Journal of Ecohydrology
Online ISSN: 2423-6101
University of Tehran Press
Home Page: https://ije.ut.ac.ir

Investigating the effect of biological revitalization operations on soil organic carbon stock (case study: Tal Siah forestry project)

Saeid Niknafs Dehghani,[1] Farshad Soleimani Sardoo,[2*] Ali Azareh[3]

1. Graduated, Master's degree, University of Jiroft, PhD Student in Watershed Science and Engineering, Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Kashan University, Iran. Email: saidniknafs9101@gmail.com
2. Assistant Professor, Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft, Iran. Corresponding author; Email: f.soleimani@ujiroft.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, University of Jiroft, Iran. Email: Aliazareh@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 30 December, 2024
Received in revised form 04 February, 2025
Accepted 08 March, 2025
Available online 21 March, 2025

Keywords:
biological regeneration, soil,
carbon sequestration,
one-way ANOVA,
Tal Siah forestry project.

ABSTRACT

Subject: Investigating the effect of biological restoration operations on soil organic carbon storage (Case study: Tal Siah Afforestation Project)

Objective: To evaluate the role of the Iranian melon plant species in increasing soil carbon sequestration and helping to reduce atmospheric carbon dioxide in order to support sustainable development.

Research methods: Soil samples were randomly collected from two depths of 0–15 and 15–30 cm from under the canopy of the Iranian melon species and control areas. After laboratory analysis, the samples were statistically analyzed using independent t-test and one-way analysis of variance (ANOVA) in SPSS software.

Findings: The results showed that the amount of organic carbon in the restored area at depths of 0–15 and 15–30 was approximately 0.2, while in the control area this amount was 0.06 and 0.04, respectively. The amount of carbon sequestered in the restored area at depths of 0–15 and 15–30 cm was 4.39 and 9.07 tons/ha, respectively, while this amount was measured in the control area as 1.05 and 3.83 tons/ha, respectively. Also, the apparent specific gravity of the soil in the restored area was estimated to be 1.46 and 1.43 g/cm3, and in the control area as 1.55 and 1.51 g/cm3, respectively.

Conclusion: The presence of plant species such as Persian melon effectively increases carbon sequestration in the soil and can be used as an efficient solution to reduce global warming.

Cite this article: Niknafs Dehghani, S., Soleimani Sardoo, F., Azareh, A. (2025). Investigating the effect of biological revitalization operations on soil organic carbon stock (case study: Tal Siah forestry project). *ECOHYDROLOGY*, 12 (1), 675-694. https://doi.org/10.22059/IJE.2025.386114.1853

Publisher: University of Tehran Press. DOI: https://doi.org/10.22059/IJE.2025.386114.1853

Introduction
Soil carbon sequestration is considered one of the most effective strategies for mitigating climate change and improving the environmental quality of natural ecosystems. Vegetation, as a key component of the carbon cycle, plays a crucial role in carbon stabilization through photosynthesis, the input of organic residues into the soil, and the enhancement of carbon pool stability. In this context, native and drought-resistant species in arid and semi-arid regions, due to their specific ecological traits, can significantly contribute to the enhancement of soil carbon storage.

Objective
The objective of this study was to evaluate the impact of *Prosopis cineraria* tree cover on soil carbon sequestration in the Telesiah region of Jiroft County. Additionally, the study aimed to compare the amount of soil carbon stored under tree canopies with that in areas lacking vegetation cover.

MaterialsandMethods
This research was conducted using a completely randomized sampling design. Soil samples were collected from two depths (0–15 cm and 15–30 cm) in two different areas: under the tree canopy and in control sites without tree cover. After preparation, the samples were analyzed to determine the organic carbon content through the wet oxidation method, and the bulk density was measured. Subsequently, soil organic carbon per unit area was calculated based on these measurements. Data analysis was performed using independent t-tests and one-way analysis of variance (ANOVA) through SPSS software.

Results
The results indicated that the amount of soil carbon sequestration under the canopy of *P. cineraria* was significantly higher than in the control area ($p<0.05$). In the 0–15 cm soil layer, carbon sequestration was measured at 4.39 tons per hectare, while in the 15–30 cm layer, it reached 9.07 tons per hectare. In contrast, the corresponding values in the control area were 1.05 and 3.83 tons per hectare, respectively. A significant difference was also observed between the different soil depths, with deeper layers exhibiting higher carbon storage.

Discussion
The findings demonstrate that the presence of native species such as *Prosopis cineraria* enhances soil properties, particularly organic matter content and carbon storage capacity. This improvement can be attributed to increased input of plant residues, extensive root system development, and higher biological activity in the soil. Furthermore, the notable difference in carbon storage between soil depths suggests greater carbon stability in the deeper layers.

Conclusion
This study underscores the importance of expanding native vegetation cover to increase soil carbon sequestration in arid and semi-arid ecosystems. The use of resilient species like *P. cineraria* is recommended as an effective strategy for ecosystem restoration projects and climate change mitigation. Future research should focus on long-term monitoring and modeling of carbon dynamics across different spatial and temporal scales.

Author contribution
Saeed Niknaf: Data collection, writing
Farshad Soleimani Sardoo: supervisor and editing
Ali Azareh: Data analysis and writing

Data Availability Statement
The datasets are available upon reasonable request to the corresponding author.

Acknowledgements
This article is the result of a thesist entitled investigating the effect of biological recovery operation on soil organic carbon storage (case study : Tall Siah Forestry). The financial support of the university of Jiroft is gratefully acknowledged.

Ethical considerations
All text used in this research has been written in accordance with scientific and ethical principles.

Funding
The cost of the research was funded by university of Jiroft

Conflict of interest
The authors have reported no conflicts of interest with regard to the authorship or publication of this article

انتشارات دانشگاه تهران

مجله اکوهیدرولوژی

شاپای الکترونیکی: ۶۱۰۱-۲۴۲۳

سایت نشریه: https://ije.ut.ac.ir

بررسی تأثیر عملیات احیای بیولوژیک بر ذخیرهٔ کربن آلی خاک (مطالعهٔ موردی: پروژهٔ جنگل‌کاری تل سیاه)

سعید نیک‌نفس دهقانی،[۱] فرشاد سلیمانی ساردو،[۲*] علی اذره[۳]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه جیرفت و دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه کاشان، ایران. رایانامه: saidniknafs9101@gmail.com

۲. استادیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه جیرفت، ایران. رایانامه: f.soleimani@ujiroft.ac.ir

۳. دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه جیرفت، ایران. رایانامه: Aliazareh@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:
احیا بیولوژیک،
خاک،
ترسیب کربن،
واریانس یک‌طرفهٔ ANOVA،
پروژهٔ جنگل‌کاری تل سیاه

چکیده

موضوع: بررسی تأثیر عملیات احیای بیولوژیک بر ذخیرهٔ کربن آلی خاک (مطالعهٔ موردی: پروژهٔ جنگل‌کاری تل سیاه)

هدف: ارزیابی نقش گونهٔ گیاهی کهور ایرانی در افزایش ترسیب کربن خاک و کمک به کاهش دی‌اکسید کربن جوی به‌منظور حمایت از توسعهٔ پایدار.

روش تحقیق: نمونه‌های خاک از دو عمق ۰–۱۵ و ۱۵–۳۰ سانتی‌متر، به‌طور تصادفی از زیر تاج پوشش گونه کهور ایرانی و مناطق شاهد برداشت شدند. نمونه‌ها پس از آنالیز آزمایشگاهی، با استفاده از آزمون t مستقل و آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) در نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مقدار کربن آلی در منطقه احیاشده در عمق‌های ۰–۱۵ و ۱۵–۳۰ تقریباً برابر با ۰/۲ بود، در حالی‌که در منطقه شاهد این مقدار به‌ترتیب برابر با ۰/۰۶ و ۰/۰۴ به‌دست آمد. میزان کربن ترسیب‌شده در منطقه احیاشده به‌ترتیب در عمق‌های ۰–۱۵ و ۱۵–۳۰ سانتی‌متری برابر با ۴/۳۹ و ۹/۰۷ تن در هکتار بود، در حالی که این مقدار در منطقه شاهد به‌ترتیب ۱/۰۵ و ۳/۸۳ تن در هکتار اندازه‌گیری شد. همچنین، وزن مخصوص ظاهری خاک در منطقه احیاشده به‌ترتیب برابر با ۱/۴۶ و ۱/۴۳ و در منطقه شاهد برابر با ۱/۵۵ و ۱/۵۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب برآورد گردید.

نتیجه‌گیری: وجود گونه‌های گیاهی مانند کهور ایرانی به طور مؤثر موجب افزایش ترسیب کربن در خاک شده و می‌تواند به عنوان راهکاری کارآمد برای کاهش گرمایش جهانی مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: نیک‌نفس دهقانی، سعید؛ سلیمانی ساردو، فرشاد؛ اذره، علی. بررسی تأثیر عملیات احیای بیولوژیک بر ذخیرهٔ کربن آلی خاک (مطالعهٔ موردی: پروژهٔ جنگل‌کاری تل سیاه). *اکوهیدرولوژی*، ۱۲(۱)، ۶۷۵-۶۹۴.
https://doi.org/10.22059/IJE.2025.386114.1853

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

© سعید نیک‌نفس دهقانی، فرشاد سلیمانی ساردو، علی اذره.

مقدمه

افزایش نگرانی‌ها دربارهٔ گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی باعث شده است که در سال‌های اخیر توجه بیشتری به خاک و قابلیت آن در ترسیب کربن معطوف گردد (شاهرخ و همکاران، ۱۳۹۶). در دنیای امروزی، یکی از اصلی‌ترین روش‌ها برای کاهش گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسید کربن (CO_2)، ترسیب آن در خاک یا زیست‌تودهٔ گیاهی است. این روش نه‌تنها به اهداف توسعهٔ پایدار و کاهش دی‌اکسید کربن در جو کمک می‌کند، بلکه به غنی‌سازی خاک ازطریق افزایش کربن آلی نیز مؤثر است. در حال حاضر، حفاظت و افزایش کربن آلی در خاک به یکی از اولویت‌های اصلی سیاست‌های بسیاری از کشورها تبدیل شده است (سینگلا[1] و همکاران، ۲۰۲۴; روسی[2] و همکاران، ۲۰۰۹). یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسید کربن، ترسیب آن در خاک یا در زیست‌تودهٔ گیاهی است. همچنین به نظر می‌رسد که اکوسیستم‌های باثبات، مانند مراتع، بهترین منابع برای ترسیب کربن و کاهش تغییرات اقلیمی جهانی محسوب می‌شوند (کوهستانی و همکاران، ۱۴۰۰). خاک پس از اقیانوس‌ها، بزرگ‌ترین ذخیره‌گاه کربن در جهان است و هرساله مقدار قابل توجهی از کربن را در خود نگهداری می‌کند (نصرتی، محمدی و نظری سامانی، ۱۳۹۷). ترسیب کربن ازطریق ذخیره‌سازی بلندمدت دی‌اکسید کربن جو در مادهٔ آلی خاک، نه‌تنها انتشار دی‌اکسید کربن به جو را جبران می‌کند، بلکه به افزایش حاصلخیزی خاک نیز کمک می‌کند (شاهرخ و همکاران، ۱۳۹۶). با توجه به اینکه تولید زی‌تودهٔ گیاهی به‌عنوان معیاری برای سنجش میزان دی‌اکسید کربن جذب‌شده از جو محسوب می‌شود، انتخاب گونه‌های گیاهی با تولید زی‌تودهٔ بالا می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش غلظت دی‌اکسید کربن در نظر گرفته شود (خورده‌بین و همکاران، ۱۳۹۲). پوشش گیاهی به‌عنوان بازیگر اصلی چرخهٔ کربن شناخته می‌شود، که این عملکرد به‌دلیل نقش آن در فتوسنتز، دینامیک جذب و رهاسازی فصلی و ارتباط طولانی‌مدت با فرایندهای مصرف میان زی‌تودهٔ گیاه و کربن خاک است (دلخوش و باقری، ۱۳۹۰؛ نجف‌پور، ۱۳۹۳). وجود مادهٔ آلی علاوه‌بر اینکه نشان‌دهندهٔ حاصلخیزی و کیفیت خاک است، به‌دلیل نقش کلیدی کربن آلی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، ازجمله تهیهٔ پیش‌ماده برای میکروارگانیسم‌ها، افزایش ظرفیت بافری، فراهم‌سازی عناصر غذایی و جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای، مطالعهٔ تغییرات آن بسیار حائز اهمیت است (کوچ، امانی و عابدی، ۲۰۲۲). مادهٔ آلی یکی از عناصر حیاتی خاک است که شامل بقایای بافتی گیاهان و جانوران، اجزای تجزیه‌نشده و همچنین بخش‌های جزئی تجزیه‌شدهٔ آن‌ها و ریزجانداران مرده است (ادواردز و آرانکون،[3] ۲۰۲۲). وجود مادهٔ آلی نه‌تنها نشان‌دهندهٔ حاصلخیزی و کیفیت خاک است، بلکه به‌عنوان شاخص مناسبی برای باروری خاک نیز به شمار می‌آید. این ماده نتیجهٔ تعامل فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی است. مادهٔ آلی با بهبود شرایط خاکدانه‌سازی، وضعیت تخلخل و نفوذپذیری خاک را ارتقا می‌دهد؛ ازاین‌رو نقش مهمی در پایداری اکوسیستم ایفا می‌کند. به همین دلیل، بررسی جنبه‌های مختلف آن یکی از الزامات و پایه‌های اصلی در مطالعات کیفیت خاک، چرخهٔ کربن و تغییرات اقلیم به حساب می‌آید (یانگ[4] و همکاران، ۲۰۲۳). موضوع مهمی که باید مد نظر قرار گیرد، این است که انجام اقداماتی همچون احیا و حفاظت از پوشش گیاهی جنگل‌ها و مراتع و همچنین به‌کارگیری اصول کشاورزی پایدار در تولید محصولات زراعی، علاوه‌بر افزایش توان ترسیب کربن در سیستم خاک–گیاه، مزایای دیگری نیز دارد که به آن‌ها خدمات اکوسیستمی گفته می‌شود (یگانه و همکاران، ۱۳۹۴). ازجمله خدمات اکوسیستمی ناشی از سیاست‌های ترسیب کربن می‌توان به بهبود تنوع زیستی، جلوگیری از فرسایش خاک، کاهش خطرات ناشی از آلودگی‌های گردوغبار، تقویت منابع آب زیرزمینی، افزایش ظرفیت نفوذ و نگهداری آب در خاک، کاهش وزن مخصوص ظاهری و بهبود شرایط فیزیکی خاک برای رشد گیاه و فعالیت ریزجانداران اشاره کرد (فلاحی، ۱۳۹۲؛ زو[5] و همکاران، ۲۰۱۰). آثار اجرای طرح‌های مرتعی فقط به نتایج مستقیم محدود نمی‌شود، بلکه تأثیرات غیرمستقیم و خدمات ناشی از این طرح‌ها نیز از نکات مهمی هستند که توجه به آن‌ها می‌تواند پایه‌ای معتبر برای سرمایه‌گذاری در اکوسیستم‌های مرتعی

1. Singla
2. Rossi
3. Edvards & Arancon
4. Yang
5. Zhu

فراهم کند. مناطق خشک و نیمه‌خشک حدود ۴۵ درصد از سطح کرهٔ زمین را پوشش می‌دهند و با وجود محتوای پایین کربن آلی در این مناطق، تقریباً ۱۶ درصد از ذخایر جهانی کربن خاک را در بر می‌گیرند. احیای این مناطق می‌تواند منجر به ذخیره‌سازی مقادیر قابل توجهی کربن، به میزان سالانه حدود یک پتاگرم کربن در سطح جهانی شود. علاوه‌بر این، افزایش کربن آلی خاک در این مناطق می‌تواند به بهبود باروری، افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک، تقویت تنوع زیستی، اصلاح ساختار خاک، کاهش فرسایش، بهبود نفوذپذیری خاک و کاهش رواناب منجر گردد(نوستو، جوباگی و پاروئلو،[1] ۲۰۰۶) . مطالعات متعددی درزمینهٔ تغییرات کربن آلی خاک در طول عملیات احیایی مراتع و آبخیزها انجام شده که نتایج متفاوتی را به همراه داشته است. ازآنجاکه توان ترسیب کربن در خاک بسته به گونهٔ گیاهی، مکان و شیوهٔ مدیریت متفاوت است، محققان مختلف با بررسی توان ترسیب کربن در طول عملیات احیایی مانند قرق، مرتع‌کاری و بذرکاری به ارزیابی این توان ترسیب کربن پرداخته‌اند. دهقان فیروزآبادی و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهشی با عنوان «بررسی تأثیر عملیات تاغ‌کاری بر ویژگی‌های شیمیایی خاک (مطالعهٔ موردی: کانون بحرانی فرسایش بادی میبد)» به این نتیجه رسیدند که ازنظر خصوصیات شیمیایی خاک، کربن آلی در منطقهٔ تاغ‌کاری‌شده نسبت به منطقهٔ شاهد افزایش معنی‌داری در سطح یک درصد دارد؛ به‌طوری‌که مقدار آن از ۰/۱ به ۰/۵ رسیده که تقریباً پنج برابر افزایش را نشان می‌دهد. همچنین نتایج نشان‌دهندهٔ افزایش معنی‌دار عنصر پتاسیم در خاک منطقهٔ تاغ‌کاری‌شده نسبت به منطقهٔ شاهد است؛ به‌گونه‌ای که میزان این عنصر از ۳۶۶ ppm به حدود ۱۲۹۹ ppm رسیده که نشان‌دهندهٔ افزایش حدود چهاربرابری است. خان‌محمدی و متینی‌زاده (۱۴۰۲) در پژوهشی به ارزیابی ویژگی‌های خاک زیر تاج پوشش درختان بنه و بادام‌کوهی در تنگ خشک شهرستان سمیرم پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد که مقادیر هدایت الکتریکی، کربن آلی و پتاسیم قابل دسترس در خاک زیر تاج‌پوشش درختان بنه و بادام‌کوهی به‌طور معنی‌داری بیشتر از خاک منطقهٔ شاهد است. ریگی، ذوالفقاری و سلیمی (۱۴۰۲) تحقیقی با عنوان «ارزیابی پتانسیل انباشت کربن خاک در گونه‌های کلیر و کهور ایرانی (مطالعهٔ موردی: منطقهٔ کشتگان سراوان)» انجام دادند. آن‌ها اشاره کردند که میزان انباشت کربن خاک در منطقهٔ تحت پوشش گونهٔ گیاهی کلیر (۱/۳۲ تن در هکتار) به‌طور معنی‌داری ($p<0.01$) بیشتر از منطقهٔ تحت پوشش گونهٔ گیاهی کهور ایرانی (۰/۷۵ تن در هکتار) و منطقهٔ شاهد (۰/۲۵ تن در هکتار) بود. همچنین محتوی مادهٔ آلی خاک و درصد شن در زیر سایه‌انداز هر دو گونهٔ گیاهی بیشتر از منطقهٔ شاهد بود. براساس نتایج، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که وجود گونه‌های گیاهی موجب افزایش میزان انباشت کربن خاک و در پی آن تعدیل گرمایش جهانی می‌شود. قربانی و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی ظرفیت ترسیب کربن و ارتباط آن با برخی خصوصیات خاک و پوشش سطح خاک پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که آنالیز همبستگی ترسیب کربن در رویشگاه‌ها و طبقات ارتفاعی مختلف، رابطهٔ منفی با درصد شن، اسیدیته و هدایت الکتریکی خاک دارد. همچنین، این مطالعه همبستگی مثبت ترسیب کربن را با درصد رس و سیلت، درصد کربن آلی، مادهٔ آلی و نیتروژن خاک نشان می‌دهد. الباسیونی[2] و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی به بررسی تغذیهٔ گیاهان تحت تغییرات آب‌وهوا و ترسیب کربن خاک پرداختند. نتایج نشان داد که ترسیب کربن خاک نه‌تنها در کاهش تغییرات آب‌وهوایی مؤثر است، بلکه در دسترسی به مواد مغذی گیاه و حاصلخیزی خاک نیز نقش اساسی ایفا می‌کند. به همین دلیل، در سطح جهانی توجه قابل توجهی به جذب کربن دی‌اکسید از جو و ذخیره‌سازی آن در خاک ازطریق گیاهان وجود دارد. اتخاذ روش‌های مدیریتی و افزایش ورودی‌های کربن خاک نسبت به خروجی‌ها، نقش مهمی در ترسیب کربن خاک و تغذیه گیاه دارد. ازجمله خدمات ترسیب کربن می‌توان به بهبود تنوع زیستی، جلوگیری از فرسایش خاک، کاهش خطرات آلودگی‌های ناشی از گردوغبار، تقویت منابع آب زیرزمینی، افزایش ظرفیت نفوذ و نگهداری آب در خاک، کاهش وزن مخصوص ظاهری و بهبود شرایط فیزیکی خاک برای رشد گیاه و فعالیت ریزجانداران اشاره کرد. سینگ و همکاران (۲۰۱۷) مشخصات خاک در امتداد تغییرات ارتفاعی در جنگل‌های پهن‌برگ در منطقهٔ هیمالیا را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که میزان منیزیم خاک تابع تغییرات فصلی و ارتفاعی است. همچنین، مادهٔ آلی و میزان پتاسیم تحت‌تأثیر تغییرات فصلی و عمق خاک قرار دارند. نقش اکوسیستم‌های جنگلی در ترسیب کربن به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان عامل کلیدی در کاهش اثرات تغییرات

1. Nosetto, Jobbagy & Paruelo
2. Elbasiouny

اقلیمی شناخته شده است. جنگل‌ها ازطریق فرایندهای بیولوژیکی مختلف، کربن اتمسفری را در هر دو بخش بیومس و خاک جذب و ذخیره می‌کنند. تحقیقات اخیر نشان داده است که شیوه‌های مدیریت جنگل، مانند جنگل‌کاری و احیای جنگل، می‌توانند پتانسیل ترسیب کربن را به‌طور قابل توجهی افزایش دهند. برای مثال، یک مطالعه توسط ژانگ[1] و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که پروژه‌های احیای جنگل در مناطق استوایی باعث افزایش قابل‌توجه کربن آلی خاک تا ۲۵ درصد در طول یک دهه شدند. این موضوع اهمیت مدیریت پایدار جنگل‌ها در مقابله با گرمایش جهانی را نشان می‌دهد. به‌طور مشابه، مدیریت مراتع نقش مهمی در ترسیب کربن ایفا می‌کند، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک که بازسازی پوشش گیاهی می‌تواند بهبودهای قابل توجهی در ذخیرهٔ کربن خاک ایجاد کند. مطالعه‌ای توسط اسمیت[2] و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد که مدیریت صحیح چرا و شیوه‌های حفاظت از خاک می‌توانند ترسیب کربن را در مراتع تا ۳۰ درصد در طول پنج سال افزایش دهند. این یافته‌ها پتانسیل شیوه‌های مدیریت اراضی را در کمک به ترسیب کربن و ارائهٔ یک راه‌حل طبیعی برای کاهش اثرات تغییرات اقلیمی تأکید می‌کنند.

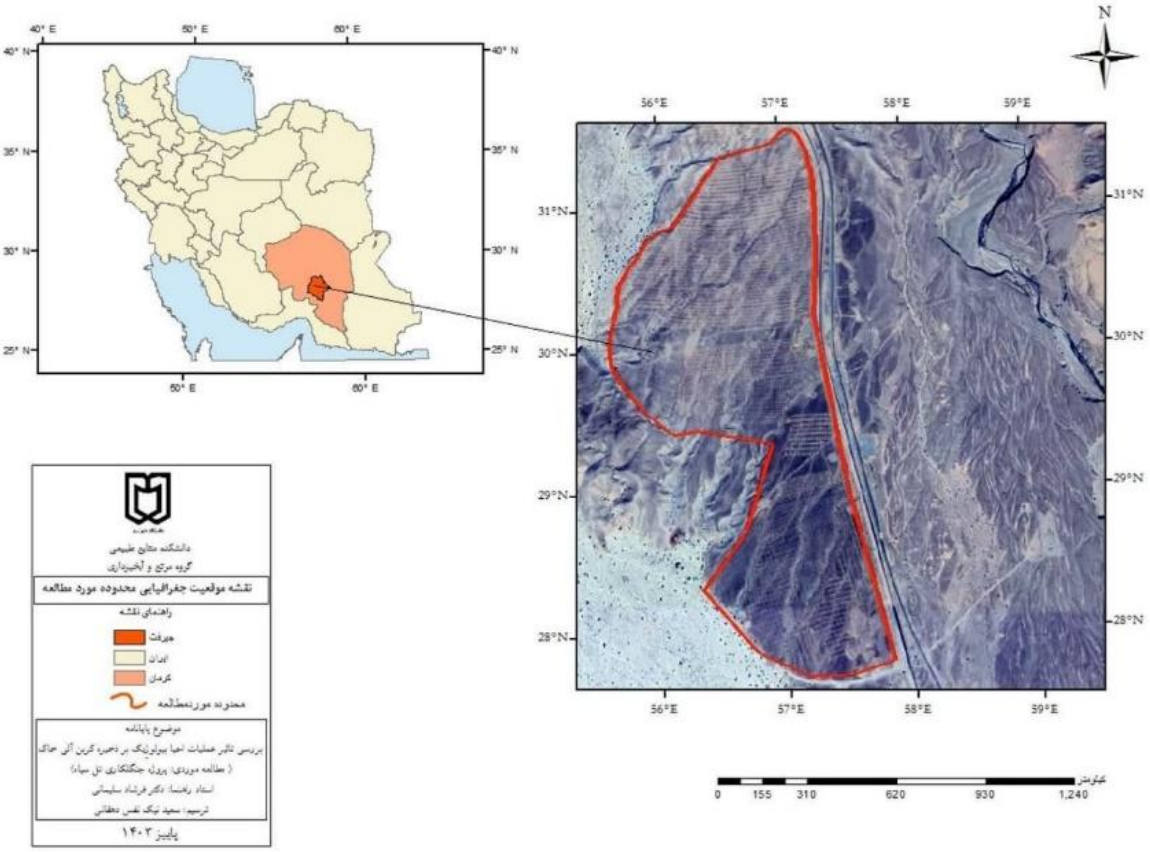
در سال‌های پس از انقلاب، اجرای گستردهٔ عملیات بیولوژیکی، مکانیکی و بیومکانیکی آبخیزداری در عرصه‌های منابع طبیعی، به‌ویژه تحت نظارت سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، نقش مهمی در مدیریت پایدار سرزمین ایفا کرده است. این اقدامات علاوه‌بر کنترل فرسایش و بهبود وضعیت هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز، می‌توانند تأثیر قابل توجهی در کاهش اثرات تغییرات اقلیمی داشته باشند. یکی از مهم‌ترین جنبه‌های این تأثیر، قابلیت ترسیب کربن و بهبود کیفیت خاک است که می‌تواند در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مقابله با گرمایش جهانی مؤثر باشد. بااین‌حال، به‌رغم اجرای گستردهٔ این پروژه‌ها، ارزیابی کمی و دقیق ظرفیت آن‌ها در جذب و ذخیره‌سازی کربن کمتر مورد توجه قرار گرفته است. ازاین‌رو، انجام مطالعات جامع در این زمینه برای تعیین میزان اثربخشی این اقدامات ضروری به نظر می‌رسد. پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرگذاری پروژه‌های آبخیزداری بر ترسیب کربن، به‌طور خاص بر منطقهٔ تل سیاه جیرفت متمرکز شده و تلاش دارد با ارائهٔ تحلیل‌های دقیق، نقشی مؤثر در بهینه‌سازی برنامه‌های مدیریتی ایفا کند.

مواد و روش

منطقهٔ مطالعاتی

برای انجام این پژوهش از پروژهٔ جنگل‌کاری تل سیاه (طول جغرافیایی "۰ '۳۴ °۵۷ تا "۰ '۴۴ °۵۷ شرقی و عرض جغرافیای "۰ '۵۲ °۲۷ تا "۰ '۴۶ °۲۸ شمالی) در اطراف شهرستان جیرفت نمونه‌برداری خاک انجام گرفت (شکل ۱). منطقهٔ تل سیاه در پنج‌کیلومتری شرق جیرفت با مساحت حدود ۲۵۳۹ هکتار قرار گرفته است. میانگین بارندگی آن با توجه به آمار ایستگاه هواشناسی جیرفت که نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه است، ۱۷۳/۵ میلی‌متر در سال است و دمای سالانهٔ آن، بین ۴- تا ۴۹ درجهٔ سلسیوس متغیر است. از سال ۱۳۹۴، سازمان منابع طبیعی جنوب استان کرمان اقدام به کشت گونهٔ کهور ایرانی (*Prosopis cineraria*) در این منطقه کرده و آن را به یک جنگل مصنوعی تبدیل نموده است.

1. Zhang
2. Smith



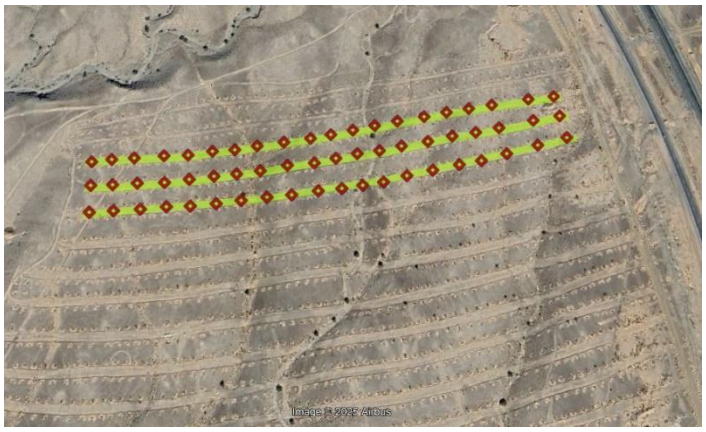
شکل ۱. موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه

روش پژوهش

برای نمونه‌برداری از خاک به‌منظور تعیین میزان کربن ذخیره‌شده، در منطقهٔ احیا، اقدام به استقرار ترانسکت و پلات شد. در این راستا، سه ترانسکت ۲۰۰ متری با فاصلهٔ ۳۰ متر از یکدیگر به‌صورت تصادفی–سیستماتیک قرار گرفت و سپس ۱۰ پلات ۳ متر مربعی به‌طور تصادفی در طول هر ترانسکت مستقر شد. در هر پلات، پروفیل زیر تاج‌پوشش گیاه برای نمونه‌برداری حفر گردید. نمونه‌برداری در عمق‌های ۰ تا ۱۵ و ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متری انجام شد. درمجموع، ۶۰ نمونه خاک از هر منطقه (احیا و شاهد) برداشت گردید. موقعیت نقاط پروفیل خاک در روی نقشهٔ موقعیت منطقه در شکل (۲) قابل مشاهده است. نمونه‌برداری از منطقهٔ شاهد در همان راستا، اما خارج از منطقهٔ احیا انجام شد. درنهایت، ۱۲۰ نمونه خاک برای انجام آزمایش‌های شیمیایی و فیزیکی به آزمایشگاه خاک‌شناسی دانشگاه جیرفت منتقل گردید. تعیین درصد کربن آلی نمونه‌های خاک به روش والکلی و بالک انجام شد. با داشتن مقدار درصد کربن آلی در واحد وزن خاک و وزن مخصوص ظاهری در یک عمق مشخص، می‌توان کربن آلی در واحد سطح را ازطریق رابطهٔ زیر محاسبه کرد (مصدقی، ۱۳۸۲).

$$Cc(g/m2)= 10000 * OC(\%)* Bd\ (g/cm3) * e\ (cm)$$

در این رابطه، Cc میزان کربن ذخیره‌شده در سطح یک متر مربع، OC درصد کربن آلی در عمق مشخصی از خاک و Bd جرم مخصوص ظاهری برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و e ضخامت خاک برحسب سانتی‌متر است. شکل (۳) نحوهٔ نمونه‌برداری از خاک در پای نمونه‌های گیاهی را نمایش می‌دهد.



شکل ۲. موقعیت نقاط پروفیل خاک در روی نقشهٔ موقعیت منطقه

شکل ۳. نمونه‌برداری از خاک پای نمونه‌های گیاهی

تجزیه‌وتحلیل داده

برای تجزیه‌وتحلیل اطلاعات گردآوری‌شده، از روش‌های آمار توصیفی و آمار استنباطی استفاده شده است. استفاده از آمار توصیفی با هدف تلخیص اطلاعات جمع‌آوری شده و شناخت بیشتر جامعهٔ مورد بررسی صورت پذیرفته است؛ زیرا هدف آمار توصیفی، توصیف، استخراج نکات اساسی و ترکیب اطلاعات به کمک زبان اعداد است. هدف آمار استنباطی، به‌طور کلی انجام استنباط دربارهٔ پارامترهای جامعه ازطریق تجزیه‌وتحلیل اطلاعات موجود در داده‌های نمونه و همچنین سنجش عدم اطمینانی است که در این استنباط‌ها وجود دارد. در این راستا فرضیهٔ تحقیق با استفاده از آزمون تحلیل واریانس مورد آزمون قرار گرفته است. به‌منظور مقایسهٔ تأثیر نوع فعالیت‌های احیایی بر میزان کربن آلی خاک، ابتدا شاخص‌های هر نوع فعالیت احیا با منطقهٔ شاهد خود ازطریق آزمون تی مستقل بررسی شد. سپس فعالیت احیایی و شاهد با استفاده از تجزیه‌وتحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) مورد مقایسه قرار گرفتند. همچنین برای نرمال بودن توضیع داده‌ها از آزمون کولموگروف–اسمیرنوف استفاده شد. تمامی داده‌های جمع‌آوری‌شده با استفاده از نرم‌افزارهای Excel 2013 و SPSS 16 تحلیل گردید.

نتایج

شاخص‌های پراکنش میانگین و انحراف‌معیار هریک از پارامترهای مورد مطالعه در طرح تحقیق، برای دو منطقهٔ شاهد و احیاشده به شرح جدول (۱) بوده است. این اطلاعات در دو عمق نمونه‌برداری ۰–۱۵ و ۱۵–۳۰ سانتی‌متری از سطح خاک جمع‌آوری و

ارائه شده است. مطابق با یافته‌های جدول (۱) مشاهده می‌شود که مقدار متوسط کربن آلی خاک در منطقهٔ احیاشده در عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری تقریباً یکسان و برابر با ۰/۲ بوده است؛ درحالی‌که مقدار این شاخص در منطقهٔ شاهد و در عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری به‌ترتیب برابر با ۰/۰۶ و ۰/۰۴ برآورد شده است که به‌طور قابل توجهی کمتر از مقدار این شاخص در منطقهٔ احیاشده بوده است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که مقدار کربن ترسیب‌شده در منطقهٔ احیاشده و در عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری به‌ترتیب برابر با ۴/۳۹ و ۹/۰۷ میلی‌گرم بوده است. مقدار این پارامتر در منطقهٔ شاهد و در عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری سطح خاک، به‌ترتیب برابر با ۱/۰۵ و ۳/۸۳ به دست آمده که اختلاف قابل توجهی را با منطقهٔ احیاشده نشان می‌دهد. مقدار پارامتر وزن مخصوص ظاهری خاک در عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری منطقهٔ احیاشده اختلاف زیادی نداشته و به‌طور متوسط برابر با ۱/۴۶ و ۱/۴۳ برآورد شده است. مقدار این شاخص در عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری منطقهٔ شاهد به‌ترتیب برابر با ۱/۵۵ و ۱/۵۱ میلی‌گرم بوده است.

جدول ۱. ویژگی‌های توصیفی پارامترها در اعماق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری مناطق شاهد و احیاشده

پارامترها	عمق نمونه‌برداری	منطقهٔ احیاشده		منطقهٔ شاهد	
		۰–۱۵ cm	۱۵–۳۰ cm	۰–۱۵ cm	۱۵–۳۰ cm
وزن مخصوص ظاهری خاک (Bd)		۱/۴۶۶۸ ± ۰/۰۷۷۸	۱/۴۳۱۸ ± ۰/۰۸۵۶	۱/۵۵۳۱ ± ۰/۱۱۲۱	۱/۵۱۴۹ ± ۰/۱۱۸۸
کربن آلی خاک (OC)		۰/۲۱۴۱ ± ۰/۲۴۶۹	۰/۲۰۹۴ ± ۰/۳۵۵۱	۰/۰۶۳۴ ± ۰/۰۴۲۸	۰/۰۴۲۷ ± ۰/۰۳۹۸
کربن (SC)		۴/۳۹۵۴ ± ۵/۲۰۳۴	۹/۰۷۷۹ ± ۱۴/۶۱۴	۱/۰۵۹۸ ± ۰/۸۵۵۹	۳/۸۳۴۸ ± ۵/۵۰۵۶

به‌منظور آزمون نرمال بودن توزیع داده‌ها، از آزمون کلموگروف–اسمیرنوف استفاده شده است. با توجه به سطوح معناداری به‌دست‌آمده از این آزمون مشاهده می‌شود که مقادیر عناصر فسفر (p-value = ۰/۱۷۷)، پتاسیم (p-value = ۰/۲۹۶) و وزن مخصوص ظاهری خاک (p-value = ۰/۸۲۲) در سطح خطای ۰/۰۵ نرمال بوده‌اند، درحالی‌که مقادیر پارامترهای نیتروژن، کربن آلی خاک و کربن ترسیب‌شده با سطوح معناداری کمتر از ۰/۰۵ نرمال نبوده‌اند. بنابراین، فرض نرمال بودن بر روی تمامی پارامترهای مورد آزمون برقرار نبوده است و نشان می‌دهد که در شاخص‌های نیتروژن، کربن آلی خاک و کربن ترسیب‌شده، می‌توان انتظار مقادیر خیلی بزرگ و خیلی کوچک را نیز با احتمال زیاد داشت. اما با استناد به قضیهٔ حد مرکزی می‌توان از آزمون تحلیل واریانس برای مقایسهٔ اثر احیا بر روی کربن ترسیب‌شدهٔ خاک و سایر پارامترها استفاده کرد (جدول ۲).

جدول ۲. آزمون نرمال بودن توزیع داده‌ها

پارامتر	آماره KS[1]	سطح معناداری
وزن مخصوص ظاهری خاک (Bd)	۰/۶۳۰	۰/۸۲۲
کربن آلی خاک (OC)	۳/۴۱۰	۰/۰۰۰
کربن (SC)	۳/۲۵۹	۰/۰۰۰

نتایج آزمون اثر احیای بیولوژیک بر ترسیب کربن نشان داد که سطح معناداری آزمون تحلیل واریانس برای اثر احیای بیولوژیک بر ترسیب کربن، کوچک‌تر از خطای ۰/۰۵ به دست آمده (p-value = ۰/۰۰۵) و نشان می‌دهد که مقادیر ترسیب کربن در بین منطقهٔ احیاشده و منطقهٔ شاهد اختلاف معناداری داشته است و می‌توان این تغییر در میزان ترسیب کربن را به احیای بیولوژیک منطقهٔ احیاشده نسبت داد. همچنین سطح معناداری برای اثر عمق نیز کوچک‌تر از خطای ۰/۰۵ به دست آمده (p-value = ۰/۰۱۵) و نشان می‌دهد که میزان ترسیب کربن در عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری هر دو منطقه اختلاف معناداری

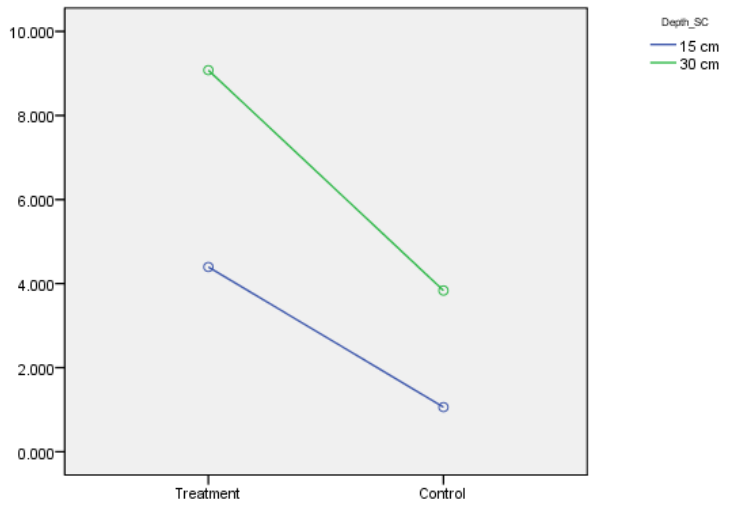
1. Kolmogorov-Smirnov

داشته است. درحالی‌که اثر متقابل عمق و اثر احیا با سطح معناداری بزرگ‌تر از ۰/۰۵ (p-value = ۰/۵۲۷)، نشان می‌دهد که اختلاف معناداری بین مقدار ترسیب کربن در بین عمق‌های متفاوت مناطق مختلف وجود ندارد. به بیان دیگر، روند تغییر در میزان ترسیب کربن عمق ۱۵ سانتی‌متری در بین مناطق شاهد و احیاشده، همسو با روند تغییر در میزان کربن ترسیب‌شدهٔ عمق ۳۰ سانتی‌متری بین دو منطقه بوده است (جدول ۳)؛ اما به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که احیای بیولوژیک، تأثیر معناداری بر کربن ترسیب‌شده داشته است. با توجه به مقادیر میانگین کربن ترسیب‌شدهٔ خاک در مناطق مورد مطالعه، به نظر می‌رسد که احیای بیولوژیک موجب افزایش کربن ترسیب‌شدهٔ خاک در هر دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری شده است. ازاین‌رو فرضیهٔ تحقیق در سطح خطای ۰/۰۵ مورد پذیرش قرار گرفته است. همچنین نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که احیای بیولوژیک تأثیر قابل توجهی بر افزایش میزان کربن ترسیب‌شده در خاک دارد. همان‌طور که در نمودار (۱) مشاهده می‌شود، میزان کربن ترسیب‌شده در مناطق احیاشده نسبت به مناطق شاهد در هر دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری افزایش یافته است. این افزایش در عمق ۳۰ سانتی‌متری نسبت به ۱۵ سانتی‌متری بیشتر بوده که می‌تواند نشان‌دهندهٔ نفوذ بهتر مواد آلی به لایه‌های عمیق‌تر خاک در نتیجهٔ عملیات احیا باشد.

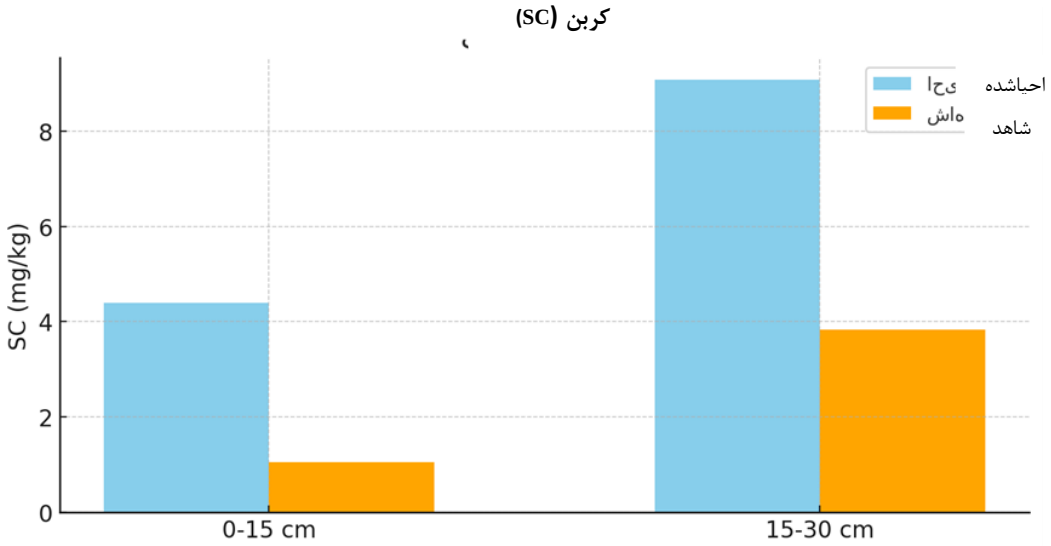
همچنین، نمودار (۲) مقادیر این شاخص را به‌صورت هیستوگرام (نمودار ستونی) نمایش می‌دهد که به‌وضوح تفاوت میان مناطق احیاشده و شاهد را مشخص می‌کند. نتایج آماری نیز نشان می‌دهد که تفاوت بین این دو منطقه ازنظر آماری معنادار بوده و فرضیهٔ تحقیق در سطح خطای ۰/۰۵ مورد تأیید قرار گرفته است. این یافته‌ها اهمیت اجرای پروژه‌های احیای بیولوژیک را در افزایش ذخیره‌سازی کربن خاک و درنتیجه کاهش دی‌اکسید کربن اتمسفری و مقابله با گرمایش جهانی تأیید می‌کند.

جدول ۳. آزمون تحلیل واریانس کربن ترسیب‌یافته در مناطق و عمق‌های مختلف

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجهٔ آزادی	آمارهٔ F	معناداری
مقدار ثابت	۲۵۳۰/۴۰۴	۱	۳۷/۲۵۱	۰/۰۰۰
احیای بیولوژیک	۵۵۱/۹۵۸	۱	۸/۱۲۵	۰/۰۰۵
عمق نمونه‌برداری	۴۱۷/۱۰۶	۱	۶/۱۴۰	۰/۰۱۵
احیا * عمق	۲۷/۲۸۸	۱	۰/۴۰۲	۰/۵۲۷
خطا	۷۸۷۹/۷۸۰	۱۱۶		
کل	۱۱۴۰۶/۵۳۵	۱۲۰		



نمودار ۱. مقادیر میانگین کربن ترسیب‌شده در مناطق و عمق‌های مختلف



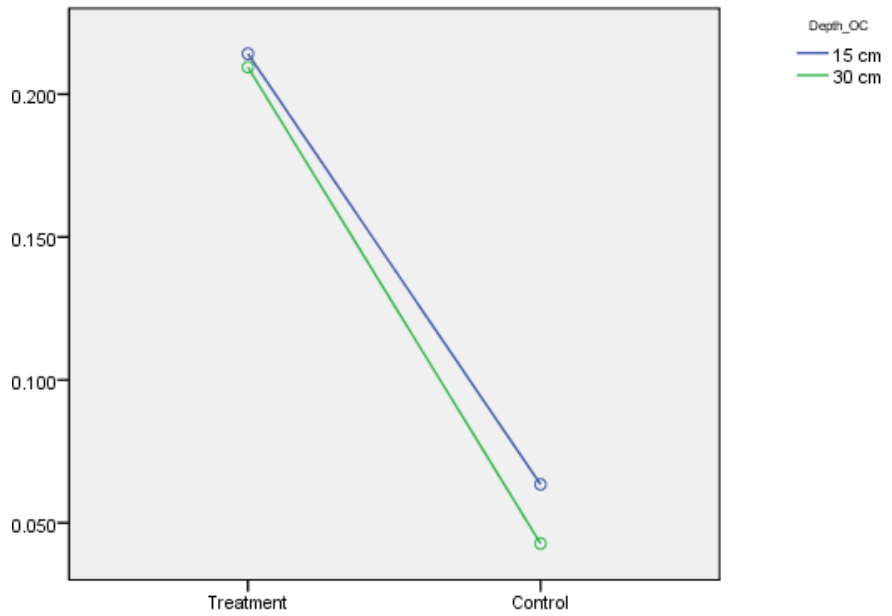
نمودار ۲. مقایسهٔ مقادیر میانگین کربن ترسیب‌شده در مناطق شاهد و احیاشده در عمق‌های مختلف خاک

نتایج آزمون اثر احیای بیولوژیک بر کربن آلی خاک نشان داد که سطح معناداری آزمون تحلیل واریانس برای اثر احیای بیولوژیک بر میزان کربن آلی خاک، کوچک‌تر از خطای ۰/۰۵ به دست آمده (p-value = ۰/۰۰۰) و نشان می‌دهد که مقادیر کربن آلی خاک در بین منطقهٔ احیاشده و منطقهٔ شاهد اختلاف معناداری داشته است. سطح معناداری برای اثر عمق بزرگ‌تر از خطای ۰/۰۵ به دست آمده (p-value = ۰/۷۴۷) و نشان می‌دهد که میزان کربن آلی خاک در عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری دو منطقهٔ مورد مطالعه اختلاف معناداری نداشته است. همچنین، اثر متقابل عمق و اثر احیا با سطح معناداری بزرگ‌تر از ۰/۰۵ (p-value = ۰/۸۳۹)، نشان می‌دهد که روند تغییر این پارامتر در بین مناطق مورد مطالعه، در هر دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری یکسان بوده است (جدول ۴). با توجه به این نتایج می‌توان اظهار نمود که احیای بیولوژیک، تأثیر معناداری بر میزان کربن آلی خاک داشته است و با توجه به مقادیر میانگین کربن آلی خاک در مناطق مورد مطالعه، به نظر می‌رسد که احیای بیولوژیک موجب افزایش کربن آلی خاک در هر دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری شده است. نمودار ارائه‌شده (نمودار ۳) تغییرات کربن آلی خاک (OC) را در دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری بین منطقهٔ احیا (Treatment) و منطقهٔ شاهد (Control) نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار کربن آلی در منطقهٔ احیا به‌طور قابل توجهی بیشتر از منطقهٔ شاهد است. این روند در هر دو عمق نمونه‌برداری‌شده دیده می‌شود، به‌طوری‌که در عمق ۱۵ سانتی‌متری مقدار کربن آلی نسبت به عمق ۳۰ سانتی‌متری اندکی بیشتر است. این یافته‌ها نشان‌دهندهٔ تأثیر مثبت عملیات احیای بیولوژیک بر افزایش ذخیرهٔ کربن آلی خاک است. کاهش محسوس کربن آلی در منطقهٔ شاهد، به‌ویژه در عمق ۳۰ سانتی‌متری، احتمالاً ناشی از نبود پوشش گیاهی و درنتیجه کاهش ورود مواد آلی به خاک و فرایندهای تخریب سریع‌تر مواد آلی است. این نتایج اهمیت احیای بیولوژیک را در بهبود کیفیت خاک و افزایش ذخیره‌سازی کربن آلی، به‌ویژه در لایه‌های سطحی خاک نشان می‌دهد. نمودار (۴) مقادیر این شاخص را به‌صورت هیستوگرام (نمودار ستونی) نشان می‌دهد.

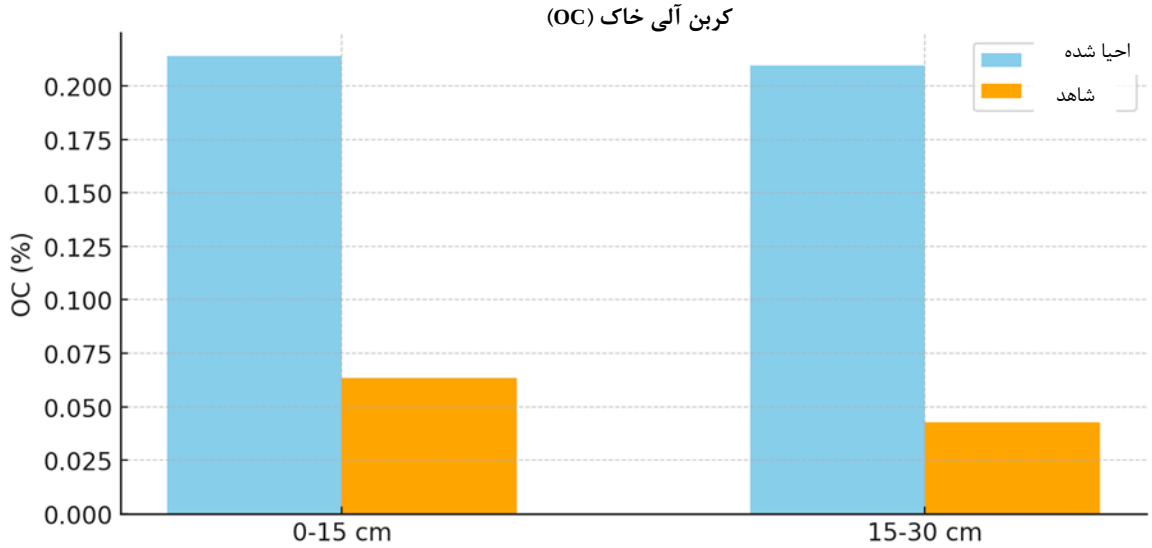
جدول ۴. آزمون تحلیل واریانس کربن آلی خاک در مناطق و عمق‌های مختلف

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	آمارهٔ F	معناداری
مقدار ثابت	۲/۱۷۶	۱	۴۵/۶۶۹	۰/۰۰۰
احیای بیولوژیک	۰/۷۸۱	۱	۱۶/۳۹۰	۰/۰۰۰
عمق نمونه‌برداری	۰/۰۰۵	۱	۰/۱۰۵	۰/۷۴۷
احیا * عمق	۰/۰۰۲	۱	۰/۰۴۲	۰/۸۳۹
خطا	۵/۷۱۷	۱۲۰		

کل	۸/۶۸۰	۱۲۴



نمودار ۳. مقادیر میانگین کربن آلی خاک در مناطق و عمق‌های مختلف



نمودار ۴. مقایسهٔ مقادیر میانگین کربن آلی خاک در مناطق شاهد و احیاشده در عمق‌های مختلف

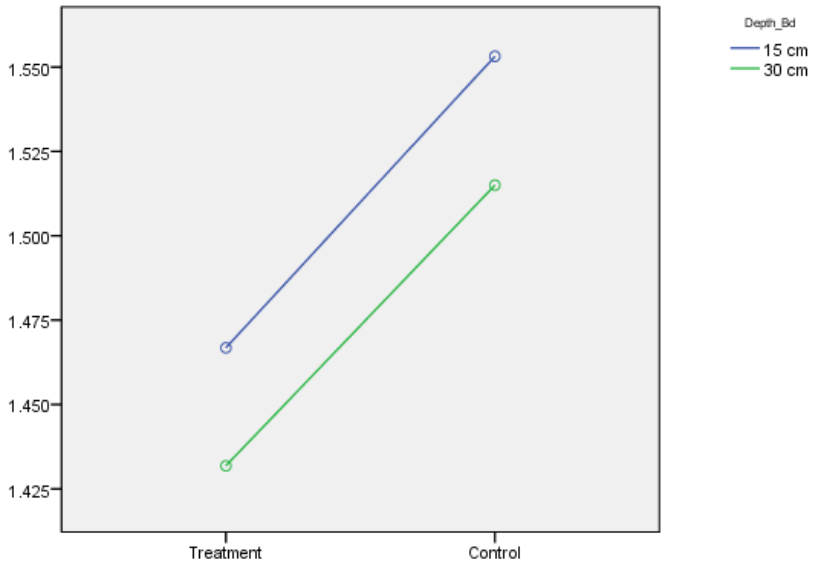
نتایج آزمون اثر احیای بیولوژیک بر وزن مخصوص ظاهری خاک نشان داد سطح معناداری آزمون تحلیل واریانس برای اثر احیای بیولوژیک بر میزان وزن مخصوص ظاهری خاک، کوچک‌تر از خطای ۰/۰۵ به دست آمده (p-value = ۰/۰۰۰) و نشان می‌دهد که مقادیر وزن مخصوص ظاهری خاک در بین منطقه احیا شده و منطقهٔ شاهد اختلاف معناداری داشته است. سطح معناداری برای اثر عمق نیز کوچک‌تر از خطای ۰/۰۵ به دست آمده (p-value = ۰/۰۴۸) و نشان می‌دهد که میزان وزن مخصوص ظاهری خاک در عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری دو منطقهٔ مورد مطالعه اختلاف معناداری داشته است؛ درحالی‌که اثر متقابل عمق و اثر احیا با سطح معناداری بزرگ‌تر از ۰/۰۵ (p-value = ۰/۹۳۰) نشان می‌دهد که روند تغییر این پارامتر در بین مناطق مورد مطالعه، در هر دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری یکسان بوده است (جدول ۵). با توجه به این نتایج می‌توان اظهار نمود که احیای بیولوژیک، تأثیر معناداری بر میزان وزن مخصوص ظاهری خاک داشته است و با توجه به مقادیر میانگین وزن

مخصوص ظاهری خاک در مناطق مورد مطالعه، به نظر می‌رسد که احیای بیولوژیک موجب کاهش وزن مخصوص ظاهری خاک در هر دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری شده است. نمودار ارائه‌شده (نمودار ۵) تغییرات وزن مخصوص ظاهری خاک (Bd) را در دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری بین منطقهٔ احیا (Treatment) و منطقهٔ شاهد (Control) نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار وزن مخصوص ظاهری خاک در منطقهٔ احیا نسبت به منطقهٔ شاهد به‌طور قابل توجهی کمتر است. این کاهش در هر دو عمق نمونه‌برداری‌شده مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که در عمق ۳۰ سانتی‌متری وزن مخصوص ظاهری خاک کمتر از عمق ۱۵ سانتی‌متری کاهش یافته است.

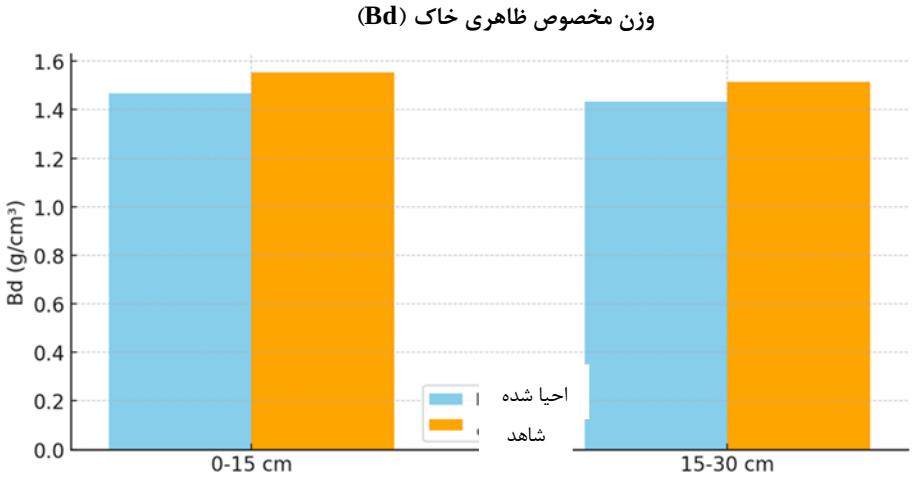
کاهش وزن مخصوص ظاهری خاک در منطقهٔ احیا احتمالاً ناشی از افزایش مادهٔ آلی و بهبود ساختار خاک در اثر عملیات احیای بیولوژیک است. افزایش پوشش گیاهی و فعالیت‌های بیولوژیکی منجر به بهبود تخلخل خاک و کاهش تراکم آن شده که درنهایت موجب کاهش وزن مخصوص ظاهری خاک شده است. درمقابل، در منطقهٔ شاهد، مقدار بالاتر وزن مخصوص ظاهری می‌تواند نشان‌دهندهٔ فشردگی بیشتر خاک، کاهش نفوذپذیری و تهویهٔ کمتر باشد. این نتایج نشان‌دهندهٔ اثرات مثبت احیای بیولوژیک بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک، به‌ویژه کاهش تراکم و افزایش خلل و فرج در آن است که می‌تواند به ارتقای ظرفیت نگهداشت آب و بهبود شرایط رشد گیاه کمک کند. نمودار (۶) مقادیر این شاخص را به‌صورت هیستوگرام (نمودار ستونی) نشان می‌دهد.

جدول ۵. آزمون تحلیل واریانس وزن مخصوص ظاهری خاک در مناطق و عمق‌های مختلف

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجهٔ آزادی	آمارهٔ F	معناداری
مقدار ثابت	۲۶۷/۰۲۱	۱	۲/۶۶ ×۱۰^{۴}	۰/۰۰۰
احیای بیولوژیک	۰/۲۱۶	۱	۲۱/۵۰۲	۰/۰۰۰
عمق نمونه‌برداری	۰/۰۴۰	۱	۴/۰۰۵	۰/۰۴۸
احیا * عمق	۰/۰۰۰۰۷۷۳	۱	۰/۰۰۸	۰/۹۳۰
خطا	۱/۱۶۳	۱۱۶		
کل	۲۶۸/۴۴۰	۱۲۰		



نمودار ۵. مقادیر میانگین وزن مخصوص ظاهری خاک در مناطق و عمق‌های مختلف



نمودار ۶. مقایسهٔ مقادیر میانگین وزن مخصوص ظاهری خاک در مناطق شاهد و احیاشده در عمق‌های مختلف

نتایج و بحث

مطالعهٔ مناطق دارای پوشش درختچه‌ای کهور ایرانی نشان داد که حضور این درختچه باعث افزایش معنادار ویژگی‌هایی مانند مادهٔ آلی و مقدار کربن می‌شود. این افزایش‌ها در خاک زیر تاج‌پوشش (مقدار کربن ترسیب‌شده در منطقهٔ احیاشده و در عمق‌های ۰–۱۵ و ۱۵–۳۰ سانتی‌متری به‌ترتیب برابر با ۴/۳۹ و ۹/۰۷ تن در هکتار به دست آمد) در مقایسه با مناطق بدون پوشش (مقدار این پارامتر در منطقهٔ شاهد و در عمق‌های ۰–۱۵ و ۱۵–۳۰ سانتی‌متری سطح خاک، به‌ترتیب برابر با ۱/۰۵ و ۳/۸۳ تن در هکتار به دست آمده که اختلاف قابل توجهی را با منطقهٔ احیا نشان می‌دهد) قابل توجه بود. میزان مادهٔ آلی خاک نیز تحت‌تأثیر چند عامل مختلف قرار دارد که از مهم‌ترین آن‌ها تثبیت کربن به‌صورت مادهٔ آلی به‌واسطهٔ فتوسنتز است. در مناطقی که پوشش گیاهی احیا شده است، تجزیهٔ ذخایر قبلی گیاهی به‌دلیل افزایش دما در فصل گرم بیشتر شده و مقدار مادهٔ آلی کاهش می‌یابد. درمقابل، خاک‌هایی که پوشش گیاهی با ریشه‌های فراوان دارند، دارای مواد آلی و نیتروژن بیشتری نیز هستند (جعفری و همکاران، ۱۳۹۴).

ترسیب کربن در مراتع و حوزه‌های آبخیزداری ازطریق اجرای عملیات احیایی توسط گونه‌های بوته‌ای مقاوم و محافظت از مراتع می‌تواند نقشی اساسی در جذب کربن ایفا کند(سو[1] و همکاران، ۲۰۱۰). این تحقیق نشان می‌دهد که احیای زیستی اراضی بیابانی به‌طور چشمگیری ظرفیت خاک برای جذب کربن را افزایش می‌دهد. به‌طورکلی، بهره‌برداری متناسب از منابع طبیعی نه‌تنها نیازهای انسانی را برطرف می‌کند، بلکه باعث حفظ عملکرد اکوسیستم‌ها، به‌ویژه ازنظر جذب کربن می‌شود. زمانی که خاک مرتع به دلایل مختلف خاصیت نفوذپذیری خود را از دست داده و نمی‌تواند به‌طور طبیعی آب باران را جذب و نگهداری کند، در کوتاه‌مدت با به‌کارگیری روش‌های مکانیکی متناسب با شرایط منطقه، می‌توان دوباره امکان نفوذ آب باران را در خاک فراهم کرد. یکی از راهکارهای اساسی برای اصلاح و احیای پوشش گیاهی، اجرای عملیات مکانیکی نظیر بوته‌کاری، بذرپاشی، نهال‌کاری، و ایجاد هلالی‌های آبگیر است که به‌منظور افزایش نفوذ و ذخیرهٔ آب باران در خاک انجام می‌شود. از مهم‌ترین چالش‌های تغییرات آب‌وهوایی، سهم هر کشور در تولید گازهای گلخانه‌ای و ظرفیت‌های متفاوت آن‌ها در مقابله با این چالش است (UNDP, 2000).

1. Su

نتایج این مطالعه نشان داد که احیای منطقه با گونهٔ کهور بر کربن خاک تأثیر مثبت و معنی‌داری داشته است (مقدار کربن ترسیب‌شده در منطقهٔ احیاشده و در عمق‌های ۰–۱۵ و ۱۵–۳۰ سانتی‌متری به‌ترتیب برابر با ۴/۳۹ و ۹/۰۷ تن در هکتار بوده است). این نتیجه با دستاوردهای فروزه (۱۳۸۵) مطابقت دارد. ایشان گزارش دادند که افزایش لاشبرگ و درصد تاج‌پوشش باعث افزایش میزان کربن ترسیب‌یافته در خاک مورد مطالعه نسبت به خاک منطقهٔ شاهد شده است. (در این پژوهش، با افزایش عمق، درصد کربن ترسیب‌یافته افزایش یافت؛ به‌طوری‌که مقدار کربن ترسیب‌شده در منطقهٔ احیا و در عمق‌های ۰–۱۵ و ۱۵–۳۰ سانتی‌متری به‌ترتیب برابر با ۴/۳۹ و ۹/۰۷ تن در هکتار بوده که بیانگر این است با افزایش عمق در منطقهٔ مورد مطالعه کربن ترسیب‌یافته نیز افزایش یافته است. این نتیجه با یافته‌های حاصل از پژوهش قنبریان، حسنلی و رجبی نوقاب (۱۳۹۴) که به‌منظور بررسی ترسیب کربن در خاک زیر اشکوب گیاه مو در استان فارس انجام گرفت مطابقت داشت؛ این نتیجه احتمالاً به‌دلیل تجزیهٔ سریع لاشبرگ‌ها و تجمع ریشه‌های گیاه در این عمق حاصل شده است. علاوه‌بر این، ازآنجاکه منطقهٔ مطالعه‌شده بیابانی است، وجود بادهای نسبتاً شدید می‌تواند یکی از دلایل احتمالی افزایش ترسیب کربن در عمق دوم باشد که با یافته‌های احمدی، حشمتی و ناصری (۱۳۹۳) نیز همخوانی داشت. وانی[1] و همکاران (۲۰۱۲) بیان کردند که در منطقهٔ فعالیت ریشه پتانسیل ترسیب کربن بیشتر است.

توجه به میزان ذخیرهٔ کربن در اکوسیستم‌های مختلف زمین، به‌ویژه درخت‌زارها و جنگل‌ها، به‌منظور کاهش دی‌اکسید کربن جو، کاهش آلودگی هوا و کاهش گرمایش جهانی، به مسئله‌ای با اهمیت فزاینده تبدیل شده است(مک‌دیکن،[2] ۱۹۹۷) . تحقیقات نشان داده است که در تقریباً تمام اکوسیستم‌های خشکی، میزان کربن آلی ذخیره‌شده در خاک بیشتر از کربن ذخیره‌شده در سطح زمین است. اکوسیستم‌های جنگلی در این زمینه اهمیت ویژه‌ای دارند، زیرا اجزای آن‌ها (مانند درختان) نه‌تنها مقدار قابل توجهی از کربن را در سطح خاک ذخیره می‌کنند، بلکه به‌طور تصاعدی موجب افزایش کربن آلی خاک نیز می‌شوند (لورنز و لال،[3] ۲۰۰۹). ریزش سالانهٔ لاشبرگ از درختان منبع مهمی برای مواد آلی و عناصر غذایی خاک به شمار می‌آید. در واقع، برگ‌ها منبع اصلی تأمین مادهٔ آلی در خاک هستند (کاهی[4] و همکاران، ۲۰۰۹). بیشتر بودن مادهٔ آلی در زیر تاج‌پوشش درختان نسبت به فضای باز، علاوه‌بر انباشتگی لاشبرگ، می‌تواند به وجود بقایای میوه، بذر و ریشه‌های مرده در خاک نیز نسبت داده شود. همچنین، ورود مادهٔ آلی ازطریق تجزیهٔ این بقایا و ترشحات آن‌ها در خاک، نقش مهمی در افزایش میزان مادهٔ آلی دارد (ریس[5] و همکاران، ۲۰۰۹) . از دیگر دلایل افزایش مادهٔ آلی در ناحیهٔ زیر تاج‌پوشش درختان، می‌توان به ورود مادهٔ آلی بیشتر به خاک ناشی از تجزیهٔ ریشه‌های نازک (کمتر از ۲ میلی‌متر) اشاره کرد که در فضای خارج از زیر تاج پوشش درختان وجود ندارد(دستا، لیسانورک، و مختار،[6] ۲۰۱۸) . درختان به‌عنوان بادشکن همانند حصار عمل می‌کنند و لاشبرگ ریخته‌شده را در بین خود گیر می‌اندازند و مانع انتقال آن‌ها به فضای خارج از تاج می‌شوند (کاهی و همکاران، ۲۰۰۹). بدین‌ترتیب با افزایش انباشتگی لاشبرگ در زیر تاج، درصد مادهٔ آلی نیز افزایش می‌یابد. کهور ایرانی به‌دلیل نداشتن اثر دگرآسیبی و فراهم آوردن شرایط مناسب برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها در خاک، به افزایش مقدار مادهٔ آلی و درنتیجه حاصلخیزی خاک کمک می‌کند (مصلحی و همکاران، ۱۴۰۱). علاوه‌بر این، کهور ایرانی بهبوددهندهٔ چرخهٔ عناصر غذایی، تولید توده و سرعت تجزیه است (متین‌خواه، شبازی ونعیمی نیا ۱۳۹۵). این بهبود شرایط و افزایش تولید می‌تواند عامل دیگری برای افزایش مادهٔ آلی باشد. نتایج این تحقیق درزمینهٔ افزایش مادهٔ آلی نسبت به منطقهٔ شاهد، با نتایج (لی[7] و همکاران، ۲۰۰۷)، (سینگ[8] و همکاران، ۲۰۱۲) و (شو،[9] ۲۰۰۶) که معتقدند میزان کربن و ماده آلی در زیر درختان به‌دلیل تجزیهٔ لاشبرگ افزایش می‌یابد، مطابقت دارد. جمع‌بندی نتایج

1. Wani
2. MacDicken
3. Lorenz & Lal
4. Kahi
5. Reis
6. Desta, Lisanenwork & Mukhtar
7. Li
8. Singh
9 . Xu

به‌دست‌آمده در پژوهش بازگیر، نوروزی و مقصودی (۱۳۹۸) که به بررسی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی درخت کنار پرداخته بودند، نشان داد که افزایش مادهٔ آلی خاک، به‌طور هم‌زمان با افزایش کربن، نیتروژن و زیست‌تودهٔ میکروبی، موجب بهبود شاخص‌های سلامت و کیفیت خاک می‌شود.

با توجه به به اهمیت این موضوع، در مطالعهٔ حاضر به بررسی تأثیر عملیات احیای بیولوژیک بر ذخیرهٔ کربن آلی خاک (مطالعهٔ موردی: پروژهٔ جنگل‌کاری تل سیاه) پرداخته شد که نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه نشان می‌دهند که میزان مقدار کربن ترسیب‌شده در منطقهٔ احیاشده و در عمق‌های ۰–۱۵ و ۱۵–۳۰ سانتی‌متری به‌ترتیب برابر با ۴/۳۹ و ۹/۰۷ تن در هکتار بوده است. مقدار این پارامتر در منطقهٔ شاهد و در عمق‌های ۰–۱۵ و ۱۵–۳۰ سانتی‌متری سطح خاک، به‌ترتیب برابر با ۱/۰۵ و ۳/۸۳ تن در هکتار به دست آمده که اختلاف قابل توجهی را با منطقهٔ احیاشده نشان می‌دهد. با توجه به نتایج می‌توان اظهار داشت که وجود گونه‌های گیاهی سبب افزایش میزان ترسیب کربن خاک در نتیجهٔ کاهش گرمایش جهانی می‌شود.

Refrences

Ahmadi, H., Heshmati, G. A., & Naseri, H. (2014). Soil carbon sequestration potential in desert lands under the influence of two species: Haloxylon and Salsola. *Journal of Desert Ecosystem Engineering*, 5, 24–36. (in Persian)

Bazgir, M., Norouzi, A., & Maghsoudi, Z. (2019). Study of physical, chemical and biological properties of soils under Ziziphus spina-christi stands in Izeh region. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 27(2), 232–243. (in Persian)

Dehghan Firoozabadi, A., Kalantari, S., Fazelpoor, M., & Taghizadeh Mehrjerdi, R. (2024). Effects of Haloxylon plantation on soil chemical properties (Case study: Critical wind erosion area of Meybod). *Environmental Erosion Research Journal*, 14(54), 58–72. (in Persian)

Delkhosh, M., & Bagheri, A. (2011). [The role of vegetation in the carbon cycle]. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 18(3), 45-56. (in Persian)

Desta, K., Lisanenwork, N., & Mukhtar, M. (2018). Physio-chemical properties of soil under the canopies of Faidherbia albida (Delile) A. Chev and Acacia tortilis (Forssk.) Hayen in park land agroforestry system in Central rift Valley, Ethiopia. *Academic Journal*, 10 (1), 1-8.

Edwards, C. A., & Arancon, N. Q. (2022). The Role of Earthworms in Organic matter and nutrient cycles. *In Biology and ecology of earthworms*, 233-274.

Elbasiouny, H.; H. El-Ramady, F. Elbehiry, V.D. Rajput, T. Minkina, & S. Mandzhieva. 2022. Plant nutrition under climate change and soil carbon sequestration. *Sustainability*, 14(2): 914.

Fallahi, H. R. (2013). *Study of plant diversity and application of RothC model for soil carbon stock simulation under climate change scenarios in the International Carbon Sequestration Project Area (South Khorasan Province)*. Ph.D. Dissertation, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad. (in Persian)

Forouzeh, M. R. (2006). *Study of soil carbon sequestration and standing biomass of dominant shrub species in the flood spreading area of Garbayegan-Fasa*. M.Sc. Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (in Persian)

Ghanbarian, G. A., Hasanli, A. M., & Rajabi Noghab, V. (2015). Comparison of carbon sequestration potential in different organs and soils of Amygdalus and Vitis vinifera ecosystems in Fars Province. *Iranian Journal of Natural Resources Environment*, 67(2), 257–265. (in Persian)

Ghorbani, A., Moammari, M., Abbasi, S., Alami Zare, S., Baghaei, K., Hashemimajd, K., Badarzadeh, M., & Bahrami, B. (2022). Study of carbon sequestration and soil characteristics changes along altitudinal gradients of Sabalan rangelands. *Water and Soil Modeling and Management Journal*, 13, 137–150. (in Persian)

Jafari, M., & Tavili, A. (2015). *Rehabilitation of dry lands*. Tehran: University of Tehran Press. (in Persian)

Kahi, C. H., Ngugi, R. K., Mureithi, S.M., & Ngethe, J. C. (2009). The canopy effects of Prosopis juliflora and Acacia tortilis trees on herbaceous plants species and soil physicochemical properties in Njemps Flats, Kenya. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(3), 441-449.

Khanmohammadi, Z., & Matinizedeh, M. (2023). Evaluation of soil properties under tree canopies of Pistacia atlantica and Amygdalus scoparia (Case study: Tang-e-Khoshk, Semirom). *Soil and Plant Interactions*, 14(2), 93–108. (in Persian)

Khordebin, S., Hojjati, S., Landi, A., & Ahmadianfar, O. (2013). Assessment of residue and amount of organic carbon sequestration in different parts of plants under various land uses in Behbahan, Khuzestan Province. *Natural Environment Journal*, 76(1), 161–171. (in Persian)

Kooch, Y., Amani, M., & Abedi, M. (2022). Vegetation degradation threatens soil health in a mountainous semi-arid region. *Science of The Total Environment*, 830, 154827.

Kouhestani, N., Rostgar, S., Heydari, G., Shataei Jouybari, Sh., & Amirnejad, H. (2021). Monitoring of spatial distribution of soil carbon sequestration over four decades of rangeland cover changes (Case study: Norood watershed, Mazandaran Province). *Rangeland Journal*, 15(2), 344–356. (in Persian)

Li, J., Zhao, C., Zhu, H., Li, Y., & Wang, F. 2007. Effect of plant species on shrub fertile island at an oasis–desert ecotone in the South Junggar Basin. *China*, 71(4): 350-361.

Lorenz, K., & Lal, R., 2009. *Carbon sequestration in forest ecosystems*. Springer Science & Business Media, Heidelberg.

MacDicken, K.G. (1997). A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects. *Winrock Internationl Institute for Agricultural Development Forest Carbon Monitoring Program*, 91 p.

Matinkhah, S., Shabazi, A., & Naeiminia, M. (2016). Effect of Arabic gum (*Acacia nilotica*) and Pakistani mesquite (*Prosopis juliflora*) as nitrogen-fixing trees on the underlying soil. *Water and Soil Science*, 25(1/4), 211–222. (in Persian)

Mosadeghi, M. (2003). *Rangeland management in Iran*. Astan Quds Razavi Publications. (in Persian)

Moslehi Jouybari, M., Hassani, M., Sadeghi, S. M., Ahmadi, A., Beizhani, A., & Sadeghi, M. (2021). *Allelopathic effects of native (Prosopis cineraria (L.) Druce) and invasive (Prosopis juliflora (SW.) DC) species on germination of native plant seeds. Forests and Rangelands Research Institute*. Final Research Report. Tehran. (in Persian)

Najafpour, M. (2014). [Carbon sequestration and its role in reducing global warming]. *Iranian Journal of Natural Environment*, 67(1), 123-134. (in Persian)

Nosetto, M.D., Jobbagy, E.G., & Paruelo, J.M. (2006). Carbon sequestration in semi-arid Rangelands. *Arid Environments*, No.67و 142-156.

Nosrati, K., Mohammadi, Z., & Nazari Samani, A. (2018). Impact of flood spreading operation on soil organic carbon storage in Dasht-e-Zahab plain. *Environmental Erosion Research Journal*, 4(2), 12–22. (in Persian)

Reis, G., Lana, A., Mauricio, R., Lana, R., Machado, R., Borges, I., & Neto. T. (2009). Influence of trees on soil nutrient pools in a silvopastoral system in the Brazilian Savannah. *Plant and Soil*, 329 (1- 2), 185–193.

Rigi, M., Zolfaghari, F., & Salimi, K. (2023). Assessment of soil carbon accumulation potential in Calir and Prosopis cineraria species (Case study: Keshtgan area, Saravan). *Spatial Analysis of Environmental Hazards Journal*, 4, 99–112. (in Persian)

Rossi J., A., Govaerts, B., De Vos, B., Verbist, A., Vervoort, J., Poesen, B., Muys , & Deckers, J. (2009). Spatialstructures of soil organic carbon in tropical forests —a case study of Southeastern Tanzania. *Catena*, 77, 19 –27.

Shahrokh, S., Souri, M., Moatamedi, J., & Eftekhari, A. R. (2017). Efficiency of Farometer in carbon management and soil biomass in Khalfan rangelands of Mahabad. *Iranian Rangeland Research Institute*, 24(1), 98–109. (in Persian)

Singh, I.S., Awasthi, O.P., Singh, R.S., More, T.A., & Meena, S.R., (2012). Changes in soil properties under tree species. *Journal of Agricultural Sciences*, 80(2), 146-

Singh, P., Sahu, S., Singh, P., & Singh, N. (2017). Study of Association of Soil Parameters with Various Density Classes of Forests of Mukundpur, Satna, Forest Division and Madhya Pradesh. *Journal of Soil Science & Plant Health*, 1, 1-7.

Smith, J., et al. (2021). The Role of Rangeland Management in Enhancing Soil Carbon Sequestration. *Journal of Climate Change and Sustainability*, 12(1), 34-41.

UNDP., (2000). Carbon sequestration in the decertified rangelands of Hossein Abad, through community based management, program coordination, 1- 7.

Wani, S.P., Chander, G., Sahrawat, K. L., Rao, C. S., Raghvendra, G., Susanna, P., & Pavani, M. (2012). Carbon sequestration and land rehabilitation through Jatropha curcas (L.) plantation in degraded lands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 161(1), 112-120.

Xu, H. (2006). *Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery*.

Yang, R. M., Huang, L. M., Zhang, X., Zhu, C. M., & Xu, L. (2023). Mapping the distribution, trends, and drivers of soil organic carbon in China from 1982 to 2019. *Geoderma*, 429, 116232.

Yang, R. M., Huang, L. M., Zhang, X., Zhu, C. M., & Xu, L. (2023). Mapping the distribution, trends, and drivers of soil organic carbon in China from 1982 to 2019. *Geoderma*, 429, 116232.

Yeganeh, H., Azarnivand, H., Saleh, I., Arzani, H., & Amirnejad, H. (2015). Economic valuation of gas regulation services in the rangeland ecosystems of the Taham watershed. *Rangeland Scientific Research Journal*, 9(2), 106–119. (in Persian)

Zhang, Y., et al. (2020). Carbon Sequestration in Tropical Forest Restoration Projects. *Environmental Science & Technology*, 54(3), 212-220.

Zhu, Z., Bergamaschi, B., Bernknopf, R., Clow, D., Dye, D., Faulkner, S., Forney, W., Gleason, R., Hawbaker, T., Liu, J., Liu, S., Prisley, S., Reed , B., Wein, A., & Zhu, Z. (2010). A method for assessing carbon stocks, carbon sequestration, and greenhouse-gas fluxes in ecosystems of the United States under present conditions and future scenarios. *U.S. Geologial Survey Scientific Investigation Report* 2010-5233. 188 p.