



Predicting Soil Organic Carbon as Affected by Climate Change Scenarios in the Natural Habitat of *Halocnemum strobilaceum*

Malihe Akbari Bozchaluie¹, Behnaz Attaeian^{2*}, Bijan Azad³

1. Department of Natural Engineering, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: makbari404@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Natural Engineering, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: b.attaeian@malayeru.ac.ir

3. Department of Arid and Mountainous Areas Revitalization, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: bijanazad@ut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: Oct. 25, 2024 Revised: Feb. 21, 2025 Accepted: May. 19, 2025 Published online: Aug. 2025 Keywords: Climate Change, Meighan Kavir, RothC Model, Halocnemum Strobilaceum.	Carbon sequestration is one of the ways to reduce the amount of carbon dioxide in the atmosphere and thereby reduce the negative consequences of climate change. In this research, the initial evaluation of the amount of carbon reserves in <i>Halocnemum strobilaceum</i> habitat in Mighan Arak desert and determining the validity of Rothamsted Carbon Model (RothC) as well as investigating future two climate scenarios (Absence and onset of climate change) in estimating the changes in soil organic carbon stock were done. Sampling was done in the form of random-systematic design using 48 points in the topsoil. To evaluate the efficiency of the model, the coefficient of explanation (R^2), correlation coefficient (r), root mean square error (RMSE) and also the efficiency index of the model implementation (PE) were used. The results showed that the highest and lowest amount of soil organic carbon in the habitats of this plant for each of the above scenarios, respectively, with the values of 19/1687, 20/0824, 20/0802 corresponding to the habitat of this plant in the west of Miqan desert and 9/7525, 10/2211, 10/22 tons per hectare in the south of Meyqan desert. Also, the results showed the reduction of all active carbon reserves, such as the reservoirs of degradable plant material, resistant plant material, microbial biomass, and soil humus organic matter equivalent to 14/167, 16/421, 13/976 and 1/91% respectively. It will decrease compared to the conditions of non-occurrence of climate change. Considering the fragile state of the Miqan desert ecosystem and other playas of Iran, if the economic value (the economic value of each ton of carbon is at least 50 US dollars) and the environmental value of carbon deposition (reducing the effects of global warming, etc.) add to the sum of the benefits and services of these ecosystems is done, the need to protect these ecosystems becomes more obvious.
Cite this article: Akbari Bezcheloi, M., Attaeian, B., & Azad, B. (2025) Predicting Soil Organic Carbon as Affected by Climate Change Scenarios in the Natural Habitat of <i>Halocnemum strobilaceum</i>, <i>Iranian Journal of Soil and Water Research</i>, 56 (6), 1437-1457. https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.384239.669818 © The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press. DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.384239.669818	



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Atmospheric CO₂ mitigation through soil carbon sequestration is an essential strategy for combating climate change, particularly in arid and semi-arid ecosystems where organic inputs are limited. *Halocnemum strobilaceum*, a salt-tolerant halophyte dominating the edges of the Mighan Desert playa (Arak, Iran), may contribute substantially to below-ground carbon storage under saline, water-scarce conditions. This study provides a preliminary quantification of soil organic carbon (SOC) beneath *H. strobilaceum*, evaluates the Rothamsted Carbon Model (RothC-26.3) for this environment, and projects SOC dynamics under two contrasting climate scenarios through 2050. By validating RothC in this context, we aim to establish a robust framework for long-term desert ecosystem carbon monitoring.

Materials and Methods

Field sampling was carried out in summer 2023 using a random-systematic design across four distinct *H. strobilaceum* stands (north, south, east, west) on the Mighan playa. At each of 48 sampling points, topsoil (0–25 cm) cores were collected, bulk density recorded in situ, and samples analyzed for texture (hydrometer), pH and electrical conductivity (1:2.5 soil:water), and organic C via Walkley–Black titration. SOC stocks (t ha⁻¹) were computed from percent C, bulk density, and sampling depth.

The RothC-26.3 model was forced with monthly climate inputs (2005–2022: mean temperature, precipitation, potential evapotranspiration) and estimated plant-residue inputs based on local biomass data. Two future scenarios were defined for 2023–2050:

No-change: continuation of long-term mean climate.

Climate-change: –10.4 % precipitation and +17.7 % temperature relative to baseline (per Koocheki et al., 2007 projections).

Model calibration in inverse mode employed December 2012 SOC observations (n = 24). Performance metrics included coefficient of determination (R²), Pearson's correlation (r), root-mean-square error (RMSE), and model efficiency index (PE). Measured versus simulated SOC time series were compared using Excel and SPSS v21.0.

Results and Discussion

RothC exhibited excellent agreement with field observations: R² = 0.99, r = 0.98, RMSE = 0.32 t ha⁻¹, PE = 0.99, indicating negligible bias and high predictive reliability. Baseline (Dec 2023) SOC stocks ranged from 9.8 t ha⁻¹ in the south stand to 20.1 t ha⁻¹ in the west. Under the no-change scenario, SOC increased modestly by 1.8–2.3 % across all sites by 2050, reflecting steady carbon inputs. Conversely, the climate-change scenario projected SOC declines of 4.6–5.6 %, with the greatest loss in the northern stand (–5.6 %) and the smallest in the eastern stand (–4.6 %) by Dec 2050. Model outputs also forecast a 7–9 % increase in cumulative soil CO₂ efflux under warming and drying, amplifying carbon losses. These divergent trajectories underscore the sensitivity of desert SOC pools to altered precipitation and temperature regimes.

Conclusion

Our findings demonstrate that the RothC-26.3 model is robust for simulating SOC in saline, semi-arid soils and can reliably predict future carbon dynamics under climate change. Projected warming and reduced rainfall may drive a 4–6 % SOC loss and elevated CO₂ emissions by mid-century beneath *H. strobilaceum*. To safeguard this ecosystem service, adaptive management—such as controlled grazing, maintenance of shallow water tables, and halophyte stand conservation—is recommended. Future work should involve the establishment of long-term monitoring stations and experimental plots to refine residue input estimates, validate model projections, and assess the efficacy of management interventions in stabilizing desert SOC stocks.

Author Contributions

Conceptualization, Behnaz Attaeian; Methodology, Behnaz Attaeian and Maliha Akbari Bezcheloi, Bijan Azad; Software and modeling, Bijan Azad, Maliha Akbari Bezcheloi; Validation, Behnaz Attaeian, Bijan Azad; Formal analysis, Maliha Akbari Bezcheloi and Bijan Azad; Investigation, Maliha Akbari Bezcheloi; Data curation, Maliha Akbari Bezcheloi; Writing—original draft preparation, Maliha Akbari Bezcheloi; Writing—review and editing, Behnaz Attaeian; Supervision, Behnaz Attaeian; Project administration, Behnaz Attaeian. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

The raw data generated and analyzed during this study are available from the corresponding author, Behnaz Attaeian, upon reasonable request and pending permission from the co-authors.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the support of Malayer University, which provided facilities and guidance essential for Maliha Akbari Bezcheloi's master's research project.

Ethical Considerations

Not applicable in the study.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

مدل سازی اثر سناریوهای اقلیمی بر موجودی کربن آلی خاک در رویشگاه طبیعی *Halocnemum strobilaceum*

ملیحه اکبری بزچلویی^۱، بهناز عطائیان^{۲*}، بیژن آزاد^۳

۱. گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: makbari404@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: b.attaieian@malayeru.ac.ir

۳. گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: bijanazad@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	ترسب کربن یکی از روش های کاهش مقدار دی اکسید کربن اتمسفر و در نتیجه کاهش پیامدهای منفی تغییرات اقلیمی است. در این تحقیق به ارزیابی اولیه از میزان ذخایر کربن خاک در رویشگاه <i>Halocnemum strobilaceum</i> در کویر میقان اراک و تعیین اعتبار مدل Rothamsted Carbon Model (RothC) و همچنین بررسی دو سناریو اقلیمی آینده (عدم وقوع تغییر اقلیم و وقوع تغییر اقلیم) در برآورد تغییرات موجودی کربن آلی خاک پرداخته شد. نمونه گیری در قالب طرح تصادفی-سیستماتیک با استفاده از ۴۸ نقطه در خاک سطحی انجام گرفت. برای ارزیابی کارایی مدل از ضریب تبیین (R^2)، ضریب همبستگی (r)، میانگین مربعات خطا (RMSE) و همچنین شاخص کارایی اجرای مدل (PE) استفاده شد. نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار موجودی کربن آلی خاک در رویشگاه های این گیاه برای هر یک از سناریوهای فوق، به ترتیب با مقادیر ۱۹/۱۶۸۷، ۲۰/۰۸۲۴، ۲۰/۰۸۰۲ مربوط به رویشگاه این گیاه در غرب کویر میقان و ۹/۷۵۲۵، ۱۰/۲۲۱۱، ۱۰/۲۲ تن بر هکتار در جنوب کویر میقان بود. همچنین نتایج بیانگر کاهش همه ذخایر فعال کربن بود، چنان که مخازن مواد گیاهی تجزیه پذیر، مواد گیاهی مقاوم، زیست توده میکروبی، مواد آلی هوموسی شده خاک به ترتیب معادل ۱۴/۱۶۷، ۱۶/۴۲۱، ۱۳/۹۷۶ و ۱/۹۱ درصد نسبت به شرایط عدم وقوع تغییرات اقلیمی کاهش نشان خواهد داد. با توجه به وضعیت شکننده اکوسیستم کویر میقان و سایر پلایاهای ایران، در صورتی که ارزش اقتصادی (ارزش اقتصادی هر تن کربن حداقل ۵۰ دلار آمریکا) و زیست محیطی ترسب کربن (کاهش تأثیرات گرم شدن زمین و ...) به جمع مزایا و خدمات این اکوسیستم ها افزوده گردد، لزوم حفاظت از این اکوسیستم ها آشکارتر می شود.
واژه های کلیدی: تغییر اقلیم، کویر میقان، مدل روتامستد، باتلاقی شور.	

استناد: اکبری بزچلویی؛ ملیحه، عطائیان؛ بهناز، آزاد؛ بیژن، (۱۴۰۴) مدل سازی اثر سناریوهای اقلیمی بر موجودی کربن آلی خاک در رویشگاه طبیعی *Halocnemum strobilaceum*. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۶)، ۱۴۳۵-۱۴۳۷. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.384239.669818>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.384239.669818>

مقدمه

خاک، یکی از بزرگ‌ترین ذخیره‌گاه‌های کربن آلی در اکوسیستم‌های خاکی است، که نقش مهمی در چرخه جهانی کربن ایفا می‌کند. اقدامات مدیریتی مناسب در اکوسیستم‌های طبیعی می‌تواند به جذب کربن اتمسفری (CO_2) و ذخیره آن در خاک اکوسیستم کمک کند (Malanson & Yadav, 2008). ذخیره کربن آلی خاک بستگی به عوامل گوناگون محیطی همانند اقلیم، فیزیوگرافی و عوامل مدیریتی همانند نوع کاربری و پوشش گیاهی دارد (Rahman et al., 2021). نوع پوشش گیاهی غالب در هر اکوسیستم از جمله عوامل تأثیرگذار بر ذخیره کربن آلی خاک است. تنوع فیزیولوژیکی گونه‌های گیاهی شرایط حرارتی و رطوبتی خاک را تغییر داده و تعیین‌کننده میزان کربن جذب شده و نرخ انتقال آن به خاک می‌باشند و در نتیجه بر تنفس خاک و انتشار کربن به اتمسفر اثر می‌گذارند (Carvalho et al., 2016). فاکتورهای اقلیمی مانند بارندگی و درجه حرارت به‌عنوان محرک‌های اصلی چرخه جهانی کربن اثر قابل ملاحظه‌ای بر دینامیک کربن آلی خاک دارند (Soleimani et al., 2017). بیشتر تحقیقات، تغییر اقلیم و افزایش دما را عامل اصلی افزایش انتشار CO_2 از خاک به اتمسفر و کاهش ذخیره کربن آلی خاک دانسته‌اند (Carvalho et al., 2016). هرچند که تغییر اقلیم همیشه موجب افزایش انتشار دی اکسیدکربن از خاک به اتمسفر نخواهد شد و گاهی اوقات میزان انتشار به‌دلیل مصرف شدن منابع کربن قابل تجزیه و باقی ماندن منابع کربن مقاوم به تجزیه کاهش می‌یابد (Azad et al., 2020). هیئت بین دولتی تغییر اقلیم در گزارش ششم (AR6^1) خود ضمن برآورد افزایش $1/0.9^\circ \text{C}$ میانگین دمای جهانی (۲۰۲۰-۲۰۱۱)، نسبت به افزایش بلایای طبیعی همانند خشکسالی و سیلاب در نتیجه تغییر اقلیم هشدار داده است. با توجه به ضرورت ارزیابی دینامیک کربن آلی خاک در پاسخ به عوامل اقلیمی، مدل‌های زیادی توسعه پیدا کرده‌اند. در میان مدل‌های شبیه‌سازی ماده آلی خاک، مدل RothC بیشترین کاربرد را در ارزیابی اثرات سناریوهای اقلیمی بر موجودی کربن آلی خاک داشته است (Farina et al., 2017). مدل‌های RothC به‌دلیل سادگی و در دسترس بودن داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (Venkatesh et al., 2022). آزادی و افضلی (۱۳۹۸) با ارزیابی کارایی دو مدل کربن RothC و Century در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری‌شده میدانی با استفاده از آماره‌های ضریب همبستگی (r)، ضریب تبیین (R^2)، میانگین مربعات خطا (RMSE)، $\text{RMSE}0.05$ و تفاوت میانگین (MD) دقت مناسب مدل روتامستد را در ارزیابی منابع کربن آلی خاک نشان دادند. Afzali et al., (2019) با اعتبارسنجی مدل RothC در مراتع خشک جنوب ایران به ارزیابی اثر سناریوهای اقلیمی آینده بر موجودی کربن آلی خاک پرداختند و پیش‌بینی کردند با افزایش دما تجزیه مواد آلی و هدر رفت کربن آلی خاک در مراتع جنوب ایران تسریع می‌گردد. Venkatesh et al., (2022) استفاده از مدل RothC اثر کاربری بر کربن آلی خاک را تحت تأثیر تغییر اقلیم در ایالت گوا، هند مورد ارزیابی قرار دادند. در مقایسه با مدل RothC ، مدل‌هایی مانند DNDC و CENTURY ، جزئیات دقیق‌تری از چرخه کربن را برآورد می‌کنند اما بهای این دقت، افزایش پیچیدگی و نیازهای داده‌ای مدل است (Wiltshire et al., 2023). عملکرد مناسب مدل RothC تحت مدیریت‌ها و اقلیم‌های مختلف در مطالعات مختلف مورد تأیید قرار گرفته است (Jebari et al., 2021). با استفاده از مدل RothC ، محققان و مدیران می‌توانند پتانسیل ترسیب کربن در مراتع تحت شیوه‌های مختلف مدیریتی و سناریوهای اقلیمی ارزیابی کنند و راهکارهایی را برای کاهش اثرات تغییر اقلیم و بهبود سلامت خاک ارائه دهند.

در این میان گیاهان هالوفیت به‌دلیل تحمل به نمک و شرایط محیطی سخت، دارای ظرفیت قابل توجهی برای تبدیل به محصولات سازگار با خاک‌های شور هستند. در حالی که مزایای اقتصادی و اکولوژیکی آن در مناطق کویری و بیابانی آنها مورد توجه قرار گرفته است، غالباً، نقش هالوفیت‌ها در موضوعات مختلف مربوط به تغییرات آب و هوایی نادیده گرفته شده است. این گیاهان علاوه بر این که منابع خوبی از مواد غذایی و علوفه هستند، می‌توانند با افزایش ورودی کربن به زی‌توده یا خاک، کاهش انتشار کربن از طریق تنفس یا تجزیه، یا تغییر الگوهای تخصیص کربن در بین اندام‌ها یا بخش‌های مختلف گیاه، جذب کربن را افزایش دهند (Hammed et al., 2024). تحقیقات نشان داده است که گیاهان شورپسند قابلیت ذخیره کربن آلی به‌میزان متوسط ۳ الی ۷ تن در هکتار در سطح جهانی را دارند (Glenn et al., 1992)، بنابراین ارزیابی این گونه‌ها حائز اهمیت است. گونه گیاهی باتلاقی شور با نام علمی *Halocnemum strobilaceum* از خانواده اسفناجیان از گونه‌های غالب بوته‌ای و گوشتی، در شوره‌زارهای مرطوب ناحیه ایران - تورانی و صحرا - سندی و رویشگاه‌هایی است که سطح آب زیرزمینی بالایی دارند (Hosseini et al., 2007). این گونه دارای سازگاری‌های فیزیولوژیکی و اکولوژیکی منحصر به فردی است (مظفریان و همکاران، ۱۳۹۷) و می‌تواند به ذخیره کربن در شرایط سخت محیطی کمک کند. این درختچه

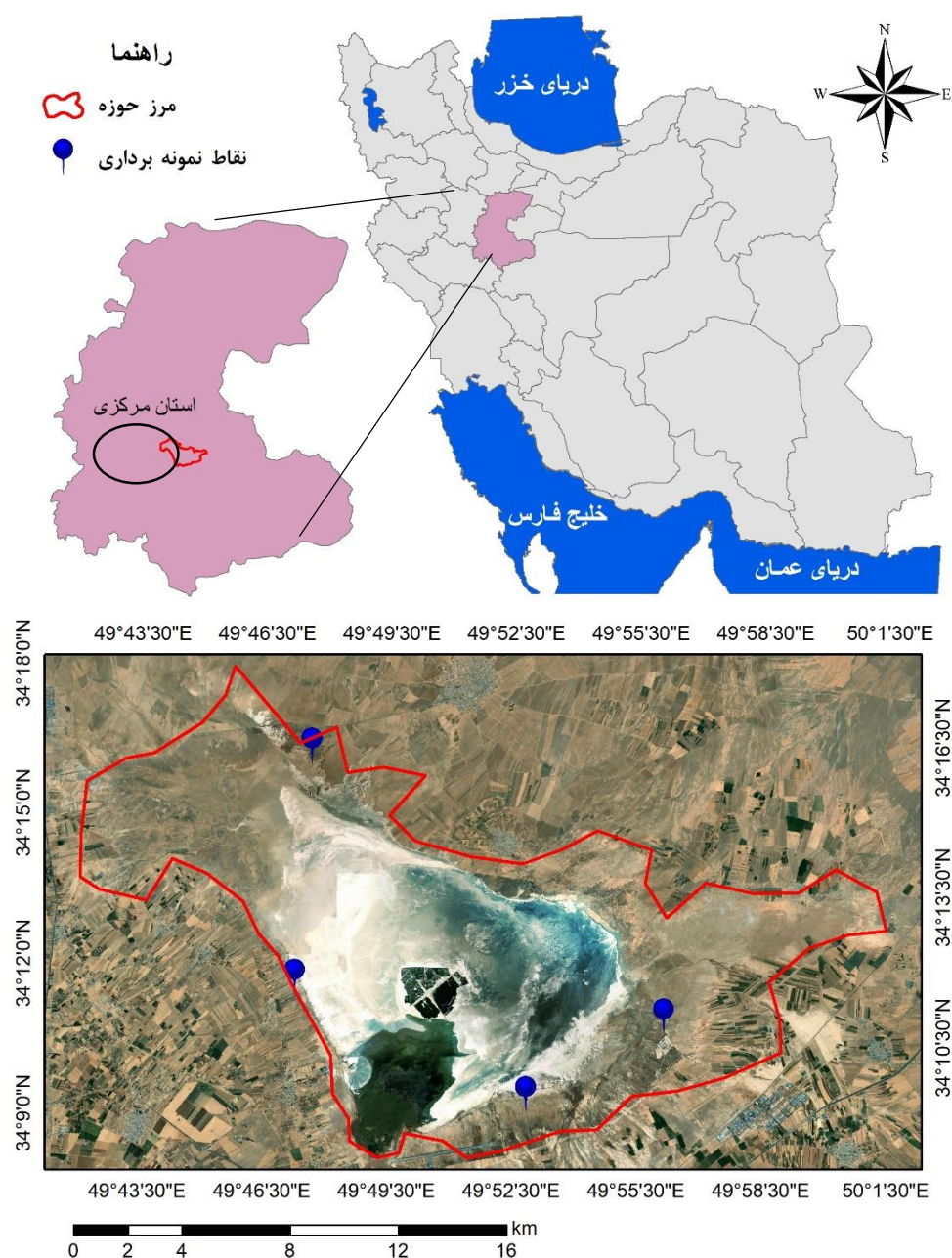
شورپسند که عمدتاً در زیستگاه‌های شور مانند باتلاق‌های نمکی و اکوسیستم‌های کویری یافت می‌شود، قادر به ذخیره مقادیر قابل توجهی کربن هم در سطح زمین در زیست توده گیاهی و هم در زیر زمین در مواد آلی خاک است (Marasco et al., 2016). پتانسیل ترسیب کربن در اندام هوایی *H. strobilaceum* بیشتر از اندام زیرزمینی آن است و نتایج نشان داده است که برگ‌های این گیاه در مقایسه با سایر اندام‌های گیاهی دارای ظرفیت ترسیب کربن بالاتری هستند (Taati et al., 2019). هرچند در مطالعه دیگری که در مراتع استان گلستان انجام شد، پژوهشگر میزان ذخیره کربن آلی گیاه باتلاقی شور را وابسته به عوامل متعددی از جمله چرای دام و نوع اکوسیستم دانست (حسینی و همکاران، ۲۰۰۷). حذف چرای دام و مدیریت قرق منجر به افزایش ذخیره کربن آلی این گونه گیاهی و گونه‌های همراه آن مانند *Halostachys caspica* در مراتع گمیشان، استان گلستان شده است (فروزه، ۱۳۸۹). تجزیه و تحلیل محیط سیستم ریشه گیاه و ترکیب غیر آلی و آلی خاک رویشگاه‌های گونه گیاهی باتلاقی شور نشان داد که رشد و توسعه این گیاه به شدت عوامل تنش‌زای محیط وابسته است (Jurakulov et al., 2023). به همین دلیل، بررسی توانایی ترسیب کربن و تغییرات آن در رویشگاه‌های گونه *H. strobilaceum* ضروری به نظر می‌رسد. یکی از رویشگاه‌های مهم این گونه گیاهی، کویر میقان در استان مرکزی است که تاکنون مطالعات اندکی در خصوص میزان ترسیب کربن آلی خاک در این رویشگاه این گونه گیاهی صورت پذیرفته است و تاکنون هیچ مطالعه‌ای به ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر میزان موجودی کربن آلی خاک و میزان انتشار دی‌اکسید کربن از خاک زیر آشکوب این گونه گیاهی به ویژه در مفهوم مدل‌سازی نپرداخته است. لذا مطالعه فعلی اولین تلاش برای مدل‌سازی اثر سناریوهای آبی اقلیمی بر ذخیره کربن آلی خاک رویشگاه *Halocnemum strobilaceum* در کویر میقان است.

مواد و روش‌ها

کویر میقان با مساحتی بالغ بر ۲۸۰۰۰ هکتار در فاصله ۱۵ کیلومتری شمال‌شرق شهرستان اراک و در موقعیت جغرافیایی $34^{\circ}09'$ تا $34^{\circ}16'$ عرض شمالی و $49^{\circ}45'$ تا $49^{\circ}55'$ طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). دریاچه فصلی کویر میقان با مساحتی بالغ بر ۱۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ هکتار مربوط به دوره کواترنر بوده و مانند سایر کویرها عارضه مناطق خشک است که به واسطه وضعیت خاص ژئومورفولوژیکی منطقه به وجود آمده است. این منطقه در پست‌ترین نقطه حوضه آبخیز اراک با ارتفاع ۱۶۵۰ متر از سطح دریا قرار گرفته و آب‌های این حوضه آبخیز را در خود جمع می‌کند (عالایی طالقانی، ۱۳۸۸). بر اساس اطلاعات ایستگاه هواشناسی سینوپتیک اراک به‌عنوان ایستگاه مبنا که در فاصله ۵ کیلومتری کویر میقان واقع گردیده متوسط رطوبت نسبی منطقه ۴۵/۶ درصد، تعداد روزهای خشک منطقه ۱۸۶ روز و دوره خشکی منطقه از اواخر اردیبهشت تا اواخر مهر ماه می‌باشد (اداره هواشناسی استان مرکزی، ۱۴۰۳). با مد نظر قرار دادن میانگین بلندمدت بارندگی منطقه بر اساس ایستگاه سینوپتیک اراک در سال ۱۳۸۴ و ۱۴۰۳، به‌ترتیب برابر ۳۷۷/۶ (خالدی، ۱۳۸۵) و ۳۰۷/۶ میلی متر (اداره کل هواشناسی استان مرکزی، ۱۴۰۳) و آمار متوسط بارندگی همان ایستگاه در سال نمونه‌برداری (۱۴۰۲) معادل ۲۹۹/۱۸ (اداره کل هواشناسی استان مرکزی، ۱۴۰۲) روند کاهشی بارش در منطقه قابل مشاهده است. اقلیم شهر اراک بر اساس تقسیم‌بندی دومارتن نیمه خشک و براساس طبقه‌بندی آمبروزه خشک و سرد است (اداره کل هواشناسی استان مرکزی، ۱۴۰۳).

روش نمونه‌برداری میدانی

تیپ *H. strobilaceum* در کویر میقان دارای گونه‌های همراه اندکی است. در دهه ۵۰، گیاه *Salicornia europaea* به‌صورت نوار باریکی در حاشیه غربی دریاچه فصلی کویر میقان همراه با *H. strobilaceum* مشاهده می‌شد (میرداودی، ۱۳۷۶). امروزه به‌دلیل تغییرات اقلیمی و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در این منطقه، اثری از این گیاه در این ناحیه دیده نمی‌شود. بر همین اساس و با توجه به مطالعات پیشین، تیپ گونه *H. strobilaceum* در چهار بخش شمال، جنوب، غرب و شرق کویر میقان شناسایی شد. محل نقاط نمونه‌برداری خاک نزدیک به نقاط نمونه‌برداری در آذر ماه سال ۱۳۹۱ (اکبری، ۱۳۹۱) انتخاب گردید، از آنجا که موقعیت جغرافیایی (مختصات utm برداشتی توسط GPS) نقاط نمونه‌گیری سال‌های پیش موجود بودند، در کاوش میدانی بازبایی و نمونه‌گیری مجدد از این محل‌ها انجام شد. نمونه برداری خاک در تابستان سال ۱۴۰۲ از عمق ۰-۲۵ سانتی‌متری انجام شد. سپس نمونه‌ها در کیسه‌های نمونه‌گیری قرار گرفته و پس از کدگذاری جهت تجزیه و اندازه‌گیری کربن آلی خاک به آزمایشگاه مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی منتقل گردید. در مطالعه حاضر از هر یک از این چهار سایت تعداد ۱۲ نمونه خاک (در مجموع ۴۸ نمونه) نزدیک بر نقاط نمونه‌گیری تصادفی در مطالعات گذشته، انتخاب شد. جهت مطالعه خصوصیات خاک شامل کربن آلی (OC)، هدایت الکتریکی (EC)، اسیدیته (pH)، وزن مخصوص ظاهری (Bd) برداشت شد. لازم به‌ذکر است که از داده‌های برداشت شده در سال ۱۳۹۱ برای کالیبراسیون استفاده شده است (اکبری، ۱۳۹۱).



شکل ۱. موقعیت چهار بخش نمونه‌برداری و حوزه کویر میقان در ایران، استان مرکزی و شهرستان اراک

تجزیه‌های آزمایشگاهی

برای تجزیه خاک، ابتدا نمونه‌های خاک در هوای آزاد خشک گردید و بعد از خرد نمودن کلوخه‌ها و جدا نمودن ریشه‌ها سنگ و سایر ناخالصی‌ها، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد و مقدار سنگ و سنگریزه آن‌ها توزین و به درصد محاسبه گردید. بعد از این که عمل آماده‌سازی بر روی نمونه‌های خاک صورت گرفت (Pauwels و همکاران، ۱۹۹۲)، تجزیه فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها با استفاده از روش‌های استاندارد آزمایشگاهی انجام شد. بافت خاک به روش هیدرومتر اندازه‌گیری شد (Bouyoucos, ۱۹۶۲). برای تعیین وزن مخصوص ظاهری خاک، نمونه‌های خاک که با سیلندر با حجم مشخص نمونه‌گیری شده را در آون ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک نموده و سپس وزن نمونه خشک بر حجم نمونه‌ها تقسیم گردید (Hartg & Blake, 1986). درصد ماده آلی خاک از طریق روش والکلی - بلک (Black & Walkley, 1934) تعیین شد. سپس با تقسیم کردن درصد ماده آلی خاک بر ۱/۷۲۴، درصد کربن آلی خاک به دست آمد. برای تعیین اسیدیته خاک پس از تهیه محلول عصاره اشباع به روش پتانسیومتری و با استفاده از دستگاه pH متر الکترونیکی اسیدیته



اندازه‌گیری شد (Pauwels et al., 1992). برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی خاک پس از تهیه محلول عصاره اشباع، از دستگاه EC متر دیجیتالی استفاده گردید (Pauwels et al., 1992). در نهایت با استفاده از رابطه (۱)، میزان موجودی کربن آلی خاک بر حسب تن بر هکتار محاسبه شد (Tadiello et al., 2022 ; Betany & Eller, 1995):

$$SOC = \%OC * Bd * e * 10$$

رابطه (۱)

که در آن:

SOC: کربن آلی خاک (Ton/ha)

OC: کربن آلی (%)

Bd: وزن مخصوص ظاهری خاک (gr/cm^3)

e: عمق نمونه‌برداری (cm)

مدل RothC (ورود و خروج کربن خاک) یک مدل محاسباتی برای شبیه‌سازی کربن آلی خاک است که به تجزیه و تحلیل فرآیندهای مختلف کربن در خاک کمک می‌کند (فلاحی و همکاران، ۱۳۹۲؛ شهسواری و همکاران، ۱۴۰۱). ورودی‌های اصلی این مدل شامل: دما: دمای خاک تأثیر زیادی بر سرعت تجزیه کربن آلی در خاک دارد. این پارامتر معمولاً به صورت میانگین دمای سالانه خاک وارد مدل می‌شود.

- رطوبت: میزان رطوبت خاک تأثیر مستقیم بر فعالیت میکروبی و تجزیه مواد آلی دارد. رطوبت به‌عنوان یک عامل محدودکننده می‌تواند سرعت تجزیه را تحت تأثیر قرار دهد.

- مقدار کربن آلی ورودی: میزان ورودی کربن آلی از طریق مواد گیاهی (مانند بقایای گیاهی، برگ‌ها و ریشه‌ها) به خاک وارد می‌شود.

- ترکیب کربن آلی ورودی: که شامل انواع مختلف کربن آلی است که وارد خاک می‌شود مانند مواد آلی با منشأ گیاهی یا حیوانی که سرعت تجزیه آن‌ها متفاوت است.

- خصوصیات خاک: خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مانند بافت خاک (شن، رس، سیلت)، pH خاک و مواد معدنی نیز می‌توانند بر فرآیندهای تجزیه کربن تأثیر بگذارند.

- فعالیت میکروبی: فعالیت میکروبی در خاک که تأثیر زیادی بر تجزیه مواد آلی و تولید کربن گاز دی‌اکسید کربن دارد. پس از ورود داده‌ها به مدل، به منظور دستیابی به تخمینی از مقادیر بخش‌های مختلف کربن آلی خاک، مدل RothC مقادیر این پارامترها را از مقادیر موجود کربن آلی خاک شبیه‌سازی کرده و در خروجی‌های مدل تغییرات مواد آلی در منابع مختلف را که به پنج جز اساسی، ماده آلی خنثی (IOM^1)، ماده گیاهی قابل تجزیه (DPM^2)، ماده گیاهی مقاوم به تجزیه (RPM^3)، زیست توده میکروبی (BIO^4)، و مواد آلی هوموسی شده (HUM^5) تقسیم می‌شود را نشان می‌دهد. دو جزء (DPM) و (RPM) مربوط به تجزیه بقایای گیاهی بوده و دو جز (HUM) و (BIO) مربوط به تجزیه مواد آلی خاک است (Nemoto, 2010).

اعتبارسنجی^۶ مدل روتامستد (Roth C)

جهت اعتبارسنجی مدل داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، از پارامترهای آماری R^2 ، $RMSE^7$ ، MD و PE^8 استفاده شد (باقری‌فام و همکاران، ۱۴۰۱) (روابط ۲ تا ۴).

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{O}) (O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

رابطه (۲)

^۱ Inert Organic Matter

^۲ Decomposable Plant Material

^۳ Resistant Plant Material

^۴ Microbial Biomass

^۵ Humified Organic Matter

^۶ Validation

^۷ Root Mean Square Error

^۸ Performance Efficiency

$$RMSE = \frac{100}{\bar{O}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$PE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه ۴}$$

O_i : مشاهده شده،

P_i : شبیه سازی شده،

$\bar{O}$: میانگین مشاهده شده‌ها،

SE_i : انحراف معیار مشاهده شده،

$tm_{0.95}$: تی استیودنت جدول برای درجه آزادی $n-2$ و

n : تعداد مشاهدات می باشد

پیش بینی موجودی کربن آلی خاک تحت سناریوهای اقلیمی

بر مبنای پیش بینی های ارائه شده براساس مدل گردش عمومی جو در مطالعه کوچکی و همکاران (۱۳۸۶) که دو سناریو اقلیمی جهت ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر موجودی کربن آلی خاک و انتشار دی اکسید کربن از خاک پایه گذاری شد. سناریو اول یا سناریو بدون تغییر اقلیم شامل ادامه روند شرایط اقلیمی بلندمدت برای دوره ۲۰۲۳ تا ۲۰۵۰ می باشد که در حقیقت میانگین بلندمدت بارش و دما در ایستگاه هواشناسی اراک است و سناریو دوم شامل سناریو تغییر اقلیم با کاهش ۱۰/۴۴ درصدی بارش و افزایش ۱۷/۶۶ درصدی دما نسبت به میانگین بلندمدت منطقه برای دوره ۲۰۲۳ تا ۲۰۵۰ بود. داده های ورودی مدل Roth، شامل اطلاعات خاک، اطلاعات مدیریت زمین و همچنین اطلاعات اقلیمی است. اطلاعات خاک شامل درصد رس خاک، عمق خاک، میزان موجودی کربن آلی ابتدایی خاک؛ اطلاعات مدیریت زمین شامل نوع کاربری، وضعیت پوشش گیاهی، مقدار بقایای گیاهی وارد شده به خاک، فاکتور کیفیت بقایای گیاهی و اطلاعات اقلیمی شامل متوسط دمای ماهانه، مجموع بارش ماهانه و مجموع تبخیر از هوای آزاد ماهانه می باشند. از طریق دو فایل هواشناسی و مدیریت زمین تمامی اطلاعات و داده های ذکر شده به مدل روتامستد وارد می شوند. ایجاد یک فایل ورودی آب و هوا برای هر سایت نمونه برداری مورد نیاز است (آزاد و افضل، ۱۳۹۷).

تجزیه و تحلیل داده ها

برای مقایسه بین مقادیر موجودی کربن آلی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده توسط مدل RothC-26.3 و تجزیه و تحلیل آماری میزان موجودی کربن در چهار سایت از رویشگاه *H. strobilaceum* در حاشیه کویر میقان از نرم افزارهای آماری SPSS v21.0, Excel استفاده شد. برای بررسی معنی داری بین موجودی کربن آلی خاک و انتشار دی اکسید کربن آلی خاک در سناریوهای اقلیمی از آزمون تی استیودنت نمونه های مستقل استفاده گردید.

نتایج و بحث

واسنجی مدل RothC

برای واسنجی مدل RothC از داده های حاصل از مطالعات قبلی که مقدار کل کربن آلی خاک را در دسامبر ۲۰۱۲ در چهار رویشگاه *H. strobilaceum* در بخش شمالی، جنوبی، شرقی و غربی کویر میقان (مجموعاً ۲۴ داده) اندازه گیری نموده بودند (اکبری، ۱۳۹۱) استفاده گردید. برای واسنجی مدل، مدل RothC به طور مکرر اجرا شد و خروجی های مدل در هر اجرا بازدید شده و کربن ورودی گیاهی مکرر تصحیح شد تا مقدار ذخیره کربن آلی خاک اندازه گیری شده با مقدار ذخیره کربن آلی خاک شبیه سازی شده در رویشگاه های *H. strobilaceum* در کویر میقان در سال ۲۰۱۲ (دسامبر ۲۰۱۲ میلادی) برابر گردد. با توجه به اینکه درصد تغییرات بین مقادیر مدل سازی شده و اندازه گیری شده پایین می باشد نتایج نشان دهنده تطابق مناسبی بین موجودی کربن آلی خاک مدل سازی و اندازه گیری شده در دسامبر ۲۰۱۲ می باشد. جدول ۱ که بیانگر واسنجی مناسب مدل می باشد.

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

رابطه ۵)

جدول ۱. داده‌های ورودی رویشگاه‌های *H. Strobilaceum* در کویر میقان (دسامبر ۲۰۱۲، برابر آذر ماه ۱۳۹۱)

Deviation (%) ^c	Modeled SOC stock (Mg C ha ⁻¹) ^b	Measured SOC stock (Mg C ha ⁻¹)	DPM/RPM ^a	Modeled soil C inputs (Mg C ha ⁻¹)	Clay (%)	رویشگاه
-۰/۱۵۰۹۷	۱۲/۱۶۹۱	۱۲/۱۸۷۵	۰/۶۷	۰/۲۸۵۹	۳۶/۶۳	شمال
۰/۱۹۶۰۷۸	۱۰/۲۲	۱۰/۲	۰/۶۷	۰/۲۳۸۸	۳۹/۹۳	جنوب
-۰/۰۹۵۰۲	۲۰/۰۸۰۹	۲۰/۱	۰/۶۷	۰/۴۶۷	۳۸/۶۷	غرب
۰/۱۷۰۹۴۲	۱۳/۷۴۸۴	۱۳/۷۲۵	۰/۳۷	۰/۳۲۰۴	۳۹/۶۷	شرق

^a) Decomposable Plant Material/Resistant Plant Material.

^b) Model run to the equilibrium in "inverse mode".

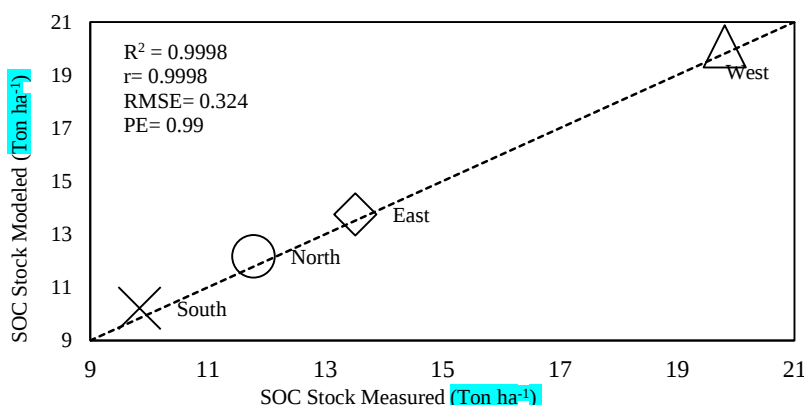
^c) Deviation (%) calculated as $[100 \times (\text{modeled} - \text{measured}) / \text{measured}]$.

ارزیابی کارایی مدل RothC

در این مطالعه برای ارزیابی کارایی مدل‌ها مقادیر ذخیره کربن آلی خاک شبیه‌سازی شده توسط مدل RothC با داده‌های اندازه‌گیری شده تحقیق حاضر در سال ۱۴۰۲ (دسامبر ۲۰۲۳) بر مبنای تجزیه آماری مقایسه شدند (جدول ۲). شاخص‌ها و آزمون‌های آماری استفاده شده در این مطالعه برای ارزیابی کارایی مدل شامل ضریب تبیین (R^2)، ضریب همبستگی (r)، میانگین مربعات خطا (RMSE) و همچنین شاخص کارایی اجرای مدل (PE) بودند. کمترین ارزش RMSE صفر هست که نشان دهنده عدم تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی شده است. همچنین حداکثر مقدار شاخص PE برابر با ۱ بوده و هرچه این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد به معنای حداکثر برازش است. ضریب همبستگی (r) بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل RothC بزرگتر از صفر و برابر ۰/۹۹ بود. ضریب همبستگی (r) بیانگر درجه‌ای از ارتباط بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده می‌باشد که در مطالعه حاضر نشان دهنده همبستگی مثبت بین ذخیره کربن آلی خاک شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بود (جدول ۳). همچنین ضریب تبیین (R^2)، بین موجودی کربن آلی خاک اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی شده برابر ۰/۹۹ بود (جدول ۳) که نشان دهنده یک رابطه خطی معنی‌دار بین ذخیره کربن آلی اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی شده توسط مدل است. شاخص RMSE که نشان‌دهنده تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ۰/۳۲۴ بود که بسیار پایین می‌باشد و بیانگر خطای پایین بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده است. همچنین موجودی کربن آلی خاک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط هر مدل RothC به طور مناسبی در نزدیکی خط ۱:۱ پراکنش داشتند که بیانگر توانایی این مدل در برآورد دقیق موجودی کربن آلی خاک در رویشگاه‌های *H. Strobilaceum* کویر میقان است (شکل ۲).

جدول ۲. موجودی کربن آلی خاک اندازه‌گیری شده در رویشگاه‌های مختلف *H. Strobilaceum*.

موقعیت مکانی رویشگاه	موجودی کربن آلی خاک (تن در هکتار)
شمال	$11/78 \pm 1/03^{bc}$
جنوب	$9/84 \pm 1/04^c$
غرب	$19/81 \pm 1/54^a$
شرق	$13/52 \pm 1/01^b$



شکل ۲. موجودی کربن آلی خاک اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی شده توسط مدل RothC در مقایسه با خط ۱ به ۱ در رویشگاه‌های *H. Strobilaceum* در کویر میقان.

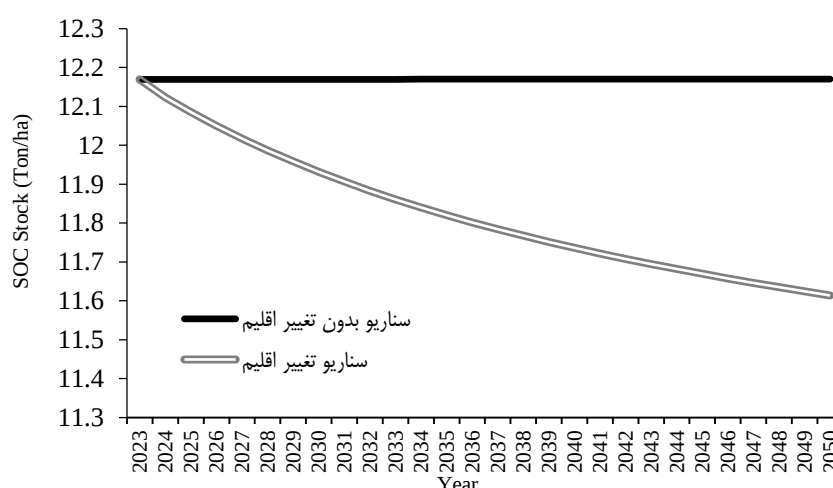
ارزیابی کارایی مدل RothC با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده حاصل از مطالعه حاضر بر مبنای تجزیه‌های آماری انجام شد. نتایج آزمون‌های آماری استفاده شده برای ارزیابی شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط هر مدل RothC در رویشگاه‌های *H. strobilaceum* کویر میقان نشان داده شده است. شاخص کارایی مدل نیز ۰/۹۹ بود که نشان‌دهنده کارایی بالای مدل در برآورد موجودی کربن آلی خاک در رویشگاه‌های گیاه مورد مطالعه در کویر میقان می‌باشد (جدول ۳).

جدول ۳. شاخص‌های آماری مربوط به اعتبارسنجی مدل‌های RothC در رویشگاه‌های *H. strobilaceum*

آزمون‌های آماری	RothC	برآزش کامل ^a
R ²	۰/۹۹	۱
R	۰/۹۹	۱
RMSE	۰/۳۳۴	۰
PE	۰/۹۹	۱

a: بیانگر بهترین حالت در اعتبارسنجی مدل‌ها می‌باشد.

شبیه‌سازی اثر سناریوهای اقلیمی بر موجودی کربن آلی خاک در شمال کویر میقان
نتایج شبیه‌سازی مدل RothC در رویشگاه *H. strobilaceum* در شمال کویر میقان نشان داد که موجودی کربن آلی خاک در سناریو تغییر اقلیم نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم روند کاهشی خواهد داشت (شکل ۳) و میزان این کاهش به طور میانگین ۴/۵۶۲ درصد خواهد بود (جدول ۴).



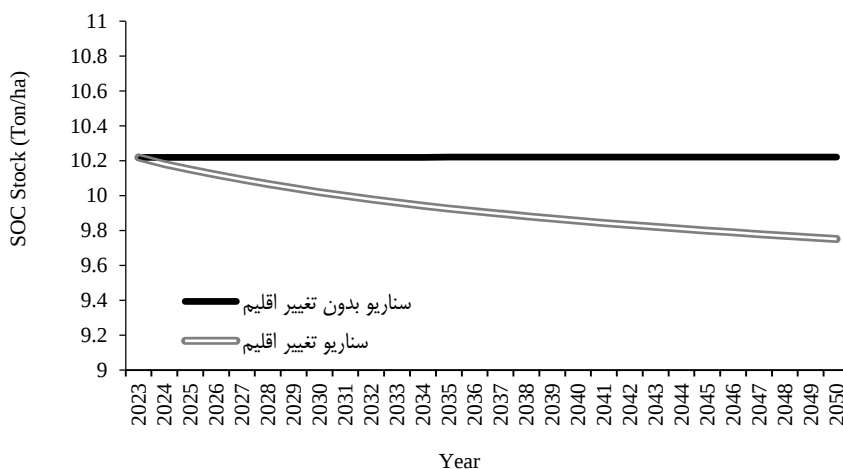
شکل ۳. موجودی کربن خاک در دو سناریوی بدون تغییر اقلیم و با تغییر اقلیم در شمال

جدول ۴. موجودی کربن خاک در سال مورد مطالعه (۱۴۰۲) و در دو سناریوی بدون تغییر اقلیم و با تغییر اقلیم در شمال

در دسامبر ۲۰۲۳ (تن بر هکتار)	در دسامبر ۲۰۵۰ سناریو بدون تغییر اقلیم (تن بر هکتار)	در دسامبر ۲۰۵۰ سناریو تغییر اقلیم (تن بر هکتار)
۱۲/۱۶۹۱	۱۲/۱۷۰۴	۱۱/۶۱۳۹
موجودی کربن	۰/۱۰۶	- ۴/۵۶۲
میزان تغییرات نسبت به دسامبر ۲۰۲۳ (درصد)	- ۴/۵۶۲	
میزان تغییرات موجودی کربن در سناریو تغییر اقلیم نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم (درصد)		

شبیه‌سازی اثر سناریوهای اقلیمی بر موجودی کربن آلی خاک در جنوب کویر میقان
شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط مدل RothC در رویشگاه‌های جنوب کویر میقان اراک نشان داد که موجودی کربن در دسامبر ۲۰۲۳ (دی ماه ۱۴۰۲ شمسی)، دسامبر ۲۰۵۰ (دی ماه ۱۴۲۹ شمسی) در سناریو بدون تغییر اقلیم و دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو تغییر اقلیم در

رویشگاه‌های این گیاه در جنول کویر میقان به ترتیب ۱۰/۲۲، ۱۰/۲۲۱۱ و ۹/۷۵۲۵ تن بر هکتار برآورد گردید (شکل ۴ و جدول ۵).



شکل ۴. موجودی کربن خاک در دو سناریوی بدون تغییر اقلیم و با تغییر اقلیم در جنوب کویر میقان

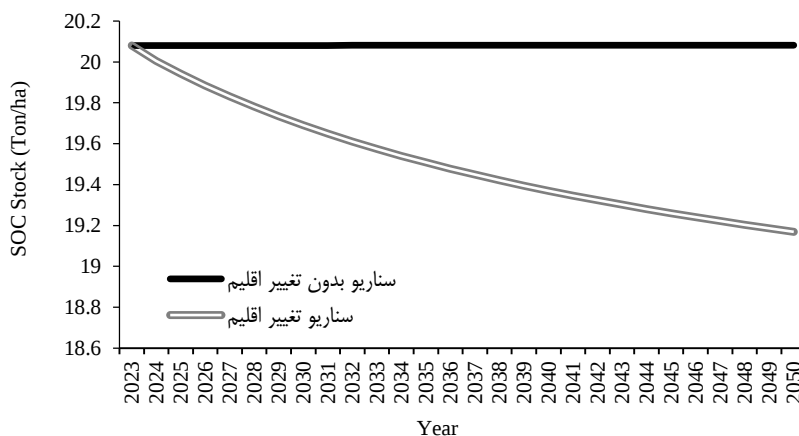
جدول ۵. موجودی کربن خاک در سال مورد مطالعه (۱۴۰۲) و در دو سناریوی بدون تغییر اقلیم و با تغییر اقلیم در جنوب

در دسامبر ۲۰۲۳ (تن بر هکتار)	در دسامبر ۲۰۵۰ سناریو بدون تغییر اقلیم (تن بر هکتار)	در دسامبر ۲۰۵۰ سناریو تغییر اقلیم (تن بر هکتار)
۱۰/۲۲	۱۰/۲۲۱۱	۹/۷۵۲۵
-	۰/۱۰۷	- ۴/۵۷۴
موجودی کربن		
میزان تغییرات نسبت به دسامبر ۲۰۲۳ (درصد)		
میزان تغییرات موجودی کربن در سناریو تغییر اقلیم نسبت به		
سناریو بدون تغییر اقلیم (درصد)		
- ۴/۵۸۴		

همانطور که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود میزان کربن موجود خاک در رویشگاه گیاه *H. strobilaceum* در جنوب کویر میقان، در سناریو تغییر اقلیم نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم به میزان ۰/۴۶۸۶ تن بر هکتار (معادل ۴/۵۸۴ درصد)، کاهش نشان خواهد داد.

شبیه‌سازی اثر سناریوهای اقلیمی بر موجودی کربن آلی خاک در غرب کویر میقان

شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط مدل RothC در رویشگاه‌های غرب کویر میقان اراک نشان داد که موجودی کربن در دسامبر ۲۰۲۳ (دی ماه ۱۴۰۲ شمسی)، دسامبر ۲۰۵۰ (دی ماه ۱۴۲۹ شمسی) در سناریو بدون تغییر اقلیم و دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو تغییر اقلیم در رویشگاه‌های این گیاه در غرب کویر میقان به ترتیب ۲۰/۰۸۰۲، ۲۰/۰۸۲۴ و ۱۹/۱۶۸۷ تن بر هکتار برآورد گردید (شکل ۵ و جدول ۶).



شکل ۵. موجودی کربن خاک در دو سناریوی بدون تغییر اقلیم و با تغییر اقلیم در غرب کویر میقان

جدول ۶. موجودی کربن خاک در سال مورد مطالعه (۱۴۰۲) و در دو سناریوی بدون تغییر اقلیم و با تغییر اقلیم در غرب

در دسامبر ۲۰۲۳ (تن بر هکتار)	در دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو بدون تغییر اقلیم (تن بر هکتار)	در دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو تغییر اقلیم (تن بر هکتار)
۲۰/۰۸۰۲	۲۰/۰۸۲۴	۱۹/۱۶۸۷
-	۰/۰۱۰۹	- ۴/۵۳۹
موجودی کربن		
میزان تغییرات نسبت به دسامبر ۲۰۲۳ (درصد)		
میزان تغییرات موجودی کربن در سناریو تغییر اقلیم نسبت		
به سناریو بدون تغییر اقلیم (درصد)		
- ۴/۵۴۹۷		

همان طور که در جدول ۶ ملاحظه می شود میزان کربن موجود خاک در رویشگاه گیاه *H. strobilaceum* در غرب کویر میقان، در سناریو تغییر اقلیم نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم به میزان ۰/۹۱۳۷ تن بر هکتار (معادل ۴/۵۴۹۷ درصد)، کاهش نشان خواهد داد.

شبیه سازی اثر سناریوهای اقلیمی بر موجودی کربن آلی خاک در شرق کویر میقان

شبیه سازی های انجام شده توسط مدل RothC در رویشگاه های شرق کویر میقان اراک نشان داد که موجودی کربن در دسامبر ۲۰۲۳ (دی ماه ۱۴۰۲ شمسی)، دسامبر ۲۰۵۰ (دی ماه ۱۴۲۹ شمسی) در سناریو بدون تغییر اقلیم و دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو تغییر اقلیم در رویشگاه های این گیاه در شرق کویر میقان به ترتیب ۱۳/۷۴۷۶، ۱۳/۷۴۹۱ و ۱۳/۱۲۰۸ تن بر هکتار برآورد گردید (شکل ۵ و جدول ۷).



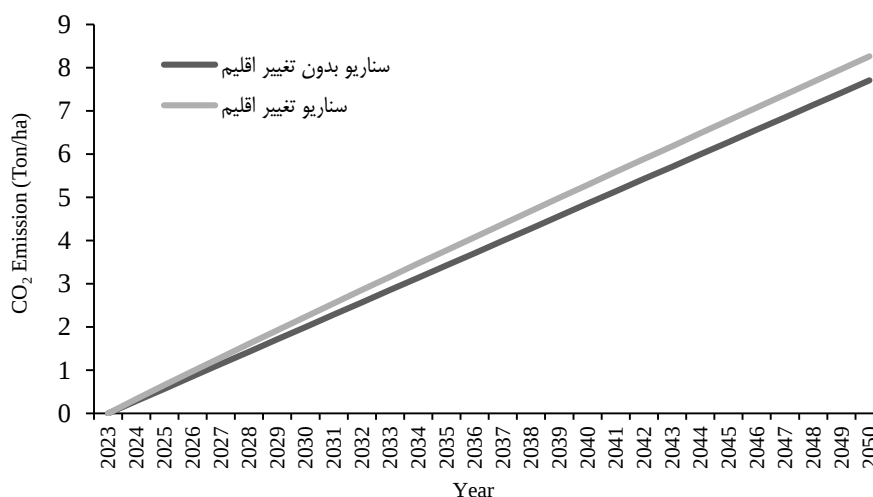
شکل ۶. موجودی کربن خاک در دو سناریوی بدون تغییر اقلیم و با تغییر اقلیم در شرق کویر میقان

جدول ۷. موجودی کربن خاک در سال مورد مطالعه (۱۴۰۲) و در دو سناریوی بدون تغییر اقلیم و با تغییر اقلیم در شرق

در دسامبر ۲۰۲۳ (تن بر هکتار)	در دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو بدون تغییر اقلیم (تن بر هکتار)	در دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو تغییر اقلیم (تن بر هکتار)
۱۳/۷۴۷۶	۱۳/۷۴۹۱	۱۳/۱۲۰۸
-	۰/۰۱۰	- ۴/۵۵۹۳
موجودی کربن		
میزان تغییرات نسبت به دسامبر ۲۰۲۳ (درصد)		
میزان تغییرات موجودی کربن در سناریو تغییر اقلیم		
نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم (درصد)		
- ۴/۵۶۹		

همانطور که در جدول ۷ ملاحظه می شود میزان کربن موجود خاک در شرق کویر میقان، در سناریو تغییر اقلیم نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم به میزان ۰/۶۲۸۳ تن بر هکتار (معادل ۴/۵۶۹۷ درصد)، کاهش نشان خواهد داد. با توجه به برآوردهای صورت گرفته، بیشترین مقدار موجودی کربن آلی خاک در رویشگاه های این گیاه برای هر یک از سناریوهای فوق، در دسامبر ۲۰۲۳، دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو بدون تغییر اقلیم و موجودی کربن دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو تغییر اقلیم به ترتیب با مقادیر ۲۰/۰۸۰۲، ۲۰/۰۸۲۴ و ۱۹/۱۶۸۷ تن بر هکتار مربوط به رویشگاه این گیاه در غرب کویر میقان و کمترین مقدار موجودی کربن آلی خاک در رویشگاه های این گیاه برای هر یک از سناریوهای فوق ۱۰/۲۲، ۹/۷۵۲۵ و ۱۰/۲۲۱۱ تن بر هکتار در جنوب کویر میقان بود.

شبیه‌سازی اثر سناریوهای اقلیمی بر میزان انتشار دی اکسیدکربن از خاک به اتمسفر در شمال کویر میقان
شبیه‌سازی اثر سناریوهای اقلیمی بر میزان انتشار دی اکسیدکربن از خاک نیز نشان داد که انتشار دی اکسیدکربن در دسامبر ۲۰۵۰ (دی ماه ۱۴۲۹ شمسی) در سناریو بدون تغییر اقلیم و دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو تغییر اقلیم در رویشگاه‌های این گیاه در شمال کویر میقان، به ترتیب برابر ۷/۷۰۹۹ و ۸/۲۶۶۴ تن بر هکتار برآورد گردید (شکل ۷ و جدول ۸).



شکل ۷. میزان انتشار دی اکسیدکربن از خاک در دو سناریوی بدون تغییر اقلیم و با تغییر اقلیم در شمال کویر میقان

جدول ۸. میزان انتشار دی اکسیدکربن از خاک در سال مورد مطالعه (۱۴۰۲) و در دو سناریوی بدون تغییر اقلیم و با تغییر اقلیم در شمال

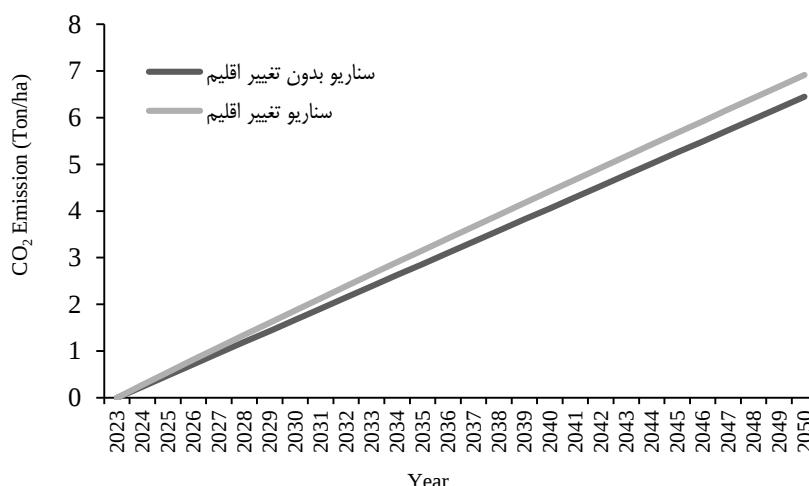
دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو		دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو	
تغییر اقلیم (تن بر هکتار)		بدون تغییر اقلیم (تن بر هکتار)	
۸/۲۶۶۴		۷/۷۰۹۹	
		میزان انتشار دی اکسید کربن از خاک به اتمسفر	
		میزان تغییرات انتشار دی اکسیدکربن در سناریو تغییر اقلیم نسبت	
+ ۷/۲۱۷۹		به سناریو بدون تغییر اقلیم (درصد)	

همانطور که در جدول ۸ ملاحظه می‌شود انتشار دی اکسیدکربن از خاک در رویشگاه گیاه *H. strobilaceum* در شمال کویر میقان، در سناریو تغییر اقلیم نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم به میزان ۰/۵۵۶۵ تن بر هکتار (معادل ۷/۲۱۷۹ درصد)، افزایش نشان خواهد داد.

شبیه‌سازی اثر سناریوهای اقلیمی بر میزان انتشار دی اکسیدکربن از خاک به اتمسفر در جنوب کویر میقان
شبیه‌سازی اثر سناریوهای اقلیمی بر میزان انتشار دی اکسیدکربن از خاک نیز نشان داد که انتشار دی اکسیدکربن در دسامبر ۲۰۵۰ (دی ماه ۱۴۲۹ شمسی) در سناریو بدون تغییر اقلیم و دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو تغییر اقلیم در رویشگاه‌های این گیاه در جنوب کویر میقان، به ترتیب برابر ۶/۴۴۶۵ و ۶/۹۱۵۱ تن بر هکتار برآورد گردید (شکل ۸ و جدول ۹).

جدول ۹. میزان انتشار دی اکسیدکربن از خاک در سال مورد مطالعه (۱۴۰۲) و در دو سناریوی بدون تغییر اقلیم و با تغییر اقلیم در جنوب

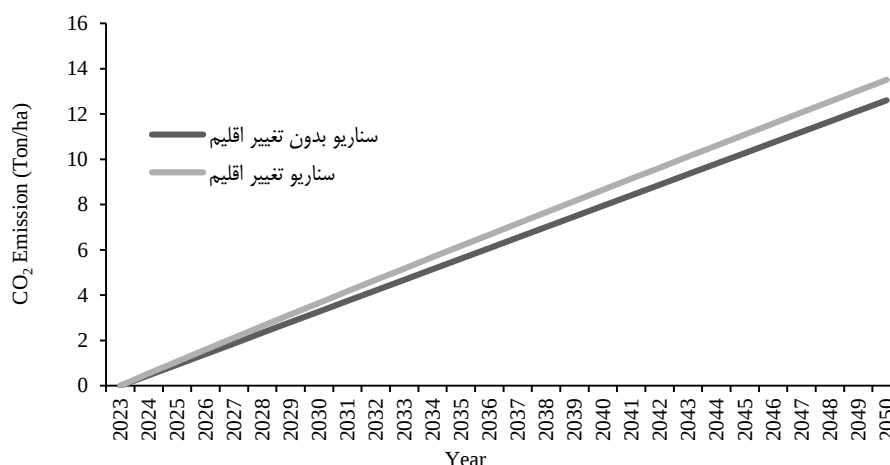
میزان انتشار دی اکسید کربن از خاک به اتمسفر	۶/۴۴۶۵	دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو
میزان تغییرات انتشار دی اکسیدکربن در سناریو تغییر اقلیم نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم (درصد)	۷/۲۶۶۹ +	دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو تغییر اقلیم (تن بر هکتار)



شکل ۸. میزان انتشار دی‌اکسیدکربن از خاک در دو سناریوی بدون تغییر اقلیم و با تغییر اقلیم در جنوب کویر میقان

همانطور که در جدول ۹ ملاحظه می‌شود، انتشار دی‌اکسیدکربن از خاک در رویشگاه گیاه *H. strobilaceum* در جنوب کویر میقان، در سناریو تغییر اقلیم نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم به میزان $0/4686$ تن بر هکتار (معادل $7/2669$ درصد)، افزایش نشان خواهد داد.

شبیه‌سازی اثر سناریوهای اقلیمی بر میزان انتشار دی‌اکسیدکربن از خاک به اتمسفر در غرب کویر میقان
شبیه‌سازی اثر سناریوهای اقلیمی بر میزان انتشار دی‌اکسیدکربن از خاک نیز نشان داد که انتشار دی‌اکسیدکربن در دسامبر ۲۰۵۰ (دی ماه ۱۴۳۹ شمسی) در سناریو بدون تغییر اقلیم و دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو تغییر اقلیم در رویشگاه‌های این گیاه در غرب کویر میقان، به‌ترتیب برابر $12/6013$ و $13/515$ تن بر هکتار برآورد گردید (شکل ۹ و جدول ۱۰).



شکل ۹. میزان انتشار دی‌اکسیدکربن از خاک در دو سناریوی بدون تغییر اقلیم و با تغییر اقلیم در غرب کویر میقان

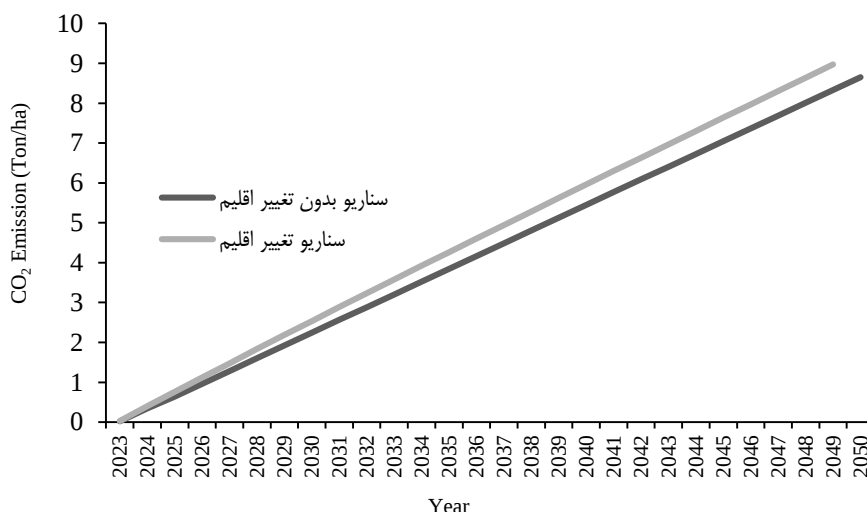
جدول ۱۰. میزان انتشار دی‌اکسیدکربن از خاک در سال مورد مطالعه (۱۴۰۲) و در دو سناریوی بدون تغییر اقلیم و با تغییر اقلیم در غرب

دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو بدون تغییر اقلیم (تن بر هکتار)	دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو تغییر اقلیم (تن بر هکتار)	
۱۲/۶۰۱۳	۱۳/۵۱۵	میزان انتشار دی‌اکسید کربن از خاک به اتمسفر
		میزان تغییرات انتشار دی‌اکسیدکربن در سناریو تغییر اقلیم نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم (درصد)
		$+ 7/2508$

همانطور که در جدول ۱۰ ملاحظه می‌شود انتشار دی‌اکسیدکربن از خاک در رویشگاه گیاه *Halocnemum strobilaceum* در غرب کویر میقان، در سناریو تغییر اقلیم نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم به میزان $0/9137$ تن بر هکتار (معادل $7/2508$ درصد)، افزایش

نشان خواهد داد.

شبیه‌سازی اثر سناریوهای اقلیمی بر میزان انتشار دی اکسیدکربن از خاک به اتمسفر در شرق کویر میقان شبیه‌سازی اثر سناریوهای اقلیمی بر میزان انتشار دی اکسیدکربن از خاک نیز نشان داد که انتشار دی اکسیدکربن در دسامبر ۲۰۵۰ (دی ماه ۱۴۲۹ شمسی) در سناریو بدون تغییر اقلیم و دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو تغییر اقلیم در رویشگاه‌های این گیاه در شرق کویر میقان، به ترتیب برابر ۸/۶۴۹۲ و ۹/۲۷۷۵ تن بر هکتار برآورد گردید (شکل ۱۰ و جدول ۱۱).



شکل ۱۰. میزان انتشار دی اکسیدکربن از خاک در دو سناریوی بدون تغییر اقلیم و با تغییر اقلیم در شرق کویر میقان

جدول ۱۱. میزان انتشار دی اکسیدکربن از خاک در سال مورد مطالعه (۱۴۰۲) و در دو سناریوی بدون تغییر اقلیم و با تغییر اقلیم در شرق

بدون تغییر اقلیم (تن بر هکتار)	دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو	دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو	بدون تغییر اقلیم (تن بر هکتار)
۸/۶۴۹۲	۹/۲۷۷۵	۷/۲۶۴۲	۹/۲۷۷۵
میزان انتشار دی اکسید کربن از خاک به اتمسفر			
میزان تغییرات انتشار دی اکسیدکربن در سناریو تغییر اقلیم نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم (درصد)			
+ ۷/۲۶۴۲			

همانطور که در جدول ۱۱ ملاحظه می‌شود انتشار دی اکسیدکربن از خاک در شرق کویر میقان، در سناریو تغییر اقلیم نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم به میزان ۰/۶۲۸۳ تن بر هکتار (معادل ۷/۲۶۴۲ درصد)، افزایش نشان خواهد داد. با توجه به برآوردهای صورت گرفته، بیشترین مقدار انتشار دی اکسیدکربن از خاک به اتمسفر در رویشگاه‌های این گیاه برای هر یک از سناریوهای مورد مطالعه، در دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو بدون تغییر اقلیم و مقدار انتشار دی اکسیدکربن از خاک در دسامبر ۲۰۵۰ در سناریو تغییر اقلیم به ترتیب با مقادیر ۱۳/۵۱۵ و ۱۳/۵۱۵ تن بر هکتار مربوط به رویشگاه این گیاه در غرب کویر میقان و کمترین مقدار انتشار دی اکسیدکربن از خاک در رویشگاه‌های این گیاه برای هر یک از سناریوهای فوق ۶/۴۴۶۵ و ۶/۹۱۵۱ تن بر هکتار در جنوب کویر میقان بود. بدین ترتیب، بیشترین میزان تغییرات انتشار دی اکسیدکربن در سناریو تغییر اقلیم نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم با مقدار ۰/۹۱۳۷ تن بر هکتار، در غرب کویر میقان و کمترین میزان تغییرات انتشار دی اکسیدکربن در سناریو تغییر اقلیم نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم با مقدار ۰/۴۶۸۶ تن بر هکتار، در جنوب کویر میقان اتفاق خواهد افتاد.

نتیجه‌گیری

مدل‌های کربن برای فهمیدن اثر فاکتورهای محیطی بر تغییرات بلندمدت کربن خاک نقش مهمی دارند. چنانچه این مدل‌ها به‌طور صحیح در مناطق مختلف اعتبارسنجی شود، می‌توانند برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات کربن خاک استفاده شوند. لذا در این مطالعه ارزیابی کارایی مدل RothC به‌عنوان پراستفاده‌ترین مدل در مطالعات کربن خاک، برای مراتع شور حاشیه دریاچه فصلی کویر میقان اراک، استان

مرکزی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل RothC در شبیه سازی کربن آلی خاک نتایج رضایت بخشی داشته و مقادیر شبیه سازی شده به خوبی با مقایر اندازه گیری شده در رویشگاه های گیاه باتلاقی شور (*Halocnemum strobilaceum*) همخوانی داشتند. به طوری که ضریب تبیین و ضریب همبستگی به ترتیب برابر $0/99$ و $0/98$ و مقدار RMSE برابر $0/324$ بود که نشان دهنده تفاوت بسیار کم بین مقادیر اندازه گیری شده و مدل سازی شده است، این یافته با نتایج سایر محققینی مثل آزاد و افزلی (۱۳۹۷)، باقریفام و همکاران (۱۴۰۱) و سبطی و همکاران (۱۴۰۱) مطابقت داشت. نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل RothC در مناطق زراعی خراسان نشان دهنده دقت قابل قبول این مدل در شبیه سازی ذخایر کربن آلی خاک (SOC) تحت شرایط اکوسیستم های خشک و نیمه خشک است. ضریب تبیین $0/70$ تا $0/98$ و RMSE بین $1/12$ تا $2/73$ گزارش شده، که بیانگر اعتبار و قابلیت مدل مذکور در شبیه سازی میزان کربن آلی خاک در سایر زیست بوم ها است (باقریفام و همکاران، ۱۴۰۱). این ضریب در مراتع جنوب کشور برابر $0/76$ بوده است که در کنار RMSE معادل $0/14$ عملکرد مناسب مدل در این شرایط اقلیمی را نیز نشان می دهد (Afzali et al., 2019). نتایج مدل سازی تغییرات ذخایر کربن آلی خاک در اراضی زراعی و مرتعی استان کردستان تحت سناریوهای مختلف مدیریت کوددهی و تغییر اقلیم با استفاده از مدل RothC در این منطقه نشان داد که RMSE، ضریب تبیین و کارایی مدل بترتیب برابر $8/92$ ، $0/82$ و $0/74$ + بوده است و این توانایی مدل مذکور در پیش بینی کربن آلی در شرایط اقلیمی متفاوت را نشان می دهد (شهمسوری و همکاران، ۱۴۰۱). کارایی مدل و میزان خطای RMSE در برآورد و شبیه سازی کربن آلی خاک سطحی در مراتع نیمه استپی و کوهستانی استان کرمانشاه به ترتیب برابر $0/96$ - و $0/11$ بوده است که در تأیید نتایج مطالعات بالا عملکرد مناسب مدل را نشان می دهد (اقبالیان و همکاران، ۱۴۰۲).

همچنین نتایج شبیه سازی ها به وسیله مدل RothC نشان داد در طی سال های ۱۴۰۲ هجری شمسی (۲۰۲۳ میلادی) تا ۱۴۲۹ هجری شمسی (۲۰۵۰ میلادی) ذخایر کربن آلی خاک در رویشگاه های گیاه باتلاقی شور در کویر میقان، در سناریو بدون تغییر اقلیم، به میزان $2/019$ درصد افزایش، و در سناریو تغییر اقلیم به میزان $4/556$ درصد کاهش خواهد یافت. کاهش کربن در این مطالعه با یافته های - Baveye و همکاران (۲۰۲۰) همسو بود. از جنبه پاسخ مدل به تغییرات اقلیمی، کاهش ذخایر SOC تا سال ۲۰۵۰ تحت سناریوی تغییر اقلیم در کویر میقان، همسو با یافته های باقریفام و همکاران (۱۴۰۰) در مناطق نیمه خشک خراسان است که کاهش $2/36$ تا $3/53$ درصدی را پیش بینی کرده اند. این همخوانی نشان می دهد که مدل RothC علی رغم تفاوت در پارامترهای اکولوژیک بین اکوسیستم های بیابانی و نیمه خشک، توانایی پیش بینی الگوهای کلی تغییرات SOC تحت استرس های اقلیمی را داراست. با این وجود، نرخ تجزیه کربن آلی تحت سناریو تغییر اقلیمی کویر میقان و در خاک های بیابانی منطقه $49/37$ درصد سریع تر از مناطق مورد مطالعه در جنوب ایران ($3/05$ درصد، Afzali et al., 2019)، برآورد شد که احتمالاً مرتبط با ترکیب بافت خاک سبک و تابش خورشیدی شدیدتر در منطقه بیابانی است.

از طرفی بررسی تغییرات دما نشان داد که تا سال ۲۰۵۰ بر اساس سناریوی تغییر اقلیم نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم، دما به میزان $2/675$ درجه سانتی گراد افزایش می یابد (مطالعه کوچکی و همکاران، ۱۳۸۶). باقریفام و همکاران (۱۴۰۱) نیز در این خصوص به نتایج مشابهی دست یافتند. همچنین در منطقه مطالعه تا سال ۲۰۵۰ بر اساس سناریوی تغییر اقلیم، بارندگی به میزان $8/16$ درصد در مقایسه با سناریو بدون تغییر اقلیم کاهش خواهد یافت (مطالعه کوچکی و همکاران، ۱۳۸۶) که این کاهش با توجه به میانگین بلندمدت بارش منطقه (۳۰۰ میلی متر) حدود ۲۴ میلی متر کاهش در میزان بارش خواهد بود. این یافته نیز با نتایج بیان شده توسط سبطی و همکاران (۱۴۰۱) مطابقت داشت. یافته های سایر محققین (باقریفام و همکاران، ۱۴۰۱؛ Muñoz-Rojas et al., 2017) نشان داده بود که کاهش بارندگی منجر به کاهش محتوای رطوبتی خاک و در نتیجه کاهش فعالیت جمعیت میکروبی خاک و به طبع آن تجزیه پایین تر کربن آلی خاک می شود. اما به نظر می رسد که در رویشگاه هایی که سطح آب زیر زمینی بالا باشد (مثل رویشگاه باتلاقی شور)، محتوای رطوبتی خاک از طریق خاصیت موئینگی فراهم شده و سرعت تجزیه ترکیبات کربن دار افزایش داشته است. نتایج شبیه سازی مدل نشان داد که طی سال های ۱۴۰۲ تا ۱۴۲۹ هجری شمسی، بیشترین میزان تغییرات انتشار دی اکسید کربن در سناریو تغییر اقلیم نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم با مقدار $0/9137$ تن بر هکتار، در غرب کویر میقان و کمترین میزان تغییرات انتشار دی اکسید کربن در سناریو تغییر اقلیم نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم با مقدار $0/4686$ تن بر هکتار، در جنوب کویر میقان اتفاق خواهد افتاد. این یافته نیز با نتایج Muñoz-Rojas et al., (2017)؛ Shpedt al., (2019) و سبطی و همکاران (۱۴۰۱) مطابقت داشت. با افزایش دما سرعت تجزیه افزایش یافته و باعث هدر رفتن ذخیره کربن آلی خاک به صورت انتشار CO_2 در لایه های بالایی خاک می شود، نکته ای که سبطی و همکاران (۱۴۰۱) نیز به آن اشاره کردند. هرچند در مناطق خشک کاهش سرعت تجزیه ترکیبات حاوی کربن، به واسطه فراهم نبودن شرایط برای زی توده میکروبی خاک، کمتر از نواحی مرطوب است (Lal, 2013). با توجه به نتایج به دست آمده، مدل Roth C توانسته است دینامیک ذخیره سازی

کربن آلی خاک در منطقه مورد مطالعه را با دقت مناسب شبیه‌سازی کند. خروجی دو مدل اقلیمی نشان داد که تغییرات دمایی آینده در سال ۲۰۵۰ میلادی (معادل ۱۴۲۹ هجری شمسی) بر اساس سناریوهای بدون تغییر اقلیم و تغییر اقلیم به ترتیب ۲/۱۶ و ۲/۶۷ افزایش خواهد یافت. این یافته‌ها با نتایج اکثر مطالعات آب و هوایی که افزایش دما را در دهه‌های آینده پیش بینی کرده‌اند، مطابقت دارد. بر اساس یافته‌های پژوهش حاضر، میزان بارندگی در ایستگاه مورد مطالعه در آینده (سال ۱۴۲۹ هجری شمسی) بر اساس دو سناریوی بدون تغییر اقلیم و تغییر اقلیم کاهش خواهد یافت. نتایج شبیه‌سازی مدل Roth C برای پیش‌بینی ذخیره‌سازی کربن آلی خاک نشان داد که ذخیره‌سازی کربن آلی خاک در سال ۱۴۲۹ در هر دو سناریو اقلیمی کاهش خواهد یافت. بر اساس این نتایج، با افزایش دما، سرعت تجزیه کربن آلی خاک افزایش می‌یابد. افزایش سرعت تجزیه در کاربری اراضی مرتعی حاشیه پلایاها، به دلیل کمبود پوشش گیاهی سطحی، باعث هدر رفتن کربن آلی خاک به صورت CO₂ در لایه‌های بالایی خاک می‌شود. برخی مطالعات نشان داده‌اند که مناطقی با پوشش گیاهی کم (کشاورزی نسبت به مرتع) به شدت تحت تاثیر تغییرات آب و هوایی قرار گرفته و منجر به هدررفت کربن آلی خاک در این مناطق خواهد شد.

انجام اقدامات مؤثر در شناسایی راه‌های سازگاری و حفظ ثبات محیط‌زیست برای مقابله با تغییرات اقلیمی و کاهش اثرات گازهای گلخانه‌ای، ضروری است. این تصمیم‌گیری‌ها باید همراه با شناسایی و برآورد اثر کاربری‌ها و سایر متغیرهای مدیریتی و محیطی باشد که امروزه به کمک مدل‌های مشهوری همچون RothC، این مهم میسر گردیده است. اهمیت قیاس و صحت‌سنجی در همه موارد از جمله مهم‌ترین اقدامات در تایید و تشریح مدل‌ها خواهد بود. در پژوهش حاضر بزرگترین منبع خطا در تحلیل عدم قطعیت مدل مربوط به برآورد اولیه کربن ورودی است، که مشابه چالش‌های گزارش شده توسط باقری‌فام و همکاران (۱۴۰۰) در کالیبراسیون مدل برای مراتع نیمه خشک است. این مسئله اهمیت انجام اندازه‌گیری‌های میدانی بلندمدت برای تخمین دقیق‌تر پارامترهای بیولوژیک در اکوسیستم‌های خشک را برجسته می‌سازد. بنابراین ایجاد مزارع آزمایشی و ایستگاه‌های مطالعاتی به منظور فراهم‌سازی داده‌های بلندمدت مورد نیاز برای مدل‌سازی کربن در طیف وسیعی از خاک‌ها، کاربری‌ها، اقلیم‌ها و مدیریت‌های مختلف کشور یک نیاز ضروری است. این گونه برنامه‌ریزی‌ها، اطلاعات حیاتی و مهم مورد نیاز واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌های شبیه‌سازی را فراهم می‌کنند.

سپاس‌گزاری

این مقاله در قالب پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد تحت حمایت دانشگاه ملایر، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست انجام شده است. نویسندگان مقاله از مسئولان محترم دانشگاه سپاس‌گزاری می‌نمایند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- آزاد، بیژن و افضلی، سید فخرالدین (۱۳۹۷). مدل‌سازی اثر تغییر اقلیم بر انتشار دی‌اکسیدکربن خاک در مراتع خشک (جنوب ایران). نشریه مهندسی اکوسیستم بیابان، ۷(۲۰)، ۷۱-۸۷.
- اقبالیان، زینب؛ عطائیان، بهناز و پرویزی، یحیی (۱۴۰۲). بررسی تغییرات کربن آلی خاک و اعتبار سنجی مدل Roth C جهت برآورد آن در مناطق کوهستانی. نشریه اکوسیستم‌های طبیعی ایران، ۴(۱۴)، ۱-۲۳.
- اداره هواشناسی استان مرکزی (۱۴۰۲). گزارش تحلیل داده و ارائه آمار و اطلاعات هواشناسی. ایستگاه سینوپتیک اراک
- اداره هواشناسی استان مرکزی (۱۴۰۳). شبکه ایستگاه‌ها، خلاصه اطلاعات اقلیمی ایستگاه سینوپتیک اراک. دسترسی ۱۰ اسفندماه ۱۴۰۳
- اکبری، نرگس (۱۳۹۱). بررسی آتاکولوژی گونه *Halocnemum* باتلاقی در منطقه کویر میقان اراک. پایان‌نامه کارشناسی/ارشد. دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک.
- باقری‌فام، صبا؛ دلاور، محمدمامیر؛ کشاورز، پیمان و کرمی، پرویز (۱۴۰۰). اعتبارسنجی مدل RothC با بررسی پویایی بلندمدت ذخیره کربن آلی در اراضی زراعی. هفدهمین کنگره علوم خاک ایران و چهارمین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه تجدید حیات حکیمانه خاک و حکمروائی حکیمانه آب، کرج.
- باقری‌فام، صبا؛ دلاور، محمد. امین؛ کشاورز، پیمان و کرمی، پرویز (۱۴۰۱). کاربرد مدل Roth C در شبیه‌سازی اثر تغییرات اقلیمی بر انتشار کربن دی اکسید و ذخایر کربن آلی خاک اقلیم نیمه‌خشک خراسان رضوی. نشریه آب و خاک، ۳۶ (۵)، ۶۱۱-۶۲۸.

رحیم فروزه، محمد (۱۳۸۹). بررسی تاثیر قرق مرتع بر توان ترسیب کربن دو گونه شورپسند (*Halocnemum strobilaceum* و *Halostachys caspica*) مطالعه موردی: مراتع گمیشان، نشریه پژوهش‌های آبخیزداری، ۲۲ (۸۵)، ۳۳-۲۲.

حسینی، سیدعلی؛ شاهمرادی، امرعلی و ابرسجی، قاسمعلی (۱۳۸۶). بررسی نحوه حضور گونه *Halocnemum strobilaceum* M.B در مراتع شور و قلیایی در شمال استان گلستان. تحقیقات مرتع و بیابان/ایران، ۱۴ (۲)، ۱۱۰-۱۲۲.

سبطی، مریم؛ خرمالی، فرهاد؛ سلطانی، افشین؛ افتخاری، کامران؛ قانقرمه، عبداعظیم و دردی‌پور، اسماعیل (۱۴۰۱). تاثیر تغییر اقلیم بر ذخیره کربن آلی خاک با استفاده از مدل Roth C در اراضی زراعی استان گلستان. مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی)، ۴۵ (۴)، ۳۳۹-۳۵۵.

سلیمانی، اعظم؛ حسینی، سیدمحسن؛ مساح بوانی، علیرضا؛ جعفری، مصطفی و فرانکاوگیلیا، روسا (۱۳۹۶). شبیه‌سازی ذخیره کربن آلی خاک تحت تاثیر تغییر پوشش زمین و تغییر اقلیم، جنگل‌های هیرکانی (شمال ایران)، علم محیط زیست کل، ۵۹۹-۶۰۰، ۱۶۴۶-۱۶۵۷.

شهسواری، پوریا؛ دلاور، محمد امیر؛ کرمی، پرویز و نبی‌اللهی، کمال (۱۴۰۱). شبیه‌سازی پویایی کربن آلی خاک با استفاده از مدل RothC در کاربری‌های مختلف اراضی ایستگاه تحقیقاتی سارال استان کردستان. تحقیقات آب و خاک/ایران، ۵ (۵۳)، ۹۹۲-۹۷۱.

علائی طالقانی، محمود (۱۳۸۸). ژئومورفولوژی ایران. نشر قومس، چاپ ششم، ۳۶۰ صفحه.

فالاحی، جبار؛ رضوانی مقدم، پرویز؛ نصیری محلاتی، مهدی و بهدانی، محمدعلی. (۱۳۹۲). تعیین اعتبار مدل RothC جهت برآورد توان ترسیب کربن خاک بوم نظامی بازسازی شده، تحت دو سناریوی اقلیمی متفاوت. آب و خاک، ۲۷ (۳)، ۶۵۶-۶۶۸.

کوچکی، علیرضا؛ نصیری، مهدی و کمالی، غلامعلی (۱۳۸۶). مطالعه شاخص‌های هواشناسی ایران در شرایط تغییر اقلیم. پژوهش‌های زراعی/ایران، ۱۳۳-۱۴۳، ۱۵.

مظفریان، ولی ا...؛ قهرمانی‌نژاد، فرخ؛ نریمیس، سارا؛ جعفری، عفت؛ کاظم‌پوراوصالو، شاهرخ؛ لطفی، الهه و اسدی، مصطفی (۱۳۹۷). فلور فارسی ایران. چاپ اول، تهران: انتشارات موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور.

REFERENCES

- Akbari, N. (2012). An autecological study of the marsh halophyte *Halocnemum* in the Mighan Desert region, Arak (Master's thesis). Faculty of Agriculture and Natural Resources, Islamic Azad University, Arak Branch. (In Persian)
- Alai-Taleghani, M. (2009). *Geomorphology of Iran* (6th ed., 360 pp.). Qomes Publishing. (In Persian)
- 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 and Technology*. 17(5), 3087-3098. (In Persian).
- Azad, B., & Afzali, S. F. (2022). Modelling the impacts of climate change on the soil CO₂ emissions in arid rangelands (Southern Iran). *Desert Ecosystem Engineering*, 7(20), 71-87. (In Persian).
- 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.
- Bagherifam, S., Delavar, M. A., Keshavarz, P., & Karami, P. (2021). Validation of the RothC model by examining long-term dynamics of soil organic carbon stocks in agricultural lands. Proceedings of the 17th Iranian Soil Science Congress and 4th National Conference on On-Farm Water Management: "Wise Soil Revival and Wise Water Governance," Karaj, Iran. (In Persian)
- Bagherifam, S., Delavar, M. A., Keshavarz, P., & Karami, P. (2022). Application of the RothC Model in Simulating Effect of Climate Change on CO₂ Emissions and Soil Organic Carbon Stocks in Semi-arid Climate of Khorasan-e-Razavi. *Water and Soil*, 36(5), 611-628. (In Persian)
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). *Bulk density*, In: *Methods of Soil Analysis*. Part I. Physical and Mineralogical Methods, Klute, A. (Ed.). Soil Science Society of America Publication. 363-376.
- Bouyoucos, G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, 56, 464-465.
- Carvalho, G.L.D., Maria, C.I., & Equardo de sa, M. (2016). Trees modify the dynamics of soil CO₂ efflux in coffee agroforestry systems. *Agriculture and Forest Meteorology*, 224, 30-39.
- Eghbalian, Z., Attaeian, B., & Parvizi, Y. (2023). Investigation of Soil Organic Carbon Changes and Validation of the Roth C Model to Estimate in Mountainous Areas. *Journal of Natural Ecosystems of Iran*, 4(14), 1-23. (In Persian).
- Eller, B.H., and Bettany, J.R. 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Soil Sci.* 75: 529-538.
- Farina, R., Marchetti, A., Francaviglia, R., Napoli, R., & Di Bene, C. (2017). Modeling regional soil C stocks



- and CO₂ emissions under Mediterranean cropping systems and soil types. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 238, 128–141.
- Fallahi, J. , Rezvani Moghaddam, P. , Nassiri Mahallati, M., & Behdani, M. A. (2013). Validation of RothC Model for Evaluation of Carbon Sequestration in a Restored Ecosystem Under Two Different Climatic Scenarios. *Water and Soil*, 27(3), 656-668. (In Persian).
- Hameed, A., Hussain, S., Rasheed, A., Ahmed, M. Z., & Abbas, S. (2024). Exploring the Potentials of Halophytes in Addressing Climate Change-Related Issues: A Synthesis of Their Biological, Environmental, and Socioeconomic Aspects. *World*, 5(1), 36-57.
- Hoseini, A. , Shahmoradi, A., & Abarsaji, G. (2007). An Investigation on the Presence Form of Halocnemum strobilaceum in Saline and Alkaline Rangelands of Northern Golestan Province. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 14(2), 110-123. (In Persian).
- Jebari, A., Álvaro-Fuentes, J., Pardo, G., Almagro, M., & Del Prado, A. (2021). Estimating soil organic carbon changes in managed temperate moist grasslands with RothC. *PLoS One*, 16(8), e0256219.
- Jurakulov, B., Tagaev, I., Alikulov, B., Axanbayev, S., Akramov, I., & Ismailov, Z. (2023). Population of Halocnemum strobilaceum (Pall.) M. Bieb in a dry salt lake of the Central Kyzylkum. *Plant Sci Today*, 10(2), 170-177.
- Koocheki, A. , Nasiri Mahalati, M., & Kamali, G. (2007). Climate indices of Iran under climate change. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 5(1), 133-142. (In Persian). doi: 10.22067/gsc.v5i1.904.
- Lal, R. (2013). Soil carbon management and climate change. *Carbon Management*, 4, 439-462.
- Markazi Province Meteorological Department. (2023). Data analysis report and presentation of meteorological statistics and information. Arak Synoptic Station. (In Persian).
- Markazi Province Meteorological Department. (2024). Station network, summary of climatic information of Arak Synoptic Station. Accessed 10 Esfand 1403. (In Persian). <https://www.markazimet.ir/uploads/station/arak.pdf>.
- Marasco, R., Mapelli, F., Rolli, E., Mosqueira, M.J., Fusi, M., Bariselli, P., Reddy, M., Cherif, A., Tsiamis, G., Borin, S., & Daffonchio, D. (2016). Salicornia strobilacea (synonym of Halocnemum strobilaceum) grown under different tidal regimes selects rhizosphere bacteria capable of promoting plant growth. *Frontiers in Microbiology*, 7, p.1286.
- Mozafarian, V.; Ghahremaninejad, F.; Narimisa, S.; Jafary, E.; Kazempoor Owsalo, S.; Lotfi, E.; & Asadi, M. (2018). *Flora of Iran* (1st ed.). Tehran: Research Institute of Forests and Rangelands. (In Persian)
- Muñoz-Rojas, M., Abd-Elmabod, S.K., Zavala, L.M., De la Rosa, D., & Jordán, A. (2017). Climate change impacts on soil organic carbon stocks of Mediterranean agricultural areas: a case study in Northern Egypt. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 238, 142-158.
- Nemoto, R. (2010). Long-term soil carbon changes in different agricultural management systems under past and future climate (Doctoral dissertation, University of Bern).
- Pauwels, J.M., Van Ranst, E., Verloo, M. & Mvondo, Z.A. (1992) Analysis Methods of Major Plants Elements. Pedology Laboratory Manual: Methods of Plants and Soil Analysis. Stock Management Equipment of Worms and Chemical Equipment. Publica Agricol. 28, AGCD, Brussels.
- Rahim Forouzeh, M. (2010). Effect of exclusion on carbon sequestration potential of Halocnemum strobilaceum and Halostachys caspica (Case study: Gomishan rangelands), *Journal of Watershed Research*, 22(85), 22-33. (In Persian).
- Rahman, M.M., Zimmer, M., Ahmed, I., Donato, D., Kanzaki, M., & Xu, M. (2021). Co-benefits of protecting mangroves for biodiversity conservation and carbon storage. *Nature Communications*, 12(12), 1–9.
- Sebti, M., Khormali, F., Soltani, A., Eftekhari, K., ghanghermeh, A., & dordipour, E. (2023). The effect of climate change on soil organic carbon storage using the Roth C model in the agricultural lands of Golestan province. *Agricultural Engineering*, 45(4), 339-355. (In Persian)
- Shpedt, A. A., Ligaeva, N. A., & Emelyanov, D. V. (2019, August). Transformation of soil and land resources of the Middle Siberia in the conditions of climatic changes. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 315, No. 5, p. 052051). IOP Publishing.
- Shahsavari, P. , Delavar, M. A. , Karami, P. and Nabiollahi, K. (2022). Simulating soil organic carbon dynamics using RothC in grasslands range and croplands Saral Research Center Kurdistan Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(5), 971-992. (In Persian). doi: 10.22059/ijswr.2022.339220.669211
- Soleimani, A., Hosseini, S.M., Massah Bavani, A., Jafari, M., & Francaviglia, R. (2017). Simulating soil organic carbon stock as affected by land cover change and climate change, Hyrcanian forests (northern

- Iran). *Science of the Total Environment*, 599–600, 1646–1657. (In Persian).
- Taati, M., Ghanbarian, G. A., Safaeian, R., & Afzali, S. F. (2019). Comparative assessment of carbon sequestration capability in plant and soil of three dominant halophytic species, including *Aeluropus littoralis*, *Halocnemum strobilaceum*, and *Seidlitzia rosmarinus* in Fars Province. *Ecopersia*, 7(2), 69-77.
- Tadiello, T., Perego, A., Valkama, E., Schillaci, C. and Acutis, M., 2022. Computation of total soil organic carbon stock and its standard deviation from layered soils. *MethodsX*, 9, p.101662.
- Venkatesh, G., Gopinath, K. A., Reddy, K. S., Reddy, B. S., Prabhakar, M., Srinivasarao, C., & Singh, V. K. (2022). Characterization of Biochar Derived from Crop Residues for Soil Amendment, *Carbon Sequestration and Energy Use*, 14, 2295.
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtareff method for detwrmining soil organic matter, and a proposed modification of the choromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38.
- Wiltshire, S., Grobe, S., & Beckage, B. (2023). A Historically Driven Spinup Procedure for Soil Carbon Modeling. *Soil Systems*, 7(2), 35.
- Yadav, V., & Malanson, G. (2008). Spatially explicit historical land use land cover and soil organic carbon transformations in Southern Illinois. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 123, 280-292.