



Modeling the impact of climate change on soil organic carbon pools in the semi-arid climate of Mashhad using the RothC model

Saba Bagherifam¹, Mohammad Amir Delavar^{2✉}, Payman Keshavarz³, Parviz Karami⁴

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. Email: saba.bagherifam@gmail.com

2. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. Email: amir-delavar@znu.ac.ir

3. Department of Soil and Water Research, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Mashhad, Iran. Email: pykeshavarz@yahoo.com

4. Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. Email: p.karami@uok.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 25, 2022

Revised: Oct. 14, 2022

Accepted: Oct. 26, 2022

Published online: Dec. 22, 2022

Keywords:

Decomposition of soil organic matter,
Active carbon pools,
Rothamsted carbon model,
Calibration and Validation of RothC.

ABSTRACT

Soil organic carbon is a key element in determining soil quality, health, and fertility. Due to the complexity of the structure and relationships of soil organic carbon pools, the use of models is beneficial in identifying the reaction of these pools to the change in ecosystem conditions. So, by using the RothC model, the effect of global warming and climate change on the amount of soil organic carbon pool of the agricultural ecosystem of southeastern of Mashhad was investigated. Therefore, the model was calibrated and validated using data measured in 2020 and available long-term data. Comparing the measured values of soil organic carbon and the simulated values by the model, the coefficient of determination (R^2) was 0.89. Root means square error (RMSE): 3.45, mean difference (MD): 1.84, mean absolute error (MAE): 2.79, and model efficiency (EF) was 0.73, demonstrating the validity and suitability of the model. The modeling of the future climate changes of Mashhad showed a decrease in rainfall and an increase in temperature and evaporation, leading the amount of total soil organic carbon (TOC) would decrease by 1.13% compared to the current conditions. Considering the decomposition rate constant of the model's four active carbon pools, humus exhibited the slowest decomposition rate of 0.96%. At the same time, decomposable plant materials (DPM), resistant plant materials (RPM), and microbial biomass (BIO) were decreased by 1.18%, 2.21%, and 2.10%, respectively, compared to the current climate condition. Moreover, over time, the decomposition rate decreased due to the decay of active organic matter pools that are easily decomposed.

Cite this article: Bagherifam, S., Delavar, M. A., Keshavarz, P., & Karami, P. (2022). Modeling the impact of climate change on soil organic carbon pools in the semi-arid climate of Mashhad using the RothC model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (10), 2349-2363. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.346264.669327>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.346264.669327>



اثر تغییرات اقلیمی بر مقادیر ذخایر کربن آلی خاک اقلیم نیمه خشک مشهد با استفاده از مدل RothC

صبا باقریفام^۱، محمد امیر دلاور^۲، پیمان کشاورز^۳، پرویز کرمی^۴۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، ایمیل: saba.bagherifam@gmail.com۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، ایمیل: amir-delavar@znu.ac.ir۳. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، مشهد، ایران، ایمیل: pykeshavarz@yahoo.com۴. گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران، ایمیل: p.karami@uok.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	کربن آلی خاک یک جز کلیدی در تعیین کیفیت، سلامت و حاصلخیزی خاک است که با توجه به پیچیدگی ساختار و روابط ذخایر کربن آلی، بهره‌گیری از مدل‌ها در شناسایی واکنش این ذخایر نسبت به تغییر شرایط بوم نظام بسیار کارگشا است. از این رو با استفاده از مدل RothC، اثر گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی، بر مقادیر ذخایر کربن آلی خاک بوم نظام زراعی جنوب شرقی مشهد بررسی شد. برای این منظور ابتدا مدل با استفاده از داده‌های مطالعات پیشین و مقادیر اندازه‌گیری شده در سال ۲۰۲۰، مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفت. با مقایسه بین مقادیر کل کربن آلی خاک اندازه‌گیری شده در مناطق مطالعاتی و مقادیر شبیه‌سازی شده به وسیله مدل، ضریب تبیین معادل ۰/۸۹، ریشه میانگین مربعات خطا ۳/۴۵، تفاوت میانگین ۱/۸۴، میانگین مطلق خطا ۲/۷۹ و کارایی مدل ۰/۷۳ به دست آمد. این نتایج بیانگر اعتبار و قابلیت به کارگیری مدل است. مدل‌سازی تغییرات اقلیمی آینده مشهد نشان داد که با کاهش بارندگی و افزایش دما و تبخیر، میزان ذخیره کل کربن آلی خاک نسبت به شرایط عدم وقوع تغییرات اقلیمی ۱/۱۳ درصد کاهش دارد. با توجه به ثابت سرعت تجزیه ذخایر چهارگانه کربن فعال مدل، هوموس با کندترین سرعت تجزیه، به میزان ۰/۹۶ درصد و بخش‌های مواد گیاهی تجزیه‌پذیر، مواد گیاهی مقاوم و زیست‌توده میکروبی به ترتیب ۱/۱۸، ۲/۲۱ و ۲/۱۰ درصد نسبت به شرایط اقلیمی کنونی کاهش داشتند. نتایج نشان داد که با گذشت زمان به دلیل تجزیه شدن بخش‌های فعال ماده آلی که به سهولت تجزیه می‌شوند، سرعت تجزیه کاهش می‌یابد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۵/۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۷/۲۲	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۸/۴	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۰/۱	
واژه‌های کلیدی: تجزیه ماده آلی، ذخایر کربن فعال، واسنجی و اعتبارسنجی RothC.	

استناد: باقریفام؛ صبا، دلاور؛ محمدامیر، کشاورز؛ پیمان، کرمی؛ پرویز (۱۴۰۱). اثر تغییرات اقلیمی بر مقادیر ذخایر کربن آلی خاک اقلیم نیمه‌خشک مشهد با استفاده از مدل RothC. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۱۰)، ۲۳۶۳-۲۳۶۹. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.346264.669327>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.346264.669327>

مقدمه

خاک بزرگ‌ترین مخزن ذخیره کربن آلی و معدنی جهان پس از اقیانوس‌ها است (Stockmann *et al.*, 2013). مقدار کربن معدنی خاک تا عمق یک متری حدود ۷۵۰ پتاگرم^۱ (Jobbágy & Jackson, 2000) و مقدار کربن آلی موجود در این عمق حدود ۱۵۰۰ پتاگرم است (Scharlemann *et al.*, 2014)؛ که این رقم، بیش از مجموع مقدار کربن موجود در گیاهان (۶۵۰ پتاگرم) و هوا کره (۷۵۰) است (Stockmann *et al.*, 2013)؛ بنابراین خاک پتانسیل زیادی برای تشدید گرمایش زیست‌کره، با از دست دادن کربن به شکل کربن دی‌اکسید از خاک دارد. در مقیاس جهانی سالانه ۶۸ تا ۹۸ پتاگرم کربن از خاک به اتمسفر ساطع می‌شود که این دومین جریان بزرگ کربن بین بوم‌نظام‌ها و هوا کره است (Bond-Lamberty & Thomson, 2010). از سوی دیگر خاک با امکان ترسیب کربن، به‌عنوان راهکار مناسبی جهت کاهش انتشار کربن دی‌اکسید شناخته می‌شود؛ بنابراین، حتی تغییرات کوچک در مقادیر تجزیه و یا ترسیب کربن آلی خاک، به‌طور مستقیم بر محتوی کربن دی‌اکسید اتمسفری تأثیر می‌گذارد (Weihermüller *et al.*, 2013). از این‌رو در سال‌های اخیر توجه سیاست‌گذاران و نهادهای علمی به میزان ذخایر کربن خاک و بازخورد بالقوه آن‌ها نسبت به تغییرات محیطی افزایش یافته است و ملاک جدید مدیریت پایدار خاک، حفظ توانایی خاک در نگهداشت و ترسیب کربن آلی است (FAO, 2015). باین‌همه، نظر به بطنی و تدریجی بودن تغییرات کل کربن آلی خاک در پاسخ به تنش‌های محیطی، پیش‌بینی میزان تأثیر آن‌ها بر محتوی کربن آلی خاک، مشکل است (Mondini *et al.*, 2012). از این‌رو مدل‌های مختلف گردش کربن خاک به‌منظور پیش‌بینی تغییرات کربن آلی خاک در پاسخ به تغییرات آب و هوایی، کاربری اراضی و نحوه مدیریت زمین، طراحی و توسعه یافتند (Kaczynski *et al.*, 2017). از جمله مدل RothC (Coleman & Jenkinson, 1996) که یکی از معتبرترین و پر استنادترین مدل‌های گردش کربن در مطالعات پژوهشگران در اقصی نقاط جهان به شمار می‌آید (Campbell & Paustian, 2015). این مدل ابتدا به کمک نتایج حاصل از پایش بلندمدت قدیمی‌ترین کرت‌های ثابت جهان، در ایستگاه تحقیقات کشاورزی رتامستد انگلستان (که از سال ۱۸۳۴ بر روی گندم شروع شده و همچنان ادامه دارد)؛ برای بررسی گردش کربن آلی خاک در اراضی زراعی طراحی شد. ولی پس‌از آن برای استفاده در مراتع و جنگل‌ها نیز گسترش یافت و تاکنون در بسیاری از نقاط جهان در مقیاس منطقه‌ای و ملی مورد راستی آزمایی و بازنگری قرار گرفته است. در مدل RothC سرعت گردش ذخایر کربن آلی به نوع خاک، دما، رطوبت، پوشش گیاهی و استفاده از مواد آلی به‌ساز و کودها بستگی دارد (Kaczynski *et al.*, 2017). این مدل بر اساس چندین مخزن مفهومی کربن (با نرخ گردش متفاوت) تشکیل شده است که ویژگی‌های پیچیده شیمیایی، بیولوژیکی و فیزیکی کربن آلی خاک را ساده می‌کند (Smith *et al.*, 2002). در مدل رتامستد کربن آلی خاک به چهار مخزن فعال و مقادیر کمی ماده آلی پایدار (بخش غیرفعال) تقسیم می‌شود. چهار مخزن فعال عبارت‌اند از: مواد گیاهی مقاوم^۲، مواد گیاهی تجزیه‌پذیر^۳، زیست‌توده میکروبی^۴ و مواد آلی هوموسی شده^۵. بخش غیرفعال هم به‌عنوان ماده آلی بی‌اثر^۶ شناخته می‌شود (Barančíková *et al.*, 2010; Diele *et al.*, 2021). در پژوهش‌های کمی، ذخایر مفهومی مدل رتامستد با مقادیر بخش‌های مختلف ماده آلی خاک که از فرایندهای جدایه‌پذیری^۷ فیزیکی و شیمیایی به‌دست آمدند مقایسه شدند که در بیشتر مطالعات انجام‌شده، همبستگی قوی بین این مقادیر گزارش شده است (Skjemstad *et al.*, 2004; Zimmermann *et al.*, 2007; Dondini *et al.*, 2009; Leifeld *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2011). پژوهش انجام‌گرفته بر روی ۱۲۳ نمونه خاک اراضی زراعی سوئیس که در معرض طیف وسیعی از تغییرات محیطی و مدیریتی بودند؛ همبستگی خوبی بین مقادیر بخش‌های مختلف ماده آلی خاک اندازه‌گیری شده و مقادیر ذخایر کربن آلی شبیه‌سازی شده توسط این مدل را نشان داد. ضریب همبستگی اسپیرمن برای بخش‌های مواد گیاهی تجزیه‌پذیر و مواد گیاهی مقاوم به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۷۶ و برای هر دو بخش مواد آلی هوموسی شده و زیست‌توده میکروبی معادل ۰/۹۹ به دست آمد (Zimmermann *et al.*, 2007)؛ که مشاهده ضریب همبستگی بالاتر برای بخش‌های مواد آلی هوموسی شده و زیست‌توده میکروبی در بوم‌نظام مرتعی ایرلند نیز گزارش شده است (Xu *et al.*, 2011). پژوهش‌های انجام‌شده در ۵۴ منطقه از آلمان که بیش از ۵۰ سال کاربری زراعی داشتند و پنج منطقه از انگلستان نیز نشان

۱. 1 Petagram = 1 Gigatonne

۲. Resistant Plant Material, RPM

۳. Decomposable Plant Material, DPM

۴. Microbial Biomass, BIO

۵. Humified Organic Matter, HUM

۶. Inert Organic Matter, IOM

۷. Fractionation procedure

داد که برآوردهای مدل قابل قبول و همخوان با نتایج اندازه‌گیری شده است. به طوری که ضریب همبستگی برای بخش مواد گیاهی مقاوم در مناطق اول و دوم، به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۸۱ و برای مواد آلی هوموسی شده معادل ۰/۹۱ و ۰/۹۴ به دست آمد. اگرچه برای سایر ذخایر کربن آلی، ضریب همبستگی کمتر (بین ۰/۵۰ تا ۰/۷۰) بوده است (Herbst *et al.*, 2018). مدل‌سازی اثر گرمایش زیست‌کره و افزایش کربن دی‌اکسید بر مقادیر کربن آلی خاک، در بیشتر موارد نشانگر افزایش سرعت تجزیه و هدرروی ذخایر کربن آلی خاک است (Jones *et al.*, 2005; Barančíková *et al.*, 2010; Francaviglia *et al.*, 2013; Muñoz-Rojas *et al.*, 2017). با این حال، میزان اثر تغییرات اقلیمی بر ذخایر کربن آلی خاک نامشخص است و به شدت به چگونگی واکنش ریزجانداران هتروتروف و سرعت تجزیه اجزا مختلف کربن آلی خاک بستگی دارد (Jones *et al.*, 2005). همچنین تأثیر تغییرات دمایی همواره می‌بایست با در نظر گرفتن تغییرات بارش منطقه مورد بررسی قرار گیرد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک که بارندگی عامل محدودکننده رشد گیاهان به شمار می‌آید و مقدار ورودی کربن به خاک را تعیین می‌کند؛ میانگین بارندگی سالانه با توزیع ذخایر کربن آلی خاک همبستگی قوی تری دارد (Jobbágy & Jackson, 2000; Doetterl *et al.*, 2015; Hobley *et al.*, 2015). با این وجود تاکنون در مطالعات محدودی به شبیه‌سازی پویایی کربن آلی خاک در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک که حاوی مقادیر کمی کربن آلی هستند؛ پرداخته شده است (Farina *et al.*, 2017). بیشتر این مطالعات نیز به بررسی ذخیره کل کربن آلی خاک اختصاص یافته است و مطالعه مخازن مختلف کربن آلی مدل بسیار کم مورد توجه قرار گرفته است (Xu *et al.*, 2011). در ایران نیز مطالعات اندکی با استفاده از مدل رتامستد انجام گرفته است؛ که به بررسی ذخیره کل کربن آلی خاک در بوم‌نظام‌های مرتعی و جنگلی با پوشش دائم گیاهی و مقادیر بیشتر کربن آلی خاک پرداخته شده است؛ اما مستنداتی در زمینه به‌کارگیری مدل رتامستد در بررسی ذخایر کم کربن آلی بوم‌نظام‌های زراعی ایران که به لحاظ تأمین امنیت غذایی کشور، حائز اهمیت ویژه‌ای هستند؛ مشاهده نشد. کربن آلی خاک این مناطق علاوه بر تأثیرپذیری از شرایط اقلیمی، متأثر از نحوه مدیریت زراعی نیز است. از این رو در پژوهش حاضر ضمن ارزیابی قابلیت مدل RothC در شبیه‌سازی تغییرات ذخایر کم کربن آلی خاک اراضی کشاورزی مشهد، تأثیر تغییرات اقلیمی تا پایان قرن حاضر بر میزان کل کربن آلی خاک و هریک از ذخایر پنج‌گانه کربن آلی مدل تحت مدیریت کنونی این اراضی، بررسی شد.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مورد مطالعه

شهر مشهد مرکز استان خراسان رضوی، در شمال شرقی ایران قرار دارد. این شهر با ۳۵۱ کیلومتر مربع مساحت و بیش از سه میلیون نفر جمعیت، دومین شهر پهناور و پرجمعیت ایران پس از تهران است. بیشینه ارتفاع منطقه ۱۱۵۰ متر و کمینه آن ۹۵۰ متر از سطح دریا است. منطقه مورد مطالعه اراضی کشاورزی به مرکزیت مختصات ۵۹ درجه و ۲۸ دقیقه و ۳۰،۲۱ ثانیه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۳۶ دقیقه و ۷،۹۹ ثانیه عرض شمالی در بخش رضویه (جنوب شرقی مشهد) است. اقلیم مشهد با وجود تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد، بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر نیمه‌خشک سرد (BSk) است. عمده خاک‌های منطقه نیز بر اساس سیستم طبقه‌بندی فائو (IUSS Working Group WRB, 2015) در گروه‌های مرجع Calcisols و Regosols و بر اساس سیستم طبقه‌بندی جامع خاک به روش آمریکایی (Soil Survey Staff, 2014) در رده آریدی سول و انتی سول که بر روی رسوبات دوره کرتاسه تشکیل شده است؛ قرار می‌گیرند.

ساختار مدل و تجزیه هر یک از اجزاء فعال کربن مدل RothC

کربن ورودی از بقایای گیاهی بسته به کیفیت بقایا به دو جز مواد گیاهی تجزیه‌پذیر و مواد گیاهی مقاوم تقسیم می‌شوند که هر دوی آن‌ها به صورت نمایی تجزیه و تولید زیست‌توده میکروبی بعلاوه مواد آلی هوموسی شده و کربن دی‌اکسید می‌کنند. مقدار رس خاک با تأثیر بر سرعت تجزیه و قدرت نگهداری آب در خاک، تعیین‌کننده نسبت بین کربن دی‌اکسید و زیست‌توده میکروبی بعلاوه مواد آلی هوموسی شده تولیدی است سپس زیست‌توده میکروبی بعلاوه مواد آلی هوموسی شده به ۴۶ درصد زیست‌توده میکروبی و ۵۴ درصد مواد آلی هوموسی شده تقسیم می‌شوند و هر کدام از این اجزا همچنان تجزیه‌شده و تولید کربن دی‌اکسید و زیست‌توده میکروبی بعلاوه مواد آلی هوموسی شده می‌کنند (Barančíková *et al.*, 2010; Coleman & Jenkinson, 2014).

$$x = 1.67(1.85 + 1.60 \exp(-0.0786\%clay)) \quad (۱) \text{ رابطه}$$

در این رابطه x نسبت کربن دی‌اکسید به زیست‌توده میکروبی بعلاوه مواد آلی هوموسی شده است، بنابراین $x/(x+1)$ کربن دی‌اکسید آزادشده و $1/(x+1)$ مقدار زیست‌توده میکروبی بعلاوه مواد آلی هوموسی شده تشکیل شده است. هریک از ذخایر کربن با سرعت تجزیه مخصوص به خود تجزیه می‌شوند (Kaonga & Coleman, 2008).

عوامل مؤثر بر سرعت تجزیه در مدل

چنانچه یک مخزن فعال مدل، دارای Y تن کربن در هکتار باشد، مقدار آن در پایان ماه به $Y e^{-abckt}$ کاهش می‌یابد. در این رابطه a ضریب تصحیح دما، b ضریب تصحیح رطوبت، c ضریب تصحیح پوشش خاک و k ثابت سرعت تجزیه سالانه است؛ بنابراین t معادل زمان یک ماه بوده و $Y(1 - e^{-abckt})$ مقداری از یک مخزن کربنی فعال است که طی یک ماه مشخص تجزیه می‌شود. ضریب تصحیح دما (a) از رابطه (۲) محاسبه شد که در آن T میانگین دمای ماهانه بر حسب سلسیوس است (Coleman & Jenkinson, 2014).

$$a = \frac{47.91}{1 + e^{\frac{106.06}{T+18.27}}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

جهت برآورد ضریب تصحیح رطوبت (b)، ابتدا حداکثر کمبود رطوبت لایه سطحی خاک^۱ از رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Farina et al., 2013).

$$\text{Maximum TSMD} = -(20.0 + 1.3(\% \text{clay}) - 0.01(\% \text{clay})^2) \quad \text{رابطه (۳)}$$

این رابطه بر اساس عمق نمونه‌برداری در کرت‌های آزمایشی رتامستد (۲۳ سانتی‌متر) تنظیم شده است، لذا در منطقه مطالعاتی که عمق نمونه‌برداری، ۳۰ سانتی‌متر است؛ مقدار محاسبه‌شده برای عمق نمونه‌برداری واقعی تصحیح گردید. برای این منظور حداکثر کمبود رطوبت لایه سطحی خاک محاسبه‌شده بر ۲۳ تقسیم و در ضخامت عمق نمونه‌برداری ضرب می‌شود. پس از تعیین آن، مقدار تجمعی کمبود رطوبت لایه سطحی خاک^۲ برای عمق نمونه‌برداری از اولین ماهی که تبخیر و تعرق پتانسیل بیشتر از بارندگی شد تا زمانی که به حداکثر کمبود رطوبت لایه سطحی خاک رسید، محاسبه شد. سپس ضریب تصحیح رطوبت (b) برای هر ماه به این ترتیب تعیین می‌گردد:

$$b = 0.2 + (1.0 - 0.2) \times \frac{(\text{max TSMD} - \text{acc. TSMD})}{(\text{max. TSMD} - 0.444 \text{ max. TSMD})} \quad \text{رابطه (۴)}$$

اگر $\text{acc. TSMD} < 0.444 \text{ max. TSMD}$ باشد، مقدار b برابر یک است و در غیر این صورت از رابطه (۴) محاسبه می‌شود: مطالعات مشخص ساخته است که مقدار تجزیه در خاک‌های فاقد پوشش گیاهی، از خاک‌هایی که سطح آن با پوشش گیاهی پوشیده شده است؛ بیشتر است؛ بنابراین ضریب تصحیح پوشش خاک (c) در ماه‌هایی که خاک دارای پوشش گیاهی است 0.6 و در مواقعی که خاک بدون پوشش باشد یک است (Coleman & Jenkinson, 2014). در اراضی مورد مطالعه بسته به زمان کاشت و برداشت محصولات و دوره‌های آیش بودن اراضی، مقدار این ضریب تعیین شد.

ورودی‌های مدل RothC

ورودی‌های مدل در سه بخش اطلاعات خاک، داده‌های مدیریت اراضی و اطلاعات اقلیمی طبقه‌بندی می‌شوند. اطلاعات مورد نیاز برای مطالعه، با همکاری بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، از طرح‌های انجام‌شده در این اراضی تهیه شده است؛ که شامل مطالعات ازدیاد گندم (۱۹۶۸)، آزمایش‌های کمبود آهن (۱۹۶۹)، مطالعات توصیه کودی (۱۹۹۵)، مطالعات حاصلخیزی مشهد (۲۰۰۹) پایش مرحله اول اراضی کشاورزی (۲۰۱۰) و پایش مرحله دوم اراضی کشاورزی (۲۰۲۰) است که هم‌راستا با این مطالعه انجام پذیرفت. در نهایت با اتکا به اطلاعات موجود و اندازه‌گیری شده در سال ۲۰۲۰، اعتبارسنجی مدل RothC در شرایط اقلیمی و مدیریتی اراضی زراعی مشهد، با استفاده از اطلاعات ۳۰ منطقه نمونه‌برداری شده، انجام پذیرفت. توزیع اندازه ذرات خاک با روش هیدرومتر، پ‌هاش توسط الکتروود شیشه‌ای در گل اشباع (pH past)، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع (ECe)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (CCE)، کربن آلی خاک (OC) به روش اکسیداسیون تر، نیتروژن کل (N) با روش کجلدال، فسفر قابل جذب (P) به روش اولسن، پتاسیم تبدالی با استفاده از عصاره‌گیری توسط استات آمونیم (K) و جرم مخصوص ظاهری خاک (BD) در نمونه‌های دست‌نخورده به روش سیلندر (Soil Survey Manual, 2014) اندازه‌گیری شدند. نتایج تجزیه نمونه‌های خاک در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. میانگین خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک اراضی مورد مطالعه در سال ۲۰۲۰ (عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر)

BD	pH past	EC	K	P	N	CCE	ESP	Clay	Silt	Sand	OC
g/cm ³		(dS/m)	(ppm)				(%)				
۱/۱۵	۷/۸	۱/۷	۲۳۱	۱۱	۰/۰۳۹	۲۹/۳	۲/۱	۲۲	۳۸	۴۰	۰/۳۵

۱. Topsoil moisture deficit

۲. Accumulated TSMD

کشت غالب این اراضی غلات زمستانه آبی در تناوب با صیفی جات و چغندر قند، همراه با آیش دوره‌ای است. مطالعات انجام شده در اراضی زراعی نشان داده است که کربن ورودی از بقایای گیاهان زراعی به نسبت ۵۹ درصد مواد گیاهی تجزیه پذیر و ۴۱ درصد مواد گیاهی مقاوم تقسیم می‌شوند؛ بنابراین فاکتور کیفیت بقایا که بیانگر نسبت مواد گیاهی تجزیه پذیر به مواد گیاهی مقاوم است؛ معادل ۱/۴۴ تعیین گردید (Shirato & Yokozawa, 2006; Barančíková *et al.*, 2010; Coleman & Jenkinson, 2014).

ایستگاه هواشناسی سینوپتیک مشهد (تأسیس ۱۹۵۱) یکی از چهار ایستگاه قدیمی هواشناسی ایران است. اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه ورودی‌های مدل در این بخش بر اساس آمار بلندمدت مشهد (۱۹۵۱ تا ۲۰۲۰) از طریق سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید. میانگین بلندمدت دمای سالانه مشهد ۱۴/۴ درجه سلسیوس، میانگین بارندگی سالانه و میانگین پتانسیل تبخیر سالانه به ترتیب ۲۵۰/۸ و ۱۲۸۴ میلی‌متر محاسبه شد. گرم‌ترین و سردترین ماه‌های سال به ترتیب جولای (۱۰ تیر تا ۹ مرداد) و ژانویه (۱۱ دی تا ۱۱ بهمن) با میانگین دمای ۲۷/۵ و ۱/۵ درجه سلسیوس هستند. بیشترین میانگین بارش در ماه مارس (۱۰ اسفند تا ۱۱ فروردین) با ۵۵/۱ میلی‌متر و بیشترین میانگین پتانسیل تبخیر در ماه جولای با ۲۵۰ میلی‌متر مشاهده شد. برای محاسبه مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل از روش تورنت‌وایت (Thorntwaite, 1948) استفاده شد. در این روش ابتدا نمایه حرارتی ماهانه (I_m) و سپس نمای حرارتی سالانه (I) محاسبه می‌شود (روابط ۵ و ۶). چنانچه دمای هوا در یک ماه صفر و یا منفی باشد، برای آن ماه I_m صفر در نظر گرفته می‌شود. از مجموع نمایه حرارتی ماهانه، نمایه حرارتی سالانه به دست می‌آید. با داشتن نمایه حرارتی سالانه (I) ضریب a تورنت‌وایت از رابطه (۷) محاسبه می‌شود. تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از روش تورنت‌وایت با فرض اینکه هر ماه ۳۰ روز و هر روز ۱۲ ساعت روشنایی داشته باشد محاسبه می‌شود، در صورتی که تعداد روزهای هر ماه و تعداد ساعات روشنایی در ماه‌های مختلف سال متفاوت است؛ بنابراین لازم است که تبخیر و تعرق پتانسیل با اعمال ضریب اصلاحی N_m که مقدار آن در عرض‌های مختلف جغرافیایی و برای هر ماه متفاوت است (رابطه ۸)؛ تصحیح گردد.

$$I_m = \left(\frac{T_m}{5}\right)^{1.514} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$I = \sum_{n=1}^{12} I_m \quad \text{رابطه ۶}$$

$$a = (6.75 \times 10^{-7})I^3 - (7.71 \times 10^{-5})I^2 + (1.7.92 \times 10^{-2})I + 0.492 \quad \text{رابطه ۷}$$

$$ETP = 16 N_m \left(\frac{10T_m}{I}\right)^a \quad \text{رابطه ۸}$$

در ایستگاه‌های هواشناسی ایران، پتانسیل تبخیر ماهانه با استفاده از تست تبخیر کلاس A آمریکایی اندازه‌گیری می‌شود و به‌طور معمول در سه ماه سردتر سال یعنی آذر تا بهمن ماه به دلیل خطای اندازه‌گیری این ابزار جمع‌آوری می‌گردد؛ که بازسازی داده‌های ناموجود و اصلاح داده‌های موجود در این ماه‌ها با استفاده از رگرسیون خطی با تورنت‌وایت و معادله خط واسنجی انجام شد.

ارزش‌دهی اولیه، واسنجی و اجرای مدل

برای استفاده از مدل RothC در هر منطقه جغرافیایی، نخست می‌بایست بر اساس اطلاعات منطقه مورد آزمایش، مدل واسنجی شود (Smith *et al.*, 2008). با تغییر مقادیر ضرایب تجزیه (a ، b و c) ضمن حفظ ساختار درونی مدل و قواعد حاکم بر گردش کربن، سرعت تجزیه در هر منطقه بر اساس مقدار رطوبت خاک، دما و نیز وضعیت پوشش گیاهی، اصلاح می‌گردد (Kaonga & Coleman, 2008; Francaviglia *et al.*, 2017).

به‌طور معمول داده‌های مخازن کربن به‌طور مستقیم وارد مدل نمی‌شوند و از شبیه‌سازی دوره تعادل چندین هزار ساله (۷۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ سال) تحت شرایط منطقه مورد بررسی به دست می‌آیند. در این فرایند مدل ذخایر کربن خاک را طی دوره تعادل طوری رشد می‌دهد که به میزان ذخیره کربن در سال پایانی تعریف شده، برساند. دوره تعادل یک خط مبنا برای بررسی اثر شرایط اقلیمی کنونی و اقدامات مدیریتی انجام شده بر خاک، ایجاد می‌کند (Coleman & Jenkinson, 1996). برای واسنجی مدل در شرایط اقلیمی و مدیریتی مشهد، ابتدا میزان کل کربن آلی (رابطه ۹) و ماده آلی پایدار اولیه خاک در سال ۱۹۶۸ با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه شد (Falloon *et al.*, 1998). در این رابطه SOC معادل درصد کربن آلی خاک، BD جرم مخصوص ظاهری خاک، D عمق نمونه برداری و G درصد حجمی سنگریزه بزرگ از دو میلی‌متر است.

$$TOC (t C ha^{-1}) = \%SOC (g 100^{-1}g^{-1}) \times BD (g cm^{-3}) \times D (cm) \times (1 - G)$$

رابطه ۹

رابطه (۱۰)

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

سپس مدل برای ۱۰ هزار سال در حالت تعادل و با نقطه پایانی سال ۱۹۶۸، اجرا شد. در این مرحله خروجی‌های مدل بازدید شد و مقدار کربن ورودی از طریق بقایای گیاهی و لاشبرگ به‌طور مکرر تصحیح و در هر بار اجرای مدل نتایج مورد بازبینی قرار گرفت تا مقدار ذخیره کربن آلی خاک شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل با مقدار ذخیره کربن آلی خاک اندازه‌گیری شده برابر گردد (Farina et al., 2017; Francaviglia et al., 2017). در ادامه با ساخت سناریوهای متوالی بر پایه اطلاعات خاک، مدیریت اراضی و اطلاعات اقلیمی، مدل اجرا و خروجی‌های آن ثبت شد.

جدول ۲. ورودی‌های خاکی و مدیریتی مدل برای اجرای دوره تعادل و سال پایانی مدل در اراضی زراعی مشهد

مقدار / سال		مؤلفه ورودی مدل
۲۰۲۰	۱۹۶۸	
۳۰	۳۰	عمق خاک (سانتی‌متر)
۲۲	۲۷/۸	مقدار رس (درصد)
۱۱/۸۹	۲۱/۸۳	کل کربن آلی خاک (تن در هکتار)
۰/۸۲	۱/۶۴	ماده آلی پایدار (تن کربن در هکتار)
*۰/۴۸	*۰/۸۳	کربن ورودی به خاک از بقایای گیاهی (تن در هکتار)
۲/۱	۱/۵	کربن ورودی به خاک از کودهای دامی (تن در هکتار)
۱/۴۴		شاخص کیفیت بقایا
زراعی		نوع کاربری تاریخی

* محاسبه شده به‌وسیله مدل، با استفاده از قابلیت محاسبه معکوس مقدار کربن ورودی از بقایای گیاهی، بر مبنای دانستن میزان کل کربن آلی خاک در منطقه مدنظر با خصوصیات خاکی، اقلیمی و مدیریت اراضی مشخص شده

اعتبارسنجی مدل

جهت اعتبارسنجی مدل، مقادیر کل کربن آلی اندازه‌گیری شده، با مقادیر جفتی شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل، مقایسه شدند (شکل ۱). برای این منظور از شاخص‌های آماری ضریب تبیین^۱، ریشه میانگین مربعات خطا^۲، میانگین مطلق خطا^۳، تفاوت میانگین^۴ و شاخص کارایی^۵ مدل استفاده شد (Smith & Smith, 2007).

ضریب تبیین (ضریب تعیین) نسبتی از واریانس کل داده‌های مشاهده شده است که به‌وسیله مقادیر شبیه‌سازی شده بیان می‌شود و از رابطه (۱۱) به‌دست می‌آید. ضریب تبیین بالاتر از ۶۰ درصد، بیانگر اعتبار مدل برای استفاده است. ریشه میانگین مربعات خطا از رابطه (۱۲) و مقدار میانگین مطلق خطا که بیانگر تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است؛ از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود. تفاوت میانگین و شاخص کارایی مدل به ترتیب از روابط (۱۴) و (۱۵) به‌دست می‌آیند؛ که هرچه شاخص کارایی مدل به یک نزدیک‌تر باشد، مدل عملکرد بهتری داشته است (Paul et al., 2003).

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{O})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{n} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{n} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

در این روابط O_i بیانگر مقادیر مشاهده شده، S_i مقادیر شبیه‌سازی شده، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده شده، \bar{S} میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده

۱. Coefficient of determination, R^2

۲. Root Mean Square Error, RMSE

۳. Mean Absolute Error, MAE

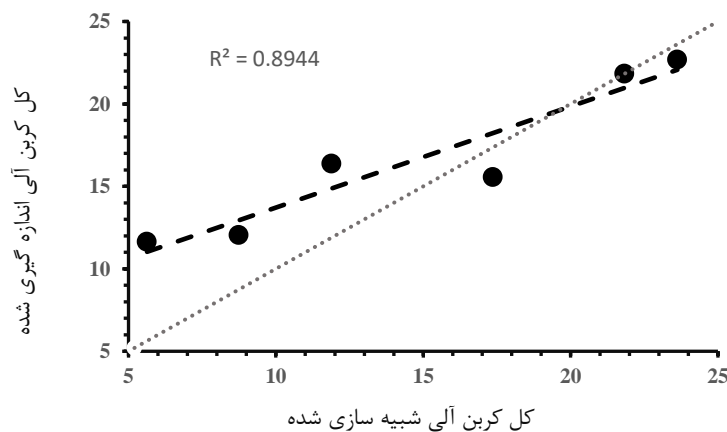
۴. Mean Difference, MD

۵. Model Efficiency, EF

و n تعداد مشاهده‌ها است.

نتایج و بحث

مقایسه میزان ذخیره کل کربن آلی خاک اندازه‌گیری شده در سال شروع مطالعه یعنی ۱۹۶۸ با سال پایانی مطالعه (۲۰۲۰) نشان‌دهنده کاهش ۴۵ درصدی کل کربن خاک، طی سال‌ها زراعت در این اراضی است. عملیات خاک‌ورزی با شکافتن خاک و تسریع ورود اکسیژن به خاک، کربن آلی محافظت‌شده درون خاکدانه‌ها را در معرض اکسیداسیون و تجزیه میکروبی قرار می‌دهد. افزون بر این، در بوم‌نظام‌های زراعی برداشت محصول و بقایای گیاهی از سطح خاک، موجب کاهش کربن ورودی به خاک نسبت به کربن خروجی می‌گردد. درحالی‌که کشاورزی حفاظتی با حداقل شخم، استفاده از بهسازهای ارگانیک دامی و گیاهی، از بین نبردن بقایای گیاهی، استفاده از محصولات پوششی و تناوب زراعی مناسب، در طولانی‌مدت موجب افزایش کربن آلی و مواد مغذی خاک شده، کشاورزی پایدار را تضمین می‌کند. ارزیابی اعتبار مدل RothC در منطقه مورد مطالعه نشان داد که مدل رتامستد با دقت بسیار خوبی توانسته است وضعیت ترسیب کربن در بوم‌نظام زراعی اقلیم سرد و نیمه‌خشک مشهد را شبیه‌سازی کند. معادله رگرسیون خطی بین مقادیر کل کربن آلی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در شکل (۱) نشان داده شده است. ضریب تبیین برابر ۰/۸۹ به‌دست آمد (رابطه ۱۱).



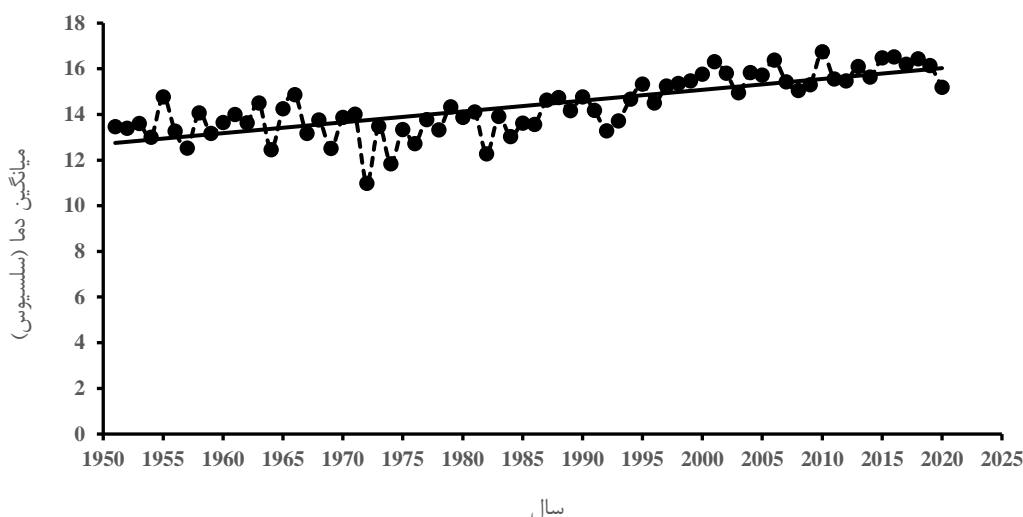
شکل ۱. ذخیره کل کربن آلی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل RothC در اراضی زراعی مشهد

ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۳/۴۵ محاسبه شد. میانگین مطلق خطا برابر ۲/۷۹ و تفاوت میانگین معادل ۱/۸۴ به‌دست آمد؛ هرچه تفاوت میانگین به صفر نزدیک‌تر باشد؛ بیانگر خطای پایین‌تری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده است (Smith & Smith, 2007). در نهایت شاخص کارایی مدل برابر ۰/۷۳ به‌دست آمد که در این شاخص، مقدار یک بیانگر برازش کامل مدل است (Paul et al., 2003). از این‌رو مدل RothC کارایی لازم جهت تخمین تغییرات کربن آلی خاک در بوم‌نظام زراعی نواحی سرد و نیمه‌خشک خراسان رضوی را دارد. اعتبارسنجی مدل RothC در بوم‌نظام زراعی اقلیم نیمه‌خشک جنوب ایتالیا، نیز بیانگر قابلیت به‌کارگیری مدل در این شرایط اقلیمی و منطقه‌ای بود؛ در این مطالعه مقدار ریشه میانگین مربعات خطا معادل ۶/۲، تفاوت میانگین ۴/۱۷ و شاخص کارایی مدل ۰/۷۱ گزارش شد (Farina et al., 2013). مطالعات انجام‌شده در بوم‌نظام‌های مرتعی اقلیم نیمه‌خشک ایران نیز حاکی از قابلیت استفاده مدل در این مناطق است؛ مقدار ضریب تبیین در اراضی مرتعی خراسان جنوبی ۰/۹۸ و شاخص کارایی مدل نیز معادل ۰/۹۸ به‌دست آمد (Fallahi et al., 2013). در اراضی مرتعی باجگاه استان فارس مقدار ضریب تبیین برابر ۰/۹۹ و ریشه میانگین مربعات خطا معادل ۴/۲۹ محاسبه شد (Azad & Afzali, 2019).

شبیه‌سازی‌های مدل تحت سناریوهای تغییرات اقلیمی

دشت مشهد در اراضی پست حوضه رودخانه کشف‌رود و در میان رشته‌کوه‌های هزار مسجد و کپه داغ در شمال و ارتفاعات بینالود و شاه جهان در جنوب واقع شده است؛ از این‌رو، تغییرات ارتفاع، تنوع توپوگرافی، همسایگی با کویر قره‌قوم ترکمنستان و تداخل جبهه‌های آب و هوایی موجب شده شهرستان مشهد نسبت به تغییرات اقلیمی آسیب‌پذیر باشد. به‌طوری‌که متوسط دمای مشهد طی ۷۰ سال گذشته روند افزایشی مشهودی داشته است (شکل ۲).

میانگین دما و بارندگی این شهر در دهه‌های ۳۰ (دوره آماری ۱۹۵۱ تا ۱۹۶۰) و ۹۰ شمسی (۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰) مقایسه شدند. فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف^۱ بررسی شد و از آزمون تی مستقل برای مقایسه بین گروهی استفاده شد. نتایج نشان داد که میانگین دمای مشهد از ۱۳/۴۹ درجه سلسیوس در دهه ۳۰ شمسی به ۱۵/۹۷ درجه سلسیوس در دهه ۹۰ افزایش معنی‌داری داشته است ($p = 0$). میانگین بارندگی مشهد نیز از ۲۵۸ میلی‌متر در دهه ۳۰ شمسی به ۲۴۷ میلی‌متر در دهه ۹۰ کاهش غیر معنی‌داری داشته است ($p = 0/۶۳$). اگرچه وقوع دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی باعث می‌شود مقایسه میانگین دهه‌ها گویای میزان تغییرات نباشد؛ اما به‌طور کلی روند دمای مشهد طی هفت دهه گذشته افزایشی و روند بارش کاهشی بوده است.



شکل ۲. روند تغییرات میانگین دمای سالانه شهر مشهد طی ۷۰ سال (دوره آماری ۱۹۵۱-۲۰۲۰)

مطالعه اثر تغییرات اقلیمی مشهد بر متغیرهای بارش، دما و تبخیر و تعرق در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۹۹ میلادی با استفاده از بروداد ریزگردانی شده دو مدل گردش عمومی NCAR-PCM و GFDL-CM نشان داده است که مشهد طی سه دوره زمانی (به اختصار ۲۰۲۵، ۲۰۵۵ و ۲۰۸۵) تا سال ۲۰۹۹ میلادی، $+۳/۳$ درجه سلسیوس افزایش دما، $-۴/۲$ میلی‌متر کاهش بارندگی و به میزان $+۱۳/۴$ درصد افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل، نسبت به دوره پایه (۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰) را تجربه خواهد کرد (Babaecian & Kouhi, 2012). از این رو ضمن لحاظ کردن تغییرات اقلیمی هر دوره در محاسبه ضرایب تصحیح a و b مدل RothC با اجرای سناریوهای متوالی برای دو وضعیت (۱) میزان ذخایر کربن آلی خاک در شرایط اقلیمی فعلی و (۲) در شرایط وقوع تغییرات اقلیم تا پایان قرن جاری اجرا شد. به‌طور کلی با افزایش دما و بارندگی، مقدار عددی ضرایب a و b افزایش و با کاهش دما و بارندگی، هر دو کاهش می‌یابند. نتایج نشان داد که با اعمال میزان کاهش بارش و افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل در نتیجه تغییرات اقلیمی آینده مشهد، مقدار ضریب تصحیح b ، $۰/۴۸$ درصد نسبت به شرایط اقلیمی کنونی، کاهش خواهد داشت. همچنین افزایش مقدار دما منجر به افزایش ضریب a به میزان $۲/۰۹$ درصد، نسبت به شرایط عدم تغییر اقلیم خواهد شد (جدول ۳).

مدل‌سازی پویایی ذخایر کربن آلی خاک تحت سناریوهای تغییرات اقلیمی

مواد گیاهی تجزیه‌پذیر که یکی از ذخایر فعال کربن در مدل رتامستد است؛ بخشی از مواد گیاهی است که به‌آسانی تجزیه‌شده و برای ۰/۱۷ سال در خاک باقی می‌ماند (González-Molina *et al.*, 2011). این مواد به‌طور کلی سهم چندانی از میزان کل کربن فعال خاک را ندارند و در طی سال‌های مورد مطالعه نیز تغییرات فراوانی نداشتند. باین‌همه مواد گیاهی تجزیه‌پذیر اهمیت انکارناپذیری در تغذیه ریزجانداران خاکزی، آزادسازی عناصر غذایی و کمک در پویایی چرخه کربن دارند (Lal, 2004). کاهش بارندگی و افزایش دما و تبخیر و تعرق پتانسیل در اثر تغییرات اقلیمی، موجب کاهش موجودی بخش مواد گیاهی تجزیه‌پذیر به میزان $۱/۱۸$ درصد در مقایسه با مقدار آن در شرایط اقلیمی کنونی می‌گردد (جدول ۴). بررسی اثر تغییرات اقلیمی آینده (۲۰۲۱-۲۰۶۰) بر ذخایر کربن آلی خاک اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل رتامستد در علفزارهای ایرلند نشان داد که با سناریوی افزایش دما و کاهش بارندگی، میزان ذخایر کربن آلی کاهش می‌یابد. در این مطالعه همچنین، بین ذخایر اندازه‌گیری شده کربن آلی و مقادیر برآورد شده به‌وسیله مدل در بخش زیست‌توده

۱. Kolmogorov-Smirnov test, KS



میکروبی و مواد آلی هوموسی شده همبستگی قوی مشاهده شد؛ اما در بخش مواد گیاهی تجزیه پذیر و مواد گیاهی مقاوم همبستگی ضعیف تری مشاهده شد (Xu et al., 2011).

جدول ۳. ضرایب تصحیح دما و رطوبت در مدل RothC تحت دو سناریوی وقوع و عدم وقوع تغییرات اقلیمی در مشهد

ضریب تصحیح رطوبت (b)		ضریب تصحیح درجه حرارت (a)		ماه
تغییر اقلیم	عدم وقوع تغییر اقلیم	تغییر اقلیم	عدم وقوع تغییر اقلیم	
۱	۱	-۰/۲۳۶	۰/۲۱۹	ژانویه
۱	۱	-۰/۳۸۳	۰/۳۶۰	فوریه
۱	۱	-۰/۹۱۳	۰/۸۷۸	مارس
-۰/۲	-۰/۲	۱/۸۷۷	۱/۸۲۹	آوریل
-۰/۲	-۰/۲	۲/۸۹۹	۲/۸۴۶	می
-۰/۲	-۰/۲	۳/۹۰۶	۳/۸۵۱	ژوئن
-۰/۲	-۰/۲	۴/۳۴۵	۴/۲۹۰	جولای
-۰/۲	-۰/۲	۳/۹۵۰	۳/۸۹۶	اوت
-۰/۲	-۰/۲	۳/۰۱۶	۲/۹۶۳	سپتامبر
-۰/۲	-۰/۲	۱/۸۲۴	۱/۷۷۷	اکتبر
-۰/۲	-۰/۲	-۰/۸۶۸	۰/۸۳۳	نوامبر
-۰/۳۷۵	-۰/۳۹۹	-۰/۳۸۴	۰/۳۶۱	دسامبر
-۰/۴۱۵	-۰/۴۱۷	۲/۰۵	۲/۰۰۸	متوسط

جدول ۴. مدل سازی تغییرات ذخایر کربن آلی خاک در شرایط تغییر اقلیم و عدم وقوع تغییر اقلیم در مشهد

تغییر اقلیم				عدم وقوع تغییرات اقلیمی			
HUM	BIO	RPM	DPM	HUM	BIO	RPM	DPM
۱۱/۶۱۹۳	-۰/۴۳۳۵	۳/۱۲۵۲	-۰/۱۵۰۵	۱۱/۷۳۱۴	-۰/۴۴۲۸	۳/۱۹۵۹	-۰/۱۵۲۳

یکی دیگر از ذخایر فعال کربن در مدل RothC بخش مواد گیاهی مقاوم است که سرعت برگشت آن در خاک ۲/۳۱ سال است (González-Molina et al., 2011). نتایج حاصل از شبیه سازی تغییرات اقلیمی نشان داد که مواد گیاهی مقاوم به میزان ۲/۲۱ درصد نسبت به شرایط عدم وقوع تغییرات اقلیمی، کاهش خواهد یافت. همچنین نتایج مشخص ساخت که در بین چهار بخش فعال کربن آلی خاک، مواد گیاهی مقاوم بیشترین تغییر مقدار را در شرایط تغییر اقلیم نسبت به عدم وقوع آن داشته است؛ مدل سازی اثر تغییرات اقلیمی در ایتالیا نیز کاهش ذخایر کربن آلی مدل را نشان داد (Francaviglia et al., 2013; Mondini et al., 2012). به طور کلی مواد گیاهی مقاوم سهم بیشتری از ذخایر کل کربن آلی خاک را نسبت به مواد گیاهی تجزیه پذیر دارند. در بوم نظام نیمه خشک مناطق مطالعاتی، از یک سو دمای زیاد موجب افزایش سرعت تجزیه و از سوی دیگر کاهش نزولات موجب کاهش ورودی کربن به خاک می گردد. سرعت تجزیه مواد آلی و راندمان چرخه تغییر و تبدیل اجزاء مختلف کربن آلی خاک، نسبت مستقیمی با کیفیت مواد ورودی به خاک دارد؛ در مناطقی که مقدار کمی بقایای گیاهی تازه به خاک افزوده می شود، فراوانی مواد گیاهی مقاوم به تجزیه در خاک بیشتر است (Anderson, 2003).

زیست توده میکروبی نیز یکی دیگر از ذخایر فعال کربن در مدل رتامستد است که سرعت بازگشت آن ۱/۶۹ سال ارزیابی شده است (González-Molina et al., 2011). فعالیت های زیستی خاک به دلیل وفور ماده آلی مورد نیاز ریزجانداران برای رشد، در سطح خاک به مراتب بیشتر است؛ بنابراین در اراضی کشاورزی که خاک سطحی در معرض بهم خوردگی و دست خوش تغییرات شدید است؛ زیست توده میکروبی نسبت به اراضی مرتعی و جنگلی بیشتر تحت تأثیر قرار می گیرد (Nielsen et al., 2002). نتایج نشان داد که تغییرات اقلیمی موجب کاهش بخش زیست توده میکروبی به میزان ۲/۱۰ درصد در مقایسه با مقدار آن در صورت ادامه شرایط اقلیمی کنونی می گردد. ریزجانداران خاک با محیط پیرامون خود رابطه نزدیکی دارند و در برخی موارد، قبل از بروز تغییرات قابل تشخیص در ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک، تغییر در جمعیت میکروبی خاک و یا فعالیت آن ها می تواند به عنوان نشانه های اولیه بهبود وضعیت خاک و یا علائم هشدار دهنده تخریب زود هنگام خاک باشد. سرعت تغییر و تبدیل در زیست توده میکروبی (به عنوان جزء زنده ماده آلی خاک)، یک تا پنج

سال سریع‌تر از کل ماده آلی خاک است (Carreiro *et al.*, 2000). به همین دلیل نیز نسبت کربن توده میکروبی (C_{mic}) به کربن آلی (C_{org}) به‌عنوان شاخصی از پویایی مواد آلی خاک، مقدار تجمع و یا هدر رفت کربن آلی خاک، برای پیش‌بینی اثرات زیست‌محیطی پدیده‌هایی همچون افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای بر بوم‌نظام خاک، آشفته‌گی‌های ناشی از جنگل‌زدایی، تبدیل مراتع و جنگل‌ها به اراضی کشاورزی و فعالیت‌های کشاورزی به‌ویژه خاک‌ورزی شدید و بی‌رویه، مورد بررسی قرار می‌گیرد (Inubushi *et al.*, 2011). مطالعات انجام‌شده در بوته‌زارهای اروپا نیز حاکی از آن است که خشکی ایجادشده در شرایط تغییر اقلیم، موجب کاهش جریان کربن از ریشه به سمت خاک، کاهش فراهمی مواد مغذی در فضای ریزوسفری و در نتیجه کاهش زیست‌توده میکروبی خاک می‌گردد (Gorissen *et al.*, 2004).

یکی دیگر از ذخایر فعال کربن در مدل رتامستد، بخش مواد آلی هوموسی‌شده است که سرعت بازگشت آن ۴۹/۵ سال است (González-Molina *et al.*, 2011). بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌شده مدل، تأثیر تغییرات اقلیمی بر میزان مواد آلی هوموسی‌شده نیز منفی بوده است. به‌طوری‌که مقدار آن در پی اعمال سناریوهای تغییر اقلیم، ۰/۹۶ درصد نسبت به شرایط عدم‌تغییر اقلیم، کاهش یافت. هوموس در برابر تجزیه به نسبت مقاوم است و بسیار به‌کندی تجزیه می‌شود و به‌طور معمول در خاک‌هایی با سن بالا مشاهده می‌شود و ترکیبی از مولکول‌های کمپلکس بزرگ (جرم مولی ۲۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ گرم بر مول) است. حلقه بنزن (آروماتیک) در انواع ترکیبات لیگنین در مسیر تجزیه با گروه‌های هیدروکسیل، متوکسیل و کربوکسیل مانند اسیدهای گالیک و وانیلیک جانشین می‌شود تا در نهایت از طریق اکسیداسیون و پلیمریزه شدن، مواد قهوه‌ای تیره هوموسی را ایجاد نماید (Stevenson, 1994; Lefèvre *et al.*, 2017). هوموس حاصل آخرین مراحل تجزیه ماده آلی خاک است و کندترین سرعت بازگشت را نسبت به سایر ذخایر فعال کربن آلی مدل دارد؛ بنابراین در شرایط تغییر اقلیم کمترین درصد تغییر را نسبت به سایر ذخایر فعال کربن نشان داد. نتایج آزمایشگاهی مطالعات انجام‌شده بر روی هوموس نیز بیانگر افزایش سرعت تنفس هوموس در شرایط افزایش دما است (Niklińska *et al.*, 1999).

ذخیره ماده آلی بی‌اثر، برای ریزجانداران خاکزی غیرقابل‌دسترس بوده و بنابراین تجزیه‌ناپذیر است به‌گونه‌ای که متوسط دوره رکود آن ۵۰۰۰۰ سال تعیین شده است و مقدار آن در بازه زمانی کوتاه تغییری نمی‌کند (González-Molina *et al.*, 2011; Sakurai *et al.*, 2012). این ذخیره کربنی دربرگیرنده بخشی کوچک، پایدار و از نظر زیستی راكد کربن خاک بوده که به میزان ناچیزی از تغییرات محیطی تأثیر می‌پذیرد. پژوهشگران دیگری نیز ضمن به‌کارگیری مدل رتامستد در مطالعه اثر تغییرات دما در گرادیان اقلیمی جنوب شرقی آمریکا بر میزان ذخایر کربن، عنوان داشتند که بخش غیرفعال کربن آلی در طی شبیه‌سازی تغییری نکرده است و سهم آن در تغییرات ذخیره کل کربن آلی خاک قابل‌چشم‌پوشی است (Luxmoore *et al.*, 2008).

میزان کل کربن آلی خاک در اجرای مدل تحت سناریوی تغییرات اقلیمی، نسبت به سناریوهای مدیریت کنونی زمین و شرایط اقلیمی فعلی، ۱/۱۳ درصد کاهش نشان داد. بیش‌تر مطالعات انجام‌گرفته در زمینه شناسایی اثرات تغییرات اقلیمی بر کربن آلی خاک (با استفاده از مدل رتامستد)، افزایش دمای محیط در شرایط تغییر اقلیم را باعث افزایش سرعت تجزیه مواد آلی در محیط خاک و در نتیجه افزایش تلفات کربن آلی از خاک و کاهش میزان ترسیب کربن و افزایش انتشار کربن دی‌اکسید عنوان کرده‌اند (Barančíková *et al.*, 2010; Mondini *et al.*, 2012; Francaviglia *et al.*, 2013; Muñoz-Rojas *et al.*, 2017). دما تا حد زیادی بر تجزیه زیستی ماده آلی خاک تأثیر می‌گذارد؛ ساختار مولکولی پیچیده ماده آلی نیز به‌طور ذاتی حساسیت دمایی بالایی دارد. درعین‌حال، باعث افزایش تولید اولیه بوم‌نظام نیز می‌گردد؛ مدل‌سازی چندین مطالعه در اروپا با استفاده از مدل RothC بیانگر افزایش میزان کربن آلی خاک تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و افزایش دما بوده است (Ciais *et al.*, 2010). برخی پژوهش‌ها عنوان داشتند که خاک قادر است با شرایط افزایش دما سازگار گردد (Jobbágy & Jackson, 2000; Sleutel *et al.*, 2007; Koven *et al.*, 2017). محدوده تغییرات کربن آلی در شرایطی که فقط دما تغییر یابد، به‌مراتب کمتر از شرایطی است که هر سه مؤلفه دما، بارندگی و تأخیر دچار تغییر شوند (Wan *et al.*, 2011). مدل‌سازی تغییرات اقلیمی در اروپا تا سال ۲۰۸۰ نشان داد که میانگین ذخیره کل کربن آلی مراتع نسبت به سال ۱۹۹۰، به میزان شش درصد کاهش می‌یابد؛ اگرچه افزایش تولید خالص اولیه در نتیجه افزایش دما تا حدودی می‌تواند این کاهش کربن را جبران کند (Smith *et al.*, 2005). مدل‌سازی اراضی زراعی نشان داده است که بسته به بالا بردن عملکرد محصولات و افزایش مقادیر کربن ورودی از بقایای گیاهی، امکان جبران کربن آلی تجزیه‌شده از خاک وجود دارد (Ludwig *et al.*, 2007; Ludwig *et al.*, 2010). همچنین مطالعه اثر ۲۷ سال تغییرات اقلیمی (۱۹۷۷-۲۰۰۴) بر مقادیر کربن آلی اندازه‌گیری شده در مقایسه با ذخایر کربن شبیه‌سازی‌شده نشان داد که مدل رتامستد به‌خوبی اثر تغییرات اقلیمی بر بخش‌های کربن آلی را منعکس می‌کند (Leifeld *et al.*, 2009).



نتایج همچنین نشان داد که با گذشت زمان به دلیل تجزیه بخش‌های فعال و سریع تجزیه ماده آلی (قندهای ساده و اسیدهای آمینه) و نیز ترکیبات با سرعت متوسط تجزیه (پلی ساکاریدها، پروتئین‌ها و چربی‌ها)، سرعت تجزیه کاهش می‌یابد و به مرور زمان ماده آلی خاک به تجزیه مقاوم‌تر می‌شود. در واقع موادی که به راحتی تجزیه می‌شوند به طور کامل یا جزئی تخلیه شده و جمعیت میکروبی و سرعت تجزیه مواد آلی کاهش می‌یابد. این همچنین به معنای تغییر شیمیایی ماده آلی و تشکیل ترکیبات کمپلکس هوموس است که مقاومت بالایی در برابر تجزیه نشان می‌دهند. بررسی اثر تغییرات اقلیمی بر ذخایر کربن آلی خاک در هشت علفزار اروپا نیز کاهش سرعت تجزیه با گذشت زمان را نشان داد (Xu et al., 2011).

نتیجه گیری

کسب امتیازات لازم از شاخص‌های آماری اعتبارسنجی، گویای قابلیت مدل RothC در ارائه پیش‌بینی‌هایی مبتنی بر واقعیت در بوم‌نظام زراعی اقلیم سرد و نیمه‌خشک مشهد است؛ آنچه بیشتر کاربردی بودن این مدل را عیان می‌سازد؛ تخمین صحیح روند تغییرات ذخایر کربن آلی خاک است. مدل توانسته است به خوبی روند کاهشی میزان کل کربن آلی خاک در مدت مورد بررسی را نشان دهد؛ که این مسئله در انتخاب روش‌های مدیریتی برتر جهت حفظ و ترسیب کربن آلی خاک بسیار راهگشا است. نتایج همچنین نشان داد که با افزایش دما و کاهش بارندگی در پی تغییرات اقلیمی منطقه، مقدار عددی ضرایب تصحیح، a و b به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند. افزایش دما از یک سو منجر به افزایش سرعت تجزیه می‌گردد (جنبه منفی) و از سوی دیگر باعث افزایش تولید اولیه بوم‌نظام می‌شود (جنبه مثبت) بنابراین تأثیر تغییرات دمایی همواره می‌بایست با در نظر گرفتن تغییرات بارش منطقه، مورد بررسی قرار گیرد. بارندگی به ویژه در مناطقی با محدودیت آبی، مقدار تولید خالص اولیه و در نتیجه ورودی کربن به خاک را تعیین می‌کند. از این رو میزان ذخایر کربن آلی خاک بوم‌نظام زراعی مشهد تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، با لحاظ کردن هر دو عامل دما و بارندگی (و تبخیر) در مدل رتامتد بررسی شد که نتایج گویای کاهش ذخیره کل کربن آلی خاک در هر چهار بخش کربن فعال خاک بود. همچنین بخش فراوانی از ذخیره کربنی فعال خاک از نوع مواد آلی هوموسی شده است. دلیل این موضوع را می‌توان در زمان بازگشت ذخایر چهارگانه کربن فعال جستجو کرد؛ جایی که هوموس کندترین زمان بازگشت را داشته و بنابراین مقدار آن در طی زمان افزایش می‌یابد. بخش‌های مواد آلی هوموسی شده و مواد گیاهی مقاوم با بیشترین سهم از ذخیره کل کربن آلی خاک منطقه مطالعاتی، در مجموع ۸۷ درصد ذخایر را به خود اختصاص دادند. شایان ذکر است که در مدل‌سازی این اراضی، مدیریت زراعی ثابت در نظر گرفته شد تا بتوان تأثیر تغییرات اقلیمی بر ذخایر کربن آلی خاک را ره‌گیری نمود؛ اما باید توجه داشت که در بوم‌نظام‌های زراعی، روش‌های مدیریت خاک ممکن است اثراتی به مراتب چشمگیرتر از تغییرات اقلیمی بر میزان ترسیب یا تجزیه کربن آلی خاک داشته باشند؛ بنابراین پیشنهاد می‌گردد با اعتبارسنجی مدل رتامتد در بوم‌نظام‌های مختلف کشور و حصول اطمینان از درستی پیش‌بینی‌های ارائه شده توسط مدل، تأثیر تغییرات اقلیمی و روش‌های مدیریتی مختلف بر ذخایر کربن آلی خاک مناطق بررسی گردد؛ تا بدین وسیله تدابیری برای حفظ و ترسیب ذخایر اندک کربن آلی خاک‌های کشور اتخاذ گردد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Anderson, T.-H. (2003). Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 98, 285-293.
- Azad, B., and Afzali, S. F. (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, 819-835 (In Persian).
- Babaeian, I., and Kouhi, M. (2012). Agroclimatic indices assessment over some selected weather stations of Khorasan Razavi province under climate change scenarios. *Journal of water and soil* 26, 953-967 (In Persian).
- Barančíková, G., Halas, J., Guttekova, M., Makovnikova, J., Novakova, M., Skalský, R., and Tarasovičová, Z. (2010). Application of RothC model to predict soil organic carbon stock on agricultural soils of Slovakia. *Soil and Water Research* 5, 1-9.
- Bond-Lamberty, B., and Thomson, A. (2010). Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature* 464, 579-582.
- Campbell, E. E., and Paustian, K. (2015). Current developments in soil organic matter modeling and the

- expansion of model applications: a review. *Environmental Research Letters* 10, 123004.
- Carreiro, M., Sinsabaugh, R., Repert, D., and Parkhurst, D. (2000). Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition. *Ecology* 81, 2359-2365.
- Ciais, P., Wattenbach, M., Vuichard, N., Smith, P., Piao, S., Don, A., Luyssaert, S., Janssens, I., Bondeau, A., and Dechow, R. (2010). The European carbon balance. Part 2: croplands. *Global Change Biology* 16, 1409-1428.
- Coleman, K., and Jenkinson, D. (1996). RothC-A Model for the turnover of carbon in soil. In "Evaluation of soil organic matter models", pp. 237-246. Springer.
- Coleman, K., and Jenkinson, D. (2014). RothC-A Model for the Turnover of Carbon in Soil-Model description and users guide. Rothamsted Research, Harpenden, UK.
- Diele, F., Marangi, C., and Martiradonna, A. (2021). Non-Standard Discrete RothC Models for Soil Carbon Dynamics. *Axioms* 10, 56.
- Doetterl, S., Stevens, A., Six, J., Merckx, R., Van Oost, K., Casanova Pinto, M., Casanova-Katny, A., Muñoz, C., Boudin, M., and Zagal Venegas, E. (2015). Soil carbon storage controlled by interactions between geochemistry and climate. *Nature Geoscience* 8, 780-783.
- Dondini, M., Hastings, A., Saiz, G., Jones, M. B., and Smith, P. (2009). The potential of Miscanthus to sequester carbon in soils: comparing field measurements in Carlow, Ireland to model predictions. *Gcb Bioenergy* 1, 413-425.
- Fallahi, J., Rezvani, M. P., Nassiri, M. M., and Behdani, M. (2013). Validation of RothC model for evaluation of carbon sequestration in a restored ecosystem under two different climatic scenari. *Journal of Water and Soil*. 3, 656-668 (In Persian).
- Falloon, P., Smith, P., Coleman, K., and Marshall, S. (1998). Estimating the size of the inert organic matter pool from total soil organic carbon content for use in the Rothamsted carbon model. *Soil Biology & Biochemistry* 30, 1207-1211.
- FAO, I. (2015). Status of the World's Soil Resources (SWSR)-technical summary. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy.
- Farina, R., Coleman, K., and Whitmore, A. P. (2013). Modification of the RothC model for simulations of soil organic C dynamics in dryland regions. *Geoderma* 200, 18-30.
- Farina, R., Marchetti, A., Francaviglia, R., Napoli, R., and Di Bene, C. (2017). Modeling regional soil C stocks and CO₂ emissions under Mediterranean cropping systems and soil types. *Agriculture, ecosystems & environment* 238, 128-141.
- Francaviglia, R., Baffi, C., Nassisi, A. L., Cassinari, C., and Farina, R. (2013). Use of the RothC model to simulate soil organic dynamic on a silty loam Inceptisol in northern Italy under different fertilization practices. *Environmental quality* 11, 17-28.
- Francaviglia, R., Renzi, G., Ledda, L., and Benedetti, A. (2017). Organic carbon pools and soil biological fertility are affected by land use intensity in Mediterranean ecosystems of Sardinia, Italy. *Science of the Total Environment* 599, 789-796.
- González-Molina, L., Etchevers-Barra, J., Paz-Pellat, F., Diaz-Solis, H., Fuentes-Ponce, M., Covaleda-Ocon, S., and Pando-Moreno, M. (2011). Performance of the RothC-26.3 model in short-term experiments in Mexican sites and systems. *Journal of Agricultural Science* 149, 415-425.
- Gorissen, A., Tietema, A., Joosten, N. N., Estiarte, M., Penuelas, J., Sowerby, A., Emmett, B. A., and Beier, C. (2004). Climate change affects carbon allocation to the soil in shrublands. *Ecosystems* 7, 650-661.
- Herbst, M., Welp, G., Macdonald, A., Jate, M., Hädicke, A., Scherer, H., Gaiser, T., Herrmann, F., Amelung, W., and Vanderborcht, J. (2018). Correspondence of measured soil carbon fractions and RothC pools for equilibrium and non-equilibrium states. *Geoderma* 314, 37-46.
- Hobley, E., Wilson, B., Wilkie, A., Gray, J., and Koen, T. (2015). Drivers of soil organic carbon storage and vertical distribution in Eastern Australia. *Plant and Soil* 390, 111-127.
- Inubushi, K., Cheng, W., Mizuno, T., Lou, Y., Hasegawa, T., Sakai, H., and Kobayashi, K. (2011). Microbial biomass carbon and methane oxidation influenced by rice cultivars and elevated CO₂ in a Japanese paddy soil. *European journal of soil science* 62, 69-73.
- IUSS Working Group WRB. (2015). World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International soil classification system for naming soil and creating legends for soil maps. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Jobbágy, E. G., and Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological applications* 10, 423-436.
- Jones, C., McConnell, C., Coleman, K., Cox, P., Falloon, P., Jenkinson, D., and Powlson, D. (2005). Global



- climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil. *Global Change Biology* 11, 154-166.
- Kaczynski, R., Siebielec, G., Hanegraaf, M. C., and Korevaar, H. (2017). Modelling soil carbon trends for agriculture development scenarios at regional level. *Geoderma* 286, 104-115.
- Kaonga, M., and Coleman, K. (2008). Modelling soil organic carbon turnover in improved fallows in eastern Zambia using the RothC-26.3 model. *Forest Ecology and Management* 256, 1160-1166.
- Koven, C. D., Hugelius, G., Lawrence, D. M., and Wieder, W. R. (2017). Higher climatological temperature sensitivity of soil carbon in cold than warm climates. *Nature Climate Change* 7, 817-822.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304, 1623-1627.
- Lefèvre, C., Rekik, F., Alcantara, V., and Wiese, L. (2017). Soil organic carbon: the hidden potential, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.
- Leifeld, J., Reiser, R., and Oberholzer, H. R. (2009). Consequences of conventional versus organic farming on soil carbon: results from a 27-year field experiment. *Agronomy Journal*. 1, 1204-1218.
- Ludwig, B., Hu, K., Niu, L., and Liu, X. (2010). Modelling the dynamics of organic carbon in fertilization and tillage experiments in the North China Plain using the Rothamsted Carbon Model—initialization and calculation of C inputs. *Plant and Soil* 332, 193-206.
- Ludwig, B., Schulz, E., Rethemeyer, J., Merbach, I., and Flessa, H. (2007). Predictive modelling of C dynamics in the long-term fertilization experiment at Bad Lauchstädt with the Rothamsted Carbon Model. *European Journal of Soil Science* 58, 1155-1163.
- Luxmoore, R. J., Tharp, M. L., and Post, W. M. (2008). Simulated biomass and soil carbon of loblolly pine and cottonwood plantations across a thermal gradient in southeastern United States. *Forest ecology and management* 254, 291-299.
- Mondini, C., Coleman, K., and Whitmore, A. (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.
- Muñoz-Rojas, M., Abd-Elmabod, S. K., Zavala, L. M., De la Rosa, D., and Jordán, A. (2017). Climate change impacts on soil organic carbon stocks of Mediterranean agricultural areas: a case study in Northern Egypt. *Agriculture, ecosystems & environment* 238, 142-152.
- Nielsen, M. N., Winding, A., Binnerup, S., and Hansen, B. (2002). Microorganisms as indicators of soil health.
- Niklińska, M., Maryński, M., and Laskowski, R. (1999). Effect of temperature on humus respiration rate and nitrogen mineralization: Implications for global climate change. *Biogeochemistry* 44, 239-257.
- Paul, K., Polglase, P., and Richards, G. (2003). Predicted change in soil carbon following afforestation or reforestation, and analysis of controlling factors by linking a C accounting model (CAMFor) to models of forest growth (3PG), litter decomposition (GENDEC) and soil C turnover (RothC). *Forest Ecology and Management* 177, 485-501.
- Sakurai, G., Jomura, M., Yonemura, S., Iizumi, T., Shirato, Y., and Yokozawa, M. (2012). Inversely estimating temperature sensitivity of soil carbon decomposition by assimilating a turnover model and long-term field data. *Soil Biology and Biochemistry* 46, 191-199.
- Semi-detailed soil survey of Astan Quds Razavi farm, Mashhad. (1970) *Technical report* No 245 (In Persian).
- Scharlemann, J. P., Tanner, E. V., Hiederer, R., and Kapos, V. (2014). Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management* 5, 81-91.
- Shirato, Y., and Yokozawa, M. (2006). Acid hydrolysis to partition plant material into decomposable and resistant fractions for use in the Rothamsted carbon model. *Soil Biology and Biochemistry* 38, 812-816.
- Skjemstad, J., Spouncer, L., Cowie, B., and Swift, R. (2004). Calibration of the Rothamsted organic carbon turnover model (RothC ver. 26.3), using measurable soil organic carbon pools. *Soil Research* 42, 79-88.
- Sleutel, S., De Neve, S., Singier, B., and Hofman, G. (2007). Quantification of organic carbon in soils: a comparison of methodologies and assessment of the carbon content of organic matter. *Communications in soil science and plant analysis* 38, 2647-2657.
- Smith, J., and Smith, P. (2007). *Environmental modelling: an introduction*, Oxford University Press.
- Smith, J., Smith, P., Wattenbach, M., Zaehle, S., Hiederer, R., Jones, R. J., Montanarella, L., Rounsevell, M. D., Reginster, I., and Ewert, F. (2005). Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990–2080. *Global Change Biology* 11, 2141-2152.
- Smith, J. U., Smith, P., Monaghan, R., and MacDonald, A. (2002). When is a measured soil organic matter fraction equivalent to a model pool? *European Journal of Soil Science* 53, 405-416.
- Smith, P., Fang, C., Dawson, J. J., and Moncrieff, J. B. (2008). Impact of global warming on soil organic

- carbon. *Advances in agronomy* 97, 1-43.
- Soil Survey Manual. (2014). Kellogg soil survey laboratory methods manual. Soil survey investigations report No 51, version 2 R Burt and soil survey staff (ed), U. S. Department of Agriculture Natural Resources conservation Service.
- Soil Survey Staff. (2014). Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Stevenson, F. J. (1994). "Humus chemistry: genesis, composition, reactions," John Wiley & Sons.
- Stockmann, U., Adams, M. A., Crawford, J. W., Field, D. J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., Minasny, B., McBratney, A. B., De Courcelles, V. d. R., and Singh, K. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 164, 80-99.
- Thorntwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review* 38, 55-94.
- Wan, Y., Lin, E., Xiong, W., and Guo, L. (2011). Modeling the impact of climate change on soil organic carbon stock in upland soils in the 21st century in China. *Agriculture, ecosystems & environment* 141, 23-31.
- Weihermüller, L., Graf, A., Herbst, M., and Vereecken, H. (2013). Simple pedotransfer functions to initialize reactive carbon pools of the RothC model. *European Journal of Soil Science* 6. 4, 567-575.
- Xu, X., Liu, W., and Kiely, G. (2011). Modeling the change in soil organic carbon of grassland in response to climate change: Effects of measured versus modelled carbon pools for initializing the Rothamsted Carbon model. *Agriculture, ecosystems & environment* 140, 372-381.
- Zimmermann, M., Leifeld, J., Schmidt, M., Smith, P., and Fuhrer, J. (2007). Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model. *European Journal of Soil Science* 58, 658-667.