



Climate-Scenario Impacts on Soil CO₂ Emissions across Four Afforestation Types and Their Understories in Meighan Desert

Bijan Azad¹ | Hossein Azarnivand² | Hamid Reza Naseri³ |
Gholam Reza Zehtabian⁴

1. Department of Rehabilitation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: bijanazad@ut.ac.ir
2. Department of Rehabilitation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: hazar@ut.ac.ir
3. Department of Management of Desert Regions, International Desert Research Center, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: hmaseri@ut.ac.ir
4. Department of Rehabilitation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: ghzehtab@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Oct. 5, 2025

Revised: Nov. 30, 2025

Accepted: Jan. 7, 2026

Published online: Feb. 2026

Keywords:

*Soil respiration flux,
Rothamsted model (RothC),
Meighan desert,
Climate change,
Soil organic carbon,*

ABSTRACT

Objective: The primary aim of this study was to calibrate and validate the Rothamsted Carbon model (RothC) and to simulate the effects of future climate scenarios on soil respiration flux from Tamarix, Haloxylon, Atriplex, and Nitraria trees and their understory rangelands in the Meighan Kavir. **Method:** Following RothC model validation, the impacts of a baseline scenario without climate change and three projected climate scenarios (RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5) were simulated across three periods (2025–2040, 2041–2060, and 2061–2080) to estimate soil respiration fluxes from the different vegetation covers. **Results:** Model validation demonstrated high accuracy of RothC in reproducing observed SOC data in the Meighan Kavir, with a model performance efficiency (EF) of 0.96. Compared to the baseline scenario, the highest soil respiration fluxes were predicted in 2025–2040 under RCP4.5 and RCP8.5 (up to a 36% increase), and in 2041–2060 under RCP2.6 (up to a 30% increase). Across all vegetation types, soil respiration fluxes exhibited a decreasing trend over time under all climate scenarios. After 2061, the decline slowed and approached a relatively stable state, though minor variations among vegetation types persisted. **Conclusions:** Considering the lower soil respiration fluxes from Nitraria trees and their understory rangelands, combined with the species' native status, Nitraria is recommended for cultivation and restoration in the Meighan Kavir to mitigate desertification.

Cite this article: Azad, B., Azarnivand, H., Naseri, H. R., & Zehtabian, G. R. (2026). Climate-Scenario Impacts on Soil CO₂ Emissions across Four Afforestation Types and Their Understories in Meighan Desert., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (12), 3393-3414. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.403683.670017>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.403683.670017>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Climate change exerts a profound influence on soil organic carbon (SOC) dynamics; however, substantial uncertainties remain regarding its long-term effects on soil respiration flux in desert ecosystems. Although numerous biological restoration and rehabilitation initiatives have been implemented in the desert regions of Iran—particularly in the Meighan Kavir—no previous study has systematically quantified or modeled SOC dynamics and soil respiration flux at the ecosystem scale. In this study, the RothC model was employed to simulate SOC turnover and associated soil respiration fluxes under projected climate change scenarios, providing a robust assessment of the potential effectiveness of these restoration efforts in mitigating carbon losses in desert ecosystems.

Materials and Methods

The study was conducted in the Meighan Kavir, located northeast of Arak County (34°09'N, 49°55'E) in central Iran. At a mean elevation of 1,670 m a.s.l., this region represents one of the higher desert terrains in Iran. This research provides one of the earliest systematic evaluations of soil respiration flux under Iranian desert conditions, with the specific objectives of: (i) assessing the performance of the RothC model in simulating SOC dynamics in the Meighan Kavir; and (ii) quantifying the effects of eight different biological restoration projects on soil respiration flux under both current (1980–2024) and projected future climate scenarios (2025–2080), including RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5, across three periods (2025–2040, 2041–2060, and 2061–2080). The afforestation projects included *Haloxylon*, *Tamarix*, *Atriplex*, and *Nitraria* trees, along with their understory vegetation, all established within a flat basin physiography. By integrating RothC simulations with observed field data, this study provides a robust assessment of how restoration strategies influence SOC dynamics and soil respiration fluxes under changing climate conditions in desert ecosystems.

Results

Statistical comparisons between the simulated and observed SOC data, including the coefficient of determination ($R^2 = 0.98$), Pearson correlation ($r = 0.99$), RMSE% (6.85), and model efficiency (0.96), indicated that the RothC model accurately reproduced the observed SOC stocks. Simulations over a 56-year period (2025–2080) predicted that soil respiration fluxes would range between 0.322 and 0.874 Mg C ha⁻¹ under future climate change scenarios. The magnitude of the flux differed among vegetation types in the following descending order: *Tamarix* trees > *Haloxylon* trees > *Atriplex* trees > *Atriplex* understory > *Haloxylon* understory > *Nitraria* trees > *Tamarix* understory > *Nitraria* understory.

The model outputs further revealed that the highest soil respiration fluxes occurred in 2025–2040 under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, and in 2041–2060 under the RCP2.6 scenario. Compared to the baseline scenario without climate change, soil respiration fluxes increased by 36% under RCP4.5 and RCP8.5 during 2025–2040, and by 30% under RCP2.6 during 2041–2060. The largest percentage changes were associated with tree vegetation, in descending order: *Atriplex* trees > *Haloxylon* trees > *Nitraria* trees > *Tamarix* trees, while understory vegetation showed nearly uniform flux changes.

Overall, soil respiration fluxes under all vegetation covers followed a decreasing trend over time, with a similar pattern across scenarios. After 2061, the rate of decline slowed substantially and reached a relatively stable state, although the near-constant flux still varied among vegetation types, following the same descending order as above.

Conclusion

Among tree vegetation covers, *Tamarix* trees exhibited the highest soil respiration fluxes, while *Nitraria* trees showed the lowest. For rangeland (understory) vegetation, the highest and lowest fluxes were observed for *Atriplex* and *Nitraria*, respectively. Considering its native status and minimal contribution to soil respiration flux, *Nitraria* is recommended as a suitable species for further cultivation and restoration efforts in the Meighan Kavir.

Overall, although soil respiration fluxes in the Meighan Kavir have increased due to climate change, projections indicate that with continued rises in temperature and further reductions in precipitation, fluxes are expected to gradually decline over time and eventually stabilize. This stabilization likely reflects the establishment of a new equilibrium in soil carbon pools, possibly due to humification processes and the inherent resistance of SOC to decomposition. Consequently, future research should focus on characterizing humus composition and dynamics in Meighan Kavir soils to better understand the long-term behavior of SOC under changing climatic conditions.

Highlights

We modeled SOC data with RothC model in eight vegetation covers
Soil CO₂ emissions were evaluated under present and climate change scenarios
Climate change increased soil CO₂ emissions by 2080
Soil CO₂ emissions decreased over time

Funding

This study was performed under the umbrella of financial support of the Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran.

Author Contributions

Conceptualization, Bijan Azad, Hossein Azarnivand, Hamid Reza Naseri, and Gholam Reza Zehtabian.; Methodology, Bijan Azad, Hossein Azarnivand, Hamid Reza Naseri, and Gholam Reza Zehtabian; Software, Bijan Azad.; Validation, Bijan Azad, Hossein Azarnivand, and Hamid Reza Naseri.; Formal analysis, Bijan Azad; Investigation, Bijan Azad, Hossein Azarnivand, Hamid Reza Naseri, and Gholam Reza Zehtabian; Writing—original draft preparation, Bijan Azad.; Writing—review and editing, Hossein Azarnivand, Hamid Reza Naseri, and Gholam Reza Zehtabian.; Visualization, Bijan Azad.; Supervision, Hossein Azarnivand.; project administration, Bijan Azad. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

Special thanks to Eng. M. Yazdanifar, Dr. S. Shamschiri, Eng. M. Akbari, Eng. M. Namdari, Mr. Khoshdoni, Eng. Rezaee, Eng. Abbas Nezhaz, Eng. Hashemi, for field samplings. We thank the anonymous reviewers for their comments and suggestions.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

All authors declare that they have no conflict of interest.

تأثیر سناریوهای اقلیمی بر انتشار CO₂ خاک در چهار نوع جنگل کاری و زیر آشکوب‌های آنها در کویر میقان

بیژن آزاد^۱ | حسین آذرینوند^۲ | حمیدرضا ناصری^۳ | غلامرضا زهتابیان^۴

^۱. گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: bijanazad@ut.ac.ir

^۲. نویسنده مسئول، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: hazar@ut.ac.ir

^۳. گروه مدیریت مناطق بیابانی، مرکز تحقیقات بین‌المللی بیابان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: hmaseri@ut.ac.ir

^۴. گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: ghzehtab@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۱۳	هدف اصلی این مطالعه، واسنجی و اعتبارسنجی مدل کربن روتامستد و شبیه‌سازی اثر سناریوهای تغییر اقلیم آینده بر جریان تنفس خاک از درختان گز، زردتاغ، آترپیلکس، قره‌داغ و مراتع زیر آشکوب آنها در کویر میقان بود. پس از اعتبارسنجی مدل روتامستد، اثر سناریو پایه بدون تغییر اقلیم و سه سناریوی پیش‌بینی شده اقلیمی (RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5) در سه بازه زمانی (۲۰۲۵-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۰) شبیه‌سازی شد تا جریان تنفس خاک در پوشش‌های گیاهی مختلف تخمین زده شود. اعتبارسنجی مدل نشان داد که روتامستد با دقت بالایی داده‌های SOC مشاهده‌شده در کویر میقان را بازتولید می‌کند و شاخص کارایی مدل برابر ۰/۹۶ بود. نسبت به سناریوی پایه، بالاترین میزان جریان تنفس خاک در بازه ۲۰۴۰-۲۰۶۰ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 (تا ۳۶٪ افزایش) و در بازه ۲۰۶۱-۲۰۸۰ تحت سناریوی RCP2.6 (تا ۳۰٪ افزایش) پیش‌بینی شد. در تمامی پوشش‌های گیاهی، جریان تنفس خاک روندی کاهشی در طول زمان داشت. پس از سال ۲۰۶۱، میزان کاهش کند شد و به تعادل نسبی رسید، اگرچه تغییرات جزئی بین انواع پوشش‌های گیاهی وجود دارد. با توجه به پایین بودن میزان جریان تنفس خاک درختان قره‌داغ و مراتع زیر آشکوبش و نیز بومی بودن این گونه، توصیه می‌شود قره‌داغ به عنوان گونه‌ای مناسب برای کشت و احیای پوشش گیاهی در کویر میقان جهت مقابله با بیابان‌زایی مورد استفاده قرار گیرد.
واژه‌های کلیدی: جریان تنفس خاک، مدل روتامستد، کویر میقان، تغییر اقلیم، کربن آلی خاک.	

استناد: آزاد، بیژن؛ آذرینوند، حسین؛ ناصری، حمیدرضا؛ و زهتابیان، غلامرضا (۱۴۰۴). تأثیر سناریوهای اقلیمی بر انتشار CO₂ خاک در چهار نوع جنگل کاری و زیر آشکوب‌های آنها در کویر میقان. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۱۲)، ۳۳۹۳-۳۴۱۴.



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.403683.670017>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.403683.670017>

مقدمه

خاک‌ها، بزرگ‌ترین ذخیره‌گاه کربن زمینی و دومین ذخیره‌گاه کربن کره زمین بعد از اقیانوس‌ها (IPCC, 2021) هستند که مهمترین جذب‌کننده ردپای کربن انسان‌ساخت به شمار می‌روند به طوری که حدود ۲۹ درصد از کل انتشار سالانه کربن انسان‌ساخت توسط اراضی جهان جذب می‌شود (Friedlingstein et al., 2019). بنابراین هر تغییر کوچک در کربن آلی خاک (SOC)، تأثیرات ژرف و عمیقی بر جریان خالص دی‌اکسید کربن (CO₂) جو و کاهش یا شدیدشدن تغییرات اقلیمی دارد (Smith et al., 2008). در مناطق خشک و بیابانی، ظرفیت ذخیره‌سازی SOC به‌طور مستقیم با پوشش گیاهی، ساختار خاک و الگوهای رطوبتی مرتبط است؛ مطالعات اخیر نشان می‌دهند که این نواحی به‌دلیل نوسان بالای بارش و حساسیت شدید به خشکی، نسبت به تغییر اقلیم واکنش‌های متفاوت و گاه شدیدی از خود نشان می‌دهند به طوری که هدرروی خالص SOC در برخی پهنه‌های خشک قابل توجه گزارش شده است (Díaz-Martínez et al., 2024) این شواهد از اهمیت تمرکز ویژه بر پوشش گیاهی و مدیریت در مطالعات مربوط به SOC در مناطق خشک حکایت دارد.

پوشش‌های گیاهی مختلف با مکانیسم‌های متفاوتی بر ورودی و خروجی کربن خاک و متعاقباً بر تنفس خاک و انتشار CO₂ از خاک اثر می‌گذارند (Willcock et al., 2016; Mishra et al., 2019). به طور کلی به دلیل تفاوت در ساختار و فنولوژی گیاهان و همچنین کمیت و کیفیت لاشبرگ؛ پوشش‌های گیاهی مختلف بر میزان تنفس خاک و انتشار CO₂ از خاک تأثیرات متفاوتی دارند (Pellikka et al., 2018; Azad et al., 2020). در مطالعه‌ای دیگر (Song et al., 2025) با بررسی انتشار CO₂ از خاک اکوسیستم‌های استپی چین نشان دادند که استپ‌های بیابانی ۵۰ تا ۹۰ درصد CO₂ کمتری نسبت به استپ‌های چمنزار منتشر می‌کنند که عمدتاً به دلیل تفاوت در کربن آلی خاک آن‌ها می‌باشد. برخی مطالعات میدانی در بیابان‌ها نشان داده‌اند که جایگزینی پوشش‌های گیاهی بومی با گونه‌های غیربومی یا تبدیل پوشش بومی به درختچه‌کاری، گاهی منجر به افزایش زیتوده گیاهی می‌شود اما هم‌زمان با تغییر در رطوبت و محرک‌های میکروبی ممکن است سرعت تجزیه ماده آلی خاک و انتشار CO₂ افزایش یابد یعنی ورودی بیشتر به معنای ذخیره خالص بیشتر نیست که این تناقض را ناشی از تغییر در کیفیت ورودی (لاشبرگ) و تغییرات رژیم رطوبتی خاک ناشی از تغییر الگوهای اقلیمی دانسته‌اند (Ren et al., 2024; Zhang et al., 2020). بررسی چندین سایت در بیابان‌ها نشان داده که شدت هدرروی SOC بیشتر به وضعیت رطوبتی و الگوهای بارش وابسته است به طوری که پالس‌های بارشی پس از دوره خشکی می‌توانند سرعت تجزیه را بالا ببرند و در نتیجه هدرروی سالانه SOC افزایش یابد (Fierer & Schimel, 2003; Shi et al., 2024). بنابراین لازم است اثرات اقلیمی در مطالعات هدرروی SOC در مناطق خشک و بیابانی تحلیل شوند.

مطالعات نشان داده‌اند که با وقوع تغییر اقلیم و تغییر الگوهای بارش و گرم شدن خاک‌ها، سرعت تجزیه لاشبرگ‌های گیاهی تشدید و هدرروی کربن از خاک به فرم CO₂ افزایش یافته و منجر به تشدید گرمایش جهانی می‌شود (Francaviglia et al., 2017; IPCC, 2021). بنابراین هر گونه مدل‌سازی که بخواهد تغییرات SOC و انتشار CO₂ در بیابان‌ها و مناطق خشک را پیش‌بینی کند، باید اثر تغییر اقلیم را لحاظ نماید. در زمینه مدل‌سازی، مدل RothC به دلیل سادگی و گستردگی کاربرد و قابلیت دسترسی آسان به داده‌های مورد نیاز جهت اجرای مدل (اکبری بزرچلویی و همکاران، ۱۴۰۴)، گزینه‌ای مناسب برای بررسی سناریوهای مدیریتی و اقلیمی بر تغییرات SOC و انتشار CO₂ است (Azad et al., 2020). هرچند که مطالعات اندکی به بررسی اثر تغییر اقلیم بر انتشار CO₂ از خاک در پوشش‌های گیاهی مناطق بیابانی پرداخته‌اند. در یک مطالعه در مقیاس جهانی (Jenkinson et al., 1991) با استفاده از مدل روتامستد اثرات تغییر اقلیم بر میزان انتشار CO₂ از خاک را در بیوم‌های مختلف سرتاسر جهان بوده بررسی نموده‌اند. در مطالعه‌ای جامع (Azad et al., 2020)، با ارائه یک شاخص جدید تحت عنوان اثر خالص تغییر اقلیم^۱ میزان انتشار CO₂ از خاک را در تیماری‌های درختکاری شده و تیمار مراتع طبیعی در مناطق نیمه‌خشک جنوب ایران بررسی نمودند و استدلال نمودند که با گذشت زمان در اثر تغییر اقلیم ابتدا مواد با قابلیت تجزیه راحت‌تر به طور کامل تجزیه می‌شوند و سپس جمعیت میکروبی و سرعت تجزیه کاهش خواهد یافت. در یک مطالعه دیگر (Gao et al., 2025) با مدل‌سازی ترسیب کربن خاک تحت سناریوهای اقلیمی آینده در فلات تبت نشان دادند که تحت سناریو RCP8.5، مناطق بیشتری SOC خود را از دست خواهند داد. هرچند که اجرای مدل RothC در خیلی از مناطق موفقیت‌آمیز بوده اما تجربیات اخیر

1. Sink
2. Anthropogenic
3. Soil Organic Carbon
4. Net effect of climate change



نشان می‌دهد که استفاده از پارامترهای پیش‌فرض مدل در مناطق خشک و بیابانی می‌تواند منجر به تخمین‌های نادرست هدرروی SOC و انتشار CO₂ از خاک شود و مطالعاتی که مدل RothC را با داده‌های میدانی واسنجی و تغییرات اقلیمی را لحاظ نموده بودند عملکرد بسیار بهتری در پیش‌بینی روندها داشتند (Afzali et al., 2019; Geremew et al., 2024). بنابراین در این مطالعه با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده SOC و الگوهای اقلیمی منطقه مدل RothC واسنجی و اعتبارسنجی شد تا برآوردی واقع‌گرایانه از اثر سناریوهای اقلیمی بر میزان انتشار CO₂ از خاک درختان گز (*Tamarix sp.*)، زردتاغ (*Haloxylon persicum*)، آتریپلکس (*Atriplex canescens*) و قره‌داغ (*Nitraria schoberi*) و مراتع زیرآشکوب آن‌ها، در حاشیه کویر میقان ارائه گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

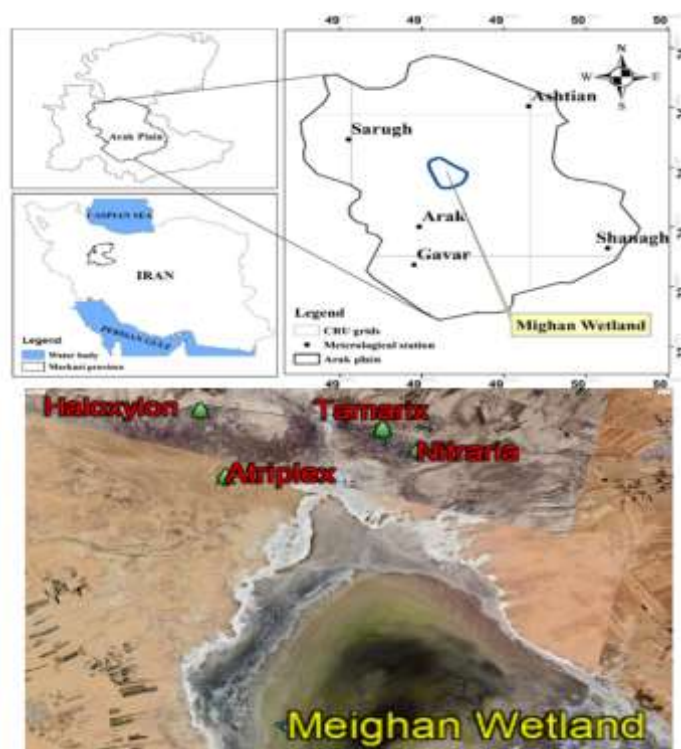
کویر میقان در ۱۵ کیلومتری شمال شرقی شهر اراک در موقعیت جغرافیایی طول ۴۶° ۴۹' تا ۵۵° ۴۹' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴° ۰۹' تا ۳۴° ۱۶' شمالی (شکل ۱) با وسعتی معادل ۵۴۸۱ کیلومتر مربع و با ارتفاع ۱۶۷۰ متر از سطح دریا مرتفع‌ترین کویر ایران است. میانگین بارش سالانه، میانگین دمای هوا سالانه و میانگین تبخیر سالانه بر مبنای داده‌های درازمدت ۴۵ ساله (۱۹۸۰-۲۰۲۴ میلادی) ایستگاه هواشناسی اراک (به عنوان نزدیکترین ایستگاه به کویر میقان) به ترتیب ۳۰۵ میلی‌متر، ۱۴ درجه سلسیوس و ۱۹۵۳ میلی‌متر و همچنین حداقل و حداکثر مطلق دمای هوا منفی ۳۸ و مثبت ۴۴ درجه سلسیوس می‌باشد. میانگین درازمدت سالانه دمای سطحی خاک ۴/۵ درجه سلسیوس بوده که بیشترین و کمترین دمای سطحی خاک به ترتیب با ۱۶/۴ و ۷/۲- درجه سلسیوس مربوط به ماه‌های جولای و ژانویه میلادی می‌باشد. اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان مرکزی جهت مقابله با بیابانزایی و جلوگیری از تخریب بیشتر ناشی از عوامل تخریب‌کننده طبیعی و انسان‌ساخت در کویر میقان از سال ۱۳۶۱ به طور پراکنده عملیات اجرایی انجام داده و مدتی هم متوقف گردیده ولی از سال ۱۳۷۰ به طور ضربتی در قالب کمربند سبز اقدام به کشت گونه‌های زردتاغ (*Haloxylon persicum*)، گز (*Tamarix sp.*)، آتریپلکس (*Atriplex canescens*) و قره‌داغ (*Nitraria schoberi*) و همچنین تهیه و اجرای طرح‌های مطالعاتی متعددی از جمله بذرپاشی در سطح بیش از ۲۰۰۰ هکتار، تولید ۳ میلیون اصله نهال، جمع‌آوری ۲۰ تن بذر از گونه‌های کشت شده، اجرای ۲۵۰۰ هکتار طرح پرورشی، نهال‌کاری در سطح ۸۵۰۰ هکتار و احداث بادشکن غیر زنده متراکم در سطح ۸۵ هکتار در منطقه نموده است. همچنین از سال ۱۳۹۹ به بعد اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان مرکزی جهت مدیریت و موفقیت بیشتر پروژه‌های سنواتی اقدام به کاشت ۱۵ هکتار آگروپایرون، اجرای آتش‌بر به طول ۱۴ کیلومتر، آبیاری بیش از ۱۰۰۰ هکتار نهال‌کاری‌های سنواتی در ۴ نوبت در هر سال، اجرای پروژه هرس و جوان‌سازی بوته‌های آتریپلکس در سطح ۶۰۰ هکتار و نصب بقایای آن به عنوان بادشکن به طول ۴۰۰۰ متر، اجرای ۲۵۰ هکتار نهال‌کاری با گونه‌های مختلف به ویژه در جنوب کویر میقان و نیز اجرای حفاظت و قرق در کل سطح کویر میقان به صورت شبانه‌روزی نموده است.

روش نمونه‌برداری میدانی و آزمایشگاهی

جهت نمونه‌برداری خاک از چهار تیپ گیاهی دست کاشت شامل زردتاغ (*Haloxylon persicum*)، گز (*Tamarix sp.*)، آتریپلکس (*Atriplex canescens*) و قره‌داغ (*Nitraria schoberi*) از روش پلات‌های تودرتو استفاده شد که هر پلات تودرتو شامل یک پلات ۱۰ × ۱۰ متر و یک پلات ۵ × ۵ متر بود (شکل ۲). در هر تیپ گیاهی تعداد ۱۰ پلات تودرتو به گونه‌ای استقرار یافت که ناهمگنی فضایی تیپ را پوشش دهد. نمونه‌برداری در پلات ۱۰ × ۱۰ متر از خاک نزدیک تنه درختان (زیر تاج پوشش) و در پلات ۵ × ۵ متر (خارج از تاج پوشش) از چهار گوشه و مرکز پلات انجام شد (Ponce-Hernandez et al., 2004). از آنجایی که دینامیک ماده آلی خاک عمدتاً در لایه فعال خاک (عمق ۰- تا ۲۰ سانتی‌متر) رخ می‌دهد و در مدل‌های ماده آلی نباید عمقی بیش از ۳۰ سانتی‌متر شبیه‌سازی شود (Wilson et al., 2009) لذا در این مطالعه نمونه‌برداری از عمق ۲۰ سانتی‌متر بالایی خاک انجام شد. برای کاهش خطا و تغییرپذیری مکانی، نمونه‌های هر پلات به صورت ترکیبی مخلوط گردیدند و نیز با هدف فراهم‌سازی داده‌های موردنیاز برای مدل‌سازی کربن خاک، نمونه‌برداری در دو مرحله انجام شد.

مرحله اول: آذر ۱۴۰۲ (دسامبر ۲۰۲۳) شامل ۷۷ و ۱۱۵ نمونه جداگانه، متناظر با ۲۳ و ۲۳ نمونه ترکیبی در پلات‌های ۱۰ × ۱۰ و ۵ × ۵ متر.

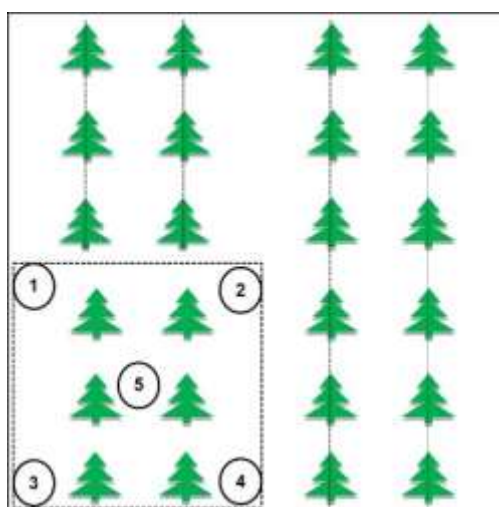
مرحله دوم: خرداد ۱۴۰۳ (ژوئن ۲۰۲۴) شامل ۴۷ و ۸۵ نمونه جداگانه، متناظر با ۱۷ و ۱۷ نمونه ترکیبی در پلات‌های ۱۰×۱۰ و ۵×۵ متر.



شکل ۱. نقشه موقعیت کویر میقان در شهرستان اراک، استان مرکزی و ایران.

در مجموع ۳۲۴ نمونه خاک جداگانه (۸۰ نمونه ترکیبی) برداشت شد. همچنین برای تعیین وزن مخصوص ظاهری، در کنار هر گودال دو نمونه استوانه‌ای برداشت شد (جمعاً ۶۴۸ نمونه). نمونه‌ها پس از هواخشک شدن، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و سپس بافت خاک (روش هیدرومتر)، درصد SOC (روش والکلی و بلاک) و وزن مخصوص ظاهری (روش سیلندر) اندازه‌گیری شد. در نهایت، موجودی کربن آلی خاک (SOC Stock) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$SOC\ Stock\ (Mg\ h^{-1}) = OC(\%) \times Soil\ Depth(cm) \times B \cdot d\ (Mg\ m^{-3}) \quad \text{رابطه ۱}$$



شکل ۲. الگوی نمونه‌برداری خاک، پلات ۱۰×۱۰ و پلات ۵×۵ جهت نمونه‌برداری از خاک زیر تاج پوشش و خاک خارج از تاج پوشش درختان.



مدل روتامستد

در این پژوهش برای شبیه‌سازی پویایی کربن آلی خاک از مدل RothC نسخه ۲۶,۳ استفاده شد. این مدل با گام زمانی ماهانه و بر پایه داده‌های خاک، پوشش گیاهی و شرایط حرارتی - رطوبتی، چرخه SOC را در قالب مخازن فعال و غیرفعال ارزیابی می‌کند (Coleman & Jenkinson, 2008).

پارامتریابی و واسنجی مدل

پارامتریابی و واسنجی مدل روتامستد با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در این پژوهش با وارد کردن اطلاعات اقلیم، مدیریت اراضی، خاک و پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه انجام شد. میانگین بلندمدت ماهیانه پارامترهای بارش، دما و تبخیر از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک شهرستان اراک به دست آمد (میانگین ۴۵ ساله). پارامترهای مربوط به سایت، شامل اطلاعات خاکشناسی، پوشش گیاهی و مدیریت اراضی با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و میدانی طی این پژوهش محاسبه شدند (جدول ۱). فاکتور نسبت مخزن DPM به RPM که به فاکتور کیفیت بقایای گیاهی یا سرعت تجزیه‌پذیری لاشبرگ گیاهی نیز معروف است برای درختان گز، تاغ، قره‌داغ و آتریپلکس میزان ۰/۲۵ و برای مراتع زیرآشکوب گز، مراتع زیرآشکوب تاغ، مراتع زیرآشکوب قره‌داغ و مراتع زیرآشکوب آتریپلکس به میزان ۰/۶۷ (جدول ۱) انتخاب شد (Coleman & Jenkinson, 2008; Shirato & Yokozawa, 2006). همچنین مقدار ماده آلی پایدار بر مبنای معادله (۲) محاسبه شد (Falloon et al., 1998)؛ که در این رابطه، متغیرهای TOC و IOM به ترتیب کل کربن آلی خاک و ماده آلی پایدار خاک است.

$$IOM = 0.049 TOC^{1.139}$$

رابطه ۲)

جدول ۱. داده‌های خاک و پوشش گیاهی در پوشش‌های گیاهی کویر میقان (میانگین داده‌ها در آذرماه ۱۴۰۲).

پوشش گیاهی	رس (%)	شوری خاک (دسی‌زیمنس بر سانتی متر)	pH	فاکتور کیفیت بقایا	ماده آلی پایدار (تن بر هکتار)
تاغ	۱۵/۵	۳/۵۷	۷/۶۶	۰/۲۵	۱/۸۰۰۳
مراتع زیر آشکوب تاغ	۱۵/۲۵	۳/۵۹	۷/۹۱	۰/۶۷	۱/۱۵۶۴
آتریپلکس	۲۵/۳۲	۳/۲۵	۷/۸۰	۰/۲۵	۱/۷۳۳۴
مراتع زیر آشکوب آتریپلکس	۲۶/۲۰	۳/۰۸	۷/۷۴	۰/۶۷	۱/۳۱۷۲
قره‌داغ	۱۳/۴۵	۳/۱۹	۷/۴۰	۰/۲۵	۰/۸۰۴۷
مراتع زیر آشکوب قره‌داغ	۱۳/۵۱	۳/۰۳	۷/۰۷	۰/۶۷	۰/۶۲۵۴
گز	۱۲/۳۰	۴/۰۴	۷/۵۶	۰/۲۵	۰/۷۴۸۶
مراتع زیر آشکوب گز	۱۵/۵۳	۲/۸۹	۷/۶۶	۰/۶۷	۰/۷۳۹۸

نکته حائز اهمیت در واسنجی مدل‌های ماده آلی خاک، رسیدن به میزان SOC در مخازن مختلف می‌باشد که با توجه به آزمایش‌های پرهزینه و تخصصی معمولاً مدل‌های ماده آلی خاک در یک دوره تعادل^۱ اجرا می‌شوند تا میزان SOC در مخازن مختلف به دست آید (Coleman & Jenkinson, 2008). داده‌های مخازن کربن خاک معمولاً به صورت مستقیم وارد مدل‌های کربن نمی‌شوند و از شبیه‌سازی یک دوره تعادل چندین هزار ساله (۷۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ سال) به‌دست می‌آیند. در واقع با معرفی کردن ویژگی‌های منطقه (پوشش گیاهی، خصوصیات خاک، مدیریت زمین و اقلیم) به مدل روتامستد، مدل مخازن کربن خاک را طی دوره تعادل به طوری رشد می‌دهد که به میزان موجودی SOC در سال پایانی برسد (در اینجا منظور میزان موجودی SOC در سال واسنجی یعنی آذر ماه سال ۱۴۰۲ است). دوره تعادل یک شاخص برای ارزیابی اثرات اقدامات مدیریتی و اقلیمی بر موجودی SOC ایجاد می‌کند، و از آنجایی که برای واسنجی مدل کربن روتامستد حداقل به یک اندازه‌گیری موجودی SOC نیاز است لذا دوره تعادل بر مبنای موجودی SOC در آذر ماه سال ۱۴۰۲، شرایط اقلیمی کویر میقان، میزان رس، مقدار ماده آلی پایدار در عمق ۲۰ سانتی‌متری خاک، میزان فاکتور کیفیت بقایای گیاهی (DPM/RPM)، کل کربن آلی اولیه خاک^۲، میزان کربن ورودی به خاک از طریق لاشبرگ‌های گیاهی پوشش‌های مختلف گیاهی کویر میقان اجرا شد (جدول ۱). لذا در این مطالعه مدل تا رسیدن به شرایط تعادل (steady-state) چندین بار اجرا شد و فایل‌های خروجی مدل در تمام

1. Parameterization
2. Inert Organic Matter (IOM)
3. Equilibrium
4. Initial total SOC

پوشش‌های گیاهی بعد از هر بار اجرا بررسی شده و کربن ورودی گیاهی مکرراً تصحیح شد تا میزان موجودی SOC اندازه‌گیری شده با مقدار موجودی SOC شبیه‌سازی شده در پوشش‌های گیاهی کویر میقان در آذر ماه سال ۱۴۰۲ برابر گردد (Coleman & Jenkinson, 2008). لازم به ذکر است تعداد ۱۹۲ نمونه خاک جداگانه شامل ۴۶ نمونه ترکیبی در آذر ماه سال ۱۴۰۲ در عملیات واسنجی مدل کربن روتامستد در پوشش‌های گیاهی کویر میقان شرکت داشتند.

اعتبارسنجی مدل

میزان موجودی SOC شبیه‌سازی شده توسط مدل روتامستد با داده‌های موجودی SOC اندازه‌گیری شده در خرداد ماه ۱۴۰۳ (ژوئن ۲۰۲۴ - تعداد ۱۳۲ نمونه خاک جداگانه که شامل ۳۴ نمونه خاک ترکیبی در عملیات اعتبارسنجی شرکت داده شدند) در پوشش‌های گیاهی کویر میقان؛ جهت تعیین اعتبار مدل روتامستد با یکدیگر مقایسه شدند. آزمون‌ها و شاخص‌های بکارگرفته شده جهت اعتبارسنجی مدل روتامستد در پوشش‌های گیاهی کویر میقان شامل شاخص کارایی اجرای مدل (PE)، ضریب تبیین (R^2)، میانگین خطا (ME)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، ضریب همبستگی (r)، درصد میانگین مربعات خطا (RMSE%)، $RMSE_{0.05}$ و آزمون t استیودنت نمونه‌های مستقل بودند. کمترین ارزش شاخص‌های RMSE، MAE و ME که برای کمی‌سازی عدم قطعیت مدل‌ها استفاده می‌شوند، صفر هست که نشان‌دهنده عدم تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی شده می‌باشد. همچنین چنانچه ارزش RMSE کمتر از $RMSE_{0.05}$ باشد از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد نشان‌دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌داری بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است. حداکثر مقدار شاخص PE نیز برابر با یک بوده و هرچه این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد به معنای حداکثر برازش است. در ارتباط با آزمون t ، هرگاه t محاسبه شده کمتر از t جدول باشد به معنای برازش کامل داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده و عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین آن‌ها می‌باشد. محدوده برازش کامل شاخص‌های اعتبارسنجی یا به عبارتی میزان ارزشی از آن‌ها که بهترین حالت شاخص‌های اعتبارسنجی را بیان می‌نماید در جدول (۳) ارائه شده است. در معادلات شماره (۳ تا ۸) O_i و m_i به ترتیب مقادیر موجودی SOC اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی شده هستند. همچنین $\bar{O}$ و n به ترتیب میانگین ارزش‌های اندازه‌گیری شده و تعداد مشاهدات می‌باشد.

$$PE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - m_i)}{n} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - O_i) / n}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - O_i)^2 - \left(\left[\sum_{i=1}^n (m_i - O_i) \right]^2 / n \right)}{(n-1)(n)}}} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$RMSE_{0.05} = \frac{100}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SE_i - t_{m0.95})^2}{n}} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$\%RMSE = \frac{100}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - m_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - m_i|}{n} \quad \text{رابطه ۸}$$

سناریوهای تغییر اقلیم

در مطالعه حاضر سناریوهای اقلیمی با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های خروجی مدل CanESM2 در مدل SDSM پایه‌ریزی گردیدند

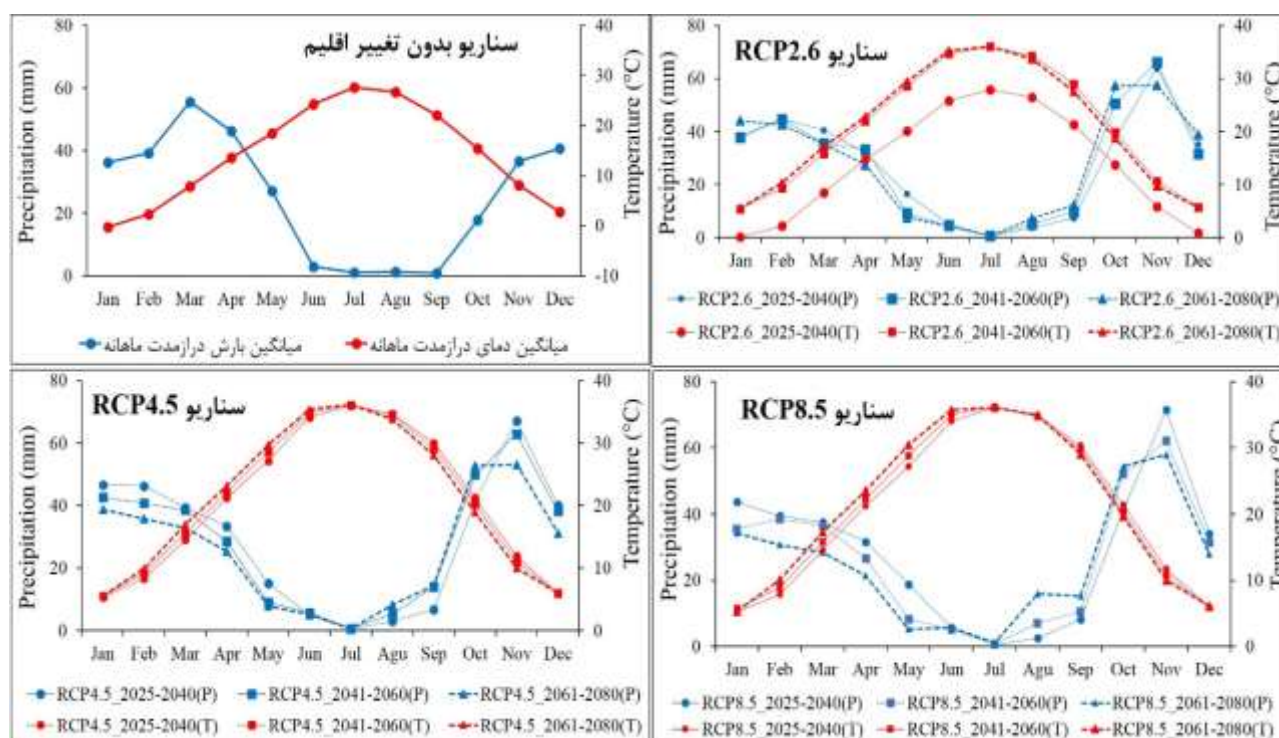
1 Performance efficiency

2 Mean Error

3 Mean Absolute Error

4 Uncertainty

و با استفاده از خروجی این مدل تغییرات اقلیمی ایستگاه هواشناسی اراک (به عنوان نزدیکترین ایستگاه به کویر میقان و دارا بودن آرشیو کاملی از داده‌های روزانه بلندمدت) با استفاده از سناریوهای جدید RCP شامل سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 و سناریو بدون تغییر اقلیم (میانگین بلندمدت عناصر اقلیمی طی دوره ۴۵ ساله ۲۰۲۴ - ۱۹۸۰) برای سه دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۰-۲۰۸۰ پیش‌بینی گردید. نسبت به میانگین درازمدت منطقه در سه دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۰-۲۰۸۰ درصد تغییرات دما و بارش برای سناریو RCP2.6 به ترتیب $-۰/۸۱$ ، $+۴۸/۹۶$ ، $+۴۹/۲۲$ و $+۶/۶۱$ ، $+۷/۶۴$ ، $+۹/۷۶$ ؛ برای سناریو RCP4.5 به ترتیب $+۴۸/۲۶$ ، $+۴۹/۶۶$ ، $+۵۰/۱۷$ و $+۱۲/۹۶$ ، $+۱۰/۰۵$ ، $+۰/۱۷$ ؛ برای سناریو RCP8.5 به ترتیب $+۴۸/۳۶$ ، $+۵۰/۴۵$ ، $+۵۲/۸۲$ و $+۹/۵۷$ ؛ $+۲/۹۲$ ، $-۲/۳۲$ خواهد بود و در شکل (۳) تغییرات دما و بارش در سناریوهای مختلف نشان داده شده است. در نهایت با استفاده از مدل روتامستد، اثر سناریوهای اقلیمی بر انتشار CO_2 از خاک در پوشش‌های گیاهی کویر میقان شبیه‌سازی گردید.



شکل ۳. تغییرات ماهیانه بارش (P) و دمای هوا (T) در سناریوهای مختلف طی سه دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰، ۲۰۶۰-۲۰۸۰، ۲۰۶۱-۲۰۸۰.

نتایج

واسنجی مدل

نتایج واسنجی مدل بر مبنای داده‌های اندازه‌گیری‌شده طی این پژوهش نشان داد که در درختان تاغ، مراتع زیرآشکوب تاغ، درختان آتریپلکس، مراتع زیرآشکوب آتریپلکس، درختان قره‌داغ، مراتع زیرآشکوب قره‌داغ، درختان گز و مراتع زیر آشکوب گز به ترتیب میزان برگشت لاشبرگ به خاک نیاز بود تا موجودی SOC مدل‌سازی‌شده توسط مدل روتامستد به میزان موجودی SOC اندازه‌گیری‌شده در آذر ماه ۱۴۰۲ برسد (جدول ۲). نتایج واسنجی نشان‌دهنده ناچیز بودن درصد تغییرات بین موجودی SOC شبیه‌سازی‌شده با موجودی SOC اندازه‌گیری‌شده بود (جدول ۲) که بیانگر انطباق بسیار مناسب شبیه‌سازی‌های مدل با اندازه‌گیری میدانی موجودی SOC در آذر ماه ۱۴۰۲ می‌باشد. از آنجایی که از شروط مهم جهت دقت بیش‌تر پیش‌بینی‌های مدل RothC در مناطق خشک و بیابانی، واسنجی مدل با داده‌های میدانی است (Afzali et al., 2019; Geremew et al., 2024) و نتایج واسنجی این مطالعه بر مبنای داده‌های میدانی حاکی از دقت بالای واسنجی مدل RothC در کویر میقان می‌باشد (جدول ۲) بنابراین با حفظ شرایط تعادل، خروجی مخازن کربن در مرحله واسنجی را استخراج و سایر فایل‌ها برای شبیه‌سازی اثرات سناریوهای مختلف اقلیمی در پوشش‌های گیاهی کویر میقان ایجاد گردیدند.

جدول ۲. کربن ورودی خاک از طریق لاشبرگ گیاهی، موجودی SOC شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در پوشش‌های گیاهی کویر میقان (میانگین داده‌ها در آذرماه ۱۴۰۲).

درصد تغییرات ^ب	موجودی SOC شبیه‌سازی شده (مگاگرم در هکتار) ^{الف}	موجودی SOC اندازه‌گیری شده (مگاگرم در هکتار)	میزان کربن ورودی به خاک از طریق لاشبرگ گیاهی (تن کربن در هکتار)	پوشش گیاهی
+۰/۰۰۴	۲۳/۶۶۷	۲۳/۶۶۶	۰/۶۶۵۸	تاغ
-۰/۰۰۶	۱۶/۰۴۵	۱۶/۰۴۶	۰/۴۷۱۴	مراوع زیر اشکوب تاغ
.	۲۲/۸۹۲	۲۲/۸۹۲	۰/۵۹۱۴	آتریپلکس
-۰/۰۰۵	۱۷/۹۸۸	۱۷/۹۸۹	۰/۵۱۵۹	مراوع زیر اشکوب آتریپلکس
+۰/۰۱۷	۱۱/۶۷۳	۱۱/۶۷۱	۰/۳۳۹۴	قره‌داغ
-۰/۰۱۰	۹/۳۵۳	۹/۳۵۴	۰/۲۸۵۰	مراوع زیر اشکوب قره‌داغ
-۰/۰۰۳	۲۵/۶۲۲	۲۵/۶۲۳	۰/۷۴۸۹	گز
+۰/۰۰۹	۱۰/۷۱۲	۱۰/۷۱۱	۰/۳۲۵۳	مراوع زیر اشکوب گز

الف) اجرای مدل در شرایط Equilibrium در حالت Inverse mode

ب) درصد تغییرات برابر است با {اندازه‌گیری شده/ (اندازه‌گیری شده - شبیه‌سازی شده) × ۱۰۰}

اعتبارسنجی مدل

یکی از شروط بکارگیری مدل‌ها، R^2 بیش از ۰.۶۰ می‌باشد لذا R^2 محاسبه شده مدل روتامستد در هشت پوشش گیاهی مورد مطالعه ($R^2 = 0.98$) بیانگر اختلاف اندک میان موجودی SOC شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در کویر میقان است (جدول ۳). ضریب همبستگی پیرسون با ارزش ۰/۹۹ بیانگر دقت بالای مدل روتامستد در کویر میقان می‌باشد (جدول ۳). قابل ذکر است که مدل روتامستد با توجه به اینکه بر مبنای میانگین داده‌ها طرح‌ریزی شده لذا تنها میانگین هر پوشش گیاهی در بخش اعتبارسنجی استفاده شده است. همچنین درصد میانگین مربعات خطا (RMSE) با ارزش ۶/۸۵ نشان‌دهنده تفاوت بسیار ناچیز بین موجودی SOC شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در پوشش‌های گیاهی کویر میقان می‌باشد (جدول ۳). همچنین $RMSE_{0.05}$ با ارزش ۳۴/۴۳ از میزان RMSE در پوشش‌های گیاهی کویر میقان بیشتر بود (جدول ۳) که از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد نشان‌دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌داری بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است (Smith et al., 1996). میزان شاخص میانگین خطا (ME) در مدل RothC، ۰/۸- (مگاگرم در هکتار) بود که نشان‌دهنده این است که مدل روتامستد به میزان بسیار ناچیزی موجودی SOC را به میزان ۴/۹۱ درصد در پوشش‌های گیاهی کویر میقان بیشتر برآورد نموده است (جدول ۳). به طور کلی مدل RothC بر مبنای مقادیر عددی به دست آمده برای شاخص‌های به کاررفته جهت ارزیابی عدم قطعیت یعنی RMSE، MAE و ME (جدول ۳) خطای کل بسیار پایینی در شبیه‌سازی موجودی SOC در هشت پوشش گیاهی کویر میقان داشته است و میزان عدم قطعیت نیز با ارزش ۱/۱۲۶ (معادل ۶/۸۵ درصد خطا) با توجه به مقیاس داده‌های اندازه‌گیری ($Mg\ ha^{-1}$)، معقول و قابل قبول است.

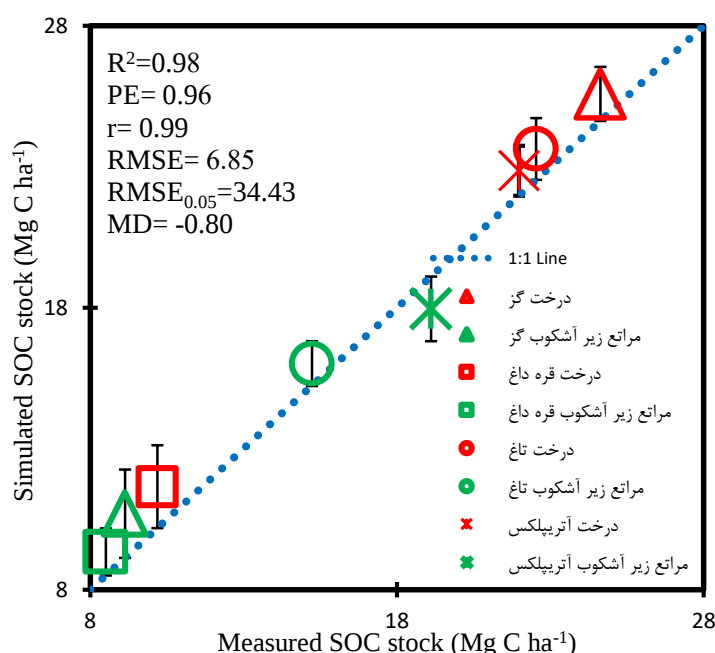
شاخص کارایی مدل (PE) که نسبت به میانگین داده‌های مشاهده شده سنجیده می‌شود و هرگاه در محدوده $1 \leq EF \leq 0.75$ باشد نشان‌دهنده عملکرد عالی و دقیق مدل می‌باشد که در این پژوهش شاخص PE با ارزش عددی ۰/۹۶ نشان‌دهنده کارایی بالای مدل در برآورد موجودی SOC در کویر میقان است (جدول ۳). آزمون t استیودنت با ارزش عددی ۰/۲۵۰۶ که کمتر از ارزش عددی t در جدول مربوطه ($t\text{-Table} = 2.1447$) بود نشان داد که تفاوت معنی‌داری ($p < 0.05$) بین موجودی SOC شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در پوشش‌های گیاهی کویر میقان وجود ندارد (جدول ۳). همچنین شکل (۴) نشان می‌دهد که مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده موجودی SOC در پوشش‌های گیاهی کویر میقان در نزدیکی خط ۱:۱ پراکنش دارند که حاکی از توانایی بالای مدل روتامستد در پیش‌بینی دقیق موجودی SOC در کویر میقان است (شکل ۴). بنابراین می‌توان ادعا نمود که نتایج اعتبارسنجی مدل روتامستد در هشت پوشش گیاهی کویر میقان نشان‌دهنده دقت بالای این مدل در برآورد موجودی SOC بوده است لذا مدل می‌تواند برای شبیه‌سازی سایر مخازن کربن خاک و نیز انتشار CO₂ از خاک در پوشش‌های گیاهی کویر میقان استفاده شود که با نتایج سایر محققین مطابقت دارد (Lai et al., 2016; Azad et al., 2020).



جدول ۳. شاخص‌های آماری مربوط به اعتبارسنجی مدل RothC در کویر میقان.

تست‌های آماری	RothC	برآزش کامل ^۱
R^2	۰/۹۸	۱
r	۰/۹۹	۱
RMSE	۶/۸۵	.
$RMSE_{0.05}$	۳۴/۴۳	$RMSE < RMSE_{0.05}$
MAE	۱/۰۹	.
ME	۰-/۸۰	.
$t_{\text{محاسبه‌شده}}$	۰/۲۵۰۶	$t_{\text{جدول}} < t_{\text{محاسبه‌شده}}$
$t_{\text{جدول}}$	۲/۱۴۴۷	

^a بیانگر بهترین حالت در اعتبارسنجی مدل‌ها می‌باشد.



شکل ۴. موجودی SOC اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در مقایسه با خط یک به یک در پوشش‌های گیاهی کویر میقان. خط‌های عمودی نشان‌دهنده تفاوت بین ارزش‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده است.

اثر سناریوهای اقلیمی آینده بر میزان انتشار سالانه دی‌اکسیدکربن از خاک در دوره ۲۰۲۵ تا ۲۰۸۰

بر مبنای نتایج ANOVA پوشش گیاهی و سناریوهای اقلیمی به طور معنی‌داری تغییرات سالانه انتشار دی‌اکسید کربن از خاک (جدول ۴) را توضیح داده‌اند ($P < 0.0001$). اثر متقابل پوشش‌های گیاهی در سناریوهای اقلیمی بر میزان تغییرات سالانه انتشار CO_2 از خاک نیز معنی‌دار بود (جدول ۴). خروجی مدل روتامستد طی مدت ۵۶ سال (۲۰۲۵ - ۲۰۸۰) نشان داد که میانگین انتشار سالانه CO_2 از خاک در سناریو بدون تغییر اقلیم از ۰/۲۸۴ تا ۰/۷۴۷، در سناریو RCP2.6 از ۰/۳۲۲ تا ۰/۸۵۷، در سناریو RCP4.5 از ۰/۳۲۶ تا ۰/۸۷۰ و در سناریو RCP8.5 از ۰/۳۲۸ تا ۰/۸۷۴ مگاگرم کربن در هکتار متفاوت است (جدول ۵) و در تمامی سناریوهای اقلیمی میانگین انتشار سالانه CO_2 از خاک در طی ۵۶ سال به ترتیب کاهشی شامل درختان گز < درختان تاغ < درختان آتریپلکس < مراعات زیر آشکوب گز < مراعات زیر آشکوب قره‌داغ بودند (جدول ۵).

همچنین در مقایسه با سناریو بدون تغییر اقلیم، درصد تغییرات انتشار سالانه CO_2 از خاک در سناریو RCP2.6 از ۱۳/۲۷٪ تا ۱۵/۵۹٪، در سناریو RCP4.5 از ۱۴/۷۸٪ تا ۱۷/۴۵٪ و در سناریو RCP8.5 از ۱۵/۴۳٪ تا ۱۷/۹۶٪ متفاوت بود. مطالعات نشان داده‌اند که تحت سناریوهای اقلیمی RCP8.5 میزان هدررفت SOC در فلات تبت چین نسبت به سایر سناریوهای اقلیمی آینده بیشتر خواهد بود (Gao et al., 2025). درصد تغییرات انتشار سالانه CO_2 نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم در دوره ۲۰۲۵ تا ۲۰۸۰ در سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب کاهشی شامل درختان آتریپلکس < درختان تاغ < درختان قره‌داغ < درختان گز < مراعات زیر آشکوب آتریپلکس <

مراتع زیر آشکوب تاغ < مراتع زیر آشکوب قره‌داغ < مراتع زیر آشکوب گز و در سناریو RCP4.5 به ترتیب کاهش شامل درختان آتریپلکس < درختان تاغ < درختان گز < درختان قره‌داغ = مراتع زیر آشکوب آتریپلکس < مراتع زیر آشکوب تاغ < مراتع زیر آشکوب گز < مراتع زیر آشکوب قره‌داغ بودند. به طور کلی نتایج شبیه‌سازی مدل روتامستد نشان داد که انتشار سالانه CO₂ از خاک در هشت پوشش گیاهی کویر میقان تحت همه سناریوهای اقلیمی نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) افزایش یافته است (جدول ۵). مطالعات نیز نشان داده‌اند که در دهه‌های آینده به علت وقوع تغییر اقلیم، سرعت تجزیه مواد آلی خاک ناشی از افزایش دما، بیشتر شده لذا سرعت معدنی شدن مواد آلی خاک افزایش و در نهایت میزان هدرروی کربن خاک به صورت CO₂ از خاک افزایش می‌یابد (Fierer & Schimel, 2003; Smith et al., 2008). در یک مطالعه جامع Shi et al. (۲۰۲۴) بیان داشتند که خشکی ناشی از تغییر اقلیم یک تنظیم‌کننده کلیدی برای پاسخ SOC به تغییر اقلیم است و در مناطقی که تغییر اقلیم رخ داده میزان هدررفت SOC نیز افزایش یافته است که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد.

جدول ۴. تحلیل واریانس انتشار سالانه CO₂ تحت تأثیر سناریوهای اقلیمی در پوشش‌های گیاهی کویر میقان.

معنی‌داری	F	درجه آزادی	ANOVA
< ۰/۰۰۰۱	۲۰۵۷/۸۷۵۱۶۴	۷	پوشش‌های گیاهی (V)
< ۰/۰۰۰۱	۱۷۱/۰۴۷۶۰۶۱	۳	سناریوهای اقلیمی (C)
< ۰/۰۰۰۱	۳/۱۰۰۶۸۷۷۰۵	۲۱	اثر متقابل V × C

جدول ۵- اثرات سناریوهای تغییر اقلیم بر میزان انتشار سالانه CO₂ (مگاگرم در هکتار) در تیمارهای مختلف از سال ۲۰۲۵ تا ۲۰۸۰ در کویر میقان.

مراتع زیر آشکوب گز	گز	مراتع زیر آشکوب قره‌داغ	قره‌داغ	مراتع زیر آشکوب آتریپلکس	آتریپلکس	مراتع زیر آشکوب تاغ	تاغ	
۰/۳۲۴	۰/۷۴۷	۰/۲۸۴	۰/۳۳۸	۰/۵۱۴	۰/۵۹۰	۰/۴۷۰	۰/۶۶۴	سناریو بدون تغییر اقلیم
۰/۳۶۷	۰/۸۵۷	۰/۳۲۲	۰/۳۳۸	۰/۵۸۴	۰/۶۸۲	۰/۵۳۳	۰/۷۶۳	RCP2.6
۱۳/۲۷	۱۴/۷۲	۱۳/۳۸	۱۴/۷۹	۱۳/۶۱	۱۵/۵۹	۱۳/۴۰	۱۴/۹۰	درصد تغییرات نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم الف
۰/۳۷۳	۰/۸۷۰	۰/۳۲۶	۰/۳۹۴	۰/۵۹۴	۰/۶۹۳	۰/۵۴۲	۰/۷۷۵	RCP4.5
۱۵/۱۲	۱۶/۴۶	۱۴/۷۸	۱۵/۵۶	۱۵/۵۶	۱۷/۴۵	۱۵/۳۱	۱۶/۷۱	درصد تغییرات نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم
۰/۳۷۴	۰/۸۷۴	۰/۳۲۸	۰/۳۹۶	۰/۵۹۶	۰/۶۹۶	۰/۵۴۴	۰/۷۷۹	RCP8.5
۱۵/۴۳	۱۷/۰۰	۱۵/۴۹	۱۷/۱۵	۱۵/۹۵	۱۷/۹۶	۱۵/۷۴	۱۷/۳۱	درصد تغییرات نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم

الف) درصد تغییرات برابر است با { مقدار در سناریو بدون تغییر اقلیم / (مقدار در سناریو بدون تغییر اقلیم - مقدار در سناریو) } × ۱۰۰

اثر سناریوهای اقلیمی در سه زیر دوره زمانی (۲۰۲۵ تا ۲۰۴۰؛ ۲۰۴۱ تا ۲۰۶۰ و ۲۰۶۱ تا ۲۰۸۰) بر میزان انتشار سالانه CO₂ از خاک در پوشش‌های گیاهی کویر میقان

در سناریو بدون تغییر اقلیم میزان انتشار سالانه CO₂ از خاک در هر کدام از پوشش‌های گیاهی در هر سه دوره زمانی تقریباً یکسان (جدول ۶) و در سطح ۵ درصد ($P < 0.05$) با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند (شکل ۵). در سناریو RCP2.6 نیز با افزایش دما و کاهش میزان بارندگی در دوره زمانی ۲۰۴۰ - ۲۰۲۵ میزان انتشار سالانه CO₂ افزایش یافته اما درصد تغییرات انتشار سالانه CO₂ در سناریو RCP2.6 نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم در این دوره در تمام پوشش‌های گیاهی تقریباً یکسان و بین ۳/۲۱ تا ۳/۸۸ درصد بوده است (جدول ۶). از آنجایی که در تحقیقات گذشته توصیه شده که ارزش‌های مطلق عددی را به دلیل وجود تفاوت بین قسمت‌های مختلف خاک نمی‌توان برای مقایسه مطالعات در نظر گرفت و مقایسات می‌بایست بر مبنای درصد تغییرات باشد (Muñoz-Rojas et al., 2013)؛ لذا در این مطالعه درصد تغییرات محاسبه و مبنای مقایسات در پوشش‌های گیاهی، سناریوهای اقلیمی و نیز سایر مطالعات در نظر گرفته شد. در یک مطالعه Xu et al. (۲۰۱۱) با استفاده از مدل کربن روتامستد نشان دادند که در سال‌های اولیه تغییر اقلیم با افزایش دما میزان ۲ الی ۶ درصد کربن خاک از طریق تجزیه کاهش خواهد یافت که به نتایج این مطالعه نزدیک است. در ادامه با تداوم افزایش دما و کاهش بارندگی

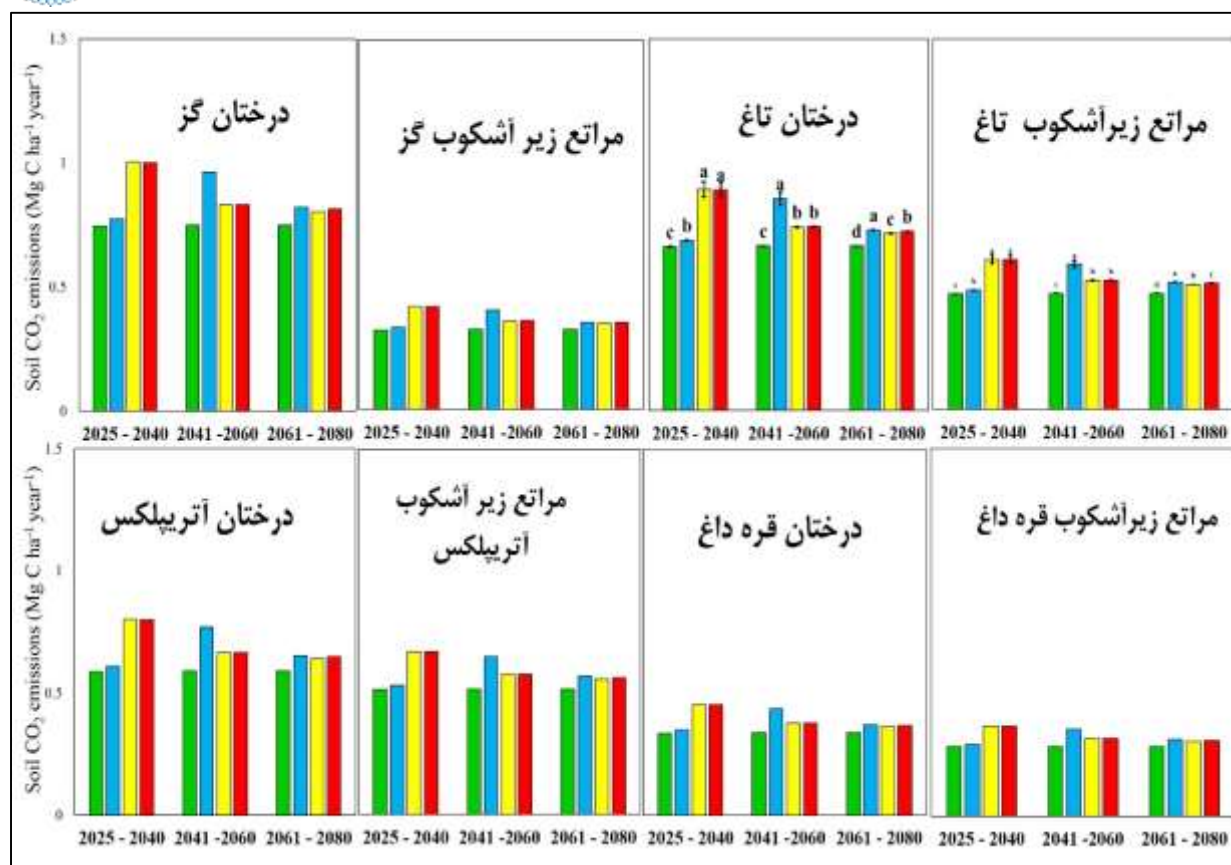


در دوره زمانی ۲۰۴۱ - ۲۰۶۰ میزان انتشار سالانه CO₂ در تمامی پوشش‌های گیاهی افزایش یافته به طوری که بیشترین میزان انتشار در تمامی سناریوهای اقلیمی در دوره ۲۰۴۱ - ۲۰۶۰ در سناریو RCP2.6 رخ داده (شکل ۵) و این سناریو با سایر سناریوها در این بازه زمانی تفاوت معنی‌دار ($P < 0.05$) دارد. از طرفی در این دوره زمانی درصد تغییرات انتشار سالانه CO₂ نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم از ۲۴/۸۳ تا ۳۰/۲۶ درصد متغیر بود و بیشترین درصد تغییرات انتشار مربوط به پوشش‌های گیاهی درختی بود که به ترتیب کاهشی شامل درختان آترپلکس < درختان تاغ < درختان قره‌داغ < درختان گز بودند و پوشش‌های گیاهی مرتعی تقریباً درصد تغییرات انتشار یکسانی در محدوده ۲۴/۸۳ تا ۲۵/۴۷ داشتند (جدول ۶). این موضوع احتمالاً به دلیل بالا بودن کمیت لاشبرگ‌های وارد شده به خاک در پوشش‌های درختی باشد (جدول ۲) زیرا که در خاک‌هایی که مواد گیاهی ورودی به خاک بیشتر باشد، جمعیت میکروبی و به تبع آن میزان تجزیه کربن آلی بیشتر شده و در نهایت میزان انتشار CO₂ افزایش خواهد یافت (Chapin et al., 2002). اما در سناریو RCP2.6 در دوره ۲۰۸۰ - ۲۰۶۱ با افزایش بیشتر دما و کاهش بیشتر بارندگی، میانگین میزان انتشار CO₂ در این دوره نسبت به دوره زمانی قبل (۲۰۴۱ - ۲۰۶۰) کاهش یافته و درصد تغییرات انتشار نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم تقریباً در تمامی پوشش‌های گیاهی یکسان و در محدوده ۹/۵۱ تا ۱۰/۳۸ درصد بوده است (جدول ۶). به طور کلی در سناریو RCP2.6 در دو دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۲۵ و ۲۰۸۰ - ۲۰۶۱ درصد تغییرات انتشار نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم تقریباً در تمامی پوشش‌های گیاهی یکسان بود هر چند که این درصد تغییرات در دوره زمانی ۲۰۸۰-۲۰۶۱ بیشتر بوده است (جدول ۶).

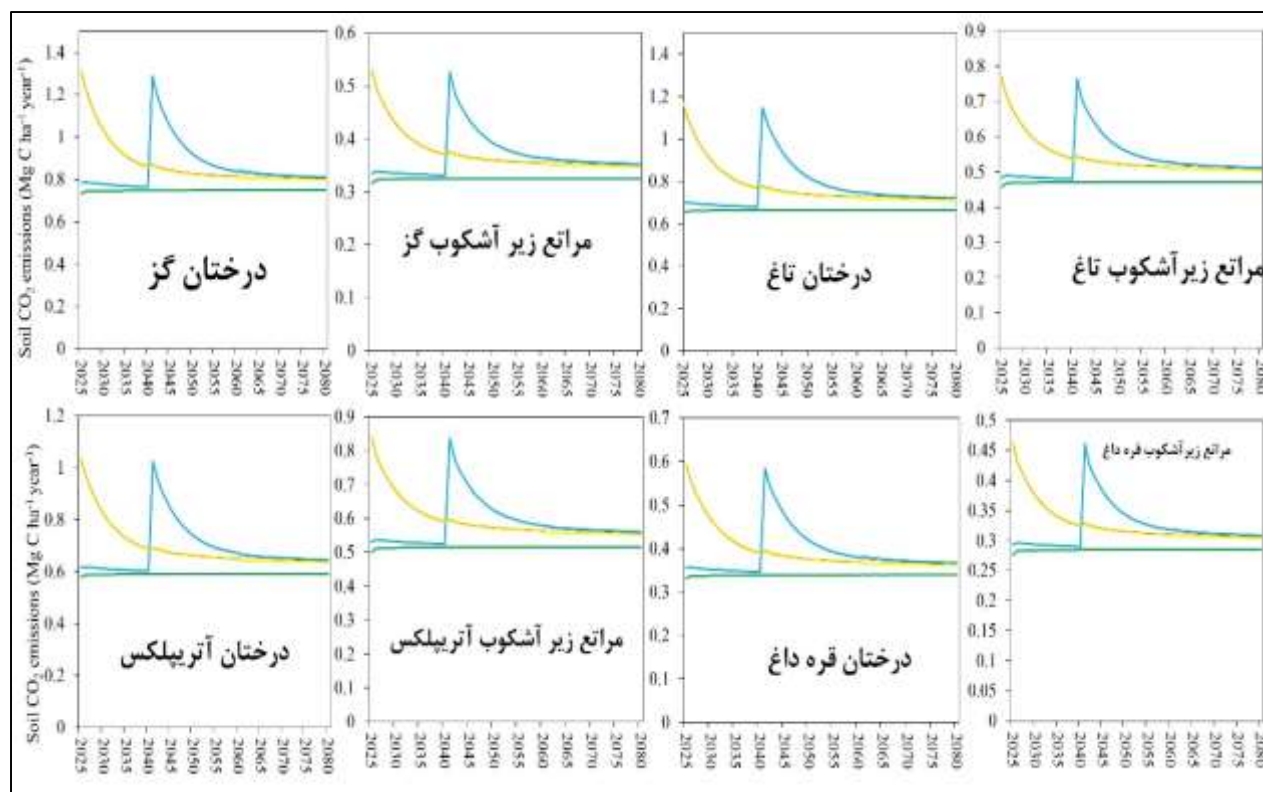
متقابلاً در هر دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 در دوره زمانی ۲۰۴۰ - ۲۰۲۵ با افزایش دما و کاهش بارندگی، میانگین میزان انتشار سالانه CO₂ افزایش یافته (جدول ۶) به طوری که بیشترین میزان انتشار در تمامی سناریوهای اقلیمی در دوره ۲۰۴۰ - ۲۰۲۵ در دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 رخ داده است (شکل ۵) و این دو سناریو با سایر سناریوها در این بازه زمانی تفاوت معنی‌دار ($P < 0.05$) دارند هر چند که با همدیگر دارای اختلاف معنی‌داری نیستند. بر مبنای نتایج حاصل از این تحقیق ما می‌توانیم انتظار داشته باشیم که در آینده تغییر اقلیم موجب تشدید میزان انتشار CO₂ در پوشش‌های گیاهی کویر میقان خواهد شد که مطابق با مطالعات پیشین است (Azad et al., 2020). در یک مطالعه‌ای دیگر (Gao et al., 2025) بیان داشتند تحت سناریو RCP8.5 میزان هدرروی SOC در فلات تبت بیشتر از سناریو RCP4.5 خواهد بود. در مناطق با اقلیم خشک، کاهش میزان بارندگی موجب کاهش رطوبت خاک و افزایش هدررفت SOC خواهد شد (Muñoz-Rojas et al., 2013). در یک مطالعه جامع (Díaz-Martínez et al., 2024) در ۳۲۶ سایت در ۲۵ کشور (۶ قاره) نشان دادند که با وقوع تغییر اقلیم در مناطق خشک منابع کربن ذره‌ای و معدنی خاک کاهش خواهند یافت و به عبارتی هدرروی SOC در مناطق خشک جهان به تغییر اقلیم حساس است که مطابق با نتایج مطالعه حاضر است. همچنین در دوره زمانی ۲۰۴۰ - ۲۰۲۵ بیشترین درصد تغییرات انتشار نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم در مقایسه با دو دوره زمانی دیگر (۲۰۴۱ - ۲۰۶۰ و ۲۰۸۰ - ۲۰۶۱) رخ داده به طوری که درصد تغییرات انتشار در سناریو RCP4.5 به میزان ۲۹/۶۰ تا ۳۶/۰۸ بوده و بیشترین درصد تغییرات نیز مربوط به پوشش‌های گیاهی درختی بود که به ترتیب کاهشی شامل آترپلکس < درختان تاغ < درختان قره‌داغ < درختان گز بودند و پوشش‌های گیاهی مرتعی تقریباً درصد تغییرات انتشار یکسانی در محدوده ۲۹/۶۰ تا ۳۰/۲۱ داشتند (جدول ۶). جالب توجه است که در هر دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 در دوره‌های زمانی بعدی (۲۰۴۱ - ۲۰۶۰ و ۲۰۸۰ - ۲۰۶۱) با وجود افزایش بیشتر دما و کاهش بیشتر بارندگی؛ میانگین میزان انتشار CO₂ در تمام پوشش‌های گیاهی نسبت به دوره زمانی قبلی (۲۰۴۰ - ۲۰۲۵) کاهش یافته است و با افزایش بیشتر دما و کاهش بیشتر بارندگی در دوره ۲۰۸۰ - ۲۰۶۱ میزان انتشار حتی نسبت به دوره زمانی قبلی (۲۰۴۱ - ۲۰۶۰) نیز کاهش داشته است (جدول ۶). مطالعات نشان داده‌اند که در شرایط وقوع تغییر اقلیم به علت پدیده هوموسی شدن، میزان انتشار CO₂ از خاک در طی زمان نسبت به گذشته کمتر خواهد شد (Stolbovoi, 2002) که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد. در سناریو RCP4.5 درصد تغییرات انتشار CO₂ نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم در دوره‌های زمانی ۲۰۴۱ - ۲۰۶۰ و ۲۰۴۱ - ۲۰۸۰ تقریباً در تمامی پوشش‌های گیاهی یکسان بود هر چند که درصد تغییرات در دوره زمانی ۲۰۴۱ - ۲۰۶۰ بیشتر از دوره زمانی ۲۰۸۰ - ۲۰۶۱ بوده است (جدول ۶). الگوی تغییرات انتشار CO₂ نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم در سناریو RCP8.5 تقریباً مشابه با سناریو RCP4.5 بود با این تفاوت که درصد تغییرات انتشار در دوره زمانی ۲۰۴۰ - ۲۰۲۵ در سناریو RCP4.5 به میزان ناچیزی از سناریو RCP8.5 بیشتر بوده اما در دو دوره زمانی دیگر درصد تغییرات انتشار در سناریو RCP8.5 بیشتر از سناریو RCP4.5 بوده است هر چند که میزان انتشار CO₂ در هر کدام از پوشش‌های گیاهی کویر میقان در دوره‌های زمانی مشابه در هر دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 تفاوت معنی‌داری بایکدیگر ($P < 0.05$) نداشتند (شکل ۵). نتایج شبیه‌سازی نشان داد که الگوی واکنش انتشار سالانه CO₂ در تمام پوشش‌های گیاهی کویر میقان نسبت به سناریوهای اقلیمی

مشابه بوده (شکل ۵) و تنها مقدار انتشار متفاوت می‌باشد (جدول ۶). مطالعات نیز نشان داده‌اند که پوشش‌های گیاهی مختلف با مکانیسم‌ها، ساختار و فنولوژی متفاوت بر ورودی و خروجی کربن خاک و میزان انتشار CO₂ از خاک تأثیرات متفاوتی دارند (Willcock et al., 2016; Mishra et al., 2019; Pellikka et al., 2018; Azad et al., 2020; Song et al., 2025). اثر سناریوهای اقلیمی در هر سه دوره زمانی در پوشش‌های گیاهی کویر میقان با مدل روتامستد نشان داد که در هر چهار سناریو اقلیمی و در هر سه دوره زمانی مورد مطالعه، بیشترین و کمترین میزان انتشار سالانه CO₂ از خاک به ترتیب مربوط به درختان گز و مراتع زیر آشکوب قره‌داغ بوده است (جدول ۶). به طور کلی میزان انتشار سالانه CO₂ از خاک در تمام سناریوهای اقلیمی و در هر سه دوره زمانی در پوشش‌های درختی به ترتیب کاهشی مربوط به درختان گز < درختان تاغ < درختان آتریپلکس < درختان قره‌داغ و در پوشش‌های مرتعی به ترتیب کاهشی مربوط به مراتع زیر آشکوب آتریپلکس < مراتع زیر آشکوب گز < مراتع زیر آشکوب قره‌داغ بوده است (جدول ۶). در نتیجه در بین پوشش‌های گیاهی درختی بیشترین و کمترین میزان انتشار به ترتیب مربوط به درختان گز و درختان قره‌داغ و در بین پوشش‌های مرتعی بیشترین و کمترین میزان انتشار به ترتیب مربوط به مراتع زیر آشکوب آتریپلکس و مراتع زیر آشکوب قره‌داغ هستند. اما از لحاظ درصد تغییرات انتشار نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم، بیشترین میزان درصد تغییرات انتشار در پوشش‌های درختی رخ داده که به ترتیب کاهشی شامل درختان آتریپلکس < درختان تاغ < درختان قره‌داغ < درختان گز بودند و پوشش‌های گیاهی مرتعی تقریباً درصد تغییرات انتشار یکسانی داشتند (جدول ۶). خیلی از مطالعات رابطه بین نوع پوشش گیاهی و انتشار CO₂ را بررسی نموده‌اند. تفاوت فیزیولوژیکی گونه‌های گیاهی با اصلاح شرایط رطوبتی و حرارتی خاک، کمیت و کیفیت لاشبرگ گیاهی، میزان ترسیب کربن و سرعت انتقال کربن به خاک در نهایت بر میزان انتشار CO₂ از خاک به اتمسفر تأثیر می‌گذارند (Raich and Tufekcioglu, 2000; Shi et al., 2014; Mishra et al., 2019) و در واقع حساسیت انتشار CO₂ از خاک در شرایط تغییر اقلیم تحت تأثیر نوع پوشش گیاهی است (Baah et al., 2016) که نتایج مطالعه حاضر با این مطالعات مطابق است.

نتایج شبیه‌سازی مدل نشان داد که روند انتشار CO₂ از خاک در همه پوشش‌های گیاهی تحت تأثیر سناریوهای اقلیمی در گذر زمان یک روند کاهشی با یک الگوی مشابه است (شکل ۶). با اینکه میزان انتشار در سناریو بدون تغییر اقلیم در تمام پوشش‌های گیاهی کویر میقان ثابت است اما در سناریو RCP2.6 از سال ۲۰۲۵ تا سال ۲۰۴۰ میزان انتشار تقریباً یک روند ثابت و یکسانی دارد که با افزایش دما و کاهش بارندگی در دوره بعدی (۲۰۴۱ - ۲۰۶۰) میزان انتشار به صورت ناگهانی افزایش یافته و سپس در سال‌های بعد وارد فاز کاهشی شده و در دوره زمانی ۲۰۸۰ - ۲۰۶۱ به یک روند ثابت رسیده است (شکل ۶). در دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 با افزایش میزان دما و کاهش بارندگی نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم در دوره ۲۰۴۰ - ۲۰۲۵ میزان انتشار افزایش یافته و سپس وارد فاز کاهشی شده و در دوره زمانی بعدی حتی با اینکه دما افزایش داشته و بارندگی کاهش یافته؛ میزان انتشار کاهش یافته و بعد از فاز کاهشی از سال ۲۰۶۱ به بعد وارد یک روند ثابت شده‌اند (شکل ۶). در واقع میزان انتشار در سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 بعد از روند کاهشی از سال ۲۰۶۱ به بعد وارد یک فاز نسبتاً پایدار شده‌اند. مخازن کربن خاک در طی زمان نسبت به تجزیه مقاوم‌تر شده (Azad et al., 2020) و بخشی از ماده آلی خاک با قابلیت تجزیه بیشتر در مخازن کربن خاک به طور جزئی یا کامل خالی شده و با کاهش جمعیت میکروارگانیسم‌ها سرعت تجزیه مواد آلی خاک نیز کم شده و با تشکیل کمپلکس‌های هوموسی در نهایت میزان انتشار CO₂ از خاک کاهش خواهد یافت (Guimarães et al., 2013; Muscolo et al., 2013). برخی از محققین نیز اعتقاد دارند که لاشبرگ‌های گیاهی وارد شده به خاک در دماهای بیشتر در مقایسه با دماهای کمتر؛ نسبت به تجزیه مقاوم‌تر هستند (Dalias et al., 2001) فلذا میزان انتشار CO₂ از خاک پایین‌تر است. هرچند که میزان انتشار وارد یک روند ثابت شده اما این میزان ثابت تقریباً در پوشش‌های گیاهی مختلف متفاوت بوده است و این میزان انتشار ثابت به طور میانگین در سه سناریو (RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5) به ترتیب کاهشی برای درختان گز، درختان تاغ، درختان آتریپلکس، مراتع زیر آشکوب آتریپلکس، مراتع زیر آشکوب تاغ، درختان قره‌داغ، مراتع زیر آشکوب گز و مراتع زیر آشکوب قره‌داغ به میزان ۰/۸۱۲۴، ۰/۷۶۵۸، ۰/۶۴۶۴، ۰/۵۶۱۶، ۰/۵۱۲۳، ۰/۳۶۸۲، ۰/۳۵۲۹ و ۰/۳۰۹۱ مگاگرم کربن در هکتار در سال می‌باشد. در واقع در این مرحله میزان کربن ورودی به خاک با میزان کربن خروجی از خاک به صورت CO₂ برابر است و مخازن کربن خاک به یک حالت نسبتاً پایدار رسیده‌اند (Francaviglia et al., 2017; Azad et al., 2020).



شکل ۵. میزان انتشار سالانه CO_2 در پوشش‌های گیاهی کویر میقان تحت تأثیر سناریوهای مختلف اقلیمی (رنگ سبز، آبی، زرد و قرمز به ترتیب مربوط به سناریوهای بدون تغییر اقلیم، RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5).



شکل ۶. روند انتشار سالانه CO_2 از خاک تحت سناریوهای مختلف اقلیمی در پوشش‌های گیاهی کویر میقان (رنگ سبز، آبی، زرد و قرمز به ترتیب مربوط به سناریوهای بدون تغییر اقلیم، RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5).

جدول ۶. میانگین میزان انتشار سالانه در پوشش‌های گیاهی کویر میقان تحت تأثیر سناریوهای اقلیمی در سه دوره زمانی.

RCP8.5			RCP4.5			RCP2.6			بدون تغییر اقلیم			سناریو
۲۰۶۱- ۲۰۸۰	۲۰۴۱- ۲۰۶۰	۲۰۲۵- ۲۰۴۰	۲۰۶۱- ۲۰۸۰	۲۰۴۱- ۲۰۶۰	۲۰۲۵- ۲۰۴۰	۲۰۶۱- ۲۰۸۰	۲۰۴۱- ۲۰۶۰	۲۰۲۵- ۲۰۴۰	۲۰۶۱- ۲۰۸۰	۲۰۴۱- ۲۰۶۰	۲۰۲۵- ۲۰۴۰	
-۰/۷۲۴۲	-۰/۷۴۳۱	-۰/۸۹۲۸	-۰/۷۱۵۲	-۰/۷۴۰۵	-۰/۸۹۴۴	-۰/۷۳۰۸	-۰/۸۵۸۰	-۰/۶۸۷۶	-۰/۶۶۵۶	-۰/۶۶۵۰	-۰/۶۶۱۹	تاغ
۸/۸۰	۱۱/۷۴	۳۴/۸۸	۷/۴۵	۱۱/۳۵	۳۵/۱۲	۹/۷۹	۲۹/۰۲	۳/۸۸	*	*	*	درصد تغییرات نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم الف
-۰/۵۱۲۸	-۰/۵۲۴۶	-۰/۶۰۸۱	-۰/۵۰۷۰	-۰/۵۲۳۵	-۰/۶۰۹۰	-۰/۵۱۷۱	-۰/۵۸۹۶	-۰/۴۸۴	-۰/۴۷۱۲	-۰/۴۷۰۹	-۰/۴۶۸۷	مراعات زیر اشکوب تاغ
۸/۲۸	۱۱/۴۰	۲۹/۷۴	۷/۵۹	۱۱/۱۷	۲۹/۹۳	۹/۷۴	۲۵/۲۰	۳/۲۶	*	*	*	درصد تغییرات نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم
-۰/۶۴۸۱	-۰/۶۶۴۰	-۰/۷۹۸۷	-۰/۶۳۸۶	-۰/۶۶۴۰	-۰/۸۰۰۲	-۰/۶۵۲۶	-۰/۷۶۹۵	-۰/۶۰۹۲	-۰/۵۹۱۲	-۰/۵۹۰۷	-۰/۵۸۸	آتریپلکس
۹/۶۲	۱۲/۴۰	۳۵/۸۳	۸/۰۱	۱۲/۴۰	۳۶/۰۸	۱۰/۳۸	۳۰/۲۶	۳/۶۰	*	*	*	درصد تغییرات نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم
-۰/۵۶۲۴	-۰/۵۷۴۷	-۰/۶۶۶۹	-۰/۵۵۵۷	-۰/۵۷۴۳	-۰/۶۶۸۰	-۰/۵۶۶۸	-۰/۶۴۶۷	-۰/۵۲۹۸	-۰/۵۱۵۷	-۰/۵۱۵۴	-۰/۵۱۳۰	مراعات زیر اشکوب آتریپلکس
۹/۰۵	۱۱/۵۰	۳۰	۷/۷۵	۱۱/۴۲	۳۰/۲۱	۹/۹۰	۲۵/۴۷	۳/۲۷	*	*	*	درصد تغییرات نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم
-۰/۳۶۸۷	-۰/۳۷۷۸	-۰/۴۵۴۲	-۰/۳۶۴۰	-۰/۳۷۶۵	-۰/۴۵۵۰	-۰/۳۷۲۰	-۰/۴۳۶۴	-۰/۳۵۰۴	-۰/۳۳۹۳	-۰/۳۳۹۰	-۰/۳۳۷۴	قره داغ
۸/۶۶	۱۱/۴۴	۳۴/۶۱	۷/۲۷	۱۱/۰۶	۳۴/۸۵	۹/۶۶	۲۸/۷۳	۳/۸۵	*	*	*	درصد تغییرات نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم
-۰/۳۰۹۴	-۰/۳۱۶۵	-۰/۳۶۶۷	-۰/۳۰۶۰	-۰/۳۱۵۵	-۰/۳۶۷۳	-۰/۳۱۲۰	-۰/۳۵۵۴	-۰/۲۹۲۵	-۰/۲۸۴۹	-۰/۲۸۴۷	-۰/۲۸۳۴	مراعات زیر اشکوب قره داغ
۸/۵۹	۱۱/۱۶	۲۹/۳۹	۷/۴۰	۱۰/۸۱	۲۹/۶۰	۹/۵۱	۲۴/۸۳	۳/۲۱	*	*	*	درصد تغییرات نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم
-۰/۸۱۳۵	-۰/۸۳۲۹	-۱/۰۰۱	-۰/۸۰۳۲	-۰/۸۳	-۱/۰۰۳	-۰/۸۲۰۷	-۰/۹۶۲۳	-۰/۷۷۲۸	-۰/۷۴۹۲	-۰/۷۴۸۵	-۰/۷۴۵۰	گز
۸/۵۸	۱۱/۲۷	۳۴/۳۶	۷/۲۰	۱۰/۸۸	۳۴/۶۳	۹/۵۴	۲۸/۵۶	۳/۸۶	*	*	*	درصد تغییرات نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم
-۰/۳۵۳۲	-۰/۳۶۱۳	-۰/۴۱۸۶	-۰/۳۴۹۳	-۰/۳۶۰۲	-۰/۴۱۹۳	-۰/۳۵۶۲	-۰/۴۰۵۸	-۰/۳۳۳۹	-۰/۳۲۵۲	-۰/۳۲۵۰	-۰/۳۲۳۴	مراعات زیر اشکوب گز
۸/۶۱	۱۱/۱۶	۲۹/۴۳	۷/۴۷	۱۰/۸۳	۲۹/۶۵	۹/۵۳	۲۴/۸۶	۳/۲۴	*	*	*	درصد تغییرات نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم

الف) درصد تغییرات برابر است با { مقدار در سناریو بدون تغییر اقلیم / (مقدار در سناریو بدون تغییر اقلیم - مقدار در سناریو) × ۱۰۰ }

نتایج همبستگی میان انتشار سالانه CO₂ از خاک و خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک و کمیت و کیفیت مواد گیاهی ورودی به خاک نشان داد که همبستگی بین انتشار CO₂ با موجودی SOC، نسبت DPM/RPM، میزان کربن ورودی به خاک و درصد سیلت خاک در سناریوهای بدون تغییر اقلیم، RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در سطح یک درصد معنی‌دار و به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۵۸، ۰/۵۵، ۰/۵۴؛ ۰/۹۹، ۰/۶۰، ۰/۵۷، ۰/۵۳ و ۰/۹۹، ۰/۶۰، ۰/۵۶، ۰/۵۳ بود (جدول ۷). بالاترین همبستگی (r=0.99) بین انتشار CO₂ در سناریوهای مختلف اقلیمی با موجودی SOC وجود داشت که در همه سناریوها نیز در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۷).

در این مطالعه بالاترین میزان همبستگی معنی‌داری (P<0.001) بین انتشار CO₂ از خاک و موجودی SOC در تمام سناریوهای اقلیمی وجود دارد (جدول ۷). از طرفی بیشترین و کمترین میزان انتشار سالانه CO₂ از خاک در درختان گز و مراتع زیر آشکوب قره‌داغ رخ داده (جدول ۵ و ۶) و بیشترین و کمترین میزان موجودی SOC نیز مربوط به درختان گز و مراتع زیر آشکوب قره‌داغ است (جدول ۲) لذا ارتباط بین موجودی SOC و میزان انتشار CO₂ از خاک در این مطالعه بسیار بالاست. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که کربن استفاده

شده توسط میکروارگانیسم‌های خاک طی فرآیند تجزیه در ارتباط مثبت با میزان انتشار CO_2 از خاک است. Chen et al. (۲۰۱۰) بیان نمودند که موجودی SOC می‌تواند یکی از مهمترین تعیین‌کنندگان میزان تنفس خاک به ویژه در مقیاس‌های زمانی بلندمدت باشد. Shi et al. (۲۰۱۴) نتیجه‌گیری نمودند که مقدار موجودی SOC با میزان انتشار سالانه CO_2 از خاک همبستگی دارد بنابراین نتایج مطالعه حاضر مطابق با نتایج این مطالعات است. مطالعات انجام شده در اکوسیستم‌های استپی چین نیز تفاوت در میزان انتشار CO_2 از خاک را تفاوت در موجودی SOC استپ‌های بیابانی در مقایسه با استپ‌های چمنزار اظهار نموده‌اند (Song et al., 2025). با احیای پوشش گیاهی کویر میقان هر چند که SOC افزایش یافته اما نتایج حاکی از افزایش میزان انتشار سالانه CO_2 از خاک نیز هست (جدول ۵، ۶ و ۷) این موضوع بدین معناست که لزوماً احیای پوشش گیاهی به معنای افزایش پایدار SOC نیست. در یک مطالعه‌ای دیگر Ren et al. (۲۰۲۴) با مطالعه گرادیان خشکی در خاک‌های چین نشان دادند که در مناطق خشک تا فوق خشک کل کربن خاک افزایش خواهد یافت اما این افزایش به دلیل افزایش کربن معدنی خاک (SIC) در شرایط خشکی شدید است نه افزایش SOC، لذا تغییر اقلیم ممکن است تأثیر متفاوتی بر SOC و SIC بگذارد و در مدل‌سازی باید تفکیک SOC و SIC انجام شود.

جدول ۷. همبستگی انتشار سالانه CO_2 و خصوصیات گیاه و خاک در پوشش‌های گیاهی کویر میقان.

	سناریو بدون تغییر اقلیم	P_value	سناریو RCP2.6	P_value	سناریو RCP4.5	P_value	سناریو RCP8.5	P_value
pH	۰/۴۲	۰/۰۰۱<	۰/۴۱	۰/۰۰۱<	۰/۴۲	۰/۰۰۱<	۰/۴۲	۰/۰۰۱<
EC	۰/۴۲	۰/۰۰۱<	۰/۴۴	۰/۰۰۱<	۰/۴۳	۰/۰۰۱<	۰/۴۴	۰/۰۰۱<
CLAY	۰/۱۲	۰/۱۵۵	۰/۱۲	۰/۱۱۷	۰/۱۳	۰/۱۵۵	۰/۱۳	۰/۱۱۷
SILT	۰/۵۴	۰/۰۰۱<	۰/۵۴	۰/۰۰۱<	۰/۵۴	۰/۰۰۱<	۰/۵۴	۰/۰۰۱<
SAND	-۰/۴۵	۰/۰۰۱<	-۰/۴۵	۰/۰۰۱<	-۰/۴۵	۰/۰۰۱<	-۰/۴۵	۰/۰۰۱<
SOC Stock	۰/۹۹	۰/۰۰۱<	۰/۹۹	۰/۰۰۱<	۰/۹۹	۰/۰۰۱<	۰/۹۹	۰/۰۰۱<
Soil Carbon Input	۰/۵۶	۰/۰۰۱<	۰/۵۷	۰/۰۰۱<	۰/۵۷	۰/۰۰۱<	۰/۵۷	۰/۰۰۱<
DPM/RPM	-۰/۵۹	۰/۰۰۱<	-۰/۶۰	۰/۰۰۱<	-۰/۶۰	۰/۰۰۱<	-۰/۶۰	۰/۰۰۱<

میزان انتشار CO_2 از خاک می‌تواند در ارتباط با تولید مواد گیاهی تازه و قابل تجزیه باشد به طوری که لاشبرگ‌های گیاهی با سرعت تجزیه بالا میزان انتشار CO_2 بیشتری تولید می‌کنند (Fontaine et al., 2007; Mchunu and Chaplot, 2012). در مطالعه حاضر میزان همبستگی معنی‌داری ($P < 0.001$) بین انتشار CO_2 از خاک با DPM/RPM (فاکتور کیفیت لاشبرگ گیاهی) در پوشش‌های گیاهی کویر میقان در سناریوهای اقلیمی مختلف بین -۰/۵۹ تا -۰/۶۰ وجود داشت و در واقع میزان انتشار CO_2 از خاک در پوشش‌های گیاهی کویر میقان همبستگی منفی با میزان DPM/RPM (فاکتور کیفیت لاشبرگ گیاهی) دارد (جدول ۷). به طوری که میزان انتشار CO_2 از پوشش‌های گیاهی درختی با ($DPM/RPM = 0.25$) و کیفیت لاشبرگ کمتر، بیشتر از مراتع زیر آشکوب با ($DPM/RPM = 0.67$)، کیفیت لاشبرگ بالاتر بود (جدول ۱، ۵ و ۶). این ارتباط منفی کمی گیج‌کننده به نظر می‌رسد اما با درک نحوه تعریف این اجزا در مدل RothC، کاملاً منطقی است. وجود همبستگی معنی‌دار ($P < 0.001$) منفی ($r = -0.60$) در کویر میقان قویاً نشان می‌دهد که تغییرات سالانه در موجودی کربن پایدار (HUM و BIO) که تحت تأثیر نرخ‌های تجزیه RPM قرار دارند، تأثیر بزرگ‌تری بر CO_2 خروجی داشته‌اند تا تجزیه سریع DPM. در واقع کاهش DPM/RPM (افزایش RPM مقاوم) به طور غیرمستقیم باعث افزایش موجودی SOC در بخش‌های پایدار (HUM) می‌شود که بخش‌های پایدار موجودی SOC نیز قوی‌ترین همبستگی مثبت ($r = 0.99$) را با CO_2 خروجی نشان داده‌اند. بنابراین، ورودی‌های با کیفیت پایین، به صورت غیرمستقیم از طریق افزایش موجودی SOC، به انتشار CO_2 بیشتر منجر شده‌اند که این یک اثر غیرمستقیم است که توسط پویایی کربن در مدل RothC در کویر میقان ایجاد شده است. به طور کلی افزایش نسبت مواد مقاوم در ورودی، به تجمع کربن در مخازن پایدارتر کمک کرده که نهایتاً به دلیل جرم کلی بالا، منبع اصلی انتشار CO_2 در طول زمان شبیه‌سازی بوده‌اند.

با توجه به اینکه هر کدام از پوشش‌های درختی و مرتعی فاکتور DPM/RPM مشابه‌ای دارند (جدول ۱) تفاوت میزان کربن ورودی به خاک از طریق پوشش‌های گیاهی می‌تواند تا حدودی تغییرات میزان انتشار CO_2 از خاک را در پوشش‌های گیاهی کویر میقان توجیه نماید. در مطالعه حاضر میزان همبستگی انتشار CO_2 از خاک با میزان کربن ورودی به خاک ($P < 0.001$) در پوشش‌های گیاهی کویر

میزان در سناریوهای اقلیمی مختلف بین ۰/۵۶+ تا ۰/۵۷+ بود (جدول ۷). در این مطالعه میزان کربن ورودی به خاک از طریق لاشبرگ گیاهی از ۰/۲۸۵ تا ۰/۲۴۸۹ تن در هکتار متغیر است و به طور کاهشی شامل درختان گز < درختان تاغ < درختان آترپلکس < مراتع زیر آشکوب آترپلکس < مراتع زیر آشکوب تاغ < درختان قره‌داغ < مراتع زیر آشکوب گز < مراتع زیر آشکوب قره‌داغ بودند (جدول ۲) که بیشترین تا کمترین میزان انتشار CO₂ از خاک نیز به همین ترتیب اتفاق افتاده است (جدول ۵ و ۶). لذا میزان کربن ورودی از طریق لاشبرگ گیاهی در پوشش‌های گیاهی کویر میزان انتشار CO₂ از خاک را توجیه نموده است. همچنین برخی مطالعات نشان‌دهنده همبستگی مثبت بین میزان انتشار CO₂ از خاک و میزان تولید لاشبرگ می‌باشد (Raich and Tufekcioglu, 2000) که با نتایج حاصل از این مطالعه همخوانی دارد. در یک مطالعه جامع Zhang et al. (۲۰۲۰) با بررسی معرفی درختچه به مناطق خشک چین نشان دادند که با افزایش پوشش گیاهی و میزان کربن ورودی به خاک به دلیل کاهش رطوبت خاک و تغییر در شرایط فیزیکوشیمیایی خاک، روند تجزیه و انتشار CO₂ تشدید می‌شود، که با نتایج مطالعه حاضر مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم در کویر میزان انتشار CO₂ از خاک به جو را در پوشش‌های گیاهی مورد مطالعه به طور معنی‌داری افزایش داده است. بالاتر بودن میزان انتشار در دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 (کاهش بیشتر بارندگی و افزایش بیشتر دما نسبت به سناریو RCP2.6) در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۵ و همچنین بالا بودن میزان انتشار در سناریو RCP2.6 در دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ نشان‌دهنده این موضوع است که در شرایط اقلیمی بدتر مخازن کربن خاک سریعتر تخلیه شده و در شرایط تغییر اقلیم با شدت کمتر میزان تخلیه مخازن کربن خاک ابتدا آهسته و با تداوم شرایط تغییر اقلیم سپس مخازن کربن خاک به میزان بیشتری تخلیه خواهند شد. با توجه به اینکه بخش قابل تجزیه کربن خاک از مخازن خاک در سال‌های قبل خالی شده، از سال ۲۰۶۱ به بعد روند انتشار CO₂ در هر سه سناریو تغییر اقلیم RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 وارد یک فاز نسبتاً پایدار شده که در این مرحله میزان کربن ورودی به خاک با میزان کربن خروجی از خاک به صورت CO₂ برابر است و مخازن کربن خاک یک وضعیت نسبتاً پایدار رسیده‌اند، هرچند که این میزان در پوشش‌های گیاهی مختلف یکسان نیست. در نهایت بر مبنای یافته‌های این مطالعه با توجه به پایین‌تر بودن میزان انتشار CO₂ از خاک درختان قره‌داغ و مراتع زیر آشکوب آن و نیز سازگاری بومی با شرایط منطقه، و همچنین به عنوان مهمترین گونه گیاهی کویر میزان که در مقایسه با گیاهانی مانند تاغ و آترپلکس در عرصه‌هایی با سطح سفره آب زیرزمینی بالا همانند کویر میزان بهتر استقرار یافته و با توسعه بر روی تپه‌های ماسه‌ای از طریق ایجاد ریشه‌های نابجا موجب تثبیت ماسه‌های روان زیر شاخ و برگ خود و جلوگیری از کویرزایی در منطقه شده، گزینه‌ای شایسته برای توسعه پوشش گیاهی در کویر میزان و تقویت ظرفیت مقابله با بیابان‌زایی به شمار می‌آید. هرچند که مطابق نتایج این پژوهش، قره‌داغ به عنوان گونه‌ای ارزشمند از نقطه نظر نرخ پایین انتشار CO₂ خاک و مقابله با بیابان‌زایی مطرح می‌باشد اما گزارش‌هایی مبنی بر آفت‌زدگی و خشکیدگی به دلیل ضعیف شدن این گیاه ناشی از خشکسالی‌های دهه اخیر و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب کویر میزان و کاهش ورود آب به تالاب میزان وجود دارد که نیازمند توجه مسئولین و سیاست‌گذاران به این مهم جهت جلوگیری از نابودی پایه‌های قره‌داغ و تشدید قانون‌های فرسایش بادی در منطقه است.

با وجود این، به دلیل دامنه گسترده عدم قطعیت‌ها از جمله وابستگی نتایج به برآوردهای متغیر تغییرات اقلیمی لازم است تفسیر یافته‌ها با دقت و احتیاط انجام گیرد. بر همین اساس، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده به بررسی واکنش انتشار CO₂ خاک در شرایط اقلیمی گوناگون و در انواع مختلف خاک و پوشش‌های گیاهی بپردازند. همچنین مطالعه جزئیات ساختاری کمپلکس‌های آلی-معدنی و هوموسی در خاک‌های منطقه می‌تواند درک عمیق‌تری از فرایندهای کنترل‌کننده انتشار کربن فراهم کند.

مدل RothC با وجود دقت قابل قبول در بسیاری از مناطق جهان در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک که بخش عمده‌ای از خاک‌های ایران را تشکیل می‌دهد با محدودیت و منابع خطای قابل توجهی از جمله خشکسالی‌های شدید، آهکی و شور بودن بخش عمده‌ای از خاک‌های ایران، کیفیت پایین و ناقص بودن داده‌های ورودی مدیریت و اقلیم، ساده‌نمایی در شبیه‌سازی آبیاری و شخم عمیق روبرو است. لذا استفاده از مدل RothC در ایران بدون واسنجی محلی و اندازه‌گیری دقیق SOC می‌تواند منجر به خطای معنی‌دار در شبیه‌سازی SOC شود و توصیه می‌شود در اراضی کشاورزی ایران که تحت آبیاری گسترده و غیرمعمول، شخم عمیق و آتش‌سوزی بقایای گیاهی هستند از این مدل استفاده نگردد اما در شرایط دیم و در اکوسیستم‌های طبیعی یا جنگل‌کاری‌هایی که خاک به طور وسیع دستخوش تغییر نمی‌شود به شرط واسنجی محلی و اندازه‌گیری دقیق SOC قابل اجرا می‌باشد.



فقدان داده‌های پیوسته و بلندمدت در حوزه‌های مدیریتی، اقلیمی و ویژگی‌های خاک، یکی از موانع اساسی در ارزیابی کارایی و قابلیت کاربرد مدل‌های مرتبط با کربن خاک در ایران به شمار می‌آید. تأمین چنین داده‌هایی شرط بنیادی برای اجرای مدل‌سازی‌های معتبر در مقیاس‌های محلی تا ملی است. از اینرو، توسعه و استقرار ایستگاه‌های تحقیقاتی و مزارع پایش در گستره‌ای متنوع از اقلیم‌ها، کاربری‌های اراضی و تیپ‌های خاک کشور ضرورت دارد تا امکان گردآوری داده‌های قابل اتکاء در دوره‌های زمانی طولانی فراهم شود. داده‌های حاصل از این زیرساخت‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در واسنجی، اعتبارسنجی و ارتقای توان پیش‌بینی مدل‌های کربن خاک خواهند داشت.

سپاسگزاری

این پژوهش در آزمایشگاه خاک گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران انجام شده است. نویسندگان از حمایت گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی قدردانی می‌نمایند. همچنین نویسندگان از خانم‌ها مهندس معصومه یزدانی‌فر، مهندس ملیحه اکبری و آقایان دکتر سیروس شمشیری، مهندس مهدی نامداری، مهندس خوشدونی، مهندس رضایی، مهندس عباس‌نژاد، مهندس هاشمی جهت همکاری در عملیات نمونه‌برداری و آزمایشگاهی تشکر ویژه را دارند. در پایان از داوران ناشناس به خاطر نظرات و پیشنهاداتشان سپاسگزاریم.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

منابع

اکبری بزرجلویی، ملیحه؛ عطائیان، بهناز؛ آزاد، بیژن. (۱۴۰۴). مدل‌سازی اثر سناریوهای اقلیمی بر موجودی کربن آلی خاک در رویشگاه طبیعی *Halocnemum strobilaceum*. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۶)، ۱۴۵۷-۱۴۴۱.

REFERENCES

- Afzali, S. F. Azad, B. Golabi, M. H. & Francaviglia R. (2019) . Using RothC model to simulate soil organic carbon stocks under different climate change scenarios for the rangelands of the arid regions of southern Iran. *Water*, 11(10), 1-13. <https://doi.org/10.3390/w1102107>
- Akbari Bezcheloi, M. Attaeian, B., & Azad, B. (2025). Predicting Soil Organic Carbon as Affected by Climate Change Scenarios in the Natural Habitat of *Halocnemum strobilaceum*. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (6), 1437-1457. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.384239.669818>
- Azad, B. Afzali, S. F. & Francaviglia R. (2020). Simulating soil CO₂ emissions under present and climate change conditions in selected vegetation covers of a semiarid region. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(5), 3087-3098. <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-019-02581-3>
- Baah-Acheamfour, M. Carlyle, C. N. Lim, S. Bork, E. W. & Chang, S. X. (2016). Forest and grassland cover types reduce net greenhouse gas emissions from agricultural soils. *The Science of the total environment*, 571, 1115-1127. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.106>
- Chapin, F. S. Matson, P. A. & Mooney, H. A. (2002). Terrestrial Production Processes. In: Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer, New York, NY. <https://doi.org/10.1007/0-387-21663-46>
- Chen, S. Huang, Y. Zou, J. Shen, Q. Hu, Z. Qin, Y. Chen, H. & Pan, G. (2010). Modeling interannual variability of global soil respiration from climate and soil properties. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 590-605. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.02.004>
- Coleman, K. & Jenkinson, D.S. (2008). RothC-26.3: A model for the turnover of carbon in soil, Model description and users guide (Windows version). <https://repository.rothamsted.ac.uk/item/8746v/rothc-26-3-a-model-for-the-turnover-of-carbon-in-soil>
- Dalias, P. Anderson, J. Bottner, P. & Coûteaux, M. M. (2001). Long-term effects of temperature on carbon mineralisation processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 33, 1049-1057. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00009-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00009-8)
- Díaz-Martínez, P. Maestre, F.T. Moreno-Jiménez, E. Delgado-Baquerizo, M. Eldridge, D.J. Saiz, H. Gross, N. Le Bagousse-Pinguet, Y. Gozalo, B. Ochoa, V. Guirado, E. García-Gómez, M. Valencia, E. Asensio, S. Berdugo, M. Martínez-Valderrama, J. Mendoza, B.J. García-Gil, J.C. Zaccane, C... & Plaza, C. (2024). Vulnerability of mineral-associated soil organic carbon to climate across global drylands. *Nature Climate Change*, 14(9), 976-982. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02087-y>
- Falloon, P. Smith, P. Coleman, K. & Marshall, S. (1998). Estimating the size of the inert organic matter pool from total soil organic carbon content for use in the Rothamsted carbon model. *Soil Biology and*

- Biochemistry*, 30: 1207–1211. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00256-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00256-3)
- Fierer, N. & Schimel, J.P. (2003). A Proposed Mechanism for the Pulse in Carbon Dioxide Production Commonly Observed Following the Rapid Rewetting of a Dry Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 67, 798-805. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2003.0798>
- Fontaine, S. Barot, S. Barré, P. Bdioui, N. Mary, B. & Rumpel, C. (2007). Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 450, 277–280. <https://doi.org/10.1038/nature06275>
- Francaviglia, R. Di Bene, C. Farina, R. & Salvati, L. (2017). Soil organic carbon sequestration and tillage systems in the Mediterranean Basin: a data mining approach. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 107, 125–137. <https://doi.org/10.1007/s10705-016-9820-z>
- Friedlingstein, P. Jones, M. W. O'Sullivan, M. Andrew, R.M. Hauck, J. Peters, G.P. Peters, W. Pongratz, J. & et al. (2019). Global carbon budget 2019. *Earth System Science Data*, 11, 1783–1838. <http://www.earth-syst-sci-data.net/11/1783/2019/>
- Gao, H. Gong, J. Liu, J. Wen, X. Huang, L. & Maier, M. (2025). Modeling of soil organic carbon stock and sequestration potential in grassland and cropland in Qinghai-Tibet Plateau: prediction and carbon management strategies based on different climate scenarios. *CATENA*, 261, 109545. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109545>
- Geremew, B. Tadesse, T. Bedadi, B. Gollany, H.T. Tesfaye, K. Aschalew, A. Tilaye, A. & Abera, W. (2024). Evaluation of RothC model for predicting soil organic carbon stock in north-west Ethiopia. *Environmental Challenges*, 15, 100909. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100909>
- Guimarães, D. V. Gonzaga, M. I. S. Da Silva, T. O. Da Silva, T. L. Da Silva-Dias. N. & Matias, M. I. S. (2013). Soil organic matter pools and carbon fractions in soil under different land uses. *Soil Tillage Research*, 126, 177–182. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.07.010>
- IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Jenkinson, D. S. Adams, D. E. & Wild, A. (1991). Model estimates of CO₂ emission from soil in response to global warming. *Nature*, 351, 304–306. <https://doi.org/10.1038/351304a0>
- Lai, L. Kumar, S. Chintala, R. Owens, V. Clay, D. Schumacher, J. Nizami, A. Lee, S. S. & Rafique, R. (2016). Modeling the impacts of temperature and precipitation changes on soil CO₂ fluxes from a Switchgrass stand recently converted from cropland. *Journal of Environmental Sciences*, 43, 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.08.019>
- Liu, Y. Q. Tan, X. & Duan, G. L. (2025). Spatiotemporal dynamics and driving factors of soil organic carbon storage in the Yangtze River Basin under climate change and land use scenarios. *Soil Ecology Letters*, 7, 250345. <https://doi.org/10.1007/s42832-025-0345-8>
- Mishra, G. Jangir, A. & Francaviglia, R. (2019). Modeling soil organic carbon dynamics under shifting cultivation and forests using Rothc model. *Ecological Modelling*, 396, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.01.016>
- Muñoz-Rojas, M. Jordán, A. Zavala, L. M. González-Peñaloza, F.A. De la Rosa, D. Pino-Mejias, R. & Anaya-Romero, M. (2013). Modelling soil organic carbon stocks in global change scenarios: a CarboSOIL application. *Biogeosciences*, 10, 8253–8268. <https://doi.org/10.5194/bg-10-8253-2013>
- Mchunu, C. & Chaplot, V. (2012). Land degradation impact on soil carbon losses through water erosion and CO₂ emissions. *Geoderma*, 177: 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.01.038>
- Muscolo, A. Sidari, M. Nardi, S. (2013). Humic substance: relationship between structure and activity. Deeper information suggests univocal findings. *Journal of Geochemical Exploration*, 129, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.10.012>
- Pellikka, P. K. E. Heikinheimo, V. Hietanen, J. Schäfer, E. Siljander, M. & Heiskanen, J. (2018). Impact of land cover change on aboveground carbon stocks in Afri-montane landscape in Kenya. *Applied Geography*, 94, 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.03.017>
- Ponce-Hernandez, R. Koohafkan, P & Antoine, J. (2004). Assessing carbon stocks and modelling win-win scenarios of carbon sequestration through land-use changes. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Rome, Italy. 166 pp, ISBN 92-5-105158-5.
- Raich, J. W. & Tufekcioglu, A. (2000). Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 48: 71–90. <https://doi.org/10.1023/A:1006112000616>
- Ren, Z. Li, C. Fu, B. Wang, S. & Stringer, L. C. (2024). Effects of aridification on soil total carbon pools in China's drylands. *Global change biology*, 30(1), e17091. <https://doi.org/10.1111/gcb.17091>
- Shi, W. Yan, M. Zhang, J. Guan, J. & Du, Sh. (2014). Soil CO₂ emissions from five different types of land use



- on the semiarid Loess Plateau of China, with emphasis on the contribution of winter soil respiration. *Atmospheric Environment*, 88, 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.01.066>
- Shi, B. Delgado-Baquerizo, M. Knapp, A. K. Smith, M.D. Reed, S. Osborne, B. Carrillo, Y. Maestre, F.T. Zhu, Y. Chen, A. Wilkins, K. Holdrege, M.C. Kulmatiski, A. Picon-Cochard, C. Roscher, C. Power, S. Byrne, K.M. Churchill, A. C. Jentsch, A. Henry, H. A. ... & Sun, W. (2024). Aridity drives the response of soil total and particulate organic carbon to drought in temperate grasslands and shrublands. *Science advances*, 10(40), eadq2654. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adq2654>
- Shirato, Y. & Yokozawa, M. (2006). Acid hydrolysis to partition plant material into decomposable and resistant fractions for use in the Rothamsted carbon model. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 812–816. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.07.008>
- Smith, J. Smith, P. & Addiscott, T. (1996). Quantitative methods to evaluate and compare Soil Organic Matter (SOM) Models. In: Powlson, D.S., Smith, P., Smith, J.U. (eds) *Evaluation of Soil Organic Matter Models*. NATO ASI Series, vol 38. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-61094-3_13
- Smith, P. Fang, C. Dawson, J. & Moncreiff, J. (2008). Impact of global warming on soil organic carbon. *Advances in Agronomy*, 97, 1–43. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(07\)00001-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(07)00001-6)
- Song, W. He, X. Qin, S. Yao, M. & Li, X. (2025). Regional-scale patterns and drivers of soil CO₂ emissions in steppe ecosystems. *Soil Ecology Letters*, 7, 250353. <https://doi.org/10.1007/s42832-025-0353-8>
- Stolbovoi, V. (2002). Carbon in Russian Soils. *Climatic Change*, 55, 131–156. <https://doi.org/10.1023/A:1020289403835>
- Willcock, S. Phillips, O. L. Platts, P. J. Swetnam, R. D. Balmford, A. & Burgess, N. D. (2016). Land cover change and carbon emissions over 100 years in an African biodiversity hotspot. *Global Change Biology*, 22(8), 2787–2800. <https://doi.org/10.1111/gcb.13218>
- Wilson, C. Papanicolaou, A. & Abaci, O. (2009). SOM dynamics and erosion in an agricultural test field of the Clear Creek, IA watershed. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6, 1581–1619. <https://doi.org/10.5194/hessd-6-1581-2009>
- Xu, X. Liu, W. & Kiely, G. (2011). Modeling the change in soil organic carbon of grassland in response to climate change: Effects of measured versus modeled carbon pools for initializing the Rothamsted Carbon model. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140, 372–381. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.12.018>
- Zhang, C. Wang, Y. Jia, X. Shao, M. & An, Z. (2020). Impacts of shrub introduction on soil properties and implications for dryland revegetation. *The Science of the total environment*, 742, 140498. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140498>