ ^{**}	۰/۰۷۴ ^{**}	۰/۱۵۰ ^{**}
خطای کرت اصلی	۴	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۳
موقعیت شیب	۲	۰/۰۳۵ ^{**}	۰/۰۱۰ ^{**}	۰/۰۰۳۳ ^{**}	۰/۰۳۳ ^{**}
کاربری × موقعیت شیب	۴	۰/۰۲۹ ^{**}	۰/۰۱۷ ^{**}	۰/۰۰۲۰ ^{**}	۰/۰۱۴ ^{**}
خطای باقیمانده	۱۲	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۱
ضریب تغییرات	—	۲/۸۶	۲/۴۷	۰/۲۱	۰/۹۷

ns، * و ** به ترتیب بیانگر غیر معنی دار، معنی دار بودن در سطح پنج و یک درصد می‌باشد.

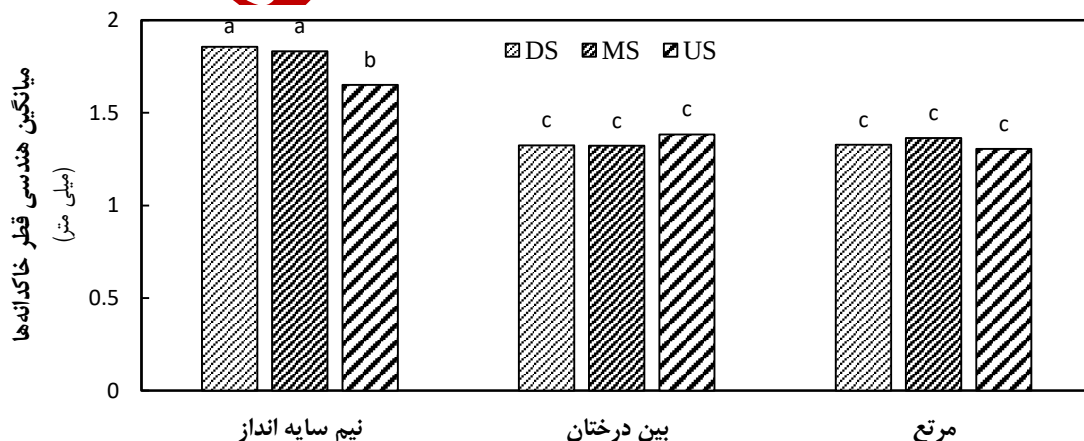
میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه

نتایج آنالیز آماری (جدول ۲) نشان داد که اثر کاربری، موقعیت شیب و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها معنی‌دار ($p < 0.01$) بود. نتایج نشان داد که تغییر کاربری زمین از مرتع طبیعی به باغ زیتون باعث افزایش معنی‌دار مقدار میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها در زیر نیم سایه انداز درختان زیتون می‌شود (به ترتیب شکل ۳ و ۴). میانگین وزنی قطر خاکدانه در دو موقعیت شیب پایین و میانه اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند اما مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه در موقعیت شیب بالا به طور معنی‌داری کاهش یافت. همچنین میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها در بخش نیم‌سایه انداز درختان زیتون، دارای الگوی تغییرات مشابه میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها بود و در موقعیت شیب پایین بیشترین مقدار و در موقعیت شیب بالا به طور معنی‌داری مقدار آن کاهش یافت.

نتایج نشان داد که در دو بخش مرتع طبیعی و بین درختان اختلاف معنی‌داری بین موقعیت‌های مختلف شیب وجود ندارد و به طور کلی این دو بخش در همه موقعیت‌های شیب مورد بررسی به طور معنی‌داری دارای میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه کمتر نسبت به بخش نیم سایه انداز درختان زیتون هستند.



شکل ۳. اثر متقابل کاربری در موقعیت شیب بر میانگین وزنی قطر خاکدانه - US موقعیت شیب بالا، MS موقعیت شیب میانه و DS موقعیت شیب پایین. حروف مشترک بیاگر تفاوت غیرمعنی‌دار در سطح احتمال یک درصد می‌باشد.



شکل ۴. اثر متقابل کاربری در موقعیت شیب بر میانگین هندسی قطر خاکدانه - US موقعیت شیب بالا، MS موقعیت شیب میانه و DS موقعیت شیب پایین. حروف مشترک بیاگر تفاوت غیرمعنی‌دار در سطح احتمال یک درصد می‌باشد.

تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که تغییر کاربری اراضی به طور چشمگیری بر الگوهای خاکدانه‌سازی و پایداری خاکدانه‌ها تأثیر می‌گذارد (Manpoong et al., 2025). دورچی و همکاران (Dorji et al., 2020) دریافتند که در غرب بوتان، پایداری خاکدانه‌ها در جنگل‌های صنوبر بالاترین میزان را دارد و پس از آن، به ترتیب، بوته‌زار، چمنزار طبیعی، باغ، کاج آبی، جنگل پهن‌برگ، جنگل مخروطی مختلط، زمین خشک و شالیزار قرار دارند. در مطالعه دیگری شاخص‌های میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها در تغییر کاربری اراضی مورد بررسی قرار گرفت (Feng et al., 2024) و نتایج نشان داد که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های خاک در کاربری‌های جنگل ثانویه و اراضی کنار رودخانه‌ای به‌طور معنی‌داری بیشتر از کاربری‌های مرتع و اراضی زراعی است. در مقابل، میانگین هندسی قطر خاکدانه‌های خاک در اراضی کنار رودخانه‌ای بیشترین مقدار را داشت و در کاربری جنگل ثانویه به طور معنی‌داری بیشتر از کاربری اراضی باغی بود.

مقادیر بالاتر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در موقعیت شیب پایین در نتایج مطالعات دیگر نیز یافت شده است. به عنوان مثال در مطالعه بنگ و همکاران (Peng et al., 2024) مشخص شد که مقدار میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها به طور معنی‌داری در موقعیت شیب انتهایی بیشتر از موقعیت‌های شیب میانه و پایین در خاک سطحی است. یکی از دلایل مهم ایجاد این تغییرات می‌تواند مقدار ماده آلی خاک باشد. مطالعات نشان داده است که خرد شدن خاکدانه‌های بزرگ خاک بر اثر فرسایش می‌تواند منجر به آزاد شدن کربن و نیتروژن محبوس شده در داخل آن‌ها و متعاقباً جابجایی آن‌ها به سمت پایین شیب توسط رواناب شود (Tang et al., 2022). علاوه بر این، فعالیت میکروبی کمتر ناشی از شرایط بی‌هوازی در موقعیت‌های پایین‌تر شیب، ممکن است باعث ایجاد مقدار ماده آلی خاک بیشتری شود (X. Zhang et al., 2021). که این عوامل در کنار یکدیگر می‌تواند یکی از دلایل افزایش بیشتر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در موقعیت‌های پایین شیب بخش نیم‌سایه انداز درختان زیتون در این مطالعه باشد. در مقابل برای بخش‌های فاصله بین درختان زیتون و مرتع طبیعی هیچ روند ثابتی برای تغییر موقعیت شیب یافت نشد که این موضوع ممکن است به علت در هم ریختگی مداوم خاک ناشی از حرکت انسان در بین درختان زیتون و حرکت دام در مرتع طبیعی باشد.

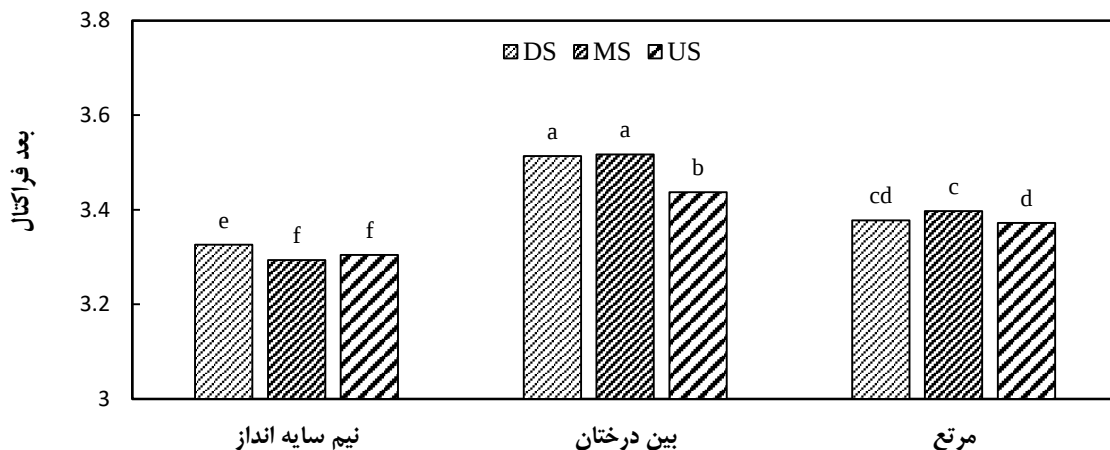
مطالعات نشان داده‌اند که خاک زیر پوشش درختان بیشترین مقدار بستر گیاهی را نسبت به سایر کاربری‌ها دارد (Cheng et al., 2023). بستر گیاهی، به عنوان نوعی ماده آلی، با افزایش مواد آلی خاک، پایداری خاکدانه‌های مقاوم در آب را تقویت می‌کند (Feng JiaYi et al., 2018). در فرآیند تجزیه بستر گیاهی، مواد مغذی برای بی‌مهرگان و میکروارگانیسم‌ها فراهم می‌شود و این میکروارگانیسم‌ها از طریق تولید پلی‌ساکاریدهای چسبنده، به تشکیل و پایداری خاکدانه‌های بزرگ‌تر کمک می‌کنند (Cheng et al., 2023). همچنین، خاصیت آبریزی مواد آلی، حفظ و پایداری این خاکدانه‌ها را تسهیل می‌کند و از تجزیه سریع آن‌ها جلوگیری می‌نماید (Sullivan, 1990; Wu et al., 2023).

در نتیجه از دلایل افزایش پایداری خاکدانه‌ها در بخش نیم‌سایه انداز درختان زیتون در این پژوهش، ممکن است به دلیل افزایش ماده آلی خاک در این بخش باشد. بر اساس نتایج یک مطالعه، باغات زیتون از روش‌های مختلف مانند بقایای هرس، زیتون‌ها و برگ‌های ریخته/تنک شده، بقایای پوشش گیاهی و بقایای حاصل از تولید روغن زیتون می‌توانند باعث تشکیل ماده آلی در خاک شوند (Addesso et al., 2025). اما در مقابل چرای شدید دام در مرتع مورد بررسی و فشردگی ناشی از حرکت انسان در فاصله بین درختان برای مدیریت باغ زیتون ممکن است باعث کاهش ماده آلی و افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک در این بخش‌ها شود که ممکن است که پایداری خاکدانه‌ها را کاهش دهد. مطالعات نشان داده است در سامانه‌های مرتعی که به صورت فشرده مدیریت می‌شوند، لگدکوبی سنگین دام، به ویژه در معابر و محل‌های استراحت، منجر به افزایش فشردگی خاک می‌گردد (De Rosa et al., 2020). این فشردگی در مراتع، ویژگی‌های مهمی از خاک نظیر چگالی ظاهری، هدایت هیدرولیکی، تهویه، حجم منافذ بزرگ و مقاومت خاک به نفوذ را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Hamza & Anderson, 2005).

شاخص بعد فرکتال خاکدانه‌ها

همچنین نتایج آنالیز آماری (جدول ۲) نشان داد که اثر کاربری، موقعیت شیب و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر بعد فرکتال خاکدانه‌ها

نیز معنی‌دار بود. به طور کلی نتایج نشان داد که تغییر کاربری زمین از مرتع طبیعی به باغ زیتون باعث کاهش معنی‌دار مقدار بعد فرکتال خاکدانه‌ها در نیم سایه انداز نسبت به فاصله بین درختان و مرتع طبیعی می‌شود (شکل ۵). نتایج نشان داد که در کاربری باغ زیتون و در هر دو بخش نیم‌سایه انداز و بین درختان، موقعیت‌های شیب پایین دارای بعد فرکتال بزرگتر است و در مرتع طبیعی بعد فرکتال بزرگتر مربوط به شیب میانه بود.



شکل ۵. اثر متقابل کاربری در موقعیت شیب بر بعد فرکتال خاکدانه‌ها - US موقعیت شیب بالا، MS موقعیت شیب میانه و DS موقعیت شیب پایین حروف مشترک بزرگ تفاوت غیر معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد می‌باشد.

در این مطالعه نتایج نشان داد که پارامتر بعد فرکتال با میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها رابطه عکس دارد، بدین صورت که هرچه پایداری خاکدانه‌ها بیشتر باشد، بعد فرکتال در آن نقطه کوچکتر است که این موضوع با نتایج دیگر تحقیقات در رابطه با همبستگی منفی بین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و بعد فرکتال همخوانی دارد (Tagar et al., 2020). به طور کلی این موضوع در هر سه بخش مورد بررسی مشاهده شد و کمترین مقدار بعد فرکتال در بخش نیم‌سایه انداز درختان زیتون ثبت شد که این بخش دارای بیشترین پایداری خاکدانه بود اما در قسمت فاصله بین درختان زیتون بیشترین جهش در مقدار بعد فرکتال رخ داد که می‌تواند به دلیل پایداری کم خاکدانه‌ها در این نقاط و مشابه پایداری کم خاکدانه‌ها در مرتع طبیعی باشد. علاوه بر این، یکی از دلایل تغییرات مداوم پایداری خاکدانه‌ها در موقعیت‌های متفاوت شیب می‌تواند غالب بودن کسر خاکدانه‌های کوچک در برخی از نقاط نمونه‌برداری در هر کاربری باشد. تانگ و همکاران (Tang et al., 2013) رابطه منفی معنی‌داری بین بعد فرکتال خاکدانه‌های خاک و میزان خاکدانه‌های بزرگ (۵-۱۰ میلی‌متر) و رابطه مثبت معنی‌داری بین بعد فرکتال و میزان خاکدانه‌های کوچک (کمتر از ۰/۲۵ میلی‌متر) یافتند که در نتیجه می‌تواند تغییرات بعد فرکتال در موقعیت‌های مختلف شیب را توضیح دهد.

همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که در بررسی مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه، دو بخش فاصله بین درختان و مرتع طبیعی اختلاف چندانی در پایداری خاکدانه‌ها ندارند که این موضوع در میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها نیز دیده شده است. اما در بررسی بعد فرکتال در این پژوهش مشاهده می‌شود که میزان بعد فرکتال در بخش فاصله بین درختان در اکثر نقاط نمونه‌برداری به طور معنی‌داری بیشتر از مرتع طبیعی می‌باشد که نشان دهنده پایداری خاکدانه کمتر در این نقاط است که می‌تواند ناشی از حساسیت بیشتر بعد فرکتال نسبت به سایر شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها باشد. هو و همکاران (Hu et al., 2007) اشاره کردند که در مقایسه با میانگین وزنی قطر خاکدانه و میانگین هندسی قطر خاکدانه، بعد فرکتال تغییرات خاکدانه‌ها را تحت سه روش مختلف خاک‌ورزی بهتر نشان می‌دهد. در یک مطالعه دیگر مشخص شد که مقدار بعد فرکتال در مورد خاکدانه‌های پایدار در برابر آب، برای کاربری‌های جنگل، مرتع، بوته‌زار و اراضی تراس‌بندی شده در لایه صفر تا ۲۰ سانتی‌متری خاک و کاربری جنگل در لایه ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متری خاک، همگی به طور معنی‌داری کمتر از مقادیر بعد فرکتال برای اراضی کشاورزی شیب‌دار هستند که

این نشان دهنده پایداری بیشتر خاکدانه‌ها در اراضی تحت پوشش درخت‌ها در سطح و عمق است (Cheng et al., 2023). گولسر (Gülser, 2006) به این نتیجه دست یافت که بعد فرکتال نسبت به میانگین وزنی قطر خاکدانه به تغییرات در خاکدانه‌ها حساس‌تر و دقیق‌تر است و این دقیق‌تر بودن شاخص بعد فرکتال برای بررسی خاکدانه‌ها در خاک توسط چنگ و همکاران (Cheng et al., 2023) نیز تایید شده است. این موضوع می‌تواند به اهمیت بررسی شاخص‌های مختلف پایداری خاکدانه در تغییر کاربری اراضی اشاره کند.

اثر کاربری اراضی بر شاخص کربن در نسبت‌های متفاوت خاکدانه‌ها

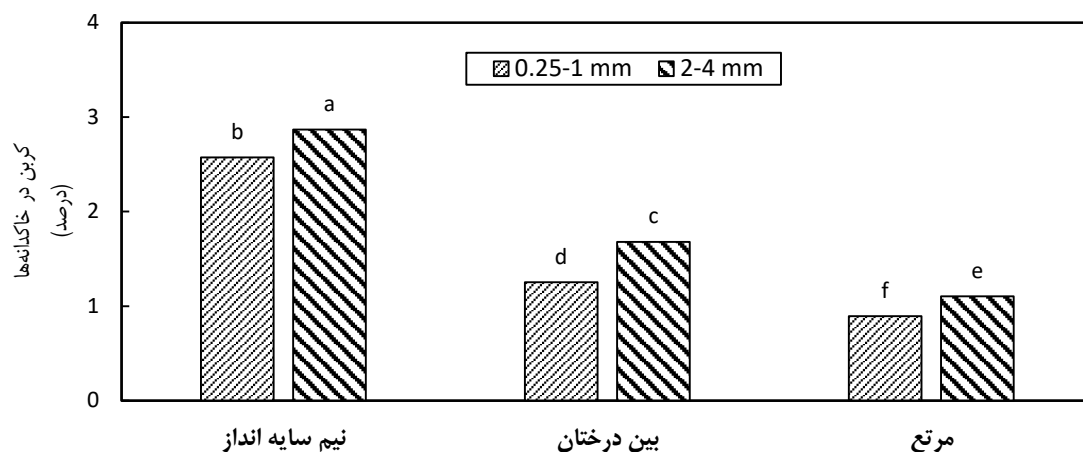
نتایج تجزیه واریانس اثر تغییر مرتع طبیعی به باغ زیتون در میزان کربن در خاکدانه‌ها در جدول ۳ ذکر شده است.

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تغییر کاربری از مرتع طبیعی به باغ زیتون در میزان کربن خاکدانه‌ها

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات کربن آلی
بلوک	۲	۰/۰۴ ^{NS}
کاربری	۲	۴۲/۸۰ ^{**}
خطای کرت اصلی	۴	۰/۰۱
موقعیت شیب	۸	۱/۵۱ ^{**}
کربن در کسر خاکدانه‌ها	۱	۳/۸۹ ^{**}
کاربری × موقعیت شیب	۱۶	۰/۵۵ ^{**}
کاربری × کربن در کسر خاکدانه‌ها	۲	۰/۱۵ ^{**}
موقعیت شیب × کربن در کسر خاکدانه‌ها	۸	۰/۰۳ ^{NS}
کاربری × موقعیت شیب × کربن در کسر خاکدانه‌ها	۱۶	۰/۰۱ ^{NS}
خطای باقیمانده	۱۰۲	۰/۰۱
ضریب تغییرات	-	۷/۱۵

NS، * و ** به ترتیب بیانگر غیر معنی دار، معنی دار بودن در سطح پنج و یک درصد می‌باشد.

نتایج آنالیز آماری (جدول ۳) نشان داد که اثر کاربری، موقعیت شیب و همچنین اثر متقابل کاربری در موقعیت شیب و کاربری در کربن در نسبت خاکدانه‌ها معنی‌دار ($p < 0.01$) بود. نتایج نشان داد که تغییر کاربری زمین از مرتع طبیعی به باغ زیتون باعث افزایش معنی‌دار مقدار کربن آلی خاک در نسبت خاکدانه‌ها در نیم سایه انداز و بخش فاصله بین درختان می‌شود (شکل ۶). با توجه نتایج به دست آمده مقدار کربن آلی در نسبت خاکدانه‌های بزرگ (۲-۴ میلی‌متر) به طور معنی‌داری ($p < 0.01$) در هر سه کاربری بیشتر از نسبت خاکدانه‌های سایز متوسط (۰/۲۵-۱ میلی‌متر) بود. همچنین نتایج نشان داد که میزان کربن در خاکدانه‌ها در بخش نیم سایه انداز، در نقاط نمونه‌برداری شیب پایین بیشتر بوده و در موقعیت‌های شیب میانه و پایین کاهش می‌یابد اما در مقابل دو کاربری دیگر روند مشخصی در تغییرات کربن در موقعیت‌های مختلف شیب ندارند (جدول ۴).



شکل ۳. اثر متقابل کاربری در نقاط نمونه‌برداری بر کربن در نسبت‌های مختلف خاکدانه، ۱-۰/۲۵ نسبت خاکدانه متوسط و ۲-۴ نسبت خاکدانه بزرگ حروف مشترک بیاگر تفاوت غیرمعنی‌دار در سطح احتمال یک درصد می‌باشد.

جدول ۴. اثر متقابل کاربری در نقاط نمونه‌برداری بر مقدار کربن خاکدانه‌ها در موقعیت‌های مختلف شیب

کاربری	DS1	DS2	DS3	MS1	MS2	MS3	US1	US2	US3
نیم سایه انداز	۳/۳۷ ^a	۲/۸۰ ^b	۳/۲۸ ^a	۲/۷۸ ^b	۲/۸۰ ^b	۲/۷۱ ^b	۲/۲۲ ^{cd}	۲/۴۳ ^c	۲/۰۶ ^{de}
درختان زیتون	۱/۴۹ ^g	۱/۲۲ ^{hi}	۱/۸۳ ^{cf}	۲/۰۶ ^{de}	۱/۸۷ ^{ef}	۱/۰۶ ^{ijk}	۱/۷۴ ^{fg}	۰/۹۶ ^{i-l}	۰/۹۱ ^{ijkl}
فاصله بین درختان	۱/۱۶ ^j	۰/۹۶ ^{i-l}	۰/۷۹ ⁱ	۱/۲۸ ^{gh}	۱/۱۶ ^j	۰/۸۷ ^{kl}	۰/۷۳ ^l	۰/۹۴ ^{ijkl}	۰/۸۷ ^{kl}
مرتج طبیعی									

DS1-DS3 نقاط در پایین شیب، MS1-MS3 نقاط در میانه شیب و US1-US3 نقاط در بالای شیب

مطالعات نشان داده است که بررسی دینامیک کربن آلی در خاکدانه‌ها تحت کاربری‌های مختلف اراضی، برای درک سازوکارهای پایداری کربن آلی خاک و پیش‌بینی روندهای آبی آن ضروری است (Peng et al., 2023). مطالعات متعدد پیدایش نشان داده‌اند که نسبت خاکدانه‌های بزرگ (Lan et al., 2022; Qiu et al., 2015) ممکن است مهم‌ترین عوامل در ذخیره‌سازی کربن آلی خاک پس از تغییر کاربری زمین باشند (Yu et al., 2023).

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که افزایش کربن آلی در خاکدانه‌های بزرگ‌تر نسبت به خاکدانه‌های متوسط، بیانگر اهمیت این گروه اندازه‌ای در ذخیره‌سازی کربن آلی خاک است. در واقع، خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر نقش برجسته‌ای در پویایی و تثبیت کربن آلی در خاک ایفا می‌کنند، که این یافته‌ها با گزارش سایر پژوهش‌ها هم‌راستا است (Cao et al., 2021). بر طبق مطالعه کاو و همکاران (Cao et al., 2021) که مقدار کربن آلی در خاکدانه‌ها را در سه باغ با عمرهای متفاوت بررسی کرد، نتایج مطالعه نشان داد که نسبت ذخایر کربن آلی خاک در نسبت خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر در باغ‌های ۱۰-۲۰ ساله، ۲۱-۱۱ ساله و ۳۰-۲۱ ساله به ترتیب ۶۱/۲۰، ۵۵/۶۹ و ۵۷/۳۳ درصد بوده است و بنابراین، نسبت خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر حامل اصلی کربن آلی خاک در بین تمام خاکدانه‌ها بود. همچنین در مطالعه دیگری مقدار کربن آلی در خاکدانه‌ها در انواع مختلف کاربری اراضی مورد بررسی قرار گرفت (Peng et al., 2023) و نتایج نشان داد که کربن آلی مرتبط با خاکدانه‌های بزرگ (بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر) و خاکدانه‌های متوسط (۲-۰/۲۵ میلی‌متر) منبع اصلی کربن آلی کل خاک را تشکیل می‌دهند و علاوه بر این در لایه ۵-۰ سانتی‌متری خاک، میزان کربن آلی در نسبت خاکدانه‌های بزرگ در مراتع، بوته‌زارها و جنگل‌های دست‌کاشت به‌طور قابل‌توجه بیشتر از اراضی زراعی و جنگل‌های طبیعی است. علاوه بر این به‌طور خاص، میانگین مقدار کربن آلی در بخش خاکدانه‌های بزرگ در خاک سطحی (صفر تا ۵ سانتی‌متر) جنگل کشت‌شده (عمدتاً توسکای تثبیت‌کننده نیتروژن) بالاترین مقدار بود (Peng et al., 2023) که کاملاً با نتایج این مطالعه همسو می‌باشد (مقدار کربن آلی موجود در نسبت خاکدانه‌های بزرگ در

بخش نیم سایه انداز درخت زیتون از دیگر کاربری‌ها بیشتر بوده است). پژوهش رونگ و همکاران (Rong et al., 2020) در منطقه فلات لس چین نشان داد که بیش از ۱۰ سال جنگل کاری، محتوای کربن مرتبط با خاکدانه‌های بزرگ را به طور قابل توجه افزایش داده است، اما تغییری در محتوای کربن مرتبط با خاکدانه‌های کوچک و کسر رس + سیلت در عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری ایجاد نکرده است. مطالعه یو و همکاران (Yu et al., 2023) در مورد نقش جنگل کاری در مقدار ذخیره کربن آلی در خاکدانه‌ها نشان داد که خاکدانه‌های بزرگ پس از جنگل کاری، کربن آلی بیشتری نسبت به خاکدانه‌های کوچک و نسبت‌های سیلت + رس انباشته کردند. این نتایج نشان می‌دهد که خاکدانه‌های بزرگ نقش مهمی در جذب کربن آلی خاک پس از جنگل کاری داشتند.

کربن آلی در خاکدانه‌ها یک ویژگی میکرو سکویی از تعادل ماده آلی خاک و میزان معدنی شدن است که برای حاصلخیزی خاک و ترسیب کربن حیاتی است (Wiesmeier et al., 2012). بالا بودن میزان کربن آلی خاک در اکثر خاکدانه‌های بزرگ را می‌توان به تشکیل خاکدانه‌های بزرگ از طریق سیمانی شدن مواد آلی در خاکدانه‌های کوچک و تجزیه ریشه‌ها و هیف‌های قارچی در خاکدانه‌های بزرگ نسبت داد (Mustafa et al., 2020). در مطالعه حاضر، محتوای کربن آلی در نسبت خاکدانه‌های بزرگتر از ۲ میلی‌متر بیشتر از سایر نسبت‌ها در تمامی کاربری‌های مورد بررسی بود. این ممکن است به این دلیل باشد که میکرو خاکدانه‌ها برای تشکیل ماکرو خاکدانه‌ها با یکدیگر پیوند برقرار می‌کنند (Cao et al., 2021).

واترز و اودس (Waters & Oades, 1991) گزارش کردند که کربن آلی عمدتاً در نسبت‌های بزرگ خاکدانه‌ها متمرکز شده است که از مفهوم سلسله مراتبی خاکدانه‌ها حمایت می‌کند. که بر این اساس نسبت‌های کوچک خاکدانه توسط عوامل پیوندی، مانند پلی‌ساکاریدهای مشتق از میکروب‌ها و گیاهان، ریشه‌ها و هیف‌های قارچی، به هم چسبیده می‌شوند تا کسرهای درشت را تشکیل دهند. وانگ و همکاران (Wang et al. 2016) نشان دادند که در نتیجه تشکیل سلسله مراتبی خاکدانه‌ها، محتوای ماده آلی با افزایش اندازه ذرات خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد، زیرا نسبت‌های بزرگ از نسبت‌های کوچک به همراه عوامل پیوندی آلی تشکیل شده‌اند، که اهمیت نسبت‌های بزرگ پایدار در ترسیب کربن آلی را برجسته می‌کند (Yang et al., 2018). کاشت درختان زیتون ممکن است به طور قابل توجه کربن آلی در خاکدانه‌ها را از طریق افزایش ورودی ماده آلی به خاک از طریق بستر گیاهی و کود افزایش دهد (Wang et al., 2016). علاوه بر این، افزایش پایداری خاکدانه‌ها در طول کاشت ممکن است از ماده آلی در برابر تجزیه میکروبی محافظت کرده و باعث تجمع کربن آلی در خاک‌ها شود (Dong et al., 2017). در نهایت، سایه‌اندازی و تغییرات ریزاقليمی ناشی از پوشش بستر ممکن است از دست دادن کربن آلی ناشی از تابش خورشیدی از خاک‌ها را نیز کاهش دهد (Wang et al., 2016). همچنین یکی از علت‌های کاهش مقدار کربن در خاکدانه‌های کاربری مرتع و همچنین فاصله بین دو ردیف کشت می‌تواند به دلیل عبور و مرور در بین ردیف‌ها برای مدیریت باغ و همچنین جرای بیش از حد منجر به تخریب در مرتع مورد بررسی باشد. گزارش شده است که تخریب اراضی و بهم ریختگی خاک، ساختار خاکدانه را متلاشی کرده و از دست دادن کربن آلی را تسریع می‌کند (Modak et al., 2019). در مقابل، کاربری‌های حفاظتی زمین، مانند جنگل‌ها، می‌تواند با افزایش ثبات خاکدانه‌ها و بهبود محتوای کربن آلی خاک به دلیل حفاظت ایجاد شده توسط خاکدانه‌ها، تأثیر مثبتی داشته باشند (Xiao et al., 2021).

در مورد اثر موقعیت شیب بر کربن خاکدانه‌ها مشاهده شد که از موقعیت شیب پایین به سمت شیب بالا مقدار کربن در خاکدانه‌ها در نیم سایه انداز درخت زیتون کاهش می‌یابد. این موضوع در نتایج مطالعات دیگر نیز مشاهده شده است. پژوهشی به بررسی اثر انواع مختلف روش‌های مدیریتی زمین را بر ویژگی‌های خاکدانه‌ها در دو موقعیت شیب بالا و پایین پرداخت. نتایج نشان داد که زمین‌هایی با شیب کمتر در تمام طبقه‌بندی‌های مدیریتی و اعماق خاک، دارای کربن آلی، مقدار خاکدانه‌های بزرگ، کربن در خاکدانه‌های بزرگ و میانگین وزنی و هندسی بالاتری نسبت به مکان‌های با شیب زیاد دارد (Mikha et al., 2021). در پژوهش دیگری که در استان چهارمحال و بختیاری کشور ایران انجام شد، مقدار کربن مرتبط با خاکدانه‌ها در سه کاربری جنگل طبیعی، جنگل پراکنده و زمین زراعی در سه موقعیت شیب مختلف شامل شیب‌های صفر تا ۱۰، ۳۰-۱۰ و ۵۰-۳۰ در صد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقدار کربن در خاکدانه‌های بزرگ و متوسط در کاربری جنگل طبیعی در موقعیت‌های

شیب صفر تا ۱۰ در صد به طور معنی داری بیشتر از موقعیت های شیب بالا است (Ayoubi et al., 2012). یکی از دلایل افزایش بیشتر کربن آلی در نسبت خاکدانه ها در بخش نیم سایه انداز درختان زیتون و در موقعیت شیب پایین می تواند به دلیل افزایش مقدار کربن آلی خاک در نقاط پایین باشد. نتایج پژوهش مختاری و همکاران (۱۳۹۰) حاکی از آن بود که بیشترین مقدار کربن آلی و نیتروژن کل در موقعیت شیب پایین به طور معنی داری بیشتر از شیب تند است.

در مقابل در بخش های فاصله بین درختان و مرتع طبیعی روند مشخصی با موقعیت های مختلف شیب مشاهده نشد. این عامل می تواند به دلیل آشفتگی بیشتر خاک در این نقاط باشد. طبق نتایج مطالعات پشین اختلال و آشفتگی در خاک یکی از دلایل اصلی کاهش کربن مرتبط با خاکدانه های خاک است که این موضوع ناشی از تخریب خاکدانه های بزرگ خاک و قرار گرفتن کربن آلی محافظت شده در معرض تجزیه میکروبی است (Weidhuner et al., 2021). همچنین این دو بخش دارای پوشش گیاهی بسیار ضعیف بودند که باعث ایجاد فرسایش در این بخش ها می شود که عامل دیگری برای توزیع نامتوازن کربن در این نقاط است و می تواند توزیع کربن در خاکدانه ها را تحت تاثیر قرار دهد. مطالعات نشان داده است که فرآیندهای فرسایش و رسوب گذاری خاک از عوامل اصلی جابه جایی و تغییر شکل کربن آلی خاک هستند و منجر به توزیع نامتوازن کربن آلی از نظر مقدار و ترکیب می شوند (Zhu et al., 2021).

اثر کاربری اراضی بر میانگین وزنی قطر خاکدانه ها در عمق

نتایج آنالیز آماری (جدول ۲) نشان داد که اثر کاربری، موقعیت شیب و همچنین اثر متقابل آن ها بر میانگین وزنی قطر خاکدانه ها در عمق ۳۰-۴۰ سانتی متر معنی دار ($p < 0.01$) بود. نتایج نشان داد که تغییر کاربری زمین از مرتع طبیعی به باغ زیتون باعث افزایش معنی دار مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه ها در عمق خاک بخش نیم سایه انداز می شود (شکل ۷). با توجه به نتایج به دست آمده بیشترین مقدار افزایش در میانگین وزنی قطر خاکدانه ها در عمق خاک در بخش نیم سایه انداز درختان زیتون و در موقعیت شیب پایین و میانه بود. همچنین مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه ها در بخش بین درختان به طور معنی داری در شیب پایین بیشتر از شیب بالا بود. اما در مقابل روند مشخصی با تغییرات شیب در قسمت مرتع مشاهده نشد. مطالعات پشین پشین بیشتر بر عمق خاک سطحی متمرکز بودند و پایداری خاکدانه ها در خاک زیرین (زیر ۳۰ سانتی متر) تا حد زیادی نادیده گرفته شده است (Zhao et al., 2014) در حالی که تخریب خاک در اعماق زیاد به محدودیت جدی برای عملکرد محصول و کیفیت خاک تبدیل شده است (Hartmann et al., 2008) و انجام مطالعات در مورد خاک های عمیق ضروری است.



شکل ۷. اثر متقابل کاربری در نقاط نمونه برداری بر میانگین وزنی قطر خاکدانه- US موقعیت شیب بالا، MS موقعیت شیب میانه و DS موقعیت شیب پایین. حروف مشترک بیاگر تفاوت غیر معنی دار در سطح احتمال یک درصد می باشد.

مطالعات نشان داده است که میزان پایداری خاکدانه ها با افزایش عمق خاک می تواند تغییر کند. در یک مطالعه نشان داده شد

که الگوهای توزیع عمودی پایداری و مقدار خاکدانه‌ها در خاک با اندازه‌های مختلف تحت تأثیر تغییر کاربری زمین قرار گرفته و پایداری خاکدانه‌ها در خاک سطحی (عمق ۷-۲۰ سانتی‌متر) بیشتر از خاک زیرین (عمق ۲۵-۷۰ سانتی‌متر) پس از ۳۸ سال جنگل‌کاری در جنوب کالیفرنیا است (Haydu-Houdeshell et al., 2018). کاهش پایداری خاکدانه‌ها با افزایش عمق در مطالعه حاضر نیز مشاهده می‌شود. هر سه کاربری زمین دارای میانگین وزنی قطر خاکدانه کمتر از خاک سطحی هستند. کاهش پایداری خاکدانه با افزایش عمق توسط دیگر مطالعات نیز تایید شده است (Chen et al., 2025). مطالعه ژانگ و همکاران (P. Zhang et al., 2021) نشان داد که برای عمق خاک صفر تا ۱۰ سانتی‌متر، میانگین مقادیر میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها به ترتیب ۰/۷۹ میلی‌متر و ۰/۲۹ میلی‌متر بود. این مقدار برای عمق خاک ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر به ترتیب به ۰/۷۲ میلی‌متر و ۰/۲۶ میلی‌متر کاهش یافت. یکی از دلایل کاهش مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه نسبت به خاک سطحی کاهش سیستم ریشه‌ای گیاهان با افزایش عمق است. در اعماق خاک، سیستم ریشه‌ای علف‌ها و بوته‌ها به تدریج کاهش می‌یابد و نمی‌تواند از تشکیل خاکدانه‌های بزرگ پایدار در برابر آب حمایت کند (Cheng et al., 2023).

کاهش پایداری خاکدانه‌ها با افزایش عمق در این مطالعه ممکن است به دلیل کاهش مقدار ماده آلی خاک با افزایش عمق باشد. مقدار برگ‌های ریخته شده، دما، رطوبت و میزان اکسیژن خاک سطحی، شرایط مناسبی را برای جوامع میکروبی فراهم می‌کند. این جوامع میکروبی در خاک سطحی فراوان‌تر از خاک‌های عمیق هستند، زیرا خاک عمیق شرایط کمتری برای رشد میکروب‌ها دارد. این فعالیت میکروبی می‌تواند پایداری خاکدانه‌های مقاوم در برابر آب را افزایش داده و توانایی ضد فرسایشی خاک را بهبود بخشد (Song et al., 2009).

با این حال نسبت به دو بخش فاصله بین درختان و مرتع میزان کربن آلی و همچنین پایداری خاکدانه‌ها در بخش نیم سایه انداز درخت زیتون بیشتر از سایر بخش‌ها بوده است که می‌تواند اثر سیستم ریشه‌ای عمیق درخت زیتون را نشان دهد. مطالعات نشان داده است که بخش اعظم ماده آلی خاک، به ویژه در اعماق خاک، منشأ ریشه‌ها، ترشحات آن‌ها و میکروب‌های مرتبط با آن‌ها را دارد (Gross & Harrison, 2019)، و حرکت عمودی کربن آلی محلول در خاک نیز در این موضوع نقش دارد (Sokol et al., 2019). همچنین در پژوهش دیگری مشخص شد که میزان شن، کربن آلی خاک و ارتفاع محل به ترتیب ۸/۶، ۵/۷ و ۴/۱ درصد از تغییرات پایداری خاکدانه‌ها را در عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری خاک کنترل می‌کنند. با این حال، در عمق ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متری، پایداری خاکدانه‌ها بیشتر تحت تأثیر میزان سیلت و کربن آلی خاک می‌باشد (P. Zhang et al., 2021). علاوه بر این تحقیقات نشان داده است که غلظت پلی‌فنول‌ها در ریشه‌ها دو تا چهار برابر بیشتر از برگ‌ها است (Wang et al., 2015). پلی‌فنول‌ها با پروتئین‌های خاک واکنش داده و ماکرومولکول‌هایی را تشکیل می‌دهند که پایداری خاکدانه‌های بزرگ و در نتیجه غلظت کربن آلی خاک را افزایش می‌دهند (Erktan et al., 2017).

در مورد اثر شیب بر میانگین وزنی خاکدانه‌ها مشاهده می‌شود که در کاربری باغ زیتون و در هر دو بخش نیم‌سایه انداز و فاصله بین درختان زیتون مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها دارای الگوی تغییرات مشابه با مقدار این ویژگی در سطح خاک و در موقعیت‌های مختلف شیب است. الگوی تغییرات میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در عمق خاک کاربری مرتع طبیعی یک روند ثابت را نشان نداد که این عامل ممکن است به علت تغییرات در ویژگی‌های مختلف مانند توزیع مقدار کربنات کلسیم و یا مقدار رس در عمق خاک باشد که در این مطالعه مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین تغییرات فشردگی در عمق خاک می‌تواند باعث کاهش خاکدانه‌های بزرگ شود (Singh et al., 2017) که یکی از دلایل کاهش پایداری خاکدانه‌ها است و این تغییرات در میزان فشردگی در موقعیت‌های مختلف شیب ممکن است یکی از دلایل تغییرات متفاوت پایداری خاکدانه‌ها در موقعیت‌های مختلف شیب در عمق خاک مرتع طبیعی باشد که این موضوع در مطالعات آیند باید مورد بررسی قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی تأثیرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی بر شاخص‌های مختلف پایداری خاکدانه و کربن آلی مرتبط با نسبت‌های مختلف خاکدانه و نقش عمق بر تغییرات پایداری خاکدانه در سه موقعیت شیب در منطقه رستم آباد پرداخته است.

طبق نتایج به دست آمده شاخص‌های میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه در بخش نیم سایه انداز درختان زیتون با افزایش رو به رو شد و کمترین مقدار بعد فرکتال خاکدانه‌ها نیز در این ناحیه ثبت شد و همچنین نتایج یک روند تقریباً کاهشی با افزایش شیب در میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها نشان داد. در مورد بخش فاصله بین درختان و مرتع طبیعی اختلاف معنی‌داری بین میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها در موقعیت‌های مختلف شیب دیده نشد اما بعد فرکتال در هر دو کاربری باغ زیتون و مرتع طبیعی دارای تغییرات معنی‌داری با موقعیت شیب بود که ممکن است به علت غالب بودن کسر خاکدانه‌های کوچک در آن نقاط باشد. در مورد ارزیابی وضعیت کربن آلی در نسبت خاکدانه‌های بزرگ و متوسط نتایج این موضوع را تایید کرد که در هر سه بخش مورد بررسی که شامل نیم‌سایه انداز درخت زیتون، فاصله بین درختان زیتون و مرتع، کربن آلی در کسر خاکدانه‌های بزرگ بیشتر از کسر خاکدانه‌های متوسط بوده است و این خاکدانه‌ها مسئول حفظ و تثبیت کربن آلی در تمام نقاط نمونه‌برداری بودند. همچنین نتایج نشان داد که مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با افزایش عمق کاهش می‌یابد که این موضوع می‌تواند به علت کاهش ماده آلی با افزایش عمق خاک باشد. در کل این مطالعه نشان داد که برای ارزیابی دقیق از پایداری خاکدانه‌ها در تغییر کاربری اراضی باید شاخص‌های مختلف پایداری مورد ارزیابی قرار گیرد تا بتوان درک درستی از اثر تغییر کاربری اراضی بر پایداری خاکدانه‌ها داشت. مطالعات تاکید داشته‌اند که بعد فرکتال خاکدانه‌ها حساسیت بیشتری نسبت به سایر شاخص‌های پایداری خاکدانه دارد و این موضوع نیز در این مطالعه با تغییرات بعد فرکتال بر خلاف شاخص میانگین هندسی قطر خاکدانه در موقعیت‌های مختلف شیب مشاهده شد اما به طور کلی برای تصمیم‌گیری در مورد بهترین شاخص برای بررسی وضعیت خاکدانه‌ها در تغییر کاربری اراضی به مطالعات بیشتری نیاز است. علاوه بر این وضعیت نامناسب خاک در فاصله بین درختان زیتون را می‌تواند با استفاده از کشت گیاهان پوششی بهبود بخشید. مطالعات متعدد نشان داده است که گیاهان پوششی نقش مهمی در افزایش کربن آلی خاک و پایداری خاکدانه‌ها در خاک دارند. در نهایت می‌توان گفت تغییر کاربری اراضی از مراتع و به خصوص از مراتع تخریب شده به باغ زیتون می‌تواند باعث بهبود وضعیت خاک شود به شرطی که در باغ زیتون مدیریت صحیحی برای افزایش پایداری خاک در تمامی نقاط آن انجام شود.

منابع

- مختاری، کرچگانی پریسا؛ ایوبی، شمس اله؛ مصدقی، محمدرضا و ملکیان، مائده (۱۳۹۰). اثر شیب و تغییر کاربری اراضی بر ذخایر مواد آلی خاک در اجزا اندازه ای ذرات و برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در اراضی تپه ماهوری اردکان. *مجله مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۱ (۱)، ۲۳-۴۱.
- ناهیدان، صفورا؛ نوربخش، فرشید و مصدقی، محمدرضا (۱۳۹۴). تاثیر موقعیت شیب بر توزیع خاکدانه ای کربن آلی، فعالیت آنزیم آل-گلوتامیناز و پایداری ساختمان خاک. *مجله مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۵ (۱)، ۱۲۹-۱۴۳.

References

- Addesso, R., Aramiti, F., Bloise, A., Mininni, A. N., Dichio, B., López-González, D., Elshafie, H. S., Ellerbrock, R. H., Schnee, L. S., & Filser, J. (2025). Soil organic matter quality in an olive orchard differently managed for 21 years: Insights into its distribution through soil aggregates and depth. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 380, 109388.
- Afuye, G. A., Nduku, L., Kalumba, A. M., Santos, C. A. G., Orimoloye, I. R., Ojeh, V. N., Thamaga, K. H., & Sibandze, P. (2024). Global trend assessment of land use and land cover changes: A systematic approach to future research development and planning. *Journal of King Saud University-Science*, 103262.
- Agnelli, A., Bol, R., Trumbore, S. E., Dixon, L., Cocco, S., & Corti, G. (2014). Carbon and nitrogen in soil and vine roots in harrowed and grass-covered vineyards. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 193, 70-82.
- Angst, Š., Mueller, C. W., Cajthaml, T., Angst, G., Lhotáková, Z., Bartuška, M., Špaldoňová, A., & Frouz, J. (2017). Stabilization of soil organic matter by earthworms is connected with physical protection rather than with chemical changes of organic matter. *Geoderma*, 289, 29-35.
- Asmare, T. K., Abayneh, B., Yigzaw, M., & Birhan, T. A. (2023). The effect of land use type on selected soil physicochemical properties in Shihatig watershed, Dabat district, Northwest Ethiopia. *Heliyon*, 9(5).

- Ayoubi, S., Karchegani, P. M., Mosaddeghi, M. R., & Honarjoo, N. (2012). Soil aggregation and organic carbon as affected by topography and land use change in western Iran. *Soil and Tillage Research*, 121, 18-26.
- Bai, Y., Zhou, Y., Du, J., & Zhang, X. (2024). Tree species identity affects nutrient accumulation and stoichiometric in soil aggregates in mixed plantations of subtropical China. *Catena*, 236, 107752.
- Bore, G., & Bedadi, B. (2015). Impacts of land use types on selected soil physico-chemical properties of Loma Woreda, Dawuro Zone, Southern Ethiopia. *Science, Technology and Arts Research Journal*, 4(4), 40-48.
- Cambardella, C., & Elliott, E. (1993). Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 57(4), 1071-1076.
- Cao, S., Zhou, Y., Zhou, Y., Zhou, X., & Zhou, W. (2021). Soil organic carbon and soil aggregate stability associated with aggregate fractions in a chronosequence of citrus orchards plantations. *Journal of Environmental Management*, 293, 112847.
- Chemeda, M., Kibret, K., & Fite, T. (2017). Influence of different land use types and soil depths on selected soil properties related to soil fertility in Warandhab Area, Horo Guduru Wallaga Zone, Oromiya, Ethiopia. *International Journal of Environmental Sciences and Natural Resources*, 4(2), 555634.
- Chen, M., Feng, S., Wang, J., Gao, M., Liu, M., Wang, K., Shangguan, Z.-p., & Zhang, Y. (2025). The stability of soil aggregates in sweet cherry (*Prunus avium* L.) orchards of different ages and varieties. *Heliyon*.
- Cheng, Y., Xu, G., Wang, X., Li, P., Dang, X., Jiang, W., Ma, T., Wang, B., Gu, F., & Li, Z. (2023). Contribution of soil aggregate particle size to organic carbon and the effect of land use on its distribution in a typical small watershed on Loess Plateau, China. *Ecological Indicators*, 155, 110988.
- Chimdi, A., Gebrekidan, H., Kibret, K., & Tadesse, A. (2012). Status of selected physicochemical properties of soils under different land use systems of Western Oromia, Ethiopia. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 2(3), 57-71.
- De Ploey, J., & Poesen, J. (2020). Aggregate stability, runoff generation and interrill erosion. In *Geomorphology and soils* (pp. 99-120). Routledge.
- De Rosa, D., Rowlings, D. W., Fulkerson, B., Scheer, C., Friedl, J., Labadz, M., & Grace, P. R. (2020). Field-scale management and environmental drivers of N₂O emissions from pasture-based dairy systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 117, 299-315.
- Dong, X., Hao, Q., Li, G., Lin, Q., & Zhao, X. (2017). Contrast effect of long-term fertilization on SOC and SIC stocks and distribution in different soil particle-size fractions. *Journal of soils and sediments*, 17, 1054-1063.
- Dorji, T., Field, D. J., & Odeh, I. O. (2020). Soil aggregate stability and aggregate-associated organic carbon under different land use or land cover types. *Soil use and Management*, 36(2), 308-319.
- Erktan, A., Balmot, J., Merino-Martín, L., Monnier, Y., Paillet, F., Coq, S., Abiven, S., Stokes, A., & Le Bissonnais, Y. (2017). Immediate and long-term effect of tannins on the stabilization of soil aggregates. *Soil Biology and Biochemistry*, 105, 197-205.
- Feng JiaYi, F. J., Chu ShuangShuang, C. S., Wang Jing, W. J., Wu DaoMing, W. D., Mo QiFeng, M. Q., Gao Jie, G. J., Lin JiaHui, L. J., & Zeng ShuCai, Z. S. (2018). Soil organic carbon density and its relationship with soil physical properties of typical plantations in South China.
- Feng, M., Li, T., Zeng, C., He, B., & Zhang, D. (2024). Changes in soil water repellency and soil erosion resistance as affected by land uses in karst environments. *Journal of Environmental Management*, 368, 122102.
- Gee, G. W., & Or, D. (2002). 2.4 Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 4 physical methods*, 5, 255-293.
- Geissen, V., Sánchez-Hernández, R., Kampichler, C., Ramos-Reyes, R., Sepulveda-Lozada, A., Ochoa-Goana, S., De Jong, B., Huerta-Lwanga, E., & Hernández-Daumas, S. (2009). Effects of land-use change on some properties of tropical soils—an example from Southeast Mexico. *Geoderma*, 151(3-4), 87-97.
- Gross, C. D., & Harrison, R. B. (2019). The case for digging deeper: soil organic carbon storage, dynamics, and controls in our changing world. *Soil Systems*, 3(2), 28.
- Gülser, C. (2006). Effect of forage cropping treatments on soil structure and relationships with fractal dimensions. *Geoderma*, 131(1-2), 33-44.
- Guo, L. B., Wang, M., & Gifford, R. M. (2007). The change of soil carbon stocks and fine root dynamics after land use change from a native pasture to a pine plantation. *Plant and Soil*, 299, 251-262.
- Hamel, Z., Ababou, A., Saidi, D., & Kemassi, A. (2021). Evaluation of soil aggregate stability in Algerian northwestern soils using pedotransfer functions and artificial neural networks. *Acta Ecologica Sinica*, 41(3), 235-242.
- Hamza, M., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121-145.

- Hartmann, C., Poss, R., Noble, A. D., Jongskul, A., Bourdon, E., Brunet, D., & Lesturgez, G. (2008). Subsoil improvement in a tropical coarse textured soil: Effect of deep-ripping and slotting. *Soil and Tillage Research*, 99(2), 245-253.
- Haydu-Houdeshell, C.-A., Graham, R. C., Hendrix, P. F., & Peterson, A. C. (2018). Soil aggregate stability under chaparral species in southern California. *Geoderma*, 310, 201-208.
- Hu, Z., LÜ, Y.-z., YANG, Z.-c., & LI, B.-g. (2007). Influence of conservation tillage on soil aggregates features in North China Plain. *Agricultural Sciences in China*, 6(9), 1099-1106.
- Joseph, P. O., Ojochegbe, O. F., Okonfor, A. S., & Faith, U. C. (2019). Impacts of Different Land Use on Some Selected Soil Physicochemical Properties in Federal Polytechnic Idah, Kogi State, Nigeria.
- Kravchenko, A., Otten, W., Garnier, P., Pot, V., & Baveye, P. C. (2019). Soil aggregates as biogeochemical reactors: Not a way forward in the research on soil–atmosphere exchange of greenhouse gases. *Global Change Biology*, 25(7), 2205-2208.
- Lan, J., Long, Q., Huang, M., Jiang, Y., & Hu, N. (2022). Afforestation-induced large macroaggregate formation promotes soil organic carbon accumulation in degraded karst area. *Forest Ecology and Management*, 505, 119884.
- Lemaire, G., Hodgson, J., & Chabbi, A. (2011). *Grassland productivity and ecosystem services*. Cabi.
- Lindell, L., Åström, M., & Öberg, T. (2010). Land-use versus natural controls on soil fertility in the Subandean Amazon, Peru. *Science of the Total Environment*, 408(4), 965-975.
- Mandelbrot, B., & Mandelbrot, B. (1982). *The fractal geometry of nature*, 1 WH freeman, New York.
- Manpoong, C., Tripathi, S. K., Aravindakshan, S., & Krupnik, T. J. (2025). Digging in: Impact of land use changes on soil aggregation patterns and carbon stocks in the moist tropics of the Mizoram in the Indomalayan realm. *Total Environment Advances*, 13, 200119.
- Mikha, M. M., Jin, V. L., Johnson, J. M., Lehman, R. M., Karlen, D. L., & Jabro, J. D. (2021). Land management effects on wet aggregate stability and carbon content. *Soil Science Society of America Journal*, 85(6), 2149-2168.
- Modak, K., Ghosh, A., Bhattacharyya, R., Biswas, D. R., Das, T. K., Das, S., & Singh, G. (2019). Response of oxidative stability of aggregate-associated soil organic carbon and deep soil carbon sequestration to zero-tillage in subtropical India. *Soil and Tillage Research*, 195, 104370.
- Montanaro, G., Celano, G., Dichio, B., & Xiloyannis, C. (2010). Effects of soil-protecting agricultural practices on soil organic carbon and productivity in fruit tree orchards. *Land Degradation & Development*, 21(2), 132-138.
- Mustafa, A., Minggang, X., Shah, S. A. A., Abrar, M. M., Nan, S., Baoren, W., Zejiang, C., Saeed, Q., Naveed, M., & Mehmood, K. (2020). Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of southern China. *Journal of Environmental Management*, 270, 110894.
- Negasa, T., Ketema, H., Legesse, A., Sisay, M., & Temesgen, H. (2017). Variation in soil properties under different land use types managed by smallholder farmers along the toposequence in southern Ethiopia. *Geoderma*, 290, 40-50.
- Nie, M., Pendall, E., Bell, C., & Wallenstein, M. D. (2014). Soil aggregate size distribution mediates microbial climate change feedbacks. *Soil Biology and Biochemistry*, 68, 357-365.
- Nie, X., Li, Z., Huang, J., Liu, L., Xiao, H., Liu, C., & Zeng, G. (2018). Thermal stability of organic carbon in soil aggregates as affected by soil erosion and deposition. *Soil and Tillage Research*, 175, 82-90.
- Nimmo, J. R., & Perkins, K. S. (2002). 2.6 Aggregate stability and size distribution. *Methods of soil analysis: Part 4 physical methods*, 5, 317-328.
- Okolo, C. C., Gebresamuel, G., Zenebe, A., Haile, M., & Eze, P. N. (2020). Accumulation of organic carbon in various soil aggregate sizes under different land use systems in a semi-arid environment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 297, 106924.
- Peng, J., Wang, J., Yang, Q., Long, L., Li, H., Guo, Z., & Cai, C. (2024). Spatial variation in soil aggregate stability and erodibility at different slope positions in four hilly regions of northeast China. *Catena*, 235, 107660.
- Peng, X., Huang, Y., Duan, X., Yang, H., & Liu, J. (2023). Particulate and mineral-associated organic carbon fractions reveal the roles of soil aggregates under different land-use types in a karst faulted basin of China. *Catena*, 220, 106721.
- Pihlap, E., Steffens, M., & Kögel-Knabner, I. (2021). Initial soil aggregate formation and stabilisation in soils developed from calcareous loess. *Geoderma*, 385, 114854.
- Qiu, L., Wei, X., Gao, J., & Zhang, X. (2015). Dynamics of soil aggregate-associated organic carbon along an afforestation chronosequence. *Plant and Soil*, 391, 237-251.
- Rong, G., Li, W., Zhu, H., Zhou, J., Qiu, L., Ge, N., Wei, X., & Shao, M. (2020). Dynamics of new-and old-organic carbon and nitrogen in bulk soils and aggregates following afforestation on farmland. *Catena*, 195, 104838.

- Singh, M. K., Singh, S., & Ghoshal, N. (2017). Impact of land use change on soil aggregate dynamics in the dry tropics. *Restoration Ecology*, 25(6), 962-971.
- Sokol, N. W., Sanderman, J., & Bradford, M. A. (2019). Pathways of mineral-associated soil organic matter formation: Integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry. *Global Change Biology*, 25(1), 12-24.
- Song, R., Liu, L., Ma, Y., & Wu, C. (2009). Effects of crop root exudates on the size and stability of soil aggregates. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 32(3), 93-97.
- Sullivan, L. (1990). Soil organic matter, air encapsulation and water-stable aggregation. *Journal of soil science*, 41(3), 529-534.
- Tagar, A., Adamowski, J., Memon, M., Do, M. C., Mashori, A., Soomro, A., & Bhayo, W. (2020). Soil fragmentation and aggregate stability as affected by conventional tillage implements and relations with fractal dimensions. *Soil and Tillage Research*, 197, 104494.
- Tang, X., Qiu, J., Xu, Y., Li, J., Chen, J., Li, B., & Lu, Y. (2022). Responses of soil aggregate stability to organic C and total N as controlled by land-use type in a region of south China affected by sheet erosion. *Catena*, 218, 106543.
- Tang, Y., Li, J., Zhang, X., Yang, P., Wang, J., & Zhou, N. (2013). Fractal characteristics and stability of soil aggregates in karst rocky desertification areas. *Natural Hazards*, 65, 563-579.
- Tisdall, J. M., & OADES, J. M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of soil science*, 33(2), 141-163.
- Tyler, S. W., & Wheatcraft, S. W. (1992). Fractal scaling of soil particle size distributions: Analysis and limitations. *Soil Science Society of America Journal*, 56(2), 362-369.
- Ufot, U., Iren, O., & Chikere Njoku, C. (2016). Effects of land use on soil physical and chemical properties in Akokwa area of Imo State, Nigeria. *International Journal of Life Sciences Scientific Research*, 2(3), 273-278.
- van Reeuwijk, L. P. (1995). Procedures for soil analysis. (No Title).
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.
- Wang, F., Zhang, X., Neal, A. L., Crawford, J. W., Mooney, S. J., & Bacq-Labreuil, A. (2022). Evolution of the transport properties of soil aggregates and their relationship with soil organic carbon following land use changes. *Soil and Tillage Research*, 215, 105226.
- Wang, J. J., Tharayil, N., Chow, A. T., Suseela, V., & Zeng, H. (2015). Phenolic profile within the fine-root branching orders of an evergreen species highlights a disconnect in root tissue quality predicted by elemental-and molecular-level carbon composition. *New Phytologist*, 206(4), 1261-1273.
- Wang, L., Guo, M., Chen, Z., Zhang, X., Zhou, P., Liu, X., Qi, J., Wan, Z., Xu, J., & Zhang, S. (2024). Quantifying the contributions of factors influencing the spatial heterogeneity of soil aggregate stability and erodibility in a Mollisol watershed. *Catena*, 239, 107941.
- Wang, S., Li, T., & Zheng, Z. (2016). Effect of tea plantation age on the distribution of soil organic carbon and nutrient within micro-aggregates in the hilly region of western Sichuan, China. *Ecological Engineering*, 90, 113-119.
- Waters, A., & Oades, J. (1991). Organic matter in water-stable aggregates.
- Weidhuner, A., Hanauer, A., Krausz, R., Crittenden, S. J., Gage, K., & Sadeghpour, A. (2021). Tillage impacts on soil aggregation and aggregate-associated carbon and nitrogen after 49 years. *Soil and Tillage Research*, 208, 104878.
- Wiesmeier, M., Steffens, M., Mueller, C., Kölbl, A., Reszkowska, A., Peth, S., Horn, R., & Kögel-Knabner, I. (2012). Aggregate stability and physical protection of soil organic carbon in semi-arid steppe soils. *European journal of soil science*, 63(1), 22-31.
- Wu, T., Zhang, Y., Wang, Y., Wang, S., & Lei, L. (2023). Factors affecting the stability of soil aggregates of plinthosols in the middle reaches of the Yangtze River. *Catena*, 228, 107159.
- Xiao, L., Zhang, W., Hu, P., Xiao, D., Yang, R., Ye, Y., & Wang, K. (2021). The formation of large macroaggregates induces soil organic carbon sequestration in short-term cropland restoration in a typical karst area. *Science of the Total Environment*, 801, 149588.
- Xu, H., & Zhang, C. (2021). Investigating spatially varying relationships between total organic carbon contents and pH values in European agricultural soil using geographically weighted regression. *Science of the Total Environment*, 752, 14977.
- Yang, F., Tian, J., Meersmans, J., Fang, H., Yang, H., Lou, Y., Li, Z., Liu, K., Zhou, Y., & Blagodatskaya, E. (2018). Functional soil organic matter fractions in response to long-term fertilization in upland and paddy systems in South China. *Catena*, 162, 270-277.

- Yu, P., Liu, J., Tang, H., Ci, E., Tang, X., Liu, S., Ding, Z., & Ma, M. (2023). The increased soil aggregate stability and aggregate-associated carbon by farmland use change in a karst region of Southwest China. *Catena*, 231, 107284.
- Zhang, H., Huang, Y., Lan, Y., He, Y., Wang, S., Jiang, C., Cui, Y., Fan, R., & Ye, S. (2024). Mixed Chinese fir plantations alter the C, N, and P resource limitations influencing microbial metabolism in soil aggregates. *Forests*, 15(4), 724.
- Zhang, P., Wang, Y., Xu, L., Li, R., Sun, H., & Zhou, J. (2021). Factors controlling spatial variation in soil aggregate stability in a semi-humid watershed. *Soil and Tillage Research*, 214, 105187.
- Zhang, X., Gregory, A. S., Whalley, W. R., Coleman, K., Neal, A. L., Bacq-Labreuil, A., Mooney, S. J., Crawford, J. W., Soga, K., & Illangasekare, T. H. (2021). Relationship between soil carbon sequestration and the ability of soil aggregates to transport dissolved oxygen. *Geoderma*, 403, 115370.
- Zhao, F., Han, X., Yang, G., Feng, Y., & Ren, G. (2014). Soil structure and carbon distribution in subsoil affected by vegetation restoration. *Plant, Soil and Environment*, 60(1), 21-26.
- Zhong, Z., Wu, S., Lu, X., Ren, Z., Wu, Q., Xu, M., Ren, C., Yang, G., & Han, X. (2021). Organic carbon, nitrogen accumulation, and soil aggregate dynamics as affected by vegetation restoration patterns in the Loess Plateau of China. *Catena*, 196, 104867.
- Zhu, G., Deng, L., & Shangguan, Z. (2018). Effects of soil aggregate stability on soil N following land use changes under erodible environment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 262, 18-28.
- Zhu, Y., Wang, D., Wang, X., Li, W., & Shi, P. (2021). Aggregate-associated soil organic carbon dynamics as affected by erosion and deposition along contrasting hillslopes in the Chinese Corn Belt. *Catena*, 199, 105106.
- Mokhtari Karchegani, P., Ayoubi, Sh., Mosaddeghi, M. R., & Malekian, M. (2011). Effects of land use and slope gradient on soil organic carbon pools in particle-size fractions and some soil physico-chemical properties in hilly regions, western iran. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, Vol. 1(1) (in persian).
- Nahidan, S., Nourbakhsh, N., Mosaddeghi, M.R. (2015). Aggregate distribution of organic C, L-glutaminase activity and aggregate stability as affected by slope position. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, Vol. 5(1) (in persian).