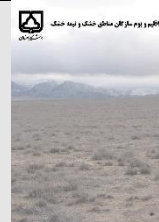




Semnan University

Climate and Ecosystem of Arid and Semi-arid Regions

<https://ceasr.semnan.ac.ir>



Research Article

Review of Organic Carbon Dynamics and Its Interrelationships with Soil Properties in Combating Desertification and Preventing Ecosystem Degradation

Habib Ramezanzadeh aronqi ^{a,*}  and Ahmad Baybordi ^b 

^aPostdoc Researcher, Soil and Water Institute, Agricultural Reasearch, Education and Extension Organisation, Tabriz, Iran

^bAssociate Professor, Soil and Water Institute, Agricultural Reasearch, Education and Extension Organisation, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article type:

Research Full Paper

Article history:

Received: 25 October 2025

Revised: 28 December 2025

Accepted: 30 December 2025

Keywords:

Desertification,
Soil organic carbon,
Land use change,
Sustainable management,
Carbon Sequestration

EXTENDED ABSTRACT

Background and Objectives: Desertification is a global process with extensive consequences, reducing agricultural productivity, threatening food security, and posing challenges to rural livelihoods in arid and semi-arid regions. It is exacerbated through feedback loops involving vegetation degradation, soil fertility decline, and water scarcity, with human activities such as overgrazing, deforestation, climate change, and unsustainable land management playing pivotal roles. Soil organic carbon (SOC) dynamics serve as a key factor in maintaining soil health, ecosystem resilience, and controlling environmental processes. This review examines the mechanisms of SOC influence on erosive factors and its interrelationships with soil properties to propose sustainable management strategies for combating desertification and preventing ecosystem degradation.

Materials and Methods: This study was conducted as a review based on the collection and analysis of international and domestic scientific articles. Focus was placed on extracting and integrating findings related to SOC impacts on soil stability, water retention, hydraulic behavior, nutrient cycling and fertility, plant species diversity, and microbial population and diversity. The role of land use changes (deforestation and intensive agriculture) in SOC dynamics and desertification intensification was evaluated.

Results: SOC acts as a foundational element for soil hydrophysical behaviors and a source of active chemical reactions, shaping the interaction patterns of desertification-limiting factors. Increased SOC enhances aggregate stability through particle binding and concentration in coarse aggregates, improves water holding capacity at saturation and field capacity, facilitates gas exchange, and renders soil resistant to wind and water erosion. In nutrient cycling, SOC elevates cation exchange capacity, regulates element availability, reduces leaching, stimulates root growth. At the ecosystem scale, SOC boosts plant biodiversity (e.g., Shannon index), particularly in arid areas based on organic matter quality. SOC alters bacteria-to-fungi ratios in the rhizosphere, increases microbial genetic diversity, and strengthens copiotrophic populations, with long-term changes exerting deeper impacts than short-term ones. Deforestation reduces organic inputs, accelerates decomposition and erosion, while intensive

*Corresponding author: mramazanzadeh@outlook.com

agriculture with heavy tillage and monoculture significantly depletes SOC. In Iran, where over 75% of areas are prone to desertification, SOC differences between critical and vulnerable zones are evident; forest and rangeland uses maintain higher SOC levels, whereas intensive agriculture markedly reduces it. Significant correlations exist between SOC decline, and desertification indices. Climate change reduces precipitation quantity and diversity while increasing temperature, negatively affecting SOC inputs and preservation. Management of plant residues, conservation tillage, and revegetation with resistant species in drylands boost SOC potential and performance.

Conclusion: SOC serves as the cornerstone of soil hydrophysical behavior and substrate, driving active chemical reactions crucial for controlling desertification. Augmenting coarse soil grain abundance, fostering new soil grain formation, enhancing water retention at saturation and field capacity, improving hydraulic behavior and gas exchange, boosting root growth and capillary root numbers, increasing exchangeable element concentrations, prolonging nutrient availability while curbing leaching, altering bacteria-to-fungi ratios in the rhizosphere, and enriching microbial population abundance and diversity are all effects of heightened SOC levels. These factors should inform land use decisions, advocating for reduced deforestation and intensive agriculture practices. National carbon sequestration schemes and participatory projects (e.g., contour furrowing and shrub planting) with socio-ecological approaches demonstrate greater success in reversing degradation.

Cite this article: Ramezanzadeh, H., Bybordi, A. (2025). Review of Organic Carbon Dynamics and Its Interrelationships with Soil Properties in Combating Desertification and Preventing Ecosystem Degradation. *Climate and Ecosystem of Arid and Semi-arid Regions*, 2(2), 98 -114.

© 2025 Published by Semnan University Press.

DOI: <https://doi.org/10.22075/ceasr.2025.39504.1057>

مروری بر نقش پویائی کربن آلی و روابط متقابل آن با ویژگی‌های خاک در مقابله با بیابان‌زایی و تخریب اکوسیستم

حبیب رمضان زاده ارونقی^{۱*}، احمد بایوردی^۲

۱- پژوهشگر پسا دکتری، دپارتمان تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و توسعه کشاورزی، تبریز، ایران

۲- دانشیار، دپارتمان تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و توسعه کشاورزی، تبریز، ایران

*: نویسنده مسئول، mramazanzadeh@outlook.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله مروری تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۴ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۹ واژه‌های کلیدی: بیابان‌زایی، کربن آلی خاک، مدیریت کاربری اراضی، مدیریت پایدار، ترسیب کربن	سابقه و هدف: بیابان‌زایی فرآیندی جهانی با پیامدهای گسترده است که بهره‌وری کشاورزی را کاهش داده، امنیت غذایی را تهدید کرده و معیشت جوامع روستایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک را با چالش‌های جدی روبرو می‌سازد. این پدیده از طریق حلقه‌های بازخوردی تخریب پوشش گیاهی، کاهش حاصلخیزی خاک و کمبود آب تشدید می‌شود، در حالی که فعالیت‌های انسانی مانند چرای بیش از حد، جنگل‌زدایی، فرسایش آبی و بادی، تغییرات آب و هوایی و مدیریت ناپایدار اراضی نقش محوری ایفا می‌کنند. پویایی کربن آلی خاک (SOC) به‌عنوان فاکتور کلیدی در حفظ سلامت خاک، انعطاف‌پذیری اکوسیستم و کنترل فرآیندهای زیست‌محیطی عمل می‌کند. حد بحرانی حدود ۲۰ گرم بر کیلوگرم ماده آلی در خاک برای جلوگیری از تخریب شدید ملاک تصمیم‌گیری می‌باشد. این مطالعه مروری بر آن است تا مکانیسم‌های تأثیر SOC بر عوامل فرسایشی و روابط متقابل آن با ویژگی‌های خاک را بررسی کند تا راهبردهای مدیریتی پایدار برای مقابله با بیابان‌زایی و پیشگیری از تخریب اکوسیستم ارائه دهد. مواد و روشها: این مطالعه به‌صورت مروری و بر پایه جمع‌آوری و تحلیل مقالات علمی بین‌المللی و داخلی صورت گرفته است. تمرکز بر استخراج و یکپارچه‌سازی یافته‌های مرتبط با تأثیر SOC بر ساختار و پایداری خاکدانه‌ها، جذب و نگهداری آب، رفتار هیدرولیکی، چرخه مواد غذایی و حاصلخیزی، تنوع گونه‌های گیاهی، و جمعیت و تنوع میکروبی خاک بود. همچنین، نقش تغییر کاربری اراضی (جنگل‌زدایی و کشاورزی فشرده) در پویایی SOC و تشدید بیابان‌زایی ارزیابی گردید. یافته‌ها: SOC به‌عنوان فاکتوری بنیادین برای تحلیل رفتارهای هیدروفیزیکی خاک و منبع واکنش‌های شیمیایی فعال شناخته می‌شود و الگوی تعامل عوامل محدودکننده بیابان‌زایی را شکل می‌دهد. افزایش میزان SOC می‌تواند پایداری خاکدانه‌ها را از طریق اتصال ذرات و تمرکز در خاکدانه‌های درشت تقویت کند، ظرفیت نگهداری آب در حالت اشباع و ظرفیت مزرعه‌ای را بهبود بخشد، تبادلات گازی را تسهیل نماید، و خاک را در برابر فرسایش بادی و آبی مقاوم سازد. کمیت و کیفیت SOC، در چرخه عناصر غذایی، ظرفیت تبادل کاتیونی را افزایش می‌دهد، حلالیت عناصری مانند فسفر، آهن و مس را ارتقا می‌بخشد، آبشویی را کاهش می‌دهد، رشد ریشه و اسیدی شدن رایزوسفر را تحریک می‌کند، و فراهمی عناصر را تنظیم می‌نماید. در مقیاس اکوسیستم، SOC تنوع زیستی گیاهی (مانند شاخص شانون) را به‌ویژه در مناطق

خشک و بر اساس کیفیت ماده آلی ارتقا می‌دهد. SOC می‌تواند نسبت باکتری به قارچ در رایزوسفر را تغییر داده، تنوع ژنتیکی میکروبی را افزایش داده و جمعیت‌های کوپروتروفیک را تقویت کند. تغییرات بلندمدت به وجود آمده توسط SOC تأثیر عمیق‌تری نسبت به کوتاه‌مدت دارند. جنگل‌زدایی با کاهش ورودی مواد آلی، افزایش تجزیه و فرسایش، و کشاورزی فشرده با خاک‌ورزی شدید و تک‌کشتی، SOC را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهند، اما شیوه‌های حفاظتی مانند خاک‌ورزی کمینه، تناوب زراعی و مدیریت بقایا آن را تقویت می‌کنند. در ایران، که بیش از ۷۵ درصد مناطق آن مستعد بیابان‌زایی است، تفاوت‌های SOC میان مناطق بحرانی و آسیب‌پذیر مشهود است. کاربری‌های جنگلی و مرتعی سطوح بالاتری از SOC را حفظ می‌کنند، در حالی که کشاورزی فشرده آن را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. همبستگی معناداری ما بین کاهش SOC، فرسایش بادی و شاخص‌های بیابان‌زایی وجود دارد. تغییرات اقلیمی باعث کاهش مقدار و تنوع بارش شده و دما را افزایش می‌دهد که بر میزان ورودی و نگهداری SOC تأثیر منفی می‌گذارد. مدیریت بقایای گیاهی، استفاده از کودهای آلی، خاک‌ورزی حفاظتی، آبیاری با استفاده از شیوه‌های نوین و احیای گیاهی با گونه‌های مقاوم در اراضی خشک، باعث افزایش پتانسیل و عملکرد SOC می‌گردد. طرح‌های ملی ترسیب کربن و پروژه‌های مشارکتی (مانند کپه‌کاری و بونه‌کاری) با رویکرد اجتماعی-اکولوژیک، موفقیت بیشتری در معکوس‌سازی تخریب نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری: مقابله مؤثر با بیابان‌زایی مستلزم اتخاذ رویکرد یکپارچه با اولویت حفاظت و احیای SOC می‌باشد. تنوع‌بخشی گونه‌های گیاهی مقاوم، کاهش جنگل‌زدایی و کشاورزی فشرده، اجرای خاک‌ورزی حفاظتی و تقویت مشارکت محلی در پروژه‌های احیایی، فرسایش را کاهش داده و انعطاف‌پذیری اکوسیستم در برابر تغییرات اقلیمی را افزایش می‌دهد. در ایران، طرح‌های ملی ترسیب کربن با تمرکز بر افزایش کیفیت و کمیت SOC و ارزیابی اثرات اقتصادی-اجتماعی-محیطی می‌توانند روند تخریب را معکوس ساخته و پایداری بلندمدت این طرح‌ها را تضمین کنند.

استناد: رمضان زاده، ارونقی، ح. و بایوردی، الف. (۱۴۰۴). مروری بر نقش پویایی کربن آلی و روابط متقابل آن با ویژگی‌های خاک در مقابله با بیابان‌زایی و تخریب اکوسیستم. *اقلیم و بوم‌سازگان مناطق خشک و نیمه خشک*، ۲(۲)، ۹۸-۱۱۴.

ناشر: دانشگاه سمنان

DOI: <https://doi.org/10.22075/ceasr.2025.39504.1057>

۱- مقدمه

بیابان‌زایی، پیامدهای مهمی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی دارد. خاک‌های تخریب‌شده، بهره‌وری کشاورزی را کاهش داده، امنیت غذایی را تهدید کرده و چالش‌های معیشت روستایی در مناطق آسیب دیده را افزایش می‌دهد (Alvyar and Mostafaei, 2025; Entezari Zarch et al., 2023). علاوه بر این، بیابان‌زایی کربن را به جو آزاد و تغییرات آب و هوایی را تشدید کرده و تنش‌های محیطی را در سراسر جهان تقویت می‌کند. پرداختن به بیابان‌زایی از طریق شیوه‌های مدیریت پایدار زمین برای کاهش این اثرات و بهبود زیست‌محیطی پایدار ضروری است. عواملی مانند چرای بیش از حد، جنگل‌زدایی، فرسایش، تغییرات آب و هوایی، ضعف مدیریت اراضی، عدم مدیریت آب، گسترش شهر و افزایش ساختمان‌سازی، توسعه معادن و صنایع مربوط به استخراج، فشار رشد جمعیتی و دیگر عوامل سیاسی، اجتماعی و اقتصادی بر شدت و وسعت بیابان‌ها تأثیر معناداری دارند. نقطه مشترک تمامی فاکتورهای یاد شده را می‌توان در تخریب خاک و پوشش گیاهی به همراه کمبود آب مرتبط دانست (Haghighi et al., 2017; Heydari et al., 2024). البته نقش فعالیت‌های انسانی در تشدید این سه مورد بسیار حائز اهمیت می‌باشد. فعالیت‌های انسانی می‌تواند با مدیریت ضعیف و استفاده غیراصولی از منابع به همراه

فاکتورهای اقتصادی-اجتماعی مانند فقر و رشد جمعیتی، باعث تشدید بیابان‌زایی در مناطق مختلف شود. با وجود روابط پیچیده بین فاکتورها، حلقه‌های بازخوردی مانند تخریب پوشش گیاهی، باعث کاهش حاصلخیزی و قدرت حفظ آب می‌شود که به فرسایش بیشتر و تشدید بیابان‌زایی می‌انجامد. ولی در این بین، کاهش کربن آلی تاثیر مستقیم و معناداری بر کارکرد این حلقه‌ها و شدت تاثیرگذاری آنها دارد. نقش کلیدی SOC و پویایی آن در بیابان‌زایی در کمک اساسی این فاکتور به حاصلخیزی و سلامت خاک و انعطاف‌پذیری اکوسیستم نهفته است. حد بحرانی ۲۰ گرم SOC بر کیلوگرم خاک برای حفظ کیفیت خاک پیشنهاد شده است که با کاهش یک درصد از این مقدار شاخص‌های خاک به شکل معناداری به سرعت کاهش می‌یابد (Grilli et al., 2021). تحقیقات نشان داده است که در حدود یک درصد تفاوت در مقدار کربن آلی در مناطق آسیب‌پذیر و بحرانی برای بیابان‌زایی وجود دارد (Attaeian et al., 2018). کربن آلی به‌عنوان شالوده حاصلخیزی خاک عمل کرده و عناصر غذایی ضروری را برای رشد گیاهان فراهم می‌نماید. علاوه بر این نقش مهمی در حفظ ساختمان و پایداری خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و کاهش فرایندهای فرسایش دارد. با این حال، با کاهش سطح کربن آلی به دلیل عوامل بیابان‌زا خاک‌ها بیشتر مستعد فرسایش می‌شوند. از دست دادن SOC عملکرد اکوسیستم را به خطر انداخته، فرایندهای خشک‌شدن را تشدید کرده و منجر به تخریب زمین می‌شود. بررسی عوامل متأثر از کربن آلی در خاک برای درک پویایی پیچیده فرایند بیابان‌زایی بسیار حیاتی است. با بررسی نحوه تعامل تغییرات در سطوح کربن آلی با سایر محرک‌های بیابان‌زایی، مانند تغییر کاربری زمین، تنوع آب و هوا و فعالیت‌های انسانی، می‌توان آگاهی کافی در مورد مکانیسم‌های نهفته در فرایندهای تخریب خاک بدست آورد. درک این تعاملات برای توسعه راهبردهای موثر برای کاهش بیابان‌زایی و ترویج شیوه‌های مدیریت پایدار زمین ضروری است. هدف از این بررسی مروری، مطالعه عوامل تاثیرپذیر از تغییرات SOC می‌باشد که از ارکان اصلی در مناطق مستعد برای کاهش و یا تشدید بیابان‌زایی می‌باشند.

۲- مواد و روش‌ها

این مطالعه به‌صورت مروری و بر پایه جمع‌آوری و تحلیل مقالات علمی بین‌المللی و داخلی صورت گرفته است. تمرکز بر استخراج و یکپارچه‌سازی یافته‌های مرتبط با تأثیر SOC بر ساختار و پایداری خاکدانه‌ها، جذب و نگهداری آب، رفتار هیدرولیکی، چرخه مواد غذایی و حاصلخیزی، تنوع گونه‌های گیاهی، و جمعیت و تنوع میکروبی خاک بود. همچنین، نقش تغییر کاربری اراضی (جنگل‌زدایی و کشاورزی فشرده) در پویایی SOC و تشدید بیابان‌زایی ارزیابی گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تغییرات کربن آلی خاک و پویایی اکوسیستم موثر در بیابان‌زایی

مطالعات نشان داده‌اند که تغییرات SOC می‌تواند با مکانیسم‌های متعددی مانند تغییر در میزان در دسترس بودن عناصر غذایی، پایداری ساختمان خاک، نگهداشت رطوبت و دینامیک آب، ترکیب و فراوانی جمعیت میکروبی، و ترسیب کربن بر پویایی اکوسیستم تاثیر بگذارد (Heydari et al., 2022؛ Babrnezhad and Nikoo, 2025). کربن آلی از طریق مکانیسم‌ها و فرایندهای مختلف بر بیابان‌زایی تاثیرگذار است که هر مجموعه پیامدهای خاص خود را نیز به‌همراه دارد. این تغییرات به یک جنبه محدود نمی‌باشند و چند وجهی بوده و در مقیاس‌های مختلف دارای ابعاد متعدد می‌باشند.

۳-۱-۱- ساختمان خاک و پایداری آن

اجزاء SOC، مواد متصل‌کننده مهمی در تشکیل خاکدانه‌ها می‌باشند. مواد آلی خاک که مسئول بسیاری از عملکردهای خاک و اکوسیستم می‌باشند، در حدود ۵۸ درصد از کربن آلی تشکیل یافته‌اند. کربن آلی با بهبود خاکدانه‌سازی از طریق اتصال بیشتر ذرات خاک به یکدیگر، تاثیر مثبت بر ساختمان خاک دارد. خاک‌هایی با محتوای کربن آلی زیاد، خاکدانه‌های بیشتر و بزرگتری را در پروفیل خود تشکیل می‌دهند (Ferreira et al., 2020). محتوای کربن آلی زیاد باعث می‌گردد تا ذرات خاک درکنار یکدیگر به وسیله ماهیت اتصال‌دهنده ماده الی نگه داشته شوند. خاک‌هایی که دارای خاکدانه‌های مناسب می‌باشند به دلیل بهبود تخلخل، نفوذپذیری و پایداری در آنها سرعت نفوذ آب و تبادلات گازی بیشتری داشته و قدرت و عمق نفوذ ریشه در آنها بیشتر است. این ویژگی‌ها از رشد سالم گیاه و عملکرد اکوسیستم حمایت می‌کنند. پایداری خاکدانه‌ها در شرایط گرم و خشک بسیار ضعیف می‌باشد. به‌طورویژه، کاهش ورود کربن آلی به خاک منجر به کاهش خاکدانه‌سازی شده و همچنین فرایند تجزیه خاکدانه‌ها به وجود می‌آید و فراوانی خاکدانه‌های درشت به سرعت کاهش می‌یابد (Li et al., 2020a). مطالعات نشان داده است که در مناطق خشک، SOC بیشتر در خاکدانه‌هایی با اندازه درشت (۰/۵ تا ۲ میلی‌متر) یافت می‌شود. هرچند در مناطقی با خاک تخریب یافته، SOC به‌طور عمده در خاکدانه‌هایی با اندازه کوچکتر (کوچکتر از ۰/۲۵ میلی‌متر) قرار دارد (Ma et al., 2020). افزایش کربن آلی برای تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها مهم است و متقابلاً خاکدانه‌ها می‌توانند از تجزیه کربن الی جلوگیری کنند. توزیع ذرات خاک و پایداری خاکدانه‌ها منجر به تغییر فعالیت میکروبی و چرخه مواد غذایی می‌شود که متعاقباً بر واکنش‌های بیوژئوشیمیایی در خاک مؤثر می‌باشد. همچنین با افزایش خاکدانه‌سازی، محیط مساعد و حمایتی برای تکثیر، رشد و نمو ریشه افزایش یافته و گیاهان با تشکیل سیستم‌های ریشه‌ای عمیق‌تر و گسترده‌تر و با مهار ذرات خاک به کاهش فرسایش‌پذیری و افزایش پایداری خاک کمک می‌کنند (Trivedi et al., 2018; Li et al., 2025). این شکل از پوشش گیاهی نقشی حیاتی در مبارزه با بیابان‌زایی ایفا می‌کند. در خاک سطحی، ارتباط دوطرفه‌ای مابین SOC با میزان و توزیع منافذ درون پروفیل خاک وجود دارد. تجزیه ماده آلی در منافذ ریز بسیار کمتر از منافذ درشت است که به دلیل امکان کم هوادیدگی در منافذ ریز و همچنین قابلیت کم دسترسی ریزجانداران به این منافذ می‌باشد. وجود منافذ ریزتر باعث افزایش مقدار مکش مورد نیاز برای خروج رطوبت می‌شود که به بقای رطوبت در خاک کمک کرده و امکان استقرار گیاهان را افزایش می‌دهد.

۳-۱-۲- تاثیر کربن آلی در جذب، نگهداری آب و رفتارهای هیدرولیکی

در مناطق مستعد بیابان‌زایی مقدار آب ورودی به پروفیل خاک کمتر از میزان تبخیر بوده و تهیه آب کافی برای استقرار گیاهان و جلوگیری از تخریب خاک ضروری می‌باشد. SOC با بهبود ظرفیت جذب آب، خشکی خاک را کم کرده و ذخیره رطوبت خاک را به مدت طولانی‌تری در فاصله زمانی بین بارندگی‌ها فراهم می‌کند. مواد آلی در خاک که شامل کربن آلی نیز می‌باشند به مانند ماده‌ای متخلخل عمل کرده که قابلیت جذب و نگهداری مولکول‌های آب را دارند. ماده آلی در خاک با تشکیل خاکدانه‌های پایدار و فضای منفذی درون ساختمان خاک منابع قابل توجهی را برای ذخیره آب به وجود می‌آورد. افزایش یک درصد وزنی کربن آلی در خاک به‌طور متوسط باعث افزایش ۲/۹۵ میلی‌متر آب در ۱۰۰ میلی‌متر خاک می‌شود (Minasny and McBratney, 2017). افزایش ماده آلی در خاک باعث می‌شود تا به‌طور نسبی تمام ارکان تشکیل‌دهنده منحنی رطوبتی در خاک‌ها تغییر یابد. هر چند این تغییر به نوع ماده آلی وارد شده به خاک، بافت و ساختمان خاک بستگی مستقیم دارد. مقدار محتوای آب قابل دسترس برای گیاهان به مقدار کمی توسط ماده آلی تغییر می‌یابد. همچنین افزایش مقدار رطوبت اشباع نیز به غیر از ماده آلی می‌تواند به سایر شرایط هیدرولوژیکی مربوط باشد. ذخیره آب افزایش یافته در حالت اشباع برای جذب مازاد آب در خاک‌ها در زمان‌هایی که رطوبت خاک نزدیک به حالت ظرفیت مزرعه‌ای قرار دارد مفید است (Bagnall

(et al., 2022). این ذخیره افزایش یافته می‌تواند به دلیل افزایش محتوای SOC باشد که ظرفیت بافری خاک در مقابل سیلاب‌های موسمی در مناطق خشک را نیز افزایش می‌دهد (Alnaimy and Elrys, 2025).

۳-۱-۳- تاثیر کربن آلی خاک بر چرخه مواد غذایی و حاصلخیزی در خاک

بخش پایدار SOC که هوموس نیز شناخته می‌شود بین ۵۰ تا بیش از ۸۰ درصد از کربن متصل به مواد آلی در خاک را تشکیل می‌دهد (Greke, 2022). این ماده به شدت بر غلظت مواد غذایی در محلول خاک تاثیر گذاشته و در مراحل گوناگون، ظرفیت‌های خاک برای چرخه مواد غذایی را افزایش می‌دهد. این ظرفیت‌ها می‌توانند شامل ظرفیت خاک برای جذب و نگهداشت عناصر غذایی، ظرفیت خاک برای فراهم نمودن شکل قابل دسترس عناصر غذایی، ظرفیت تسهیل تبادلات عناصر غذایی در محلول خاک و توانایی تهیه و دفع مناسب یون‌های منتخب در زمان رشد گیاه باشند (Singh et al., 2024). SOC ممکن است باعث افزایش حلالیت فسفر، آهن و مس شده و فراهمی آنها را برای گیاه افزایش دهد. گونه‌های مختلف کربن آلی در خاک می‌توانند به عنوان پایگاهی برای تبادلات کاتیونی در خاک عمل کرده و همتراز با رس‌های خاک، مکان‌های متعددی برای تبادلات کاتیونی بین فاز محلول و غیرمحلول در خاک ایجاد کرده و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را افزایش دهند (Schröder et al., 2016). SOC می‌تواند در رابطه‌ای تعاملی با ویژگی‌های فیزیکی خاک باعث بهبود کارایی مصرف عناصر کم مصرف و برخی شاخصه‌های کشاورزی شود (Yang et al., 2021). روابط متقابل و معنادار در بین SOC و پارامترهای خاک از جمله رس، سیلت، اسیدیته و هدایت الکتریکی گزارش شده است (Sheidai karkaj et al., 2017). SOC می‌تواند آلومینیوم را در خاک‌های اسیدی غیرفعال کند، می‌تواند به شدت با فلزات سنگین پیوند شده و آنها را برای ریشه گیاه فعال نماید. مواد آلی خاک مخزن اصلی ذخیره مواد غذایی مانند نیتروژن و گوگرد و در بسیاری از خاک‌ها برای فسفر می‌باشد. یکی از روش‌های مهم مقابله با بیابان‌زایی استقرار گیاه می‌باشد. انتقال یون‌های مواد غذایی در محلول خاک می‌تواند از طریق فرایندهای پخشیدگی و یا جریان توده‌ای اتفاق بیفتد. کمپلکس‌های آلی تشکیل شده به‌خصوص برای آهن، مس و روی یکی از عوامل در دسترس بودن آنها در محیط ریزوسفر می‌باشد. همچنین تغییراتی که در مقدار واکنش خاک به وسیله وجود مواد آلی اتفاق می‌تواند حلالیت آنها را در غالب خاک‌ها افزایش دهد. همچنین مواد کربن آلی در خاک می‌توانند رشد ریشه را افزایش دهند. آنها می‌توانند رشد طولی و تعداد ریشه‌های موئین و ترشحات ریشه را نیز بهبود بخشند. اسید هیومیک موجود در خاک می‌تواند مانند اکسین عمل کند و باعث ایجاد مکان‌های میتوزی در ریشه‌ها شده و رشد ریشه را تحریک می‌کند (Greke, 2022). همچنین مواد آلی در خاک می‌تواند با تاثیر بر فرایندهای فیزیولوژیک در گیاهان فعالیت غشای پلاسمایی H^+ -ATPase را افزایش دهند. افزایش این فعالیت در خاک‌های قلیائی می‌تواند موجب اسیدی شدن ریزوسفر شده و رشد ریشه را تقویت کند. همچنین می‌تواند ناقل‌های عناصر غذایی را در ریشه‌ها فعال کرده و اسیدهای آلی آزاد کند (Yang et al., 2021). SOC می‌تواند به تنهایی بر چرخه نیتروژن در خاک موثر بوده و باعث افزایش آزاد شدن گازهای اکسیدهای نیتروژن (NO_x) به جو شود (Palmer et al., 2017). با این وجود، زمانی که ورودی کودهای نیتروژنه به خاک محدود باشد، افزایش مقدار SOC باعث افزایش محصول می‌شود. همچنین اتلاف نیتروژن از طریق آبشویی در خاک‌ها می‌تواند با افزوده شدن مقدار کربن آلی به خاک کاهش یابد. فعالیت‌های میکروبی به‌ویژه تنظیم ابراز ژن‌های عملکردی و فعالیت‌های متابولیسمی با افزایش SOC بهبود می‌یابند و به‌طور معناداری بر تعادل کربن: نیتروژن: فسفر: گوگرد تاثیر می‌گذارند (Wang et al., 2021). به‌طور کلی، نتایج حاکی وجود رابطه‌ای متقابل است که با شروع فرایندهای بیابان‌زایی، سطوح کربن آلی در خاک کاهش می‌یابد و چرخه مواد غذایی آهسته‌تر می‌شود که منجر به تخلیه مواد غذایی از عمق

رشد ریشه و کاهش حاصلخیزی خاک می‌شود. این اثرات متعاقبا رشد گیاهان را محدود کرده و باعث تضعیف اکوسیستم می‌گردد.

۳-۱-۴- کربن آلی و تاثیر متقابل بر تنوع گونه‌های گیاهی در کاهش بیابان‌زایی

مطالعات نشان داده‌اند که ریزوسفر، مکان اصلی تعامل بین گیاهان، خاک و سیستم‌های میکروبی، ناحیه‌ای خاص می‌باشد که به شدت تحت تاثیر رشد ریشه، ترشحات آن و فعالیت‌های میکروبی قرار می‌گیرد (Wankhade et al., 2025). در محیط ریزوسفر، ریشه‌های گیاه خواص فیزیکی و شیمیایی خاک را تغییر داده و با آزاد کردن ترشحات برای به دام انداختن و اتصال ذرات خاک، رسوب کربن فتوسنتزی را افزایش می‌دهند (Sun et al., 2020). علاوه بر این سیستم ریشه تعادل اسمزی محیط خاک را از طریق رسوب و جذب عناصر غذائی تغییر داده و در نتیجه فرایند خاکدانه‌سازی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این عوامل در نهایت باعث افزایش مقاومت خاکدانه‌های خاک در برابر فرسایش و بهبود عملکردهای حفاظتی خاک و آب می‌شود. ریشه‌های گیاه به‌طور موثر فرسایش خاک را کنترل می‌کنند و ساختار خاک را از طریق اتصال شبکه، چسبندگی ریشه به خاک و بیوشیمی ریشه تثبیت می‌کنند و به‌طور غیرمستقیم تثبیت و تجزیه مواد آلی را با افزایش طول عمر خاکدانه‌ها و حفظ چرخه طبیعی آنها کنترل می‌کنند (Bodner et al., 2014). همچنین کربن رسوب کرده در ریزوسفر متاثر از فعالیت در این ناحیه است که میزان تاثیر به مورفولوژی سیستم ریشه بستگی دارد (Greke, 2022). اثرات سیستم‌های ریشه گیاهان با مورفولوژی‌های مختلف بر پایداری ساختار خاک و ترسیب کربن به شکل ریشه مانند ریشه‌های موئین، فیبری و سایر سیستم‌ها دارند (Pausch and Kuzyakov, 2017). به صورت متقابل، کربن آلی با تامین عناصر غذایی ضروری و بهبود شرایط خاک بر فعالیت پوشش گیاهی و بهره‌وری گیاه تاثیر می‌گذارد. خاک‌های با محتوای کربن بالاتر، جمعیت گیاهی متنوع‌تر و انعطاف‌پذیرتری را پشتیبانی می‌کنند که قادر به تحمل تنش‌های محیطی می‌باشند (Li et al., 2020b). با این حال، بیابان‌زایی می‌تواند سطوح کربن آلی را کاهش داده و باعث کاهش پوشش گیاهی شود که منجر به کاهش تنوع زیستی و افزایش آسیب‌پذیری در برابر تخریب خاک می‌گردد (Li et al., 2020a). تنوع گونه‌های گیاهی رابطه مستقیمی با کربن خاک به واسطه کیفیت ماده آلی دارد (Spohn et al., 2023). تاثیر تنوع گونه‌های گیاهی بر مقدار SOC در مناطق خشک بیشتر از مناطق مرطوب است، بنابراین حساسیت بر تغییرات گونه‌های کشت شده در مناطق بیابانی بیشتر از سایر مناطق می‌باشد. هرچند مطالعات تنوع زیستی تاثیر گونه‌های گیاهی را بر روی SOC کمتر برآورد می‌کنند که می‌تواند به دلیل تغییرات آهسته محتوای کربن آلی در پاسخ به تغییرات گیاه باشد. غالبا برای بررسی پاسخ کربن آلی به تغییرات گیاهی نیاز به دهه‌ها زمان می‌باشد تا به سطح پایدار جدیدی از محتوای کربن دست یافت (Bell et al., 2021). مطالعات در مورد روابط مابین شاخص خشکی، شاخص شانون و SOC محدود می‌باشد ولی تحقیقات نشان داده‌اند که روابط آنها به آب و هوای منطقه وابستگی کامل دارد (Spohn et al., 2023; Ma et al., 2025). در مناطق گرم و خشک، تغییرات شدت افزایش SOC با زیست‌توده گیاهی و شاخص شانون بیشتر از مناطق مرطوب می‌باشد. بررسی مدل‌های مختلف مابین تنوع گونه‌های گیاهی نشان داده است که مدل‌های مناسب برای پیش‌بینی ترسیب SOC، دسته‌ای از مدل‌ها می‌باشند که کیفیت ماده آلی خاک را به جای کمیت آن در محاسبات خود لحاظ کرده‌اند. هرچند مقدار زیست‌توده گیاهی با SOC رابطه مستقیم و معنادار داشته است ولی با شاخص تنوع گونه گیاهی رابطه‌ای نشان نداده است (Spohn et al., 2023; Fu et al., 2025).

۳-۱-۵- تاثیر کربن آلی خاک بر جمعیت میکروبی خاک

کمیت و کیفیت کربن آلی در خاک به دلیل منبع اصلی بودن برای انرژی مستقیمی بر تنوع زیستی و فعالیت‌های جانداران خاک و رشد و بقای آنها موثر است. ولی به‌طور غیرمستقیم، کربن آلی خاک می‌تواند تنوع زیستی را با تاثیر بر ویژگی‌های زیستگاه

آنها مانند خاکدانه‌های خاک، اندازه منافذ و اتصال بین منافذ تحت تاثیر قرار دهد. کمیت و کیفیت کربن آلی در خاک فراوانی، تنوع و فعالیت جمعیت میکروبی خاک را تعیین می‌کند ولی شرایط پیچیده‌ای وجود دارد به این دلیل که تنوع زیستی نیز بر کمیت و کیفیت SOC تعیین‌کننده است چون برهمکنش‌های متعددی وجود دارد که بر سرعت و نحوه چرخه کربن در عملکردهای اکوسیستمی تاثیرگذار است (Delgado-Baquerizo et al., 2017). مطالعات همچنین نشان داده‌اند که کیفیت SOC و تشکیل خاکدانه جایگاه‌های متمایزی را برای جمعیت‌های میکروبی مختلف ایجاد می‌کنند. به‌عنوان مثال، SOC مرتبط با خاکدانه‌های درشت تنوع میکروبی و ساختار جمعیتی را ارتقا می‌دهد که با جمعیت میکروبی مرتبط با کربن آلی موجود در خاکدانه‌های ریز متمایز است (Trivedi et al., 2017). تنوع میکروبی منبع ژنی بزرگتری را برای بهره‌برداری از قابلیت‌های عملکردی آنها برای بهبود اکوسیستم فراهم می‌کند. اتلاف تنوع در خاک مرتبط با از بین رفتن SOC عواقب قابل توجهی دارد و بنابراین درک روابط بین تنوع زیستی خاک و چرخه کربن برای پیش‌بینی تاثیرات تنوع میکروبی مرتبط با عملکردهای اکوسیستمی و جلوگیری از بیابان‌زایی مهم است (Trivedi et al., 2018). به‌عنوان مثال دیده شده است که غالباً نسبت‌های بالای قارچ به باکتری در محتوای زیاد ماده آلی و ذخیره کربن مربوط می‌باشند به‌طوری‌که جمعیت میکروبی خاک بیشتر به سمت سویه‌های کوپروتروفیک (پرخوراک، مساعد برای رشد در محیط‌هایی با غلظت بالای عناصر غذایی) نسبت به سویه‌های اولیگوتروفیک (کم‌خوراک، مساعد برای محیط‌هایی با غلظت کم عناصر غذایی) تغییر می‌یابند (Trivedi et al., 2017). هرچند پیچیدگی‌های فراوانی برای بررسی تاثیرات کربن آلی بر جمعیت میکروبی خاک به دلیل روابط مابین باکتری‌ها و قارچ‌ها با بخش معدنی خاک وجود دارد. بر اساس مطالعه‌ای، کمیت SOC فقط توانسته است ۵ درصد از تغییرات تنوع زیستی را تشریح کند و هنگامی که بر اساس کیفیت تقسیم‌بندی شد، ۲۲ درصد از تغییرات را بر اساس ژن $16S rRNA$ توانست تشریح کند (Szoboszlai et al., 2017). مطالعات نشان داده‌اند که هر چه گونه‌های بیشتری وجود داشته باشند، فرایند مصرف مواد غذایی و استفاده از SOC به‌صورت بهتری در بین گونه‌های زیستی سازماندهی شده و بهتر می‌توانند محیط را برای بقا و تکامل تغییر دهند (Mo et al., 2022). هرچند تغییرات کوتاه مدت کربن آلی در بیابان شاید بر تنوع میکروبی در خاک به‌طور معنادار موثر نباشد ولی تغییرات بلند مدت به شدت بر فراوانی و تنوع باکتری‌ها و قارچ‌ها موثر است (Cui et al., 2021; Hosseini et al., 2021). بهره‌برداری صحیح از منابع طبیعی و SOC، به‌عنوان موثرترین رویکرد برای افزایش پایدار بهره‌وری در کشاورزی، کاهش تغییرات اقلیمی و احیای محیط‌های تخریب شده در نظر گرفته می‌شوند (Fu et al., 2025). مطالعات هواشناسی نشان داده است که بر اثر تغییرات اقلیمی در اکثر مناطق ایران مقدار بارش سالیانه کاهش و میانگین دما افزایش خواهد یافت که اثر منفی بر بقای کربن آلی در خاک خواهد داشت (Behzadi Karimi et al., 2023).

۳-۲- تاثیر تغییر کاربری اراضی و شیوه‌های مدیریت

فعالیت‌های انسانی، مانند شیوه‌های کاربری ناپایدار و تغییرات پوشش زمین، می‌توانند پویائی کربن آلی در خاک را تغییر داده و به بیابان‌زایی کمک کنند (Ramesh et al., 2019; Hu et al., 2021). نتایج نشان داده است که کاربری اراضی در تغییرات SOC نقش داشته به‌نحوی که بیشترین تجمع SOC مربوط به کاربری‌های جنگل، باغ، کشاورزی و مرتع می‌باشد و هرگونه تغییر منفی از پوشش بومی می‌تواند مقدار SOC را کاهش دهد (Moradi et al., 2021). جنگل‌زدایی، کشاورزی فشرده و شیوه‌های نامناسب مدیریت زمین می‌تواند سطح SOC را کاهش داده و منجر به تخریب خاک و بیابان‌زایی شود. برعکس، اتخاذ شیوه‌های مدیریت پایدار زمین که حفاظت از خاک، احیای مواد آلی و رویکردهای اکولوژیکی کشاورزی را ترویج می‌کند، می‌تواند به کاهش بیابان‌زایی و افزایش انعطاف‌پذیری خاک کمک کند. هرگونه تغییر شدید در مقیاس زمانی

کوچک بر پوشش متداول گیاهی می‌تواند اثرات منفی بر پویایی کربن آلی در خاک داشته باشد (Li et al., 2025; Chen et al., 2025). دو تغییر جنگل‌زدایی و کشاورزی فشرده می‌تواند باعث کاهش غیرقابل برگشت کربن آلی در خاک یک منطقه گردد.

۳-۲-۱- جنگل‌زدایی

جنگل‌زدایی شامل حذف درختان و پوشش گیاهی است که باعث کاهش ورود مواد آلی به خاک می‌شود. بستر برگ، شاخه‌ها و سایر بقایای گیاهی که به کف جنگل می‌ریزند به مواد آلی خاک و محتوای کربن آلی کمک می‌کنند. مطالعات نشان داده است که جنگل‌زدایی با کاهش پوشش گیاهی منجر به کم شدن ورود منابع ماده آلی به خاک از طریق کاهش ورود لاشه برگ گیاهان و ریشه آنها می‌شود (Khosravi Mashizi et al., 2025; Li et al., 2023). با گذر زمان کاهش در مقدار ماده آلی منجر به کاهش سطح SOC می‌شود. بدون پوشش گیاهی، ورودی مواد آلی کاهش می‌یابد و منجر به کاهش سطح SOC می‌شود. همچنین مناطق جنگل‌زدایی شده اغلب در معرض نور خورشید و نوسانات دما هستند که می‌تواند تجزیه مواد آلی را تسریع کند. بدون سایه و حفظ رطوبت ایجاد شده توسط تاج جنگل، مواد آلی در خاک با سرعت بیشتر تجزیه می‌شوند و CO₂ را در جو آزاد می‌کنند (Deng et al., 2023; Peplau et al., 2023). این فرایند باعث کاهش بیشتر ذخایر SOC می‌شود. جنگل‌زدایی می‌تواند منجر به افزایش فرسایش خاک، به‌ویژه در مناظر شیب‌دار یا آسیب‌پذیر شود. از دست دادن ریشه درختان که به اتصال ذرات خاک به یکدیگر کمک می‌کند، می‌تواند خاک را مستعد فرسایش توسط آب و باد کند. فرسایش خاک می‌تواند منجر به حذف لایه سطحی خاک شود که معمولاً غنی از کربن آلی است و منجر به کاهش محتوای SOC می‌شود. جنگل‌زدایی می‌تواند جمعیت میکروبی خاک را تغییر دهد، که نقش مهمی در تجزیه مواد آلی و چرخه عناصر غذایی ایفا می‌کنند. حذف درختان و پوشش گیاهی می‌تواند تعادل جمعیت‌های میکروبی را مختل کند و بر توانایی آنها در تجزیه مواد آلی و بازیافت عناصر غذایی تأثیرگذار باشد (Heydari et al., 2024). تغییرات در فعالیت میکروبی و ترکیب جامعه می‌تواند به کاهش محتوای SOC در طول زمان کمک کند. مناطق جنگل‌زدایی اغلب به کاربری‌های کشاورزی یا شهری تبدیل می‌شوند که منجر به اختلال بیشتر خاک و تغییر در شیوه‌های مدیریت زمین می‌شود. عملیات کشاورزی باعث شتاب در تجزیه مواد آلی می‌شوند (Abdollahi garekand et al., 2019). از سوئی شهرسازی نیز منجر به تراکم خاک، آب‌بندی خاک و هدررفت ماده آلی خاک و کاهش محتوای SOC شود.

۳-۲-۲- کشاورزی فشرده

در کشاورزی فشرده که غالباً شامل خاک‌ورزی متعدد و متناوب، سیستم تک کشتی و استفاده سنگین از کودهای شیمیایی و سموم علف‌کش یا حشره‌کش می‌باشد می‌تواند به ساختمان خاک آسیب رسانده و سرعت تجزیه ماده آلی را افزایش دهد که متعاقباً باعث کاهش جذب کربن آلی در خاک می‌گردد. خاک‌ورزی باعث افزایش هواپدگی ماده آلی شده و تجزیه میکروبی آن را تسهیل می‌کند. تشدید تجزیه میکروبی نیز منجر به شکسته شدن پیوندهای کربنی و در نهایت خروج CO₂ به اتمسفر می‌گردد. خاک‌ورزی شدید باعث افزایش این روند می‌شوند که به تخلیه کربن آلی از خاک شتاب می‌بخشد. همچنین خاک‌ورزی باعث تخریب ساختمان خاک و شکسته شدن خاکدانه‌های آن می‌گردد. خاکدانه‌ها در محافظت از ماده آلی در برابر تجزیه نقش مهمی ایفا می‌کنند. بدون محافظت خاکدانه‌ها ماده تجزیه میکروبی آسیب‌پذیر شده و منجر به اتلاف آن از خاک می‌شود. از سوئی دیگر خاک‌ورزی شدید باعث افزایش فرسایش خاک می‌شود که بوسیله تخریب ساختمان خاک باعث ظهور خاک برهنه و در معرض قرار گرفتن آن در مقابل عوامل فرساینده آب و خاک می‌گردد. توجه به افزایش جمعیت میکروبی خاک و استفاده از سویه‌های مناسب می‌تواند در افزایش ترکیبات مختلف SOC و به تبع آن بهبود ساختمان خاک

نقش مهمی داشته باشند (Hosseini et al., 2024). به دلیل اینکه غالباً ماده آلی در سطح خاک تجمع می‌یابد فرسایش می‌تواند منجر به اتلاف و هدررفت این لایه غنی از کربن گردد که به‌طور کلی باعث کاهش محتوای SOC می‌گردد. خاک‌ورزی می‌تواند باعث کاهش ورود ماده آلی به خاک بوسیله به‌هم ریختن بقایای سطحی و کاهش ترکیب مواد آلی از بقایای گیاهی یا گیاهان پوششی می‌گردد. این کاهش در ورودی موادی آلی، دوباره پر کردن ذخایر SOC را محدود می‌کند، که منجر به کاهش محتوای کلی SOC در طول زمان می‌شود. خاک‌ورزی می‌تواند باعث مختل کردن جمعیت میکروبی و جانداران خاک می‌گردد که نقش‌های مهمی در تجزیه میکروبی ماده آلی خاک و چرخه عناصر در آن می‌شود. تغییرات در ترکیب و فعالیت زیستی خاک در نتیجه خاک‌ورزی می‌تواند بر سرعت تجزیه کربن آلی و ترکیبات آنها در خاک تاثیر منفی داشته باشد. روش‌های خاک‌ورزی شدید تجزیه مواد آلی خاک را تسریع می‌کند، فرسایش خاک را افزایش می‌دهد، ساختار خاک را مختل می‌کند و ورودی مواد آلی به خاک را کاهش می‌دهد که همگی به کاهش محتوای کربن آلی در خاک کمک می‌کنند. بنابراین، به حداقل رساندن دفعات خاک‌ورزی و اتخاذ روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی یا بدون خاک‌ورزی می‌تواند به حفظ SOC و بهبود سلامت و حاصلخیزی خاک کمک می‌کند. استفاده از روش‌های طولانی مدت بدون خاک‌ورزی می‌تواند باعث افزایش SOC شود که به‌طور غیرمستقیم بر بهبود خاکدانه‌سازی، فعالیت میکروبی و چرخه مواد غذایی موثر است (Ferreira et al., 2020). مطالعات نشان داده‌اند که با اعمال کشت زراعی مناسب و استفاده از سیستم آبیاری در خاک بیابانی مقدار کربن آلی به ترتیب به میزان ۳۲ تا ۶۸ درصد در کشت متناوب گندم - ذرت، ۲۷ تا ۱۳۶ درصد در کشت متناوب گندم - اقاقیا، و ۴۸ درصد در کشت متناوب گندم - یونجه افزایش می‌یابد. هرچند مطالعات نشان دادند که بعد از افزودن کربن آلی به خاک بیابان به طریقه اعمال کشت مقدار پایداری رس افزایش قابل توجهی می‌یابد ولی تاثیر معناداری در مقدار افزایش خاکدانه‌های درشت حتی بعد از ۱۰ سال کشت مداوم دیده نشد (Li et al., 2009). بایستی در نظر داشت که می‌توان با استفاده از روش‌های مناسب مانند استفاده از سیستم‌های آبیاری مدرن و خاک‌ورزی حداقل، مدیریت زراعی مناسب، برگرداندن بقایای گیاهی و استفاده از کودهای آلی مقدار کربن آلی را در خاک افزایش داد (Bakhshande Larimi et al., 2023).

۳-۳- بیابان‌زدایی

با توجه به وسعت مناطق خشک و نیمه خشک در ایران و پتانسیل بالای بیابان‌زایی در این مناطق به دلیل تغییرات اقلیمی، نیاز است تا در مورد تاثیر کربن آلی که فاکتور اساسی در جلوگیری از بیابان‌زایی و گسترش بیابان‌ها می‌باشد، تحقیقات منسجمی انجام شود. بیابان‌زایی به عنوان معضلی در مناطق نیمه مرطوب نیز در ایران به شمار می‌رود (Haghighi et al., 2017). بسیاری از مطالعات حاکی از پتانسیل بالای اراضی به بیابان‌زایی می‌باشد (Talebanfard et al., 2022; Asefjahi et al., 2022; Ghasemi Aryan et al., 2020) و سرعت بالا در تغییرات کاربری اراضی در مناطق حساس به بیابان‌زایی باعث بروز نگرانی گردیده و نیازمند نگرش جدید در نحوه حفظ منابع طبیعی و تعامل با اکوسیستم می‌باشد (Sarbaz et al., 2020). شناخت عوامل موثر در بیابان‌زدایی و تعیین راهبردهای مدیریتی با بهره‌گیری از روش‌های گوناگون بایستی در جهت برنامه‌ریزی براساس سناریوهای مدیریتی و آینده پژوهی انجام شود (Dashti et al., 2023; Eskandari Damanah et al., 2021). اجرای عملیات اصلاحی و احیای برای به حداقل رساندن پتانسیل فرسایش در مناطق حساس به بیابان‌زایی ضروری می‌باشد. مطالعات در ایران نشان داده است که هم اکنون طرح‌های متعددی برای ترسیب کربن در بخش‌های مختلف کشور در حال اجراست که سعی دارند با استفاده از افزایش مقدار کربن آلی در خاک روند بیابان‌زایی را معکوس کنند (Khosrobeigi Bozchelouie and Najmi, 2017; Sayah et al., 2024). اجرای طرح‌هایی برای احیا پوشش گیاهی می‌تواند از عوامل مهم در کنترل تخریب اراضی و افزایش پتانسیل ترسیب کربن باشد (Ahmadi et al., 2022). پروژه‌های

اصلاحی و احیایی منابع طبیعی با هدف حفظ، احیا و بهبود وضعیت پوشش گیاهی، خاک و آب اجرا می‌شوند. در کشور ایران، عرصه‌های طبیعی گسترش فراوانی دارند و مشارکت جوامع محلی و روستائیان در اجرای پروژه‌ها یکی از اصول موفقیت آنهاست. آگاهی از پیامدها و میزان دستیابی به اهداف تعریف شده برای این پروژه‌ها از طریق ارزیابی اثرات اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی انجام می‌شود (Farajollahi et al., 2022). پروژه‌های مشارکتی منارید و ترسیب کربن با استفاده از روش کپه‌کاری و ایجاد تغییرات مثبت بر ویژگی‌های خاک نمونه‌ای از پروژه‌های اصلاحی است (Gholami et al., 2020; Babrnezhad and Nikoo, 2025). نتایج نشان داد که رویکردهای اکولوژیک‌محور و اجتماعی-اکولوژیک‌محور در پروژه‌های شاخص بیابان‌زدایی واکنش‌های متفاوتی در بهبود حاصلخیزی و پایداری خاک داشته‌اند، به‌طوری‌که مدیریت اجتماعی - اکولوژیک‌محور تأثیر مطلوب‌تری بر کیفیت اکولوژیکی و کارکرد زیستی خاک نشان داد (Ghasemi Aryan et al., 2020). به‌طوری‌که در بررسی سه پروژه شاخص مقابله با بیابان‌زایی شامل بوته‌کاری، احداث آبگیر و بذرپاشی، تفاوت معناداری میان دو رویکرد مدیریتی مشاهده شد (Ghasemi Aryan et al., 2020). مدیریت اجتماعی - اکولوژیک‌محور، به‌دلیل مشارکت مؤثر جامعه محلی در تمامی مراحل برنامه‌ریزی، اجرا، نظارت و بهره‌برداری و در نتیجه حفاظت کارآمدتر عرصه‌های احیاشده، عملکرد موفق‌تری در بهبود حاصلخیزی و افزایش پایداری اکولوژیکی، و بهبود کربن آلی خاک نشان داد. بایستی در این پروژه‌ها به غیر از تمرکز بر هدف نهایی مورد انتظار، شرایط منطقه و اقدامات جانبی انجام شده و سایر متغیرهای اجتماعی و اقتصادی نیز لحاظ شود. اثرگذاری پروژه‌های بیابان‌زدایی که متمرکز بر استقرار پوشش گیاهی، افزایش ترسیب کربن و بهبود ویژگی‌های خاک می‌باشند، نیاز به زمانی طولانی دارند. همچنین می‌توان با اقدامات مقدماتی و یا تکمیلی همچون آماده‌سازی خاک برای کاشت گیاهان، قرق منطقه، غنی‌سازی و اصلاح خاک‌ها، آموزش روستائیان و نظارت پیوسته بر اجرای طرح‌ها میزان موفقیت آنها را افزایش داد.

۴- نتیجه گیری

با توجه به تغییرات اقلیمی که به سرعت در حال تغییر چهره اکوسیستم‌های کشور می‌باشد، اهمیت پروژه‌های بیابان‌زدایی و جلوگیری و مهار عوامل فرساینده و بیابان‌زا حیاتی می‌باشد. در این بین به‌نظر می‌رسد مدیریت پایدار خاک اولین قدم برای این عمل است که با چند شالوده حیاتی حمایت می‌شود. استقرار گیاهان و حفظ رطوبت خاک بایستی از طرق مختلف برای بیابان‌زدایی انجام شود که برای رسیدن به این هدف منطقی‌ترین راه افزایش میزان کربن خاک می‌باشد. پیشنهاد می‌شود تا با روش‌های مختلف احیایی و مدیریتی مقدار ترسیب کربن در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک افزایش یافته و عملیات کشاورزی در این مناطق با مدیریت حفظ و افزایش کربن آلی صورت گیرد. این هدف می‌تواند از طریق روش‌های مختلفی همچون استفاده از بقایای گیاهی، اصلاح مدیریت چرا، توسعه کشاورزی حفاظتی و احیای اراضی با گونه‌های بومی سازگار با شرایط اقلیمی ایران تحقق یابد. همچنین، در برنامه‌ریزی‌های کشاورزی این مناطق باید اصل حفظ و ارتقای کربن آلی خاک به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی مدیریت پایدار لحاظ شود تا علاوه بر افزایش حاصلخیزی خاک و پایداری تولید، در کاهش اثرات تغییر اقلیم و بازسازی اکوسیستم‌های تخریب‌شده نیز نقش‌آفرین باشد. بایستی در نظر داشت که هدف اصلی تمامی فعالیت‌های احیایی در پروژه‌های بیابان‌زدایی، بازسازی ساختار و عملکرد اکوسیستم است. تحقق این هدف مستلزم تداوم و پایداری در فرایند احیا می‌باشد، امری که به‌طور گسترده به کارآمدی سازوکارهای ترکیبی اقتصادی، اجتماعی و سیاسی و همچنین به انگیزه و میزان مشارکت ذی‌نفعان سازمانی و مردمی وابسته است.

۵- سپاس‌گزاری

بدینوسیله نویسندگان کمال تشکر و قدردانی خود را از حمایت‌های صندوق پژوهش و نوآوری کشور (بنیاد علم ایران) و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی ابراز می‌دارند.

۶- داده‌ها و اطلاعات

مبنای داده‌ها و اطلاعات بر اساس جمع‌آوری از مقالات علمی بین‌المللی و داخلی می‌باشد.

۷- تعارض منافع

در این مقاله، تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

۸- مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این مقاله به شرح زیر است:

مشارکت حبیب رمضان زاده، بررسی و داده‌برداری، تفسیر و تحلیل داده‌های مقالات و ویرایش متن اولیه مقاله می‌باشد. مشارکت احمد بایبوردی، تأمین امکانات، نظارت و راهنمایی بر روند انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج و ویرایش نهایی متن مقاله می‌باشد.

۹- اصول اخلاقی

نویسندگان، اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنها می‌باشد.

۱۰- حمایت مالی

این مقاله بخشی از پژوهش مورد حمایت مالی صندوق پژوهش و نوآوری کشور (بنیاد علم ایران) و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی می‌باشد که در قالب گرنت پژوهشگر پسادکتر انجام گردیده است.

۱۱- مراجع

1. Alvyar, Z., & Mostafaei, M. (2025). Land degradation and its impact on agriculture: challenges, causes, consequences, and solutions. *Soil and Sustainable Development*, (e227285). doi: 10.22034/ssd.2025.532645.1020 [In Persian]
2. Entezari Zarch, A., Ahmadi, H., Moeini, A. M., & Pazira, E. (2023). Assessment of land degradation using GLASOD and IMDPA models (Case study: Yazd-Ardakan plain). *Desert Management*, 10(4), 1-20. doi: 10.22034/jdmal.2022.562179.1396 [In Persian]
3. Haghgow, K., Rostami, N., Heshmati, M., & Faramarzi, M. (2017). investigation of desertification potential using imdpa model (Case Study: The Gandomban Plain, Qasr-e-Shirin). *Geography and Environmental Sustainability*, 7(1), 21-33. [In Persian]
4. Heydari Alamdarloo, E., Dehghan Rahimabadi, P., Khosravi, H., Rafiei Sharifabad, J., & Barabadi, H. (2024). vegetation vulnerability probability index: a method for determining desertification risk, *RS & GIS for Natural Resources*, 15(1), 1-18. doi: 10.30495/girs.2022.692984 [In Persian]
5. Grilli, E., Carvalho, S. C. P., Chiti, T., Coppola, E., ..., Castaldi, S. (2021). Critical range of soil organic carbon in southern Europe lands under desertification risk. *Journal of Environmental Management*, 287, 112285. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112285
6. Attaeian, b., Shojaeefar, Sh., Zandieh, V., & Hashemi, S.S. (2018). Study of soil organic carbon changes in two critical and vulnerable areas of Qahavand plain rangelands using remote sensing and

- GIS. *RS & GIS for Natural Resources*, 8(1), 76-90. doi: 20.1001.1.26767082.1396.8.4.6.5 [In Persian]
7. Heydari, N., Mousavi, S. B., Beheshti Ale Agha, A., Rakhsh, F., & Karimi, I. (2022). The effect of land use change on some physical, chemical and biological characteristics of soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(7), 1625-1643. doi: 10.22059/ijswr.2022.344871.669298 [In Persian]
 8. Babrnezhad, H., & Nikoo, S. (2025). Evaluation of the effects of biological projects on some soil properties in north khorasan province. *Desert Management*, 13(2), 45-58. doi: 10.22034/jdmal.2025.2053165.1500 [In Persian]
 9. Ferreira, C. R., Silva Neto, E. C., Pereira, M. G., Guedes, J. N., Rosset, J. S., & Cunha dos Anjos, L. H. (2020). Dynamics of soil aggregation and organic carbon fractions over 23 years of no-till management. *Soil and Tillage Research*, 198, 104533. doi: 10.1016/j.still.2019.104533
 10. Li, M., Wang, Q., & Shen, S. (2020a). Response of soil aggregate stability and distribution of organic carbon to alpine grassland degradation in Northwest Sichuan. *Geoderma Regional*, 22, e00309. doi: 10.1016/j.geodrs.2020.e00309
 11. Ma, L., Wang, Q., Shen, S., Li, F., & Li, L. (2020). Heterogeneity of soil structure and fertility during desertification of alpine grassland in northwest Sichuan. *Ecosphere*, 11(7). doi: 10.1002/ecs2.3161
 12. Trivedi, P., Singh, B. P., & Singh, B. K. (2018). Soil carbon. In P. Trivedi, B. P. Singh, and B. K. Singh (Eds.), *Soil carbon storage* (pp. 1–28). Elsevier. doi: 10.1016/b978-0-12-812766-7.00001-9
 13. Li, J., Li, S., Zhao, R., Xing, S., Chen, H., Huang, Y., Zhang, L., & Li, J. (2025). Soil organic carbon dynamics (2008–2020) across different cultivated land use types in a subtropical region. *Geoderma Regional*, 40, e00926. doi: 10.1016/j.geodrs.2025.e00926
 14. Minasny, B., & McBratney, A. B. (2017). Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 39–47. doi: 10.1111/ejss.12475
 15. Bagnall, D. K., Morgan, C. L. S., Cope, M., ..., Honeycutt, C. W. (2022). Carbon-sensitive pedotransfer functions for plant available water. *Soil Science Society of America Journal*, 86(3), 612–629. doi: 10.1002/saj2.20395
 16. Alnaimy, M. A., & Elrys, A. S. (2025). Drivers of soil degradation in arid regions: impacts on physico-chemical properties and nutrient availability. *Land Degradation and Development*. doi:10.1002/ldr.70207 [In Persian]
 17. Gerke, J. (2022). The central role of soil organic matter in soil fertility and carbon storage. *Soil Systems*, 6(2), 33. doi: 10.3390/soilsystems6020033
 18. Singh, A., Ghimire, R., & Acharya, P. (2024). Soil profile carbon sequestration and nutrient responses varied with cover crops in irrigated forage rotations. *Soil and Tillage Research*, 238, 106020. doi: 10.1016/j.still.2024.106020
 19. Schröder, J. J., Schulte, R. P. O., Creamer, R. E., ... Wall, D. P. (2016). The elusive role of soil quality in nutrient cycling: A review. *Soil Use and Management*, 32(4), 476–486. doi: 10.1111/sum.12280
 20. Yang, F., Tang, C., & Antonietti, M. (2021). Natural and artificial humic substances to manage minerals, ions, water, and soil microorganisms. *Chemical Society Reviews*, 50(10), 6221–6239. doi: 10.1039/d0cs01363c
 21. Sheidai karkaj, E., Sepehri, A., Barani, H., & Motamedi, J. (2017). Soil organic carbon reserve relationship with some soil properties in East Azerbaijan rangelands. *Journal of Rangeland*, 11(2), 125-137. doi: 20.1001.1.20080891.1396.11.2.1.0 [In Persian]
 22. Palmer, J., Thorburn, P. J., Biggs, J. S., Dominati, E. J., Probert, M. E., Meier, E. A., Huth, N. I., Dodd, M., Snow, V., Larsen, J. R., & Parton, W. J. (2017). Nitrogen cycling from increased soil organic carbon contributes both positively and negatively to ecosystem services in wheat agro-ecosystems. *Frontiers in Plant Science*, 8. doi: 10.3389/fpls.2017.00731
 23. Wang, Q., Huang, Q., Wang, J., Khan, M. A., Guo, G., Liu, Y., Hu, S., Jin, F., Wang, J., & Yu, Y. (2021). Dissolved organic carbon drives nutrient cycling via microbial community in paddy soil. *Chemosphere*, 285, 131472. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131472
 24. Wankhade, A., Wilkinson, E., Britt, D. W., & Kaundal, A. (2025). A review of plant–microbe interactions in the rhizosphere and the role of root exudates in microbiome engineering. *Applied Sciences*, 15(13), 7127. doi: 10.3390/app15137127

25. Sun, C., Wang, D., Shen, X., Li, C., Liu, J., Lan, T., Wang, W., Xie, H., & Zhang, Y. (2020). Effects of biochar, compost and straw input on root exudation of maize (*Zea mays* L.): From function to morphology. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 297, 106952. doi: 10.1016/j.agee.2020.106952
26. Bodner, G., Leitner, D., & Kaul, H. P. (2014). Coarse and fine root plants affect pore size distributions differently. *Plant and Soil*, 380, 133–151. doi: 10.1007/s11104-014-2079-8.
27. Pausch, J., & Kuzyakov, Y. (2017). Carbon input by roots into the soil: Quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale. *Global Change Biology*, 24(1), 1–12. doi: 10.1111/gcb.13850
28. Li, J., Yuan, X., Ge, L., Li, Q., Li, Z., Wang, L., & Liu, Y. (2020b). Rhizosphere effects promote soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration in rocky areas of desertification. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 304, 107126. doi: 10.1016/j.agee.2020.107126
29. Spohn, M., Bagchi, S., Biederman, L. A., Borer, E. T., ..., Yahdjian, L. (2023). The positive effect of plant diversity on soil carbon depends on climate. *Nature Communications*, 14(1). doi: 10.1038/s41467-023-42340-0.
30. Bell, S. M., Terrer, C., Barriocanal, C., Jackson, R. B., & Rosell-Melé, A. (2021). Soil organic carbon accumulation rates on Mediterranean abandoned agricultural lands. *Science of the Total Environment*, 759, 143535. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143535
31. Ma, J., Chen, L., Pang, D., Wu, M., Zhang, Y., Chen, Y., & Li, X. (2025). Aridity Index Explains the Accumulation of Soil Organic Carbon Sources in Grassland Ecosystem. *European Journal of Soil Science*, 76(4). doi: 10.1111/ejss.70158
32. Fu, T., Jia, Z., Cheng, Y., Huhe, Tsubo, M., Ma, W., Zhao, L., Ai, R., Huang, X., & Li, M. (2025). Aridity-induced nonlinear shifts in soil organic carbon across Chinese grasslands. *Ecological Indicators*, 178, 114037. doi: 10.1016/j.ecolind.2025.114037
33. Delgado-Baquerizo, M., Powell, J. R., Hamonts, K., ..., Bisset, A. (2017). Circular linkages between soil biodiversity, fertility and plant productivity are limited to topsoil at the continental scale. *New Phytologist*, 215(3), 1186–1196. doi: 10.1111/nph.14634
34. Trivedi, P., Delgado-Baquerizo, M., Jeffries, T. C., ..., Singh, B. K. (2017). Soil aggregation and associated microbial communities modify the impact of agricultural management on carbon content. *Environmental Microbiology*, 19(8), 3070–3086. doi: 10.1111/1462-2920.13779
35. Szoboszlai, M., Dohrmann, A. B., Poeplau, C., Don, A., & Tebbe, C. C. (2017). Impact of land-use change and soil organic carbon quality on microbial diversity in soils across Europe. *FEMS Microbiology Ecology*, 93(12). doi: 10.1093/femsec/fix146
36. Mo, L., Zanella, A., Bolzonella, C., Squartini, A., ..., Yeomans, A. J. (2022). Land use, microorganisms, and soil organic carbon: Putting the pieces together. *Diversity*, 14(8), 638. doi: 10.3390/d14080638
37. Cui, Y., Dong, Y., Liu, H., & Sun, Z. (2021). Short-term grazing exclusions reduced soil organic carbon but not bacterial diversity in the sagebrush desert, Northwest China. *Global Ecology and Conservation*, 31, e01872. doi: 10.1016/j.gecco.2021.e01872
38. Hosseini, M., Mohammadi, P., Ghadam, P., Saboor, A., Zarei, R., & Hojjati bonab, Z. (2021). The role of EPS-producing Cyanobacteria in Desert Soils. *Biological Journal of Microorganism*, 11(42), 51-66. doi: 10.22108/BJM.2021.129148.1397 [In Persian]
39. Behzadi Karimi, H., Mozaffari, G. A., Omidvar, K., & Mazidi, A. (2023). Analysis of climatic zones and the danger of desertification in Karun Basin under climate change conditions using UNEP index. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(2), 1-27. doi: 10.22067/geoh.2022.77881.1259 [In Persian]
40. Ramesh, T., Bolan, N. S., Kirkham, M. B., Wijesekara, H., Kanchikerimath, M., Rao, C. S., Sandeep, S., Rinklebe, J., Ok, Y. S., Choudhury, B. U., Wang, H., Tang, C., Wang, X., Song, Z., & Freeman II, O. W. (2019). Soil organic carbon dynamics: Impact of land use changes and management practices: A review. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in agronomy* (Vol. 156, pp. 1–107). Academic Press. doi: 10.1016/bs.agron.2019.02.001

41. Hu, X., Næss, J. S., Iordan, C. M., Huang, B., Zhao, W., & Cherubini, F. (2021). Recent global land cover dynamics and implications for soil erosion and carbon losses from deforestation. *Anthropocene*, 34, 100291. doi: 10.1016/j.ancene.2021.100291
42. Moradi, A., Sadeghipour, A., Nikoo, Sh., & Parvizi, Y. (2021). Effects of land use and soil characteristics on changes in soil organic carbon (Aase study: Ala area- Semnan). *Desert Management*, 16, 125-136. doi:10.22034/jdmal.2021.243144 [In Persian]
43. Chen, Y., Xi, H., & Cheng, W. (2025). Spatiotemporal dynamics of soil organic carbon in desert region and its response to climate change: A case study of Heihe river. *Ecological Indicators*, 170, 113005. doi: 10.1016/j.ecolind.2024.113005
44. Khosravi Mashizi, A., Sharafatmandrad, M., & Jahantab, E. (2025). Investigating the effect of removal and addition of litter on the facilitating role of shrub and grass species in semi-arid rangelands of kerman province using structural equation model, *Journal of Rangeland*, 18(4), 582-598. [In Persian]
45. Li, Y., Ajloon, F. H., Wang, X., Malghani, S., Yu, S., Ma, X., Li, Y., & Wang, W. (2023). Temporal effects of thinning on soil organic carbon and carbon cycling-related enzyme activities in oak-pine mixed forests. *Forest Ecology and Management*, 545, 121293. doi: 10.1016/j.foreco.2023.121293
46. Deng, J., Fang, S., Fang, X., Jin, Y., ..., Liu, C. (2023). Forest understory vegetation study: current status and future trends. *Forestry Research*, 3(6). doi: 10.48130/fr-2023-0006
47. Peplau, T., Poeplau, C., Gregorich, E., & Schroeder, J. (2023). Deforestation for agriculture leads to soil warming and enhanced litter decomposition in subarctic soils. *Biogeosciences*, 20(5), 1063–1074. doi: 10.5194/bg-20-1063-2023
48. Abdollahi garekand, J., sepehr, E., Feiziasl, V., Rasouli sadaghiani, M. H., & Samadi, A. (2019). The Effect of application of plant residues on improvement of chemical properties of calcareous, sodic and saline-sodic soils. *Applied Soil Research*, 7(3), 67-82. [In Persian]
49. Hosseini, A. S., Vali, A. A., Halabian, A. H., & Mokhtari, M. H. (2024). Assessment of the Desertification Intensity Based on soil, Vegetation, and Wind Erosion Criteria in the Northwest of Yazd, *Journal of Water and Soil Science*, 27(4), 169-186. doi: 10.47176/jwss.27.4.35472 [In Persian]
50. Li, X. G., Li, Y. K., Li, F. M., Ma, Q., Zhang, P. L., & Yin, P. (2009). Changes in soil organic carbon, nutrients and aggregation after conversion of native desert soil into irrigated arable land. *Soil and Tillage Research*, 104(2), 263–269. doi: 10.1016/j.still.2009.03.002
51. Bakhshande Larimi, S., Kazemi, H., Soltani, A., & Kamkar, B. (2023). Estimation of organic carbon content and its changes in soybean-wheat cropping rotation. *Applied soil Research*, 11(1), 1-15. doi: 10.30466/ASR.2023.121314 [In Persian]
52. Talebanfard, A. A., Akbari, M., & Azami rad, M. (2022). Sensitivity areas assessment of desertification using esas model and prioritizing management strategies (Case study: Kavir-e-Namak Basin, Khorasan Razavi Province). *Desert Management*, 10(2), 1-20. doi: 10.22034/jdmal.2022.549710.1377 [In Persian]
53. Asefjah, B., Esmaeilpour, Y., Bazrafshan, O., Keshtkar, A., & Zamani, H. (2022). Land degradation trend in the climatic types of Fars province using remote sensing and climatic variables. *Journal of Ecohydrology*, 9(4), 833-851. doi: 10.22059/ije.2023.353644.1707 [In Persian]
54. Ghasemi Aryan, Y., Azarnivand, H., Kiani Rad, A. B., Schafiee, S., & Farajollahi, A. (2020). Evaluation and comparison of management approaches (Ecological and Social-Ecological approaches) on soil fertility performance in Sarbisheh city. *Journal of Plant Ecosystem Conservation*, 8 (17), 325-340. [In Persian]
55. Sarbazi, M., Ownegh, M., Mohammadian Behbahani, A., & Akbari, M. (2020). Evaluating and modeling temporal-spatial changes of land use in the expansion of desertification intensity in the arid regions of northeast iran (Sarakhs). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 9(2), 1-18. doi:10.22067/geo.v9i2.8589 [In Persian]
56. Dashti, J., Nikoo, S., Rahimi, M., & Akbari, M. (2023). Quantitative assessment of desertification expansion using spatio-temporal variations of net primary production in arid regions of northeastern iran. *Desert Management*, 10(4), 39-54. doi: 10.22034/jdmal.2023.1982658.1403 [In Persian]
57. Eskandari Damaneh, H., Gholami, H., Mahdavi, R., Khorani, A., & Li, J. (2021). Monitoring land degradation and desertification in the arid and semi-arid regions with an emphasis in response to

- gross primary production relative to the climatic variables during the 2001-2017 in the province of Fars. *Watershed Management Research*, 34(1), 41-58. doi: 10.22092/wmej.2020.342030.1317 [In Persian]
58. Khosrobeigi Bozchelouie, R., & Najmi, M. (2017). Factors facilitating and inhibiting the participation of rural people in international carbon sequestration project (CSP) (Case Study: Galcheshme Project, Mahallat County, Markazi Province). *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 8(28), 1-24. [In Persian]
 59. Sayah, M., Sojasi Ghidari, H., & Shayan, H. (2024). Analysis the effects of international carbon sequestration project with the approach of sustainable rural development (Case study: Esfarayen city). *Geographical Engineering of Territory*, 8(2), 163-182. doi: 10.22034/jget.2023.319277.1376 [In Persian]
 60. Ahmadi, H., Heshmati, G., & Naseri, H. (2022). Soil carbon sequestration potential in desert lands affected two species of *Haloxylon aphyllum* and *Stipagrostis plumosa* (Aran-o-Bidgol, Iran). *Desert Ecosystem Engineering*, 3(5), 29-36. [In Persian]
 61. Farajollahi, A., Arami, S. A., & Ghasemi Aryan, Y. (2022). Evaluating the effects of desertification combating projects on the socio-economic conditions of local communities in Ahvaz. *Desert Ecosystem Engineering*, 11(34), 99-112. doi: 10.22052/deej.2021.11.34.51 [In Persian]
 62. Gholami, A., Sadoddin, A., Ownegh, M., Hosseinalizadeh, M., & Yari, A. (2020). Soil Erosion Reduction by Implementing a Carbon Sequestration Project in East of Iran, *Journal of Rangeland Science*, 10(1), 1-15. [In Persian]