



## Simulating soil organic carbon dynamics using RothC in grasslands range and croplands Saral Research Center Kurdistan Province

Pouria Shahsavari<sup>1</sup>, Mohammad Amir Delavar<sup>✉2</sup>, Parviz Karami<sup>3</sup>, Kamal Nabiollahi<sup>4</sup>

1. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. Email: [porya3720@gmail.com](mailto:porya3720@gmail.com)
2. Corresponding Author, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. Email: [amir-delavar@znu.ac.ir](mailto:amir-delavar@znu.ac.ir)
3. Department of Rangeland Science, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. Email: [pkaram2002@gmail.com](mailto:pkaram2002@gmail.com)
4. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. Email: [k.nabiollahi@uok.ac.ir](mailto:k.nabiollahi@uok.ac.ir)

---

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Feb. 16, 2022

**Received:** May. 7, 2022

**Accepted:** May. 22, 2022

**Published online:** July. 23, 2022

**Keywords:**

**Carbon sequestration,  
Saral,  
Management scenarios,  
RothC.**

---

### ABSTRACT

RothC is among the most successful models in terms of simulating the impacts of climate change and management activities in natural ecosystems on local and global scales. The current research was carried out to assess and validate RothC in studying SOC content from 1990 to 2020 and defining the scenarios of maintaining the current situations (scenario 1), climate change (scenario 2), manure fertilizing till 2100 (scenario 3), and climate change with manure fertilizing till 2100 (scenario 4) in grasslands, range, and croplands in Saral Research Center, Kurdistan Province, under rotations of wheat-uncultivation and wheat-pea. The parameters of the model were determined by using the measured data from the soils sampled at two years (2018 and 2019) from Saral Research Center and the local weather data. Next, the model was validated by comparison of the predicted values with the measured SOC data. Assessment of the measured and simulated data through validation for different land uses revealed that RothC could satisfactorily predict the changes in SOC contents under different fertilizing and climate change scenarios so that root mean square error (RMSE) and the simulation efficiency were calculated as 8.92% and 74.0%, respectively. The simulation results indicated that compared to scenario 1, climate change in the studied land uses will cause a decrease in SOC contents till 2100. Manure fertilizing (scenario 3) would be the best scenario so that by using this strategy the grassland, with 59.83 ton SOC per hectare until the end of the current century. According to the results predicted by the model, the highest SOC rate (32.9%) and the most change in SOC sequestration ( $\Delta$ SOCs) (0.16 t/h) during the next 80 years were calculated in the range under scenario 3; whereas the lowest values (-32.0% and -0.11 t/h, respectively), were achieved in croplands under rotations of wheat-uncultivation under scenario 2.

---

Cite this article: Shahsavari, P., Delavar, M.A., Karami, P., & 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.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.339220.669211>



## شبیه‌سازی پویایی کربن آلی خاک با استفاده از مدل RothC در کاربری‌های مختلف اراضی ایستگاه تحقیقاتی سارال استان کردستان

پوریا شهسواری<sup>۱</sup>، محمد امیر دلاور<sup>۲</sup>، پرویز کرمی<sup>۳</sup>، کمال نبی الهی<sup>۴</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. ایمیل: [porya3720@gmail.com](mailto:porya3720@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. ایمیل: [amir-delavar@znu.ac.ir](mailto:amir-delavar@znu.ac.ir)

۳. گروه مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. ایمیل: [pkaram2002@gmail.com](mailto:pkaram2002@gmail.com)

۴. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. ایمیل: [k.nabiollahi@uok.ac.ir](mailto:k.nabiollahi@uok.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	RothC یکی از موفق‌ترین مدل‌ها برای شبیه‌سازی تأثیر تغییرات آب و هوایی و فعالیت‌های مدیریتی در اکوسیستم‌های طبیعی در سطح محلی، منطقه‌ای و جهانی است. هدف این تحقیق واسنجی و اعتبارسنجی مدل RothC برای تجزیه و تحلیل ذخایر کربن آلی خاک طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ میلادی (وضعیت کنونی) و تعریف سناریوهای حفظ وضعیت کنونی (سناریو ۱)، تغییر اقلیم (سناریو ۲)، کوددهی با کود دامی (سناریو ۳) و تغییر اقلیم همراه با کوددهی با کود دامی (سناریو ۴) تا سال ۲۱۰۰ میلادی در کاربری‌های چمنزار، مرتع و اراضی کشاورزی با تناوب‌های زراعی گندم - آیش و گندم - نخود در ایستگاه تحقیقاتی سارال استان کردستان است. مدل با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در سال‌های ۱۳۸۹ (مرتع و چمنزار) و ۱۳۹۴ (اراضی کشاورزی) و داده‌های آب‌وهوای محلی پارامتریابی و با مطابقت داده‌های خروجی مدل با داده‌های مشاهده‌شده واسنجی گردید. مدل تغییرات ذخایر کربن آلی خاک را در سناریوهای مختلف کوددهی و تغییر اقلیم به‌خوبی پیش‌بینی کرد به‌طوری‌که میانگین جذر مربعات خطا ۸/۹۲ درصد و راندمان مدل‌سازی ۰/۷۴ محاسبه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد تغییرات اقلیمی در کاربری‌های مورد مطالعه موجب کاهش مقادیر ذخایر کربن آلی خاک در مقایسه با سناریو حفظ وضعیت کنونی تا سال ۲۱۰۰ میلادی خواهد شد. عملیات کوددهی با کود دامی (سناریو ۳) بهترین سناریو و کاربری چمنزار پس از اعمال این سناریو با ۵۹/۸۳ تن در هکتار ذخیره کربن آلی خاک تا ۲۱۰۰ به‌عنوان بهترین کاربری در مقادیر ترسیب کربن بود. بیشترین مقدار نرخ ذخیره کربن آلی و تغییرات ترسیب کربن آلی طی ۸۰ سال آینده در کاربری مرتع به ترتیب با ۳۲/۹ درصد و ۰/۱۶ تن در هکتار (سناریو ۳) و کمترین در اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - آیش به ترتیب با ۳۲- درصد و ۰/۱۱- تن در هکتار (سناریو ۲) برآورد شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۲/۱۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۱	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۵/۱	
واژه‌های کلیدی:	
ترسیب کربن، سارال، سناریوهای مدیریتی، مدل روتامستد.	

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

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.339220.669211>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

## مقدمه

پدیده گرمایش گلخانه‌ای<sup>۱</sup> در حدود ۱۰۰ سال پیش مطرح گردید، اما بررسی اثرات زیست‌محیطی و تأثیرات آن بر تغییر اقلیم جهانی در اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی در دستور کار سازمان‌های جهانی محیط‌زیست قرار گرفت. جامعه جهانی در یازدهم دسامبر ۱۹۹۷ میلادی در کیوتو ژاپن پروتکلی را تأیید کردند که مطابق آن اعضاء موظف شدند اقدام‌های اساسی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای انجام دهند (Lal, 2001). ایران این پروتکل را در سال ۲۰۰۵ میلادی به‌طور رسمی پذیرفت. افزایش نگرانی‌ها در زمینه گرمایش جهانی و تغییر اقلیم موجب شده که به خاک و قابلیت آن در ترسیب کربن در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای شود (Waters et al., 2016). کل مقدار کربن آلی موجود در خاک‌ها، تقریباً دو برابر موجودی کربن اتمسفر است؛ از این‌رو تغییر در کربن خاک اثرات قابل‌توجهی بر تغییر اقلیم برجای می‌گذارد (Mondinia et al., 2012). عوامل مختلفی از جمله شرایط آب و هوایی، ویژگی‌های خاک، ترکیب شیمیایی بقایای گیاهی و قابلیت دسترسی مواد آلی بر دینامیک و سرعت تجزیه کربن آلی خاک تأثیر گذارند (Baldock, 2007)، از طرفی کاربری اراضی و شیوه‌های مختلف مدیریتی نقش مهمی در تثبیت و یا کاهش کربن موجود در اتمسفر ایفا می‌کنند (Lal, 2001; Bayer et al., 2006; Falloon et al., 2007).

مراعات و چمنزارها به دلیل گسترش زیاد و توانایی بالا در ذخیره کربن، پتانسیل بسیار بالایی در ترسیب دی‌اکسید کربن اتمسفر در خاک و کاهش اثرات گرمایش جهانی دارند (Cui et al., 2005; Derner and Schuman, 2007; Mcsherry and Ritchie, 2013). مراعات به‌عنوان یکی از مهم‌ترین کاربری‌های سطح کره زمین مساحتی بالغ بر ۵۰ درصد از سطح خشکی‌های کره زمین را پوشانده و توانایی ذخیره ۳۰ درصد از کربن آلی خاک‌های جهان را دارا هستند. این نوع کاربری در مقیاس جهانی سالانه حدود ۵۰۰ میلیارد تن دی‌اکسید کربن اتمسفر را ذخیره می‌کند (Derner and Schuman, 2007). کاربری چمنزار نیز نقش مهمی در چرخه کربن دارد و حدود ۲۰۰ تا ۴۲۰ میلیارد تن کربن را در کره زمین ذخیره می‌کند. مقدار کربن موجود در کاربری چمنزار تقریباً معادل کربن موجود در جنگل‌ها و در حدود ۷۰ تن در هکتار است (Trumbmore et al., 1995).

مراعات و چمنزارها به دلیل افزایش تقاضای بشر برای تولید غذا و افزایش رشد جمعیت تحت تأثیر فعالیت‌های جدی تغییرات کاربری زمین قرار دارند به‌طوری‌که تبدیل این عرصه‌های طبیعی به اراضی کشاورزی و استفاده از روش سنتی آماده‌سازی زمین در این مناطق منجر به کاهش ۵۰ تا ۷۰ درصدی متوسط جهانی کربن آلی خاک شده است (Guo and Gifford, 2002). برآوردها نشان داده که در طی قرن گذشته تغییرات کاربری زمین و اجرای عملیات کشت و کار در حدود ۴۲ تا ۷۸ گیگا<sup>۲</sup> تن کربن از خاک به اتمسفر آزاد شده است (Paustian et al., 2016).

محاسبه و تخمین خروجی گازهای گلخانه‌ای ناشی از چرخه کربن و تأثیرات آن‌ها بر گرمایش کره زمین نیازمند انجام مطالعات طولانی‌مدت است و کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی کربن برای مطالعه این فرآیندها یکی از ابزارهای مناسب است. مدل‌های شبیه‌سازی ابزارهای بسیار کارآمدی هستند که برای دستیابی به درک بهتری از ارتباط و اثرات متقابل بین اعمال مدیریت‌های مختلف و تأثیر آن‌ها بر روی تغییرات کربن آلی خاک برای پیش‌بینی تغییرات انتشار کربن دی‌اکسید خاک به جو<sup>۳</sup> اطلاعات مفید و مناسبی را برای تصمیم‌گیری برنامه‌ریزان فراهم می‌سازند (Bleuler et al., 2017). مدل RothC یکی از پرکاربردترین مدل‌ها برای دستیابی به این اهداف است (Coleman and Jenkinson, 1996). این مدل در مطالعات مربوط به کربن آلی خاک در رتامتست<sup>۴</sup> انگلستان با انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای طولانی‌مدت طراحی و سپس در شرایط مختلف اقلیمی و تنوع وسیعی خاک‌ها در غرب و مرکز اروپا مورد مطالعه قرار گرفته است (Guo et al., 2007). مدل RothC به دلیل سادگی در نصب و اجرای مدل و همچنین کم بودن و در دسترس بودن ورودی‌های مورد نیاز برای اجرا مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است (Yao et al., 2017). محققان مختلفی موفقیت کاربرد این مدل را برای برآورد مقادیر کربن آلی در شرایط مختلف آب و هوایی، سناریوهای متعدد هدر رفت کربن آلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای و مدیریت‌های متنوع کشاورزی در دوره‌های مختلف زمانی با پوشش‌های گیاهی مختلف به اثبات رسانده‌اند (Zimmermann et al., 2007; Barančíková et al., 2010; Li Liu et al., 2011; Farina et al., 2013; Soleimani et al., 2017; Herbst et al., 2018; Azad and Afzali, 2019).

<sup>۱</sup> Greenhouse warming

<sup>۲</sup> Giga

<sup>۳</sup> Rothamsted

و هوایی در مراتع جنوب ایرلند استفاده شده و نتیجه گرفته شد که در پاسخ به درجه حرارت بالاتر، تابستان‌های خشک‌تر و زمستان‌های مرطوب‌تر مدل RothC کاهش کربن آلی خاک را در مراتع با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کرده است (Xu et al., 2011). Dechow et al. (2019) کاربرد مدل RothC را به‌عنوان یک ابزار پیش‌آگهی برای پیش‌بینی روند کربن آلی خاک در پاسخ به شیوه‌های مدیریتی در اراضی قابل کشت مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که سهم نسبی ریشه‌ها از ورودی کربن آلی به خاک بیشتر از بقایای گیاهی سطح زمین است. در تحقیق دیگری ارزیابی اثرات سناریوهای تغییر اقلیم و مدیریت زمین بر ذخایر کربن آلی خاک تا پایان قرن ۲۱ در مناطق آلاجه<sup>۱</sup> و آزبو<sup>۲</sup> در شمال اتیوپی با مدل RothC استفاده شد و گزارش شد که تغییرات آب و هوایی موجب کاهش مقدار ورودی کربن آلی به خاک شده و مدیریت استفاده بهینه از کودهای دامی و شیمیایی راهکار اصلی جهت حفظ بهره‌وری خاک و دستیابی به امنیت غذایی پایدار در شرایط تغییر اقلیم در این منطقه است (Mesfin et al., 2021).

شبیه‌سازی پویایی کربن آلی در منطقه سارال کردستان با استفاده از مدل RothC در مدیریت‌های چمنزار، مراتع و اراضی زراعی نه تنها برای تصمیم‌گیرندگان و برنامه‌ریزان در مقیاس محلی حائز اهمیت است، بلکه می‌تواند به‌عنوان یک منطقه شاخص برای تعمیم نتایج به سایر مناطق مشابه کشور نیز مورد توجه قرار گیرد. اهداف این تحقیق عبارت هستند از: واسنجی و اعتبارسنجی کاربرد مدل RothC برای برآورد ذخایر کربن آلی خاک در مدیریت‌های مختلف اراضی منطقه سارال کردستان، پیش‌بینی و مطالعه پویایی کربن آلی خاک در بازه زمانی طولانی مدت تحت تأثیر مدیریت‌های مختلف و ارزیابی اثرات سناریوی تغییرات آب و هوایی بر ذخایر کربن آلی خاک با استفاده از مدل RothC.

## مواد و روش‌ها

### مشخصات عمومی منطقه مورد مطالعه

منطقه سارال استان کردستان در محدوده جغرافیایی  $35^{\circ} 32'$  تا  $35^{\circ} 53'$  عرض شمالی و  $48^{\circ} 34'$  تا  $48^{\circ} 58'$  طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). این منطقه با مساحت ۲۳۹ هکتار از نظر آب و هوایی دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های معتدل است و بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن<sup>۳</sup> جزو مناطق نیمه‌استپی سرد محسوب می‌گردد. ارتفاع منطقه از سطح دریا ۲۱۰۰ متر است. بر اساس داده‌های بلندمدت ایستگاه هواشناسی کلیماتولوژی مستقر درون ایستگاه تحقیقاتی سارال متوسط بارندگی سالانه ۳۳۰ میلی‌متر، میانگین حداکثر درجه حرارت ۲۸/۹ درجه سلسیوس در مرداد ماه و میانگین حداقل درجه حرارت ۶/۳- درجه سلسیوس در بهمن ماه و میانگین درجه حرارت سالیانه ۱۰/۷ درجه سلسیوس گزارش شده است (Rouhi et al., 2016). بر اساس اطلاعات نقشه خاک در مقیاس تفصیلی خاک‌های غالب در این منطقه شامل خاک‌های مالی سول با گسترش ۷۰ درصد، اینسپتی سول با گسترش ۲۰ درصد و انتی سول با گسترش ۱۰ درصد است (Amari and Kashmiri, 1991). خاک‌های رده مالی سول این منطقه بر اساس سامانه رده‌بندی جامع خاک آمریکایی (Soil Survey Staff, 2014) در تحت گروه‌های تیپیک هاپلوزرولز<sup>۴</sup>، تیپیک کلسی زرولز<sup>۵</sup> و فلوواکوتیک اندواکولز<sup>۶</sup> طبقه‌بندی شده است. ترکیب پوشش گیاهی و کاربری‌های اراضی در ایستگاه تحقیقاتی سارال شامل ۵۳/۶ درصد مرتع، ۲/۶ درصد چمنزار، ۴۱ درصد اراضی کشاورزی (۳۵/۲ درصد کاربری زراعی با تناوب گندم - آیش و ۵/۸ درصد کاربری زراعی با تناوب گندم - نخود) و ۲/۸ درصد باقیمانده نیز شامل اراضی جنگلی، سایت اداری و اراضی متفرقه است (شکل ۱). انواع مدیریت‌ها، در صد مساحت و نوع گونه‌های گیاهی غالب در ایستگاه تحقیقاتی سارال در جدول ۱ ارائه شده است (AREEO, 2016).

<sup>۱</sup> Alaje

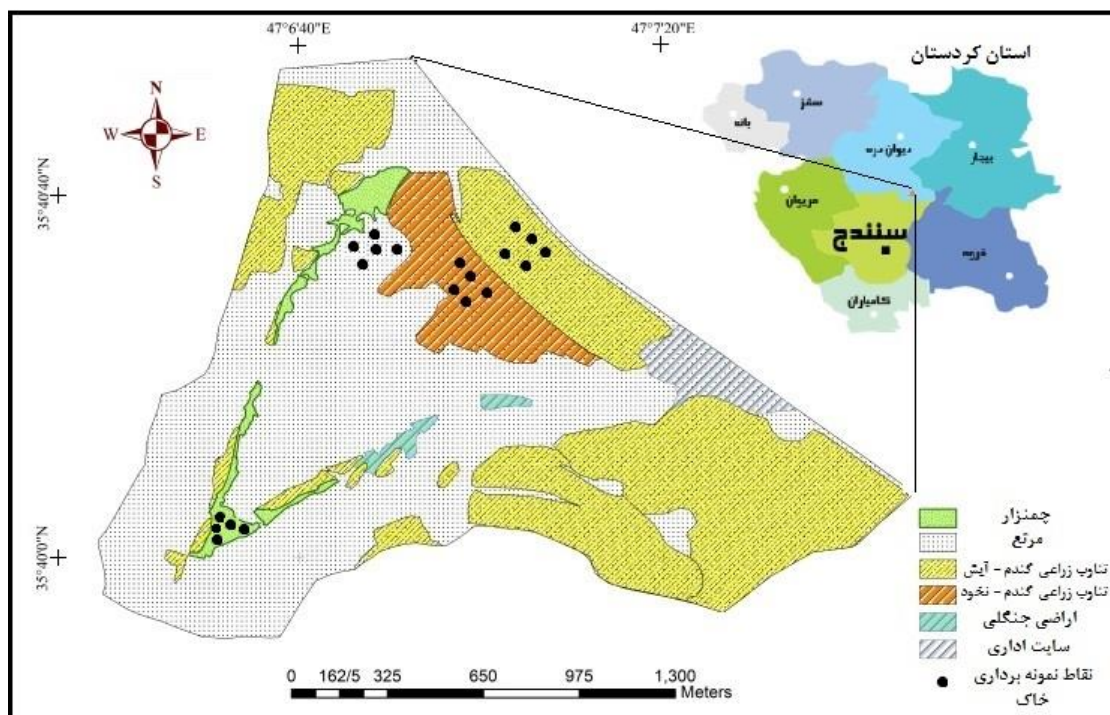
<sup>۲</sup> Azebo

<sup>۳</sup> Köppen

<sup>۴</sup> Typic Haploxerolls





<sup>۵</sup> Typic Calcixerolls

<sup>۶</sup> Fluvaquentic Endoaquolls



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری در ایستگاه تحقیقاتی سارال

جدول ۱- مدیریت‌ها، مساحت، ارقام موجود و نوع گونه‌های گیاهی غالب در ایستگاه تحقیقاتی سارال

مرجع	ارقام استفاده شده و گونه‌های گیاهی غالب	مساحت (هکتار)	نوع مدیریت
(Karami, 2010)	<i>Carthamus oxyacantha, Festuca ovina, Bromus tomentellus Boiss, Phlomis olivieri Benth, Papaver Sp, Eryngium thyrsoideum Boiss, Ferula haussknechtii H. Wolff ex Rech, Myosotis lithospermifolia Hornem, Prangos ferulacea.</i>	۱۲۸	مرتع 
Yazdanparast, ) (2008)	<i>Carex stenophylla, Eleocharis uniglumis, Juncus gerardii, Ranunculus sericeus, Dactylorhiza fuchsii, Trifolium repens, Graminas, Agropyron trichophorum, Agropyron intermedium</i>	۶	چمنزار 
Rouhi et al., ) (2016)	باران و اوحدی	۸۴	زراعت گندم (دیم) 
Rouhi et al., ) (2016)	آزکان، عادل و منصور	۱۴	زراعت نخود (دیم) 

کاربری‌های مرتع و چمنزار از سال ۱۳۶۹ شمسی (۱۹۹۰ میلادی) تاکنون در شرایط قرق بوده و کاربری‌های کشاورزی به ترتیب در وضعیت تناوب کشت گندم - آیش و تناوب کشت گندم - نخود (دو ساله) دیم قرار دارد. بر اساس اطلاعات موجود در ایستگاه تحقیقاتی



سارال، تفسیر قدیمی‌ترین عکس‌های هوایی منطقه (سال‌های ۱۹۵۸ و ۱۹۷۱ میلادی) و جمع‌آوری اطلاعات از افراد مسن و ساکنین منطقه (شش مورد) اراضی موجود در ایستگاه در ابتدای تأسیس دارای کاربری مرتع و چمنزار بکر بوده است و بخش‌هایی از آن‌ها در سال ۱۳۴۲ مصادف با اجرای قانون ملی شدن جنگل‌ها و مراتع کشور تغییر کاربری یافته و به اراضی زراعی تبدیل شده است (Karami, 2010). از جمله دلایل انتخاب ایستگاه تحقیقاتی سارال برای انجام این پژوهش می‌توان به مواردی از قبیل تنوع نوع خاک و پوشش گیاهی در منطقه اشاره کرد که نماینده مناسبی برای اراضی وسیعی از منطقه سارال در استان کردستان است. ایستگاه تحقیقاتی سارال دارای چندین دوره زمانی اندازه‌گیری کربن آلی همراه با تکرارهای اندازه‌گیری است که به‌منظور بررسی تغییرات زمانی ذخایر کربن آلی خاک اهمیت بسیار زیادی دارد و در نهایت این منطقه دارای مدیریت‌ها و کاربری‌های مختلفی است که در استان کردستان غالب است.

### نمونه‌برداری و تجزیه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌برداری از خاک‌های منطقه طی دو سال متوالی (تیر ماه سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸) به روش نمونه‌برداری تصادفی انجام گرفت. محل‌های نمونه‌برداری بر اساس نتایج مطالعات خاکشناسی تفصیلی ایستگاه تحقیقاتی سارال (Amari and Kashmiri, 1991) در رده خاک مالی‌سول در چهار کاربری چمنزار، مرتع، اراضی زراعی با تناوب گندم - آیش و اراضی زراعی تناوب گندم - نخود انتخاب شدند. نمونه‌برداری از خاک از دو عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متر و ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متری در پنج تکرار انجام شد. در مجموع تعداد ۸۰ نمونه خاک دست‌خورده و دست‌نخورده (با استفاده از سیلندر) جمع‌آوری گردید. نمونه‌های خاک جمع‌آوری ابتدا هوا خشک‌شده و بقایای گیاهی شامل ریشه گیاهان و سایر بقایای قابل مشاهده از نمونه‌های خاک حذف شدند. نمونه‌ها از الک دو میلی‌متری عبور داده‌شده و برای انجام آزمایش‌های بعدی به آزمایشگاه منتقل شدند. کربن آلی خاک با روش والکی‌بلک (Walkley and Black, 1934)، کربنات کلسیم معادل با روش تیتراسیون (Nelson, 1982)، درصد اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، واکنش خاک و قابلیت هدایت الکتریکی (Carter and Gregorich, 2007) و جرم مخصوص ظاهری خاک با روش سیلندر (Blake and Hartge, 1986) اندازه‌گیری شدند. ذخیره کربن آلی برای اعماق صفر تا ۲۰ سانتی‌متر و ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر و نرخ ذخیره کربن آلی خاک و تغییرات ترسیب کربن آلی خاک بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ با استفاده از روابط (۱)، (۲) و (۳) محاسبه شدند:

$$\text{SOC Stocks} = \%OC \times H \times BD \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{SOC rate} = 100 \times \frac{\text{SOC}_{2100} - \text{SOC}_{2020}}{\text{SOC}_{2020}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\Delta \text{SOCs} = \frac{\text{SOC}_{2100} - \text{SOC}_{2020}}{80} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه OC: کربن آلی خاک (درصد)، H: عمق خاک (سانتی‌متر) و BD: جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب) است. SOC2100 و SOC2020 به ترتیب ذخیره کربن آلی (تن در هکتار) در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۱۰۰ میلادی است.

### ساختار مدل RothC

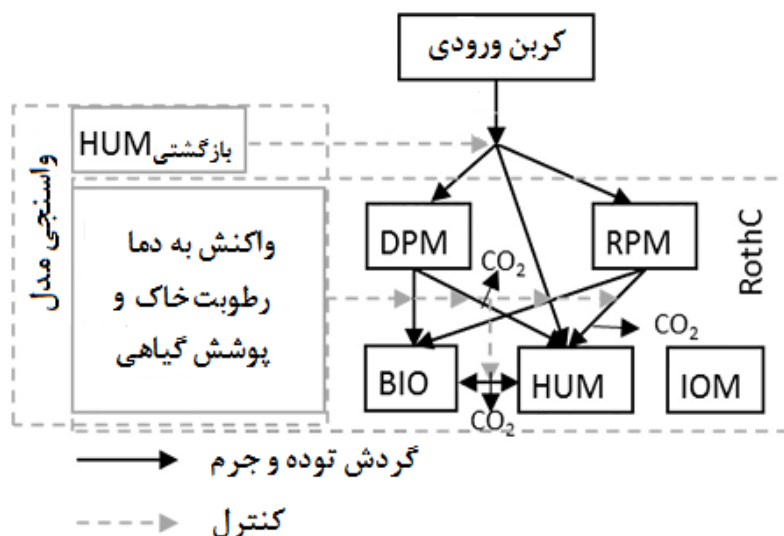
مدل RothC مقادیر کربن آلی خاک را در خاک‌های هوازی (غیراشباع) با استفاده از اطلاعات مربوط به نوع خاک، پوشش گیاهی، مقادیر دما و رطوبت شبیه‌سازی می‌کند. این مدل از یک پایه زمانی ماهانه برای محاسبه کل کربن خاک و بیوماس میکروبی در مقیاس زمانی یک تا ۱۰۰ ساله استفاده می‌کند (Coleman and Jenkinson, 1996). در این مدل، کربن آلی خاک به چهار جزء فعال و یک جزء کوچک غیرفعال تقسیم‌بندی می‌شود. اجزای فعال شامل مواد گیاهی تجزیه‌پذیر<sup>۱</sup>، مواد گیاهی مقاوم<sup>۲</sup>، زیست‌توده میکروبی<sup>۳</sup> و مواد آلی هوموسیته<sup>۴</sup> است. جزء غیرفعال (پایدار) نیز نسبتی از مواد آلی است که از نظر بیولوژیکی فعال نبوده و سن رادیو کربنی آن بیش از ۵۰۰۰۰ سال است، بنابراین این جزء در چرخه کربن شرکت ندارد (شکل ۲). در این مدل همچنین سرعت تجزیه مواد آلی توسط عوامل دما، رطوبت خاک و درصد پوشش گیاهی کنترل می‌گردد (Barančiková et al., 2010).

<sup>۱</sup> Decomposable plant materials, DPM

<sup>۲</sup> Resistant plant materials, RPM

<sup>۳</sup> Microbial biomass, BIO

<sup>۴</sup> Humified organic matters, HUM



شکل ۲- محیط مدل RothC و ساختارهای زیرمجموعه آن (Dechow et al. 2019)

میزان کاهش مقادیر کربن آلی (تن در هکتار) در مدل RothC در پایان هر ماه از رابطه (۴) محاسبه شد.

$$Y_t = Y \times e^{-abckt} \quad \text{رابطه ۴}$$

در این رابطه a ضریب تصحیح برای دما، b ضریب تصحیح برای رطوبت، c ضریب تصحیح برای پوشش خاک، k ثابت سرعت تجزیه سالانه برای جزء فعال موردنظر، t معادل یک ماه و  $Y \times (1 - e^{-abckt})$  مقدار مواد آلی است که در طی یک ماه تجزیه می‌شود (Coleman and Jenkinson, 1996).

### ورودی‌های مدل RothC

ورودی‌های مدل RothC شامل مجموعه‌ای از داده‌های اقلیمی، داده‌های خاک و داده‌های مدیریت زمین است (جدول ۲). داده‌های اقلیمی شامل بارندگی ماهانه، میانگین دمای هوا و تبخیر ماهانه است (Coleman and Jenkinson, 1996). داده‌های اقلیمی بر اساس اطلاعات اقلیمی در بازه زمانی ۱۵ ساله (۱۳۸۳ تا ۱۳۹۸) مربوط به ایستگاه هواشناسی کلیماتولوژی ایستگاه تحقیقاتی سارال محاسبه و وارد مدل شدند. داده‌های خاک و مدیریت زمین شامل مقدار رس خاک، ذخیره کربن آلی در شرایط ابتدایی خاک، عمق خاک، داده‌های مدیریتی شامل وضعیت پوشش خاک در هر ماه (آیا دارای پوشش گیاهی است یا خیر)، مقدار بقایای گیاهی وارد شده به خاک<sup>۲</sup> در هر ماه، مقدار کودهای استفاده شده در هر ماه، ماده آلی پایدار<sup>۳</sup>، فاکتور کیفیت بقایای گیاهی، نسبت مواد گیاهی مقاوم/مواد گیاهی تجزیه پذیر، میزان کربن آلی در مخازن مواد آلی هوموسی شده، زیست توده میکروبی، مواد گیاهی مقاوم و مواد گیاهی تجزیه پذیر است. مقدار رس خاک، عمق خاک، وضعیت پوشش خاک در هر ماه، مقدار کربن ورودی از بقایای گیاهی به خاک در هر ماه و مقدار کربن ورودی از کود استفاده شده در هر ماه از طریق فایل مدیریت زمین وارد مدل شدند. میزان ماده آلی پایدار، نسبت مواد گیاهی مقاوم/مواد گیاهی تجزیه پذیر و مقدار کربن آلی در مخازن مختلف نیز در فایل سناریو وارد شدند. مدل RothC برای اجرا در دو حالت Forward و Inverse طراحی شده است. در حالت Forward با دانستن میزان کربن ورودی از گیاه به خاک، تغییرات ذخایر کربن آلی خاک محاسبه می‌شود و در حالت Inverse میزان کربن ورودی از گیاه به خاک مشخص نیست و مدل بر مبنای داده‌های ذخیره کربن آلی خاک در منطقه، داده‌های هواشناسی و نوع پوشش گیاهی، میزان کربن ورودی از گیاه به خاک را در هر ماه محاسبه می‌کند. در این تحقیق میزان کربن ورودی از گیاه به خاک در هر ماه با استفاده از حالت Inverse محاسبه گردید. مقدار ماده آلی پایدار برای عمق مشخصی از خاک سطحی از طریق رابطه (۵) محاسبه شد (Falloon et al., 1998; Falloon and Smith, 2002).

1 Initial soil organic carbon  
2 Plant residues  
3 Inert organic matter, IOM

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

(رابطه ۵)

در این رابطه  $TOC$  کل کربن آلی خاک برحسب تن در هکتار است.

فاکتور کیفیت بقایای گیاهی (مواد گیاهی مقاوم/مواد گیاهی تجزیه پذیر) نشان دهنده نرخ تجزیه مواد گیاهی است و از روش دومرحله‌ای هیدرولیز اسید با استفاده از سولفوریک اسید اندازه‌گیری شد (Shirato and Yokozawa, 2006) لکن برای تعیین این فاکتور به‌طور معمول از راهنمای مدل برای پوشش‌های گیاهی مختلف استفاده می‌شود (Francaviglia et al., 2017; Soleimani et al., 2018; Herbst et al., 2017). پیش فرض مدل برای این پارامتر در مراتع بهبودیافته - محصولات کشاورزی، مراتع طبیعی - خارستان ها و درختچه‌زارهای حاره‌ای - درختان خزان کننده به ترتیب ۱/۴۴، ۰/۶۷ و ۰/۲۵ است که از طریق فایل سناریو و با توجه به نوع پوشش گیاهی مورد مطالعه وارد مدل می‌شود. داده‌های مخازن مختلف کربن آلی خاک را می‌توان توسط مدل و از طریق شبیه‌سازی یک دوره تعادل ۱۰۰۰۰ ساله تحت پوشش گیاهی بومی به دست آورد (Bleuler et al., 2017; Jebari et al., 2018).

جدول ۲- داده‌های ورودی مدل RothC و مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون دانکن

مدیریت اراضی				ویژگی	نوع داده
تناوب گندم - نخود	تناوب گندم - آیش	مرتع	چمنزار		
۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	بارش کل (میلی‌متر)	اطلاعات هواشناسی
۱۰/۰۷	۱۰/۰۷	۱۰/۰۷	۱۰/۰۷	میانگین درجه حرارت سالانه (سلسیوس)	(داده‌های هواشناسی ۱۵ ساله)
۱۵۰۹	۱۵۰۹	۱۵۰۹	۱۵۰۹	تبخیر (میلی‌متر)	ایستگاه سارال)
۲۴ <sup>b</sup>	۲۶/۵۰ <sup>b</sup>	۵۵ <sup>a</sup>	۱۸/۵۰ <sup>c</sup>	مقدار رس (درصد)	
۱/۲۴ <sup>a</sup>	۱/۲۵ <sup>a</sup>	۱/۱۳ <sup>b</sup>	۱/۰۹ <sup>c</sup>	جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	اطلاعات خاک
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	عمق خاک (سانتی‌متر)	(نتایج اندازه‌گیری‌های مطالعه حاضر)
۲۹/۱۶ <sup>b</sup>	۲۸/۸۷ <sup>b</sup>	۳۲/۱۲ <sup>b</sup>	۵۰/۶۳ <sup>a</sup>	مقادیر اولیه کربن آلی (تن در هکتار)	
۲/۴۱	۲/۲۵	۲/۷۹۲	۴/۲۵	* ماده آلی پایدار (تن در هکتار)	
۱/۱۱	۱/۰۹	۲/۰۳	۲/۲۳	* کربن ورودی از لاشبرگ به خاک (تن در هکتار)	
۱/۴۴	۱/۴۴	۱/۴۴	۱/۴۴	نسبت DPM/RPM (بدون واحد)	
۱/۴۸	۱/۴۸	۱/۴۸	۱/۴۸	کربن ورودی به خاک از طریق کود (چهار سال یک‌بار سناریوهای ۳ و ۴) (تن در هکتار)	اطلاعات مدیریتی (برآورد شده توسط مدل)
چهار ماه از سال	چهار ماه از سال	شش ماه از سال	شش ماه از سال	وضعیت پوشش خاک (بدون واحد)	

\* برآورد شده توسط مدل با روش پیش‌بینی معکوس و با استفاده از حالت Inverse

### سناریوهای مدیریتی مطالعه‌شده

بر اساس پیش‌بینی‌های انجام‌شده، کشور ایران و به‌ویژه استان کردستان در شرایط تغییر اقلیم با افزایش درجه حرارت و کاهش مقدار بارندگی مواجه خواهد شد (Khaleghi et al., 2015). نتایج تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل گردش عمومی و از طریق خروجی ریزمقیاس گردانی آماری میزان تغییرات دمای هوا و بارش سالانه را برای سه استان کردستان، کرمانشاه و همدان تا سال ۲۱۰۰ میلادی پیش‌بینی و بر اساس این نتایج تا پایان قرن ۲۱ میلادی متوسط دمای هوا استان کردستان ۴/۴ درجه سلسیوس افزایش و میزان بارش سالانه ۷/۷ درصد کاهش می‌یابد (Zohrevandi et al., 2020). در شرایط تغییر اقلیم یکی از راهکارهای اصلاح وضعیت خاک از منظر افزایش ذخیره کربن آلی خاک، بهبود حاصلخیزی خاک، افزایش راندمان و بازدهی تولید محصولات و کوددهی با استفاده از کودهای حیوانی است (Kennedy, 2004; Jangid et al., 2008). در این تحقیق با استفاده از نتایج Zohrevandi et al. (2020) و با توجه به نقش اثرگذار



عملیات کوددهی با کودهای حیوانی بر شاخص‌های کیفیت خاک، وضعیت ترسیب کربن در شرایط وقوع تغییر اقلیم در منطقه مورد مطالعه و کوددهی با کود دامی ارزیابی شد. جدول ۳ سناریوهای در نظر گرفته شده برای مدیریت چمنزار، مرتع، اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - آیش و گندم - نخود رانشان می‌دهد.

جدول ۳- سناریوهای مورد بررسی برای مدیریت‌های چمنزار، مرتع، اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - آیش و تناوب گندم - نخود

سناریوها	بازه زمانی (سال میلادی)	مدیریت
	۱۹۹۰ - ۲۰۱۹	شرایط کنونی (کاربری مرتع و چمنزار در وضعیت قرق و کاربری اراضی کشاورزی با دو نوع تناوب زراعی کاشت گندم - آیش و کاشت گندم - کاشت نخود دوساله)
۱	۲۰۲۰ - ۲۱۰۰	حفظ وضعیت کنونی (بدون تغییر اقلیم)
۲	۲۰۲۰ - ۲۱۰۰	اعمال تغییر اقلیم با افزایش ۴/۴ درجه سلسیوس متوسط دمای هوا و کاهش ۷/۷ درصدی میزان بارش*
۳	۲۰۲۰ - ۲۱۰۰	کود دهی با کود دامی سه تن در هکتار هر چهار سال یکبار (بدون تغییر اقلیم)
۴	۲۰۲۰ - ۲۱۰۰	تغییر اقلیم با افزایش ۴/۴ درجه سلسیوس متوسط دمای هوا و کاهش ۷/۷ درصدی میزان بارش و کود دهی با کود دامی سه تن در هکتار هر چهار سال یکبار*

\* برای برآورد تبخیر از نرم افزار محاسبه گر تبخیر و تعرق دلیلت<sup>۱</sup> که توسط دانشگاه کرانفیلد انگلستان طراحی و توسعه یافته است، استفاده شد (فراستی و کریمی، ۱۳۹۲).

### واسنجی مدل

واسنجی (کالیبراسیون<sup>۲</sup>) یکی از بخش‌های اساسی مطالعات مدل‌سازی است که هدف آن بهبود همبستگی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های شبیه‌سازی شده با تنظیم پارامترهای داخلی مدل است (Chaves et al., 2015). برای واسنجی مدل RothC از متغیر خروجی کل کربن آلی در هنگام ترسیم نمودار و تعیین فاکتور y-axis برای شبیه‌سازی ذخیره کربن آلی خاک در مدیریت‌های مختلف چمنزار، مرتع، اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - آیش و گندم - نخود استفاده شد. از آنجاکه برای واسنجی مدل RothC حداقل به یک دوره اندازه‌گیری ذخیره کربن آلی خاک نیاز است (Barančíková et al., 2010) برای پوشش‌های مرتع و چمنزار از نتایج مطالعه (2010) Karami و برای اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - آیش و گندم - نخود از نتایج اطلاعات پروژه امنیت غذایی ایکاردا استفاده شد (Rouhi et al., 2016). در این پژوهش برای واسنجی مدل از پارامتر کربن ورودی از طریق بقایا که یکی از پارامترهای مهم در کالیبراسیون این مدل است، استفاده شد (Guo et al., 2007). برای این منظور در ابتدای شبیه‌سازی، مقادیر این پارامتر در بخش ورودی‌های مدل به نحوی تغییر داده شد تا مقادیر کل کربن شبیه‌سازی شده توسط مدل، با مقادیر اندازه‌گیری شده در مطالعات (Karami و Rouhi et al., 2016) برابر گردد.

### اعتبار سنجی مدل

برای اعتبارسنجی مدل، مقادیر ذخیره کربن آلی خاک شبیه‌سازی شده توسط مدل RothC با مجموعه‌ای از داده‌های اندازه‌گیری شده در چهار نوع مدیریت چمنزار، مرتع، اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - آیش و گندم - نخود در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ و نتایج مطالعات (Amari and Kashmiri (1991) و Nabiollahi (2005) انجام شد. برای اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد مدل از متغیر خروجی کل کربن آلی استفاده شد (Romanenkov et al., 2019). برای مقایسه داده‌ها از شاخص‌های آماری ضریب تبیین<sup>۳</sup> (رابطه ۶)، ضریب همبستگی پیرسون<sup>۴</sup> (رابطه ۷)، جذر میانگین مربعات خطا<sup>۵</sup> (رابطه ۸) و راندمان مدل‌سازی<sup>۶</sup> (رابطه ۹) و برای مقایسه انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مشاهده شده از نتایج رگرسیون خطی استفاده شد.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{O})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

(رابطه ۷)

1 DAILYET

2 Calibration

3 R-squared correlation, R<sup>2</sup>

4 Correlation coefficient, r

5 Root mean square error, RMSE

6 Mean error, ME

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

$$RMSE = \frac{100}{\bar{O}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۸}$$

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه ۹}$$

در این روابط  $O_i$  مقادیر مشاهده شده،  $S_i$  مقادیر شبیه سازی شده،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر مشاهده شده و  $\bar{S}$  میانگین مقادیر شبیه سازی است. کلیه محاسبات و تجزیه و تحلیل های آماری اعم از اختلاف معنی داری، مقایسه میانگین ها بین کاربری های مورد مطالعه، مقایسه داده های شبیه سازی شده و مشاهده شده، مقایسه داده های شبیه سازی شده در کاربری مورد مطالعه به وسیله نرم افزارهای SPSS و EXCEL انجام شد.

## نتایج و بحث

### ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک

نتایج اندازه گیری های آزمایشگاهی نمونه های خاک در کاربری های مختلف (جدول ۴) نشان داد که در عمق صفر تا ۲۰ سانتی متری واکنش خاک از ۷/۲ تا ۷/۶، وزن مخصوص ظاهری از ۱/۰۶ تا ۱/۲۵ گرم بر سانتی متر مکعب و کربنات کلسیم معادل خاک از ۴/۱۳ تا ۱۱/۵۶ درصد متغیر است. نتایج اندازه گیری ویژگی های مختلف در عمق ۲۰ تا ۳۰ سانتی متری نشان داد که واکنش خاک از ۷/۶ تا ۷/۹، وزن مخصوص ظاهری از ۱/۱۴ تا ۱/۳۰ گرم بر سانتی متر مکعب و کربنات کلسیم معادل خاک از ۴/۸۹ تا ۲۰/۶۶ درصد متغیر است. بافت خاک در هر دو عمق تغییرات کمی داشت و کلاس های بافت خاک شامل کلاس های بافتی لوم رسی شنی (Sandy Clay Loam) و لوم رسی (Clay Loam) است. بر اساس نتایج جرم مخصوص ظاهری اندازه گیری شده در عمق صفر تا ۲۰ سانتی متری در کاربری چمنزار در سال های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ به ترتیب با ۱/۰۹ و ۱/۱۲ گرم بر سانتی متر مکعب کمترین و در کاربری اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - آیش در سال ۱۳۹۷ با ۱/۲۵ گرم بر سانتی متر مکعب و در کاربری اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - نخود در سال ۱۳۹۸ با ۱/۲۴ گرم بر سانتی متر مکعب بیشترین مقادیر را دارند. جرم مخصوص ظاهری خاک در عمق صفر تا ۲۰ سانتی متری در کاربری های چمنزار و مراتع اختلاف اندکی با هم داشته و کمتر از کاربری های اراضی زراعی اندازه گیری شدند. در عمق ۲۰ تا ۳۰ سانتی متری خاک، جرم مخصوص ظاهری اندازه گیری شده در کاربری مرتع با ۱/۱۴ گرم بر سانتی متر مکعب کمترین و در کاربری چمنزار با ۱/۳۰ گرم بر سانتی متر مکعب بیشترین مقدار را داشتند. جرم مخصوص ظاهری در کلیه کاربری های مورد مطالعه از سطح به عمق خاک افزایش یافت که بیشترین آن مربوط به کاربری چمنزار با افزایش ۱۹ درصدی در سال ۱۳۹۷ و ۱۶ درصدی در سال ۱۳۹۸ بود. طی پژوهشی بر روی کاربری های مرتع، زراعت دیم و آبی در مناطق نیمه خشک ایران، میزان جرم مخصوص ظاهری خاک در مزارع تحت کشت و کار بالاتر از مراتع گزارش شد (Ayoubi et al., 2018).

مقدار کربنات کلسیم معادل خاک در هر چهار کاربری از سطح به عمق خاک افزایش نشان داد. این افزایش در کاربری اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - نخود به میزان ۷۴ درصد در سال ۱۳۹۷ و ۹۴ درصد در سال ۱۳۹۸ بیشتر از سایر کاربری ها اندازه گیری شد. کمترین مقدار کربنات کلسیم معادل اندازه گیری شده در عمق صفر تا ۲۰ سانتی متری خاک در سال های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ به ترتیب ۴/۳۱ و ۴/۱۳ درصد مربوط به کاربری مرتع و بیشترین مقدار آن با ۲۰/۱۲ درصد در سال ۱۳۹۷ و ۲۰/۶۶ درصد در سال ۱۳۹۸ مربوط به کاربری اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - نخود است (جدول ۴). اختلاف بین مقادیر کربنات کلسیم معادل موجود در کاربری های مورد مطالعه احتمالاً به دلیل میزان آبشویی و عملیات برگرداندن خاک در کاربری های کشاورزی است. شیب، بافت خاک، آبشویی در اثر باران و عملیات آبیاری بر تجمع کربنات کلسیم معادل در لایه های زیرین خاک تأثیر مستقیم دارد (Badí et al., 2004; Presley et al., 2015; Tan et al., 2014; Wilford et al., 2013). نتایج به دست آمده در خصوص بیشتر بودن کربنات کلسیم معادل در کاربری های کشاورزی نسبت به مرتع و جنگل با نتایج سایر محققان مطابقت دارد (Celik, 2005; Riahi et al., 2015). نتایج این پژوهش نشان داد که واکنش خاک در عمق صفر تا ۲۰ در سال های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ در اراضی کشاورزی (۷/۵ و ۷/۶) بیشتر از کاربری های چمنزار و مرتع (۷/۲ و ۷/۳) بود. زمین های کشاورزی نسبت به زمین های بکر همچون مراتع و چمنزارها واکنش خاک بالاتری دارند (Lizaga et al., 2019). احتمالاً یکی از دلایل بالا بودن واکنش خاک در کاربری های زراعی نسبت به مرتع و چمنزار کمبود مواد آلی در این کاربری ها

است، پژوهش‌ها نشان می‌دهند که تجزیه مواد آلی توسط ریز جانداران خاک سبب رهاسازی اسیدهای آلی و کاهش واکنش خاک می‌شود و در اراضی کشاورزی به دلیل کمبود احتمالی مواد آلی تولید و اثر این اسیدهای آلی در کاهش واکنش خاک چشمگیر نیست (Mehmandoust et al., 2018). از دیگر علل افزایش واکنش خاک در اراضی زراعی می‌توان به بالا آمدن مواد آهکی از لایه‌های زیرین خاک به لایه‌های سطحی در اثر عملیات خاک‌ورزی (Ajmi et al., 2020) و همچنین فعالیت‌های مدیریتی از جمله کوددهی (Geissen et al., 2009) اشاره کرد.

برخلاف کربنات‌ها، کربن آلی بیشتر در لایه‌های سطحی تجمع می‌یابد و با افزایش عمق خاک مقادیر آن کاهش می‌یابد. ذخایر کربن آلی خاک از سطح به عمق خاک روند نزولی داشت به طوری که کربن آلی موجود در خاک تحت کاربری چمنزار در سال ۱۳۹۷ از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری و از عمق ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متری به میزان ۶۹/۶۱ درصد و در سال ۱۳۹۸ به میزان ۷۰/۳۸ درصد کاهش یافته است. بیشترین مقادیر ذخایر کربن آلی اندازه‌گیری شده در عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری با ۵۰/۶۲ تن در هکتار مربوط به کاربری چمنزار (سال ۱۳۹۷) و کمترین مقدار آن در همین عمق با ۲۶/۲۹ تن در هکتار مربوط به کاربری اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - آیش (سال ۱۳۹۸) است. در کل بر اساس میانگین اندازه‌گیری‌ها در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ و همچنین عمق‌های صفر تا ۲۰ و ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متری (جدول ۴)، غلظت کربن آلی در کاربری‌های مورد مطالعه از روال زیر تبعیت می‌کند: چمنزار < مرتع < اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - نخود < اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - آیش. تغییر کاربری اراضی و تبدیل مراتع و چمنزارها به اراضی کشاورزی می‌تواند ذخیره کربن آلی خاک را از طریق تأثیر آن بر مقدار کربن آلی اضافه‌شده، چرخه کربن و توزیع آن به‌ویژه در لایه‌های زیرین را خاک تغییر دهد (Jobbagy and Jackson, 2000; You et al., 2020)، به طوری که در مقایسه با محصولات زراعی یک‌ساله، علف‌های بومی و مراتع دارای سیستم‌های ریشه‌ای عمیق‌تری هستند و می‌توانند تأثیر بیشتری بر پویایی و ذخیره کربن آلی خاک در لایه‌های عمیق‌تر خاک داشته باشند (Sarto et al., 2020). همسو با یافته‌های این پژوهش محققین زیادی کاهش کربن آلی خاک را در اثر زیر کشت بردن اراضی مرتعی و چمنزار گزارش کردند (Singh et al., 2016; Van Leeuwen et al., 2017; Liu et al., 2018; Qiu et al., 2019; You et al., 2021).

جدول ۴ نتایج مقادیر ویژگی‌های مختلف خاک در اعماق صفر تا ۲۰ سانتی‌متر و ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر در مدیریت چمنزار، مرتع، اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - آیش و تناوب زراعی گندم - نخود.

کاربری	سال	عمق (سانتی‌متر)	توزیع اندازه ذرات خاک			واکنش خاک	کربنات کلسیم معادل (درصد)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	ذخایر کربن آلی خاک (تن در هکتار)
			شن	سیلت	رس				
چمنزار	۱۳۹۷	۰-۲۰	۵۶/۸	۲۴/۶	۱۸/۶	۷/۲	۸/۶۶	۱/۰۹	۵۰/۶۲
			۵۳/۱	۲۴/۳	۲۲/۶	۷/۸	۱۲/۲۳	۱/۳۰	۱۵/۳۸
	۱۳۹۸	۰-۲۰	۵۵/۷	۲۵/۸	۱۸/۵	۷/۳	۸/۷۳	۱/۱۲	۴۹/۳۷
			۵۱/۰	۲۶/۷	۲۲/۳	۷/۷	۱۲/۴۳	۱/۳۰	۱۴/۶۲
مرتع	۱۳۹۷	۰-۲۰	۱۸/۸	۲۶/۲	۵۵/۰	۷/۳	۴/۳۱	۱/۱۱	۳۲/۱۲
			۴۵/۵	۲۷/۸	۲۶/۷	۷/۶	۵/۱۶	۱/۱۴	۱۱/۰۶
	۱۳۹۸	۰-۲۰	۱۹/۱	۲۵/۴	۵۵/۵	۷/۲	۴/۱۳	۱/۱۳	۳۳/۹۸
			۱۷/۲	۲۶/۸	۲۶/۰	۷/۶	۴/۸۹	۱/۱۴	۱۱/۷۶
تناوب گندم - آیش	۱۳۹۷	۰-۲۰	۴۹/۳	۲۴/۲	۲۶/۵	۷/۵	۶/۴۲	۱/۲۵	۲۸/۸۷
			۴۴/۴	۲۵/۳	۳۰/۳	۷/۷	۷/۱۱	۱/۲۷	۹/۸۶
	۱۳۹۸	۰-۲۰	۵۱/۳	۲۳/۷	۲۵/۰	۷/۶	۵/۸۶	۱/۲۲	۲۶/۲۹
			۴۹/۰	۲۴/۹	۲۶/۱	۷/۷	۷/۱۹	۱/۲۶	۹/۲۴
تناوب گندم - نخود	۱۳۹۷	۰-۲۰	۴۶/۰	۳۰/۰	۲۴/۰	۷/۵	۱۱/۵۶	۱/۲۴	۲۹/۱۶
			۳۸/۳	۳۳/۱	۲۸/۶	۷/۹	۲۰/۱۲	۱/۲۶	۱۰/۳۴
	۱۳۹۸	۰-۲۰	۴۷/۳	۲۹/۰	۴۷/۳	۷/۶	۱۰/۵۳	۱/۲۴	۳۰/۹۴
			۴۲/۰	۲۹/۷	۲۸/۳	۷/۸	۲۰/۶۶	۱/۲۵	۹/۷۴

مقادیر کمتر کربن آلی در خاک‌های اراضی زراعی توسط برخی از محققین به سوء مدیریت خاک از جمله استفاده نکردن از کودهای آلی، خروج بقایای محصولات از مزرعه، عدم جایگزینی عناصر مغذی و خاک‌ورزی ارتباط داده شده است (de Assis et al., 2010). در مقابل در مراتع و چمنزارهای بکر مقدار قابل توجهی مواد آلی از طریق بازگشت ریشه‌ها و لاشبرگ‌ها به خاک، منجر به افزایش کربن آلی در این کاربری‌ها می‌شود. کربن آلی یکی از شاخص‌های اصلی کیفیت خاک و سلامت محیط‌زیست است که دارای حساسیت زیادی نسبت به تغییر کاربری اراضی، عملیات خاک‌ورزی، تناوب زراعی، عملیات کوددهی و سایر عوامل اثرگذار بر مواد آلی کل خاک هست (Liu et al., 2018; Chen et al., 2018; Poepflau et al., 2011; Hobley et al., 2017; et al., 2010). از جمله دلایل اصلی هدررفت کربن آلی با مدیریت زراعت می‌توان به کاهش ورودی بقایای گیاهان، افزایش میزان معدنی شدن بقایای گیاهان بازگردانده شده و اثرات خاک‌ورزی که باعث کاهش میزان حفاظت فیزیکی کربن آلی در خاکدانه‌ها می‌شود، اشاره کرد (Martens et al., 2003; Six et al., 2002).

بر اساس نتایج تحقیق حاضر در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ میانگین مقدار ذخایر کربن آلی اندازه‌گیری شده در عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری خاک در کاربری اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - نخود نسبت به کاربری اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - آیش ۲/۴۷ تن در هکتار بیشتر بود. از دلایل اصلی اختلاف مقادیر کربن آلی در این دو نوع تناوب زراعی، حذف آیش و جایگزین کردن آن با کشت نخود است. آیش یا استراحت زمین باعث می‌شود که سرعت تجزیه مواد آلی افزایش یافته و فرسایش خاک نیز تشدید گردد که در نهایت موجبات هدر رفت مواد آلی خاک را بیش‌ازپیش فراهم می‌آورد (Bayer et al., 2006). در تحقیقی با بررسی اثرات تناوب‌های زراعی مختلف گندم بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک و عملکرد محصول مشاهده شد که بعد از تناوب ماشک - گندم تناوب‌های زراعی گلزنک - گندم، نخود - گندم و گندم - گندم به ترتیب بیشترین تأثیر را بر ذخیره کربن آلی خاک در مقایسه با تناوب گندم - آیش دارد (Abdolahi et al., 2014).

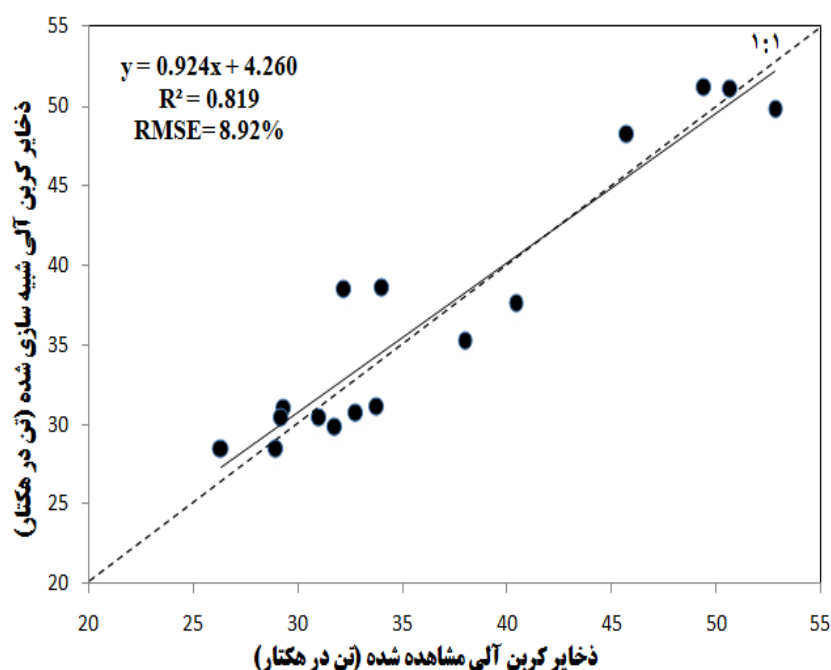
#### برآورد ذخایر کربن آلی خاک و نتایج اعتبارسنجی مدل

نتایج تعیین اعتبار مدل نشان داد که مدل RothC با دقت خوبی می‌تواند وضعیت مقدار ذخیره کربن آلی منطقه مورد مطالعه را شبیه‌سازی نماید. با توجه به اینکه در معادله مربوط به رگرسیون خطی بین مقادیر کربن اندازه‌گیری شده و مقادیر کربن شبیه‌سازی شده، شیب خط تقریباً برابر با یک و نزدیک خط ۱:۱ است، مدل کارایی لازم جهت تخمین روند تغییرات کربن آلی خاک را دارا است (شکل ۴). حداکثر اختلاف بین داده‌های ذخایر کربن آلی خاک مشاهده شده و شبیه‌سازی شده با تغییرات ۶/۰۲ تن در هکتار (۱۸ درصد) در کاربری مرتع و در داده‌های اندازه‌گیری شده در تحقیق حاضر (۱۳۹۷) و کمترین اختلاف نیز در کاربری اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - آیش به میزان ۰/۲۹ تن در هکتار (۱ درصد) بین داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل و داده‌های مشاهده شده در سال ۱۳۹۷ وجود داشت. اختلاف محاسبه شده در سایر پوشش‌های گیاهی دیگر از ۲/۹ تن در هکتار بیشتر نبود. ضریب همبستگی (r) برای ذخایر کربن آلی محاسبه شده توسط مدل RothC بزرگ‌تر از صفر و برابر ۰/۹ بود که بیانگر درجه بالایی از ارتباط و همبستگی مثبت بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده است. ضریب تعیین معیاری از نسبت واریانس کل است که در این مطالعه، ضریب تعیین محاسبه شده برای ذخایر کربن آلی خاک ۰/۸۲ بود که نشان‌دهنده اختلاف متوسط بین واریانس مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است (Smith et al., 1997). جذر میانگین مربعات خطا به‌عنوان اساسی‌ترین فاکتور در ارزیابی مدل RothC عنوان شده است (Farina et al., 2013). جذر میانگین مربعات خطا که نشان‌دهنده تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است در حد اطمینان ۹۵ درصد برای ذخایر کربن آلی خاک به ترتیب ۸/۹۲ درصد بود. راندمان مدل‌سازی برابر ۰/۷۴ و مثبت بود، بدین معنی که مدل RothC شبیه‌سازی ذخایر کربن آلی خاک را بهتر از میانگین حسابی بیان کرده است. نتایج آماری نشان می‌دهد که خروجی‌های مدل RothC به‌طور کافی روند ذخایر کربن آلی خاک را در چهار نوع پوشش گیاهی مورد مطالعه توصیف و همخوانی مناسبی با هم دارند.

#### شبیه‌سازی سناریوهای تغییر آب‌وهوا و کوددهی

سناریوهای انتخاب شده برای سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ (جدول ۳) شامل حفظ وضعیت کنونی (سناریو ۱)، تغییر اقلیم با افزایش متوسط دمای هوا و کاهش میزان بارش (سناریو ۲)، اجرای کوددهی با کود دامی (سناریو ۳) و اعمال توأمان اجرای کوددهی و تغییر اقلیم (سناریو ۴) هستند. سناریو ۱ در راستای بررسی تأثیر ادامه روند کنونی مدیریتی شامل مدیریت قرق در کاربری‌های مرتع و چمنزار و کشت محصول با رعایت تناوب‌های زراعی گندم - آیش و گندم - نخود در اراضی کشاورزی بدون کوددهی بر ذخایر کربن آلی خاک تنظیم شده است. سناریو ۲ با هدف بررسی اثر تغییرات اقلیمی پیش‌بینی شده برای غرب کشور (خصوصاً استان کردستان) بر ذخایر کربن آلی تحت کاربری‌های

مورد مطالعه تعریف شده است. نتایج تحقیقات مختلف نشان داده است که در دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت آینده در استان کردستان تحت تأثیر تغییرات جهانی و منطقه‌ای آب و هوایی قرار دارد که موجب کاهش میزان بارش و افزایش دما و تابش خورشید خواهد شد (Khalili Aghdam et al., 2012; Rasuli et al., 2014; Salahi et al., 2017; Zohrevandi et al., 2020). سناریو ۳ در راستای بررسی اثر استفاده از کود حیوانی به میزان مشخص در دوره زمانی چهار سال یک‌بار بر ذخیره کربن آلی در خاک‌های تحت کاربری‌های مورد مطالعه تعریف شد. این سناریو بر اساس پیشینه تاریخی نحوه مدیریت اراضی در منطقه سارال و سیاست‌ها و برنامه‌های کلان وزارت جهاد کشاورزی در استان کردستان (Bazargan et al., 2015; Roudgarmi and Amozadeh, 2019) تعریف شد. سناریو ۴ در راستای بررسی اثر هم‌زمان تغییر اقلیم و عملیات کوددهی بر مقدار کربن آلی خاک تعریف شده است.



شکل ۴- اعتبارسنجی مدل RothC با مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده ذخایر کربن آلی خاک در کاربری چمنزار، مرتع، اراضی کشاورزی با تناوب‌های زراعی گندم - نخود و گندم - آیش در سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۴، ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹.

### سناریو ۱ (حفظ وضعیت کنونی)

شکل ۵ مقادیر کربن آلی خاک شبیه‌سازی توسط مدل RothC با اعمال سناریوهای مختلف خاک برای کاربری‌های چمنزار، مرتع، اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - آیش و تناوب زراعی گندم - نخود از سال ۱۹۹۰ تا ۲۱۰۰ را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های خروجی مدل، مقدار ذخیره کربن آلی خاک تا سال ۲۱۰۰ (شکل ۵) برای دو کاربری چمنزار و مرتع با سناریو ۱ روند صعودی و برای دو کاربری اراضی کشاورزی با تناوب‌های زراعی گندم - آیش و گندم - نخود روند نزولی را نشان می‌دهند. نتایج تجزیه و تحلیل داده‌های خروجی (جدول ۵) نشان داد که تغییرات ترسیب کربن آلی خاک ( $\Delta$ SOCs) بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ در دو کاربری چمنزار و مرتع به ترتیب ۰/۰۸ و ۰/۱۰ تن در هکتار در سال است. برخلاف کاربری‌های چمنزار و مرتع، تغییرات ترسیب کربن آلی خاک در کاربری‌های اراضی کشاورزی با تناوب گندم - آیش و تناوب گندم - نخود به ترتیب ۰/۰۹- و ۰/۰۱- تن در هکتار در سال برآورد شده است. تجزیه و تحلیل این مقادیر بدین مفهوم است که ادامه روند مدیریت کشاورزی کنونی طی ۸۰ سال آینده نه تنها باعث ترسیب کربن آلی خاک نخواهد شد بلکه هدر رفت خاک را نیز تشدید خواهد کرد. این موضوع با مقایسه درصدهای نرخ ذخیره کربن آلی (SOC rate) تا پایان قرن ۲۱ در کاربری‌های مختلف (جدول ۵) نمایان‌تر است به طوری که با شبیه‌سازی ادامه وضعیت کنونی (سناریو ۱) کاربری مرتع با ۲۰/۹ درصد بیشترین مقدار نرخ ذخیره کربن آلی خاک و کاربری اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - آیش با ۲۴/۱- درصد دارای کمترین نرخ ذخیره کربن و بیشترین مقدار افت کربن آلی خاک را به خود اختصاص داده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی توسط مدل RothC ذخایر کربن آلی خاک در کاربری اراضی کشاورزی با تناوب گندم - نخود تا سال ۲۱۰۰ میلادی به مقدار ۱/۱ تن در هکتار کاهش می‌یابد در حالی

که این کاهش ذخیره‌سازی در اراضی کشاورزی با تناوب گندم - آیش به مقدار ۶/۸۶ تن در هکتار است. این نتایج بیانگر تأثیر مثبت حذف آیش و رعایت تناوب زراعی گندم - نخود بر مقدار کربن آلی و حاصلخیزی خاک است. در همخوانی با این یافته‌ها محققین دلیل اصلی افزایش ذخیره کربن آلی خاک را در اجرای تناوب زراعی گندم - نخود و گندم - کلزا به جای تناوب گندم - آیش افزایش ورودی کربن آلی به خاک و تثبیت نیتروژن بیشتر گزارش کردند (He et al. 2021).

شواهد حاکی از کاهش چشمگیر میزان ذخیره کربن آلی خاک در اثر تبدیل چمنزارها و مراتع بومی به زمین‌های کشاورزی داریم (Tong et al., 2019). این در حالی است که ذخیره کربن آلی ممکن است با اقداماتی از قبیل جنگل‌کاری زمین‌های زراعی تخریب‌شده (Liu and Li., 2019)، احیای مراتع (Wang et al., 2014) و تبدیل علفزارهای کم بازده به کشاورزی ارگانیک (Nautiyal et al., 2010) روند افزایشی داشته باشد.

جدول ۵. ذخایر کربن آلی خاک شبیه‌سازی‌شده، تغییرات ترسیب کربن آلی و نرخ ذخیره کربن آلی خاک در کاربری‌های مورد مطالعه طی سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۱۰۰

سناریوها	چمنزار				مرتع				اراضی کشاورزی					
	2100 t/hac	2020 t/hac	ΔSOCs t/hac	SOC rate %	2100 t/hac	2020 t/hac	ΔSOCs t/hac	SOC rate %	تناوب زراعی گندم - آیش	تناوب زراعی گندم - نخود	2100 t/hac	2020 t/hac	ΔSOCs t/hac	SOC rate %
۱	۵۷/۹۳	۱۳/۳	-۰/۸	۲۰/۹	۴۷/۹۸	۰/۰	-۲۲/۱	۲۱/۶۳	-۰/۱	۲۹/۴۵				
۲	۵۶/۳۷	۱۰/۱	-۰/۶	۱۶/۳	۴۶/۱۳	۳۹/۶۹	-۰/۸	۱۹/۳۸	-۰/۲	۲۸/۶۶	۳۰/۵۵			
۳	۵۹/۸۳	۱۷/۱	-۰/۱	۳۲/۹	۵۲/۷۳		-۰/۲	۲۶/۶۰	۰/۰۳	۳۲/۵۱				
۴	۵۸/۲۳	۱۳/۹	-۰/۹	۲۹/۵	۵۱/۴۹		-۰/۵	۲۴/۶۰	۰/۰۱	۳۱/۵۷				

ASOCs، تغییرات ترسیب کربن آلی خاک

## سناریو ۲ (تغییر اقلیم)

داده‌های شبیه‌سازی‌شده توسط مدل RothC نشان داد که تغییر اقلیم با افزایش ۴/۴ درجه سلسیوس متوسط دمای هوا و کاهش ۷/۷ درصدی میزان بارش تا سال ۲۱۰۰ میلادی، روند ذخیره کربن آلی خاک را نسبت به حفظ وضعیت کنونی (سناریو ۱) کاهش خواهد داد. بر این اساس با اعمال سناریو ۲ نرخ ذخیره کربن آلی خاک تا پایان قرن ۲۱ میلادی در کاربری‌های چمنزار، مرتع، اراضی کشاورزی با تناوب گندم - نخود و اراضی کشاورزی با تناوب گندم - آیش به ترتیب ۳/۲، ۴/۶، ۲/۶ و ۷/۹ درصد نسبت به سناریو ۱ کاهش خواهد یافت. مشابه با سناریو ۱ تغییرات ترسیب کربن آلی خاک در کاربری‌های چمنزار و مرتع به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۰۸ تن در هکتار در سال و در کاربری‌های اراضی کشاورزی با تناوب‌های گندم - آیش و گندم - نخود به ترتیب -۰/۱۱ و -۰/۰۲ تن در هکتار برآورد شد. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین مقدار ذخایر کربن آلی خاک در پایان قرن ۲۱ و پس از تغییر اقلیم پیش‌بینی‌شده مربوطه به کاربری چمنزار با



۵۶/۲۷ تن در هکتار و کمترین آن با اختلاف ۳۶/۸۹ تن در هکتار مربوط به کاربری اراضی کشاورزی با تناوب گندم - آیش با ۱۹/۳۸ تن در هکتار است. نتایج با یافته‌های سایر محققان مطابقت داشت ( Yokozawa et al., 2010; Fallahi et al., 2013; Soleimani et al., 2017). در تحقیقی کاهش محتوای کربن آلی خاک در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم برای آینده در سراسر اسپانیا با استفاده از مدل RothC پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد است که در میان پارامترهای اقلیمی، دما و بارندگی بیشترین تأثیر را در کنترل مقدار ماده آلی خاک داشتند (Jebari et al., 2018). مقدار کربن آلی خاک با کاهش میزان بارندگی کاهش می‌یابد، ولی در هر سطحی از بارش مقدار آن با افزایش دمای هوا کاهش خواهد یافت (Singh et al., 2011). نتایج اکثر مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که افزایش دمای هوا با افزایش سرعت تجزیه میکروبی و فرایند معدنی شدن باعث کاهش مقدار ماده آلی خاک خواهد شد (Smith et al., 2007; Köchy et al., 2015).

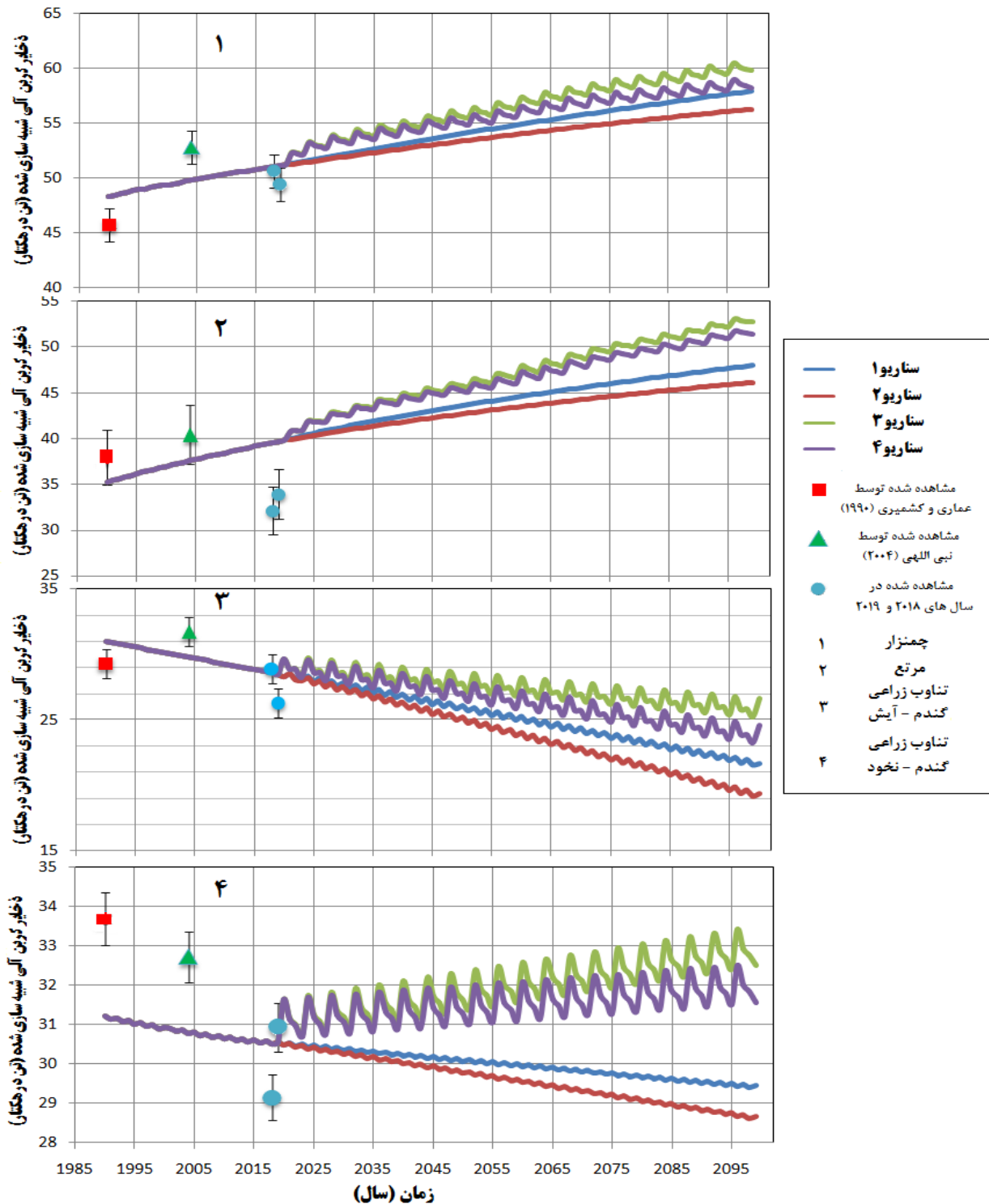
### سناریو ۳ (کوددهی با کود دامی)

تجزیه و تحلیل داده‌های خروجی مدل نشان داد (شکل ۵) که اعمال سناریو ۳ (کوددهی با سه تن در هکتار کود دامی هر چهار سال یک‌بار) بیشترین مقدار ذخیره کربن آلی را در پایان قرن ۲۱ در هر چهار کاربری چمنزار، مرتع، اراضی کشاورزی با تناوب گندم - نخود و اراضی کشاورزی با تناوب گندم - آیش (به ترتیب ۵۹/۸۳، ۶۰/۷۳، ۲۶/۵۲ و ۳۲/۵۱ تن در هکتار) خواهد داشت. در هماهنگی با نتایج این تحقیق Romanenkov et al. (2019) اظهار داشتند که میزان کربن آلی خاک در مدیریت‌های کوددهی با کود آلی طی ۳۰ سال به‌طور متوسط سالانه ۷ تا ۱۷ درصد افزایش خواهد یافت. نتایج نشان داد که بیشترین تغییرات ترسیب کربن آلی خاک با مدیریت کوددهی با کود دامی تا سال ۲۱۰۰ میلادی در کاربری مرتع با ۰/۱۶ تن در هکتار در سال و کمترین آن در کاربری اراضی کشاورزی با تناوب‌های گندم - آیش با ۰/۰۲- تن در هکتار در سال برآورد شد. داده‌های برآورد شده نشان داد که برخلاف کاربری اراضی کشاورزی با تناوب گندم - آیش، در کاربری اراضی کشاورزی با تناوب زراعی گندم - نخود پس از اعمال سناریو ۳ تغییرات ترسیب کربن آلی و نرخ ذخیره کربن آلی خاک در مقایسه با اعمال سناریوهای ۱ و ۲ به ترتیب ۰/۰۳ تن در هکتار در سال و ۶/۵ درصد خواهد شد. این موضوع نشان‌دهنده اثر چشمگیر عملیات اصلاحی کوددهی در کنار حذف آیش و رعایت تناوب کشت گندم با کاشت نخود است. Halvorson et al. (2002) با حذف آیش در تناوب زراعی گندم - آیش، افزایش کربن آلی خاک را گزارش نمودند. کاربرد کودهای آلی (دامی) به‌عنوان جایگزین و یا مکمل کودهای شیمیایی با بهبود و حفظ باروری خاک و مدیریت صحیح حاصلخیزی آن سبب تأمین مواد غذایی موردنیاز گیاه و افزایش عملکرد آن می‌شود و در نتیجه می‌تواند پایداری تولید در نظام‌های کشاورزی را تضمین کند (Mahantaa et al., 2014). در تحقیقی بیشترین تعداد سنبله در مترمربع، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه گندم با کاربرد کود دامی نسبت به کاربرد کود شیمیایی و شاهد گزارش شده است (Moradi et al., 2016). استفاده از کودهای دامی موجب بهبود رشد و نمو و افزایش عملکرد گیاه نخود شده است (Nemati et al., 2016). نتایج داده‌های شبیه‌سازی شده این مطالعه همانند سایر تحقیقات مشابه بیانگر آن بود که مدل RothC به‌صورت موفقیت‌آمیزی اثر فاکتور اصلاحی کوددهی با کود دامی را بر مقدار ماده آلی خاک نشان می‌دهد (Barančíková et al., 2010; Romanenkov et al., 2019; Singh et al., 2021).

### سناریو ۴ (کود دهی با کود دامی هم‌زمان با تغییر اقلیم)

در سناریو ۴ اعمال هم‌زمان عملیات اصلاحی کوددهی با کود دامی (سه تن در هکتار به‌صورت هر چهار سال یک‌بار) و تغییر اقلیم (افزایش ۴/۴ درجه سلسیوس متوسط دمای هوا و کاهش ۷/۷ درصدی میزان بارش) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج خروجی مدل نشان داد که مقدار ذخیره کربن آلی خاک پس از اعمال سناریو ۴ در پایان قرن ۲۱ در چهار کاربری چمنزار، مرتع، اراضی کشاورزی با تناوب گندم - آیش و اراضی کشاورزی با تناوب گندم - نخود به ترتیب ۲/۷، ۲/۵، ۷/۵ و ۲/۹ درصد کمتر از اعمال سناریو ۳ و به ترتیب ۱۱/۴، ۲۶/۹ و ۱۰/۲ درصد بیشتر از اعمال سناریو ۲ است. بر اساس نتایج ارائه‌شده (جدول ۵) برآیند اثرات استفاده از کود دامی و تغییر اقلیم پیش‌بینی شده برای منطقه مورد مطالعه مثبت بود به‌طوری‌که در کاربری‌های چمنزار و مرتع موجب افزایش مقدار ذخایر کربن آلی خاک و در کاربری اراضی کشاورزی موجب کاهش کمتر کربن آلی خاک نسبت به حفظ وضعیت کنونی گردید. تجزیه و تحلیل داده‌های خروجی مدل نشان داد (شکل ۵) که تغییرات ترسیب کربن آلی خاک و نرخ ذخیره کربن آلی خاک با اعمال سناریو ۴ در هر چهار کاربری مورد مطالعه بیشتر از حفظ وضعیت کنونی (سناریو ۱) خواهد شد. استفاده از کودهای دامی به افزایش ماده آلی، عناصر معدنی، بهبود ساختمان خاک و افزایش عملکرد تولیدات گیاهی می‌شود (Courtney and Mullen, 2008) از سوی دیگر تغییرات اقلیمی که هم به‌صورت طبیعی و هم به دلیل

تأثیر فعالیت‌های انسانی به وجود خواهد آمد، موجب افت ذخیره کربن آلی خاک نسبت به شرایط عدم‌تغییر اقلیم می‌گردد (Singh et al., 2011). در هماهنگی با این نتایج محققان با استفاده از مدل RothC تغییرات ترسیب کربن آلی خاک با اعمال سناریوهای مختلف تغییر اقلیم و عملیات اصلاحی کوددهی با استفاده از کود دامی در مناطق وسیعی از شمال اتیوپی، بین ۰/۱۸ تا ۰/۵۲ تن در هکتار در سال گزارش کردند (Mesfin et al., 2021).



شکل ۵- ذخایر کربن آلی شبیه‌سازی شده توسط مدل RothC با اعمال سناریوهای مختلف در کاربری‌های مورد مطالعه

## نتیجه‌گیری

نتایج داده‌های شبیه‌سازی شده با مدل RothC نشان داد که کاربری‌های چمنزار، مرتع، اراضی کشاورزی با تناوب گندم - آیش و اراضی کشاورزی با تناوب گندم - نخود با اعمال سناریوهای تغییر اقلیم و کوددهی اثرات متفاوت و پیچیده‌ای بر ذخایر کربن آلی کل خاک خواهد داشت. تغییر در کاربری و مدیریت خاک در طی یک دوره طولانی کشاورزی و تناوب زراعی محصول - آیش باعث افت ذخایر کربن آلی شده است. همچنین شرایط قرق و استفاده از کود دامی در کاربری‌های چمنزار و مرتع تأثیر بسزایی در ذخیره کربن آلی خاک برجای خواهد گذاشت. مدل RothC کالیبره شده به خوبی اثر این تغییرات را شبیه‌سازی نمود. با توجه به اینکه وقوع تغییرات آب و هوایی طی سال‌های آینده انکارناپذیر خواهد بود لذا بر اساس نتایج خروجی مدل، مدیریت اراضی شامل استفاده از روش اصلاحی کوددهی با کود دامی می‌تواند راهکار مناسبی در جبران هدر رفت کربن آلی خاک و تقویت آن باشد. در میان کاربری‌های مورد مطالعه بیشترین مقدار ذخیره کربن آلی خاک تا پایان قرن ۲۱ در کاربری چمنزار با اعمال سناریو ۳ (کوددهی) با ۵۹/۸۳ تن در هکتار و کمترین مقدار در کاربری اراضی کشاورزی با تناوب گندم - آیش با اعمال سناریو ۲ (تغییر اقلیم) با ۱۹/۳۸ تن در هکتار برآورد گردد. بر اساس نتایج اعمال سناریوهای ۳ و ۴ در کاربری اراضی کشاورزی با تناوب گندم - نخود از سال ۲۰۲۰ تا سال ۲۱۰۰ موجب تغییر روند و مثبت شدن تغییرات ترسیب کربن آلی و نرخ ذخیره کربن آلی خاک شده و در پایان سال ۲۱۰۰ به ترتیب موجب افزایش ۴/۱ و ۱/۱ درصدی مقدار ذخایر کربن آلی خاک نسبت به مقدار اولیه برآورد شده در سال ۱۹۹۰ میلادی خواهد شد. با این حال نتایج خروجی مدل بر اثرات زیان‌بار آیش و استراحت زمین دلالت دارد به طوری که ادامه این روش مدیریتی تا پایان سال ۲۱۰۰ میلادی موجب هدر رفت سالانه ذخایر کربن آلی خاک به مقدار ۰/۱۱ تن در هکتار در سال خواهد شد. ارزیابی داده‌های شبیه‌سازی شده در مقایسه با داده‌های مشاهده شده نشان داد که RothC مدلی کارآمد برای پیشنهاد سناریوهای جایگزین شامل بهترین شیوه‌های مدیریتی جهت افزایش تولید محصولات کشاورزی و کیفیت خاک در شرایط مختلف تغییرات آب و هوایی در منطقه سارال استان کردستان است.

## سپاس‌گزاری

از دانشگاه زنجان به خاطر حمایت‌های مالی این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Abdollahi, A., Nemati, A., Valizadeh, G. (2014). Study on effects of different crop rotations based on wheat on soil physicochemical properties and economical performance in dryland condition of Kermanshah. *Iranian Dryland Agronomy Journal*, 3(2), 161-171. (In Persian).
- Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), 2016. Saral Research Station. Available at: <https://kurdistan.areeo.ac.ir/fa-IR/kurdistan.areeo.ac/26801>.
- Ajami, M., Heidari, A., Khormali, F., Gorji, M., Ayoubi, S. (2020). Effect of Topography Indices and Soil Characteristics on Rainfed Wheat Yield in Loess Lands of Toshan Area, Northern Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(1), 93-105. (In Persian).
- Amari, P. & Kashmiri, F. (1991). Detailed Soil Studies and Land Classification for Irrigation and Demolition of Kharkeh Research Station (Saral), Kurdistan Province, Soil and Water Research Institute, Journal No. 837, p.131. (In Persian).
- Ayoubi, S., Mokhtari, J., Mosaddeghi, M. R., & Zeraatpisheh, M. (2018). Erodibility of calcareous soils as influenced by land use and intrinsic soil properties in a semiarid region of central Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 190(4), 1-12.
- Azad, B., Afzali, S. (2019). Evaluation of Two Soil Carbon Models Performance Using Measured Data in Semi-arid Rangelands of Bajgah, Fars Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(4), 819-835. (In Persian).
- Baldock, J. A. (2007). Composition and cycling of organic carbon in soil. In *Nutrient cycling in terrestrial ecosystems* (pp. 1-35). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Barančíková, G., Halas, J., Guttekova, M., Makovnikova, J., Novakova, M., Skalský, R., & Tarasovičová, Z. (2010). Application of RothC model to predict soil organic carbon stock on agricultural soils of Slovakia. *Soil and Water Research*, 5(1), 1-9.



- Bayer, C., Martin-Neto, L., Mielniczuk, J., Dieckow, J., & Amado, T. J. (2006). C and N stocks and the role of molecular recalcitrance and organomineral interaction in stabilizing soil organic matter in a subtropical Acrisol managed under no-tillage. *Geoderma*, 133(3-4), 258-268.
- Bazargan, K., Rezaei, H., Davatgar, N., Asadi Rahmani, H., Moshiri, F., Shahbazi, K., Davoodi, M.H., Saadat, S., Balali M.R., Ghalebi, S. & Fallah, A., (2015). Exploitation of Iranian soil and water resources. *Soil and Water Research Institute*. 1:34-37. (In Persian).
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk density. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 363-375.
- Bleuler, M., Farina, R., Francaviglia, R., di Bene, C., Napoli, R., & Marchetti, A. (2017). Modelling the impacts of different carbon sources on the soil organic carbon stock and CO<sub>2</sub> emissions in the Foggia province (Southern Italy). *Agricultural Systems*, 157, 258-268.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy journal*, 54(5), 464-465.
- Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (2007). *Soil sampling and methods of analysis*. CRC press.
- Celik, I. (2005). Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil and Tillage research*, 83(2), 270-277.
- Chaves e Carvalho, S. D. P., & de Lima, M. P. (2015). Database approach to calibrate growth and yield models in forestry production systems. *Advances in Forestry Science*, 2(3), 69-72.
- Chen, S., Wang, W., Xu, W., Wang, Y., Wan, H., Chen, D., ... & Bai, Y. (2018). Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(16), 4027-4032.
- Coleman, K., & Jenkinson, D. S. (1996). RothC-26.3-A Model for the turnover of carbon in soil. In *Evaluation of soil organic matter models* (pp. 237-246). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Courtney, R. G., & Mullen, G. J. (2008). Soil quality and barley growth as influenced by the land application of two compost types. *Bioresource Technology*, 99(8), 2913-2918.
- Cui, X., Wang, Y., Niu, H., Wu, J., Wang, S., Schnug, E., ... & Tang, Y. (2005). Effect of long-term grazing on soil organic carbon content in semiarid steppes in Inner Mongolia. *Ecological Research*, 20(5), 519-527.
- De Assis, C. P., de Oliveira, T. S., da Nóbrega Dantas, J. D. A., & de Sá Mendonça, E. (2010). Organic matter and phosphorus fractions in irrigated agroecosystems in a semi-arid region of Northeastern Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 138(1-2), 74-82.
- Dechow, R. Franko, U. Kätterer, T. and Kolbe, H., 2019. Evaluation of the RothC model as a prognostic tool for the prediction of SOC trends in response to management practices on arable land. *Geoderma*. 337: 463-478.
- Derner, J. D., & Schuman, G. E. (2007). Carbon sequestration and rangelands: a synthesis of land management and precipitation effects. *Journal of soil and water conservation*, 62(2), 77-85.
- Fallahi, J., Rezvani Moghaddam, P., Nasiri Mahallati, M. & Behdani, M.A. (2013). Validation of RothC Model for Evaluation of Carbon Sequestration in a Restorated Ecosystem under Two Different Climatic Scenarios. *Journal of Water and Soil*, 27(3), 668-658. (In Persian).
- Falloon, P. (1998). Estimating the size of the inert organic matter pool from total soil organic carbon content for use in the Rothamsted carbon model. *Soil Biol. Biochem.*, 30, 1207-1211.
- Falloon, P., & Smith, P. (2002). Simulating SOC changes in long-term experiments with RothC and CENTURY: model evaluation for a regional scale application. *Soil use and management*, 18(2), 101-111.
- Frasti, M., & Karimi, M. (2013). Comparison of different methods for estimating evapotranspiration of reference plant under different climatic conditions. The 1st National Conference on Natural Resources Management. *Gonbad Kavous University*.
- Farina, R., Coleman, K., & Whitmore, A. P. (2013). Modification of the RothC model for simulations of soil organic C dynamics in dryland regions. *Geoderma*, 200, 18-30.
- 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(1), 125-137.
- Fu, C., Chen, Z., Wang, G., Yu, X., & Yu, G. (2021). A comprehensive framework for evaluating the impact of land use change and management on soil organic carbon stocks in global drylands. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 48, 103-109.
- Geissen, V., Sánchez-Hernández, R., Kampichler, C., Ramos-Reyes, R., Sepulveda-Lozada, A., Ochoa-Goana, S., ... & Hernández-Daumas, S. (2009). Effects of land-use change on some properties of tropical

soils—an example from Southeast Mexico. *Geoderma*, 151(3-4), 87-97.

Guo, L. B., & Gifford, R. M. (2002). Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global change biology*, 8(4), 345-360.

Guo, L., Falloon, P., Coleman, K., Zhou, B., Li, Y., Lin, E., & Zhang, F. (2007). Application of the RothC model to the results of long-term experiments on typical upland soils in northern China. *Soil use and management*, 23(1), 63-70.

Halvorson, A. D., Peterson, G. A., & Reule, C. A. (2002). Tillage system and crop rotation effects on dryland crop yields and soil carbon in the central Great Plains.

He, W., Grant, B. B., Jing, Q., Lemke, R., Luce, M. S., Jiang, R., ... & Smith, W. N. (2021). Measuring and modeling soil carbon sequestration under diverse cropping systems in the semiarid prairies of western Canada. *Journal of Cleaner Production*, 328, 129614.

Herbst, M., Welp, G., Macdonald, A., Jate, M., Hädicke, A., Scherer, H., ... & Vanderborght, J. (2018). Correspondence of measured soil carbon fractions and RothC pools for equilibrium and non-equilibrium states. *Geoderma*, 314, 37-46.

Hobley, E., Baldock, J., Hua, Q., & Wilson, B. (2017). Land-use contrasts reveal instability of subsoil organic carbon. *Global change biology*, 23(2), 955-965.

Jafarian, Z., & Kaviani, A. (2013). Effects of land-use change on soil organic carbon and nitrogen. *Communications in soil science and plant analysis*, 44(1-4), 339-346.

Jangid, K., Williams, M. A., Franzluebbers, A. J., Sanderlin, J. S., Reeves, J. H., Jenkins, M. B., ... & Whitman, W. B. (2008). Relative impacts of land-use, management intensity and fertilization upon soil microbial community structure in agricultural systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(11), 2843-2853.

Jebari, A., Prado, A. D., Pardo, G., Rodriguez Martin, J. A., & Álvaro-Fuentes, J. (2018). Modeling regional effects of climate change on soil organic carbon in Spain.

Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological applications*, 10(2), 423-436.

Karami, P., (2010). Simulation of rangeland ecosystems performance in west of Iran using CENTURY model (Case study: Saral region of Kurdistan). Ph.D Thesis in Rangeland Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.

Kennedy, I. R., Choudhury, A. T. M. A., Kecskés, M. L., Roughley, R. J., & Hien, N. T. (2005). Non-symbiotic bacterial diazotrophs in crop-farming systems: can their potential for plant growth promotion be better exploited? In *Biological Nitrogen Fixation, Sustainable Agriculture and the Environment* (pp. 271-272). Springer, Dordrecht.

Khaleghi, S., Bazazan, F. & Madani, S. (2015). The Effect of Climate Change on Agricultural Production and on the Economy of Iran) Social Accounting Matrix Approach). *Agricultural Economics Research*. 7, 113-135.

Khalili Aghdam, N., Masaedi, A., Soltani, A. & Kamkar, B. (2012). Evaluation of the ability of LARS-WG model in predicting some atmospheric parameters of Sanandaj. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 19(4), 85-102. (In Persian).

Köchy, M., Don, A., van der Molen, M. K., & Freibauer, A. (2015). Global distribution of soil organic carbon—Part 2: Certainty of changes related to land use and climate. *Soil*, 1(1), 367-380.

Lal, R. (2001). Potential of desertification control to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. *Climatic change*, 51(1), 35-72.

Li Liu, D., Chan, K. Y., Conyers, M. K., Li, G., & Poile, G. J. (2011). Simulation of soil organic carbon dynamics under different pasture managements using the RothC carbon model. *Geoderma*, 165(1), 69-77.

Liu, D., Huang, Y., An, S., Sun, H., Bhople, P., & Chen, Z. (2018). Soil physicochemical and microbial characteristics of contrasting land-use types along soil depth gradients. *Catena*, 162, 345-353.

Liu, M. Y., Chang, Q. R., Qi, Y. B., & Sun, N. (2010). Soil organic carbon and particulate organic carbon under different land use types on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 25(2), 218-226.

Liu, Y., & Li, Y. (2019). Synergy and trade-off between carbon sequestration and soil water balance: impact of revegetation choices. *Environmental Earth Sciences*, 78(23), 1-10.

Lizaga, I., Quijano, L., Gaspar, L., Ramos, M. C., & Navas, A. (2019). Linking land use changes to variation in soil properties in a Mediterranean mountain agroecosystem. *Catena*, 172, 516-527.

Mahanta, D., Rai, R. K., Mishra, S. D., Raja, A., Purakayastha, T. J., & Varghese, E. (2014). Influence



of phosphorus and biofertilizers on soybean and wheat root growth and properties. *Field Crops Research*, 166, 1-9.

McSherry, M. E., & Ritchie, M. E. (2013). Effects of grazing on grassland soil carbon: a global review. *Global change biology*, 19(5), 1347-1357.

Mehmandoust, F., Owliaie, H. R., Adhami, E., & Naghiha, R. (2018). Effect of land use change on some physicochemical and biological properties of the soils of Servak plain, Yasouj region. *Journal of Water and Soil*, 32(3). (In Persian).

Mesfin, S., Gebresamuel, G., Haile, M., & Zenebe, A. (2021). Modelling spatial and temporal soil organic carbon dynamics under climate and land management change scenarios, northern Ethiopia. *European Journal of Soil Science*, 72(3), 1298-1311.

Mondini, C., Coleman, K., & Whitmore, A. P. (2012). Spatially explicit modelling of changes in soil organic C in agricultural soils in Italy, 2001–2100: Potential for compost amendment. *Agriculture, ecosystems & environment*, 153, 24-32.

Moradi, M., Soleymanifard, A., Naseri, R., Ghasemi, M., & Abromand, K. (2016). The changes of agronomic traits and harvest index of wheat under the effect of manure and plant growth promotion bacteria at different levels of nitrogen. *Crop physiology journal*, 7(28), 73-90.

Nabiollahi, K. (2005). Evolution of clay minerals and their relationship with different forms of potassium in the soils of Kharkeh research station in Kurdistan province. Master Thesis in Soil Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian).

Nautiyal, C. S., Chauhan, P. S., & Bhatia, C. R. (2010). Changes in soil physico-chemical properties and microbial functional diversity due to 14 years of conversion of grassland to organic agriculture in semi-arid agroecosystem. *Soil and Tillage Research*, 109(2), 55-60.

Nelson, R. E. (1982). Carbonate and gypsum. Methods of soil analysis: Part 2; Chemical and microbiological properties. Wisconsin, US: American Society of Agronomy. 181-197.

Nemati, A., Rafieiolhossaini, M., Danesh-shahraki, A. (2017). The effect of bacterial inoculation and cow manure on physiological indices, grain yield and yield components of chickpea (*Cicer arietum*) under drought stress conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 9(4), 339-351. (In Persian).

Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G. P., & Smith, P. (2016). Climate-smart soils. *Nature*, 532(7597), 49-57.

Poepflau, C., Don, A., Vesterdal, L., Leifeld, J., Van Wesemael, B. A. S., Schumacher, J., & Gensior, A. (2011). Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone—carbon response functions as a model approach. *Global change biology*, 17(7), 2415-2427.

Presley, D. R., Ransom, M. D., Kluitenberg, G. J., & Finnell, P. R. (2004). Effects of thirty years of irrigation on the genesis and morphology of two semiarid soils in Kansas.

Qiu, X., Peng, D., Wang, H., Wang, Z., & Cheng, S. (2019). Minimum data set for evaluation of stand density effects on soil quality in *Larix principis-rupprechtii* plantations in North China. *Ecological Indicators*, 103, 236-247.

Rasuli, A., Rezaei-Banafsheh, M., & Ghermezcheshmeh, B. (2014). Investigation impact of morpho-climatic parameters on accuracy of LARS-WG model. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 8(24), 9-24. (In Persian).

Riahi, M. R., Vahabzadeh, G., & Raei, R. (2016). The role of land use change on some soil physicochemical properties (case study: watershed basin of Keyasar Galooga). *Water and Soil Science*, 26(1-1), 159-171. (In Persian).

Romanenkov, V., Belichenko, M., Petrova, A., Raskatova, T., Jahn, G., & Krasilnikov, P. (2019). Soil organic carbon dynamics in long-term experiments with mineral and organic fertilizers in Russia. *Geoderma Regional*, 17, e00221.

Roudgarmi, P., and Amozadeh, M. (2019). Review of State Laws and Regulations on Forests and Rangelands. *Land Management Journal*, 6(2), 153-167. (In Persian).

Rouhi, A., Kanoni, H., & Sedri, M.H. (2016). Food Security Promotion Project Iran- ICARDA. Saral Research Station of Kurdistan Province, Agricultural Research, Education and Extension Organization. (In Persian).

Salahi, B., Goudarzi, M., & Hosseini, S. A. (2017). Prediction of the Climate Parameters in the Urmia Lake Basin during 2011-2030. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 11(37), 47-56. (In Persian).

Sarto, M. V., Borges, W. L., Sarto, J. R., Rice, C. W., & Rosolem, C. A. (2020). Deep soil carbon stock, origin, and root interaction in a tropical integrated crop–livestock system. *Agroforestry Systems*, 94(5),



1865-1877.

Singh, A. K., Rai, A., & Singh, N. (2016). Effect of long term land use systems on fractions of glomalin and soil organic carbon in the Indo-Gangetic plain. *Geoderma*, 277, 41-50.

Singh, P., Singh, G., Sodhi, G. P. S., & Sharma, S. (2021). Energy optimization in wheat establishment following rice residue management with Happy Seeder technology for reduced carbon footprints in north-western India. *Energy*, 230, 120680.

Singh, S. K., Pandey, C. B., Sidhu, G. S., Sarkar, D., & Sagar, R. (2011). Concentration and stock of carbon in the soils affected by land uses and climates in the western Himalaya, India. *Catena*, 87(1), 78-89.

Smith, P., Smith, J. U., Franko, U., Kuka, K., Romanenkov, V. A., Shevtsova, L. K., ... & Lisovoi, N. V. (2007). Changes in mineral soil organic carbon stocks in the croplands of European Russia and the Ukraine, 1990–2070; comparison of three models and implications for climate mitigation. *Regional Environmental Change*, 7(2), 105-119.

Smith, P., Smith, J. U., Powlson, D. S., McGill, W. B., Arah, J. R. M., Chertov, O. G., ... & Whitmore, A. P. (1997). A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*, 81(1-2), 153-225.

Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th Edn Washington.DC: Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture.

Soleimani, A., Hosseini, S. M., Bavani, A. R. M., 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, 1646-1657.

Tan, W. F., Zhang, R., Cao, H., Huang, C. Q., Yang, Q. K., Wang, M. K., & Koopal, L. K. (2014). Soil inorganic carbon stock under different soil types and land uses on the Loess Plateau region of China. *Catena*, 121, 22-30.

Tong, J., Hu, J., Lu, Z., Sun, H., & Yang, X. (2019). The impact of land use and cover change on soil organic carbon and total nitrogen storage in the Heihe River Basin: A meta-analysis. *Journal of Geographical Sciences*, 29(9), 1578-1594.

Trumbore, S. E., Davidson, E. A., Barbosa de Camargo, P., Nepstad, D. C., & Martinelli, L. A. (1995). Belowground cycling of carbon in forests and pastures of Eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(4), 515-528.

Van Leeuwen, J. P., Djukic, I., Bloem, J., Lehtinen, T., Hemerik, L., De Ruiter, P. C., & Lair, G. J. (2017). Effects of land use on soil microbial biomass, activity and community structure at different soil depths in the Danube floodplain. *European journal of soil biology*, 79, 14-20.

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.

Wang, D., Wu, G. L., Zhu, Y. J., & Shi, Z. H. (2014). Grazing exclusion effects on above-and below-ground C and N pools of typical grassland on the Loess Plateau (China). *Catena*, 123, 113-120.

Waters, C. M., Orgill, S. E., Melville, G. J., Toole, I. D., & Smith, W. J. (2017). Management of grazing intensity in the semi-arid rangelands of Southern Australia: Effects on soil and biodiversity. *Land Degradation & Development*, 28(4), 1363-1375.

Wilford, J., De Caritat, P., & Bui, E. (2015). Modelling the abundance of soil calcium carbonate across Australia using geochemical survey data and environmental predictors. *Geoderma*, 259, 81-92.

Yao, Z., Zhang, D., Yao, P., Zhao, N., Liu, N., Zhai, B., ... & Gao, Y. (2017). Coupling life-cycle assessment and the RothC model to estimate the carbon footprint of green manure-based wheat production in China. *Science of the Total Environment*, 607, 433-442.

Yazdanparast, P. (2008). *Investigating the Relationship between Vegetation Factors and Habitat Characteristics (Adafic and Physiographic), A Case Study of Saral Research Station in Kurdistan Province*. Ms.C Thesis in Range Management, Islamic Azad University, Science and Research Branch.

Yokozawa, M., Shirato, Y., Sakamoto, T., Yonemura, S., Nakai, M., & Ohkura, T. (2010). Use of the RothC model to estimate the carbon sequestration potential of organic matter application in Japanese arable soils. *Soil Science & Plant Nutrition*, 56(1), 168-176.

You, M., Li, L. J., Tian, Q., He, P., He, G., Hao, X. X., & Horwath, W. R. (2020). Residue decomposition and priming of soil organic carbon following different NPK fertilizer histories. *Soil Science Society of America Journal*, 84(6), 1898-1909.

You, M., Zhu-Barker, X., Hao, X. X., & Li, L. J. (2021). Profile distribution of soil organic carbon and



its isotopic value following long term land-use changes. *Catena*, 207, 105623.

Zimmermann, M., Leifeld, J., Schmidt, M. W. I., Smith, P., & Fuhrer, J. (2007). Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model. *European Journal of Soil Science*, 58(3), 658-667.

Zohrevandi, H., Khorshid Dost, A., and Sari saraf, B. (2020). Prediction of Climate Change in Western of Iran using Downscaling of HadCM3 Model under Different Scenarios. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazarts*, 7(1), 49-64. (In Persian).