

## Evaluation of Two Soil Carbon Models Performance Using Measured Data in Semi-arid Rangelands of Bajgah, Fars Province

BIJAN AZAD<sup>1</sup>, SAYED FAKHREDDIN AFZALI<sup>2\*</sup>

1. M.Sc. of Desert Regions Management, Department of Natural Resources and Environment Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran
2. Assistant Professor, Department of Natural Resources and Environment Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran  
(Received: Sep. 10, 2018- Revised: Oct. 13, 2018- Accepted: Oct. 16, 2018)

### ABSTRACT

The soil of rangelands is an important global carbon sink, in which any change makes a high impact on the CO<sub>2</sub> emissions to the atmosphere and global warming. The capacity of this sink is controlled by complex interaction functions among various factors, including climate, soil properties, vegetation type, and management practices. For understanding the effect of these factors on soil carbon in long term, the soil carbon models have a vital role. The soil carbon models must be correctly validated for a specific region and ecosystem, then they can be used to simulate and predict changes in soil carbon. The main objective of this study was to evaluate the performance of RothC and Century models as the most widely used models in the soil carbon studies for semi-arid rangelands of Bajgah in Fars province. The R<sup>2</sup> (determination Coefficient), r (correlation coefficient), RMSE (root mean square error), MAE (mean absolute error), MD (mean difference) and t-student test between simulated and measured values of soil organic C were used to evaluate the performance of RothC and Century models. Results showed although the Century model negligibly simulated SOC lower than the RothC model, but based on the statistical analyses, both models represented satisfactory results and their simulated values were consistence well with the measured values. Also the results of simulations by Century and RothC models showed that the SOC stocks will be increased during the years of 1987 to 2050 by 7.92% and 12.92%, respectively.

**Keywords:** Soil carbon sequestration, Soil carbon sink, Global warming, Carbon model, Semi-arid rangelands

## ارزیابی کارایی دو مدل کربن خاک با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در مراتع نیمه‌خشک باجگاه، استان فارس

بیژن آزاد<sup>۱</sup>، سید فخرالدین افصلی<sup>۲\*</sup>

۱. کارشناس ارشد مدیریت مناطق بیابانی، بخش مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه شیراز،

۲. استادیار بخش مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه شیراز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۶/۱۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۷/۲۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۷/۲۴)

### چکیده:

خاک مراتع ذخیره‌گاه مهم جهانی کربن بوده و هرگونه تغییر در این ذخیره‌گاه تأثیر زیادی بر انتشار دی‌اکسیدکربن به اتمسفر و گرمایش جهانی دارد. ظرفیت این ذخیره‌گاه به وسیله روابط متقابل پیچیده بین عوامل متنوعی مانند اقلیم، خصوصیات خاک، نوع پوشش گیاهی و اقدامات مدیریتی کنترل می‌شود. مدل‌های کربن برای فهمیدن اثر این فاکتورها بر کربن خاک در بلندمدت نقش مهمی دارند. مدل‌های کربن باید به طور صحیح در منطقه اعتبارسنجی شده، سپس می‌توانند برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی کربن خاک استفاده شوند. هدف اصلی این مطالعه ارزیابی کارایی مدل‌های RothC و Century برای مراتع نیمه‌خشک باجگاه استان فارس به عنوان پراستفاده‌ترین مدل‌ها در مطالعات کربن خاک بود. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مطلق خطا (MAE)، تفاوت میانگین (MD)، ضریب تبیین ( $R^2$ )،  $r$  (ضریب همبستگی) و آزمون  $t$ -student بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای ارزیابی کارایی مدل‌های RothC و Century استفاده شد. نتایج نشان داد هرچند مدل Century کربن آلی خاک را به مقدار ناچیزی کمتر از مدل RothC شبیه‌سازی نموده اما بر مبنای آنالیزهای آماری هر دو مدل نتایج رضایت‌بخشی ارائه دادند و مقادیر شبیه‌سازی شده به خوبی با مقایر اندازه‌گیری شده همخوانی داشتند. همچنین نتایج شبیه‌سازی‌ها به وسیله مدل‌های Century و RothC نشان داد در طی سال‌های ۱۳۶۶ هجری شمسی (۱۹۸۷ میلادی) تا ۱۴۲۹ هجری شمسی (۲۰۵۰ میلادی) ذخایر کربن خاک به ترتیب به میزان ۷/۹۲ و ۱۲/۹۲ درصد افزایش خواهد یافت.

**واژه‌های کلیدی:** ترسیب کربن خاک، ذخیره‌گاه کربن خاک، گرمایش جهانی، مدل کربن، مراتع نیمه‌خشک

### مقدمه

با شروع انقلاب صنعتی، آزادسازی کربن از طریق احتراق سوخت-های فسیلی و تغییر کاربری و اقدامات کشاورزی به ترتیب به میزان  $270 \pm 30$  و  $136 \pm 55$  پتاگرم<sup>۱</sup> افزایش یافته است (Lal, 2004). تحقیقات، افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر به‌ویژه دی‌اکسیدکربن ( $CO_2$ ) را در دهه‌های اخیر از عوامل مهم وقوع تغییر اقلیم جهانی و گرم شدن کره زمین بیان کرده‌اند (IPCC, 2007). به همین دلیل کشورهای جهان در پروتوکل کیوتو موظف به کاهش  $CO_2$  اتمسفر (Kirschbaum et al., 2001) از طریق ترسیب کربن در خاک شدند (Smith, 2004). زیرا خاک‌ها، بزرگ‌ترین ذخیره‌گاه کربن زمینی هستند که نقش مهمی در چرخه جهانی کربن بازی می‌کنند (Lal, 2004; Zhang et al., 2013). به طوری که حدود ۱۰ درصد  $CO_2$  اتمسفری هر ساله از طریق خاک‌ها به اتمسفر انتشار می‌یابد (Gifford,

2009; Lal, 2003; Tornquist et al., 1994). از این رو می‌توان به‌وسیله اقدامات مدیریتی مناسب از طریق جذب دی‌اکسیدکربن از اتمسفر و ذخیره آن در خاک، امکان استفاده از این ذخیره‌گاه بالقوه را برای جبران و تخفیف اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای فراهم ساخت (Izaurrealde et al., 2006; Yadav and Malanson, 2008; Field et al., 2014; Muñoz-Rojas et al., 2015; Francaviglia et al., 2017). مراتع حدود ۵۰٪ از سطح خشکی‌های کره زمین را پوشانده‌اند و توانایی ذخیره ۳۰٪ کربن آلی خاک جهان را دارند، و همچنین در مقیاس جهانی سالانه حدود ۵۰۰ میلیارد تن  $CO_2$  اتمسفر را ترسیب می‌دهند (Derner and Schuman, 2007). بنابراین اکوسیستم‌های مرتعی به دلیل گسترش سطحی زیاد در سراسر کره زمین و توانایی بالا در اندوختن کربن، پتانسیل بالایی در ترسیب دادن  $CO_2$  اتمسفر در خاک و کاهش اثرات گرمایش جهانی دارند (Morgan et al., 2001; Cui et al., 2005; Derner and Schuman, 2007;

\* نویسنده مسئول: afzalif@shirazu.ac.ir

1. Pg = petagram =  $10^{15}$  g

شرایط محیطی و مدیریتی به منظور ارزیابی کارایی آن‌ها در پیش‌بینی تغییرات ذخیره کربن آلی خاک به‌عنوان یک نیاز ضروری بیان کردند.

Wan *et al.* (2011) طی مطالعه‌ای در چین با استفاده از مدل RothC نشان دادند که کربن آلی خاک در طول دهه‌های آینده به دلیل تغییر اقلیم کاهش می‌یابد. Xu *et al.* (2011) با استفاده از مدل Century اثر احیاء زمین و اقدامات مدیریتی را بر روی پویایی کربن آلی خاک در واحه‌های کشاورزی شمال غرب چین که در ۵۰ سال گذشته تحت منطقه خشک و بیابانی بودند، مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد با به‌کارگیری اقدامات مدیریتی، ذخیره کربن آلی خاک ۸/۲ درصد نسبت به سطوح ابتدائی در درختچه‌زارهای بیابانی افزایش یافته است. Chen *et al.* (2012) با استفاده از مدل Century اثر مدیریت قرق را بر ذخیره کربن آلی خاک در مراتع شمال چین مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند که مدیریت قرق موجب تجمع مواد آلی و افزایش کربن آلی شده است. Borrelliet *et al.* (2016) با استفاده از مدل Century اثر فرسایش بر تغییرات ذخیره کربن آلی خاک در زمین‌های کشاورزی ایتالیا را در سه سناریو مدیریتی برآورد کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با اتخاذ مدیریت مناسب کشاورزی ذخیره کربن آلی خاک به میزان ۱۷ درصد افزایش خواهد یافت. Bleuler *et al.* (2017) با استفاده از مدل RothC اثر منابع مختلف کربن، کمپوست و نوع کشت را بر میزان هدرروی کربن خاک در جنوب ایتالیا بررسی کردند.

حدود ۸۵ میلیون هکتار از اراضی کشور ایران را مراتع تشکیل می‌دهند که با برنامه‌ریزی و بهره‌برداری صحیح از این منابع می‌توانند نقش مهمی در روند توسعه کشور ایفا نمایند؛ با اینکه این اراضی حدود ۵۱٪ سطح کشور را شامل شده و حدود ۷۰ درصد از مراتع ایران در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور قرار گرفته‌اند (Ansari, 2009)؛ اما تاکنون مطالعات اندکی (Vanaee *et al.*, 2017) به مدل‌سازی ذخیره کربن آلی خاک مراتع ایران برای ارائه راهکارهای مدیریتی شایسته به سازمان‌های مرتبط پرداخته‌اند. لازم به ذکر است که داده‌های قابل دسترس برای اعتبارسنجی و ارزیابی کارایی مدل‌های ماده آلی خاک در مراتع ایران بسیار محدود است. هدف اصلی این مطالعه ارزیابی کارایی دو مدل Century و RothC به‌عنوان پراستفاده‌ترین مدل‌ها برای برآورد تغییرات ذخیره کربن آلی خاک در مراتع نیمه‌خشک منطقه باجگاه در استان فارس می‌باشد. همچنین مطالعه فعلی اولین تلاش برای ارزیابی هم‌زمان کارایی دو مدل Century و RothC در مراتع ایران است.

(Mcsberry and Ritchie, 2013; Waters *et al.*, 2016). از آنجایی که تغییرات کربن آلی خاک یک فرآیند کند و بطئی است بنابراین ارزیابی تأثیر عوامل مدیریتی و اقلیمی بر منابع کربن خاک در اکوسیستم‌های مرتعی به مدت زمان زیادی نیاز دارد (Medina-Roldan *et al.*, 2012). از طرفی به دلیل پیچیدگی زیاد اکوسیستم‌ها از جمله تنوع خاک، شرایط اقلیمی و توپوگرافی و روابط متقابل پیچیده بین گیاه- خاک- اتمسفر، مطالعه پویایی کربن آلی خاک از طریق استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی به‌عنوان سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری برای پیش‌بینی تغییرات کربن آلی خاک تحت تأثیر عوامل مدیریتی و اقلیمی گزینه مفید و مناسبی است (Borrelliet *et al.*, 2016; Bleuler *et al.*, 2017; Soleimani *et al.*, 2017). با استفاده از مدل‌ها می‌توان سال‌ها قبل از وقوع تغییرات، عوامل تأثیرگذار بر منابع کربن خاک را شناسایی و اقدامات مدیریتی مناسب را اتخاذ نمود (Farage *et al.*, 2007).

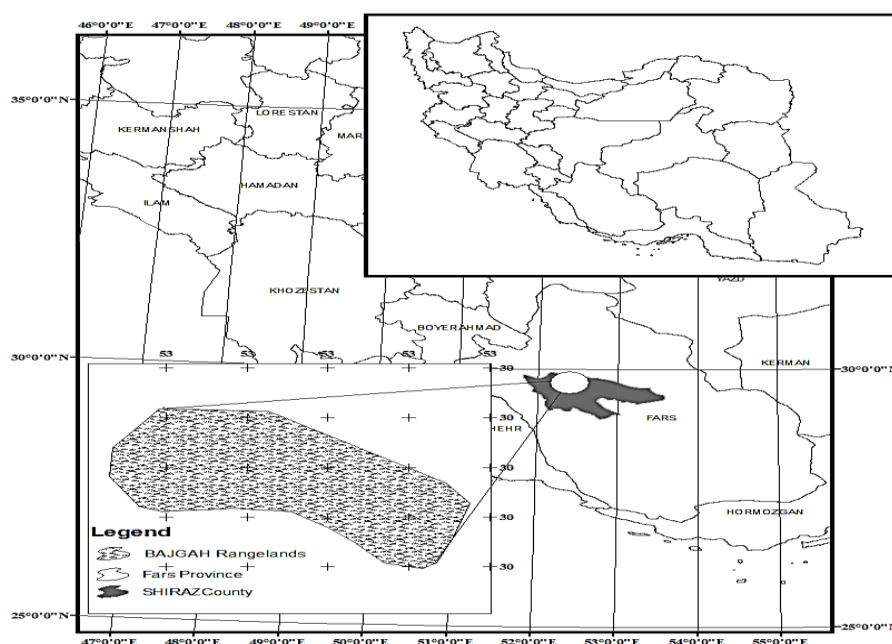
به‌منظور ارزیابی پویایی کربن آلی خاک در پاسخ به عوامل اقلیمی و مدیریتی، مدل‌های زیادی مانند EPIC, RothC, Daisy, DNDC, DayCent و Century توسعه پیدا کرده‌اند. در میان مدل‌های شبیه‌سازی ماده آلی خاک، مدل‌های RothC و Century بیشترین کاربرد را دارند (Cerri *et al.*, 2007; Kamoni *et al.*, 2007; Farina *et al.*, 2017; Barancikova *et al.*, 2010; Parton *et al.*, 1987) Century و مدل RothC (Coleman and Jenkinson, 1996) به‌طور گسترده در اکوسیستم‌های مختلف تحت شرایط محیطی و مدیریتی مختلف استفاده و ارزیابی شده‌اند (Smith *et al.*, 1997; Tornquist *et al.*, 2009; Soleimani *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018). مدل RothC به دلیل سادگی و در دسترس بودن داده‌های ورودی آن و همچنین با توجه به اینکه به تعداد داده‌های محدودی نیاز دارد مورد توجه بسیاری از محققان می‌باشد (Guo *et al.*, 2007; Coleman and Jenkinson, 2008; Barancikova *et al.*, 2010; Francaviglia *et al.*, 2012). مدل Century نیز به دلیل توانایی شبیه‌سازی مدیریت‌های مختلف مانند چرای دام، خاک‌ورزی، آتش‌سوزی، کوددهی، آبیاری، قطع درختان و فرسایش دارای ارجحیت نسبت به سایر مدل‌ها است (Yadav and Malanson, 2008; Tornquist and Jones, 2009; Chen *et al.*, 2012; Ouyang *et al.*, 2014). بیان کردند مدلهایی که به‌طور صحیح اعتبارسنجی شده‌اند را می‌توان برای پیش‌بینی تغییرات کربن آلی خاک تحت اقدامات مدیریتی و شرایط اقلیمی مختلف مورد استفاده قرار داد. Cerri *et al.* (2007) اعتبارسنجی مدل‌های Century و RothC را در شرایط مختلف تحت طیف وسیعی از

## مواد و روش‌ها

## معرفی منطقه مورد مطالعه

مراتع مورد مطالعه در منطقه‌ای به نام کوی اساتید باجگاه واقع در شمال غربی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در ۱۵ کیلومتری شمال شهر شیراز قرار دارند (شکل ۱). ارتفاع دشت باجگاه در محل احداث دانشکده کشاورزی ۱۸۱۰ متر نسبت به سطح آزاد دریا می‌باشد. مراتع مورد مطالعه از لحاظ جغرافیایی در عرض ۲۹ درجه و ۳۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۲ دقیقه شرقی واقع هستند. بر اساس آمار ۴۳ ساله

ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی، میانگین بارندگی سالیانه ۳۸۸/۴۴ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت سالیانه ۱۳/۴ درجه سانتی‌گراد و حداکثر و حداقل درجه حرارت به ترتیب در ماه‌های مرداد و دی گزارش شده است. پوشش گیاهی مراتع باجگاه از نوع گراس‌های C<sub>3</sub> بوده و تیپ گیاهی غالب این مراتع *Astragalus brachycalyx* - *Centaurea intricata* - *Convolvulus acanthocladus* می‌باشد (Khalily, 2008). از لحاظ تاریخی در مراتع باجگاه از سال ۱۳۴۳ (مصادف با ملی شدن جنگل‌ها و مراتع) تا سال ۱۳۵۷ فشار چرای متوسط دام، و از سال ۱۳۵۷ تاکنون مدیریت بدون چرای دام حاکم بوده است.



شکل ۱. موقعیت قرارگیری مراتع نیمه‌خشک باجگاه در شهرستان شیراز.

## اندازه‌گیری‌های میدانی و آزمایشگاهی

در این مطالعه نمونه‌برداری خاک به روش تصادفی صورت گرفت و تعداد ۶۰ نمونه خاک (تعداد ۳۰ نمونه در شهریور ۱۳۹۳ (سپتامبر ۲۰۱۴) و ۳۰ نمونه در دی ماه ۱۳۹۳ (دسامبر ۲۰۱۴)) از عمق ۰-۲۰ سانتی‌متری از سطح مراتع برداشت شد. به منظور تعیین وزن مخصوص ظاهری خاک دو نمونه سیلندر در کنار هر گودال خاک (در مجموع ۱۲۰ نمونه) جمع‌آوری شد. برای نمونه‌برداری از پوشش گیاهی مرتعی، زیتوده بالازمینی<sup>۱</sup>، لاشبرگ و زیتوده زیرزمینی<sup>۲</sup> (ریشه) موجود در ۱۷ پلات یک مترمربعی برداشت و در داخل کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شد و برای آزمایش‌های بعدی به آزمایشگاه منتقل شدند. بعد از خشک شدن نمونه‌های خاک در مجاورت هوا و حذف

مواد گیاهی از آن‌ها، نمونه‌های خاک با الک ۲ میلی‌متری برای آزمایش‌های بعدی الک شدند. سپس کربن آلی خاک به روش والکی و بلاک (Walkley and Black; 1934)، بافت خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، اسیدیته خاک با استفاده از دستگاه pH متر، نیتروژن خاک از روش کج‌دال (Kirk, 1950) و وزن مخصوص ظاهری خاک به روش سیلندر (Blake and Hartge, 1986) اندازه‌گیری شدند. در نهایت ذخیره کربن آلی خاک در عمق ۰-۲۰ سانتی‌متری با استفاده از معادله (۱) (Eller and Bettany, 1995) بر حسب تن بر هکتار محاسبه شد:

(رابطه ۱)

$$SOC\ Stock = OC (\%) \times depth (cm) \times B \cdot d (gr\ cm^{-3})$$

که OC، depth و B.d به ترتیب کربن آلی خاک، عمق خاک

و وزن مخصوص ظاهری خاک هستند.

### توصیف مدل Century

مدل Century یک ابزار آنالیز اکوسیستم‌های طبیعی (مرتع، جنگل و ساوان) و کشاورزی برای روشن ساختن اثرات اقلیم، مدیریت، فرسایش، آبیاری، چرای دام، کوددهی بر وضعیت عناصر غذایی خاک (کربن، نیتروژن، فسفر و سولفور) است (Parton *et al.*, 2009; Wilson *et al.*, 1987). این مدل کربن آلی خاک را در سه مخزن<sup>۷</sup> مفهومی شامل مخزن‌های غیرفعال<sup>۸</sup>، آهسته<sup>۹</sup> و فعال<sup>۱۰</sup> برای سرعت‌های آهسته، متوسط و سریع از انتقال کربن در خاک ارائه می‌دهد (Tornquist *et al.*, 2009; Wilson *et al.*, 2009). مدل Century به تعداد داده‌های ورودی بیشتری نسبت به مدل RothC برای اجرا نیاز دارد، اما به دلیل توانایی و دقت بالای مدل Century در شبیه‌سازی محرک‌های محیطی مانند فرسایش و تغییر اقلیم و همچنین مدیریت‌های مختلف مانند چرای دام ارجحیت زیادی نسبت به سایر مدل‌های بیوژئوشیمیایی دارد (Borrelliet *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2018). مدل Century توانایی شبیه‌سازی رشد و تولید گیاهی و زمان‌بندی وقوع رخدادهای محیطی مانند فرسایش و تغییر اقلیم و همچنین برنامه‌ریزی اقدامات مختلف مدیریتی مانند چرای دام، آبیاری، کاشت و برداشت گیاهان را دارد. در جدول (۱) داده‌های ورودی مهم برای اجرای مدل Century آورده شده است.

### واسنجی مدل Century و RothC

داده‌های مخازن کربن خاک معمولاً به‌صورت مستقیم وارد مدل‌ها نمی‌شوند و از شبیه‌سازی یک دوره تعادل<sup>۱۱</sup> چندین هزار ساله (۷۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ سال) تحت پوشش گیاهی بومی به‌دست می‌آیند (Tornquist *et al.*, 2009; Francaviglia *et al.*, 2012). دوره تعادل یک خط مبنا<sup>۱۲</sup> برای ارزیابی اثرات اقدامات مدیریتی و شرایط اقلیمی بر کربن آلی خاک ایجاد می‌کند. از آنجایی که برای واسنجی مدل‌های Century و RothC حداقل به یک اندازه‌گیری تاریخی ذخیره کربن آلی خاک نیاز است (Parton *et al.*, 2008; Coleman and Jenkinson, 1987)، از این‌رو با استفاده از داده‌های مطالعات قبلی (Abtahi *et al.*, 1987) (مقدار کل کربن آلی اولیه خاک در سال ۱۳۶۶) در مراتع باجگاه، هر دو مدل واسنجی شدند (جدول ۲). به این معنا که با معرفی ویژگی‌های منطقه (پوشش گیاهی بومی، خصوصیات خاک، مدیریت گذشته زمین و اقلیم) به مدل‌ها، مدل مخازن کربن خاک را طی دوره

بعد از شستشو و گذراندن ریشه‌ها از الک ۵۰ (قطر منفذ ۰/۳ میلی‌متر)، ریشه‌ها به همراه زیتوده بالازمینی و لاشبرگ گیاهان هوا خشک (یک ماه) شدند. بعد از خشک شدن نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتالی وزن خشک نمونه‌ها محاسبه گردید. کربن گیاهی (زیتوده بالازمینی، لاشبرگ و ریشه) از روش سوزاندن (Birdsey *et al.*, 2000) و نیتروژن گیاهی (زیتوده بالازمینی، لاشبرگ و ریشه) از روش کج‌دال (Bremner and Mulvaney, 1982) محاسبه شد.

### توصیف مدل کربن RothC

مدل RothC به دلیل ساختار ساده و نیاز به تعداد داده‌های محدود برای شبیه‌سازی پویایی بلندمدت کربن آلی خاک دارای ارجحیت زیادی نسبت به سایر مدل‌های کربن (Coleman and Jenkinson, 1996) می‌باشد. این مدل، کربن آلی خاک را به چهار جزء فعال و یک جزء غیرفعال تقسیم‌بندی می‌کند. اجزای فعال ماده آلی خاک شامل مواد گیاهی تجزیه‌پذیر<sup>۱</sup>، مواد گیاهی مقاوم<sup>۲</sup>، زیتوده میکروبی<sup>۳</sup> و مواد آلی هوموسی شده<sup>۴</sup> می‌باشند. در این مدل جزء غیرفعال، نسبتی از مواد آلی است که از نظر بیولوژیکی فعال نبوده و سن رادیوکربنی<sup>۵</sup> آن بیش از ۵۰/۰۰۰ سال می‌باشد و بنابراین در چرخه کربن شرکت ندارد (Coleman and Jenkinson, 2008). مدل RothC، لاشبرگ گیاهی ورودی به خاک را بر مبنای نسبت مواد گیاهی تجزیه‌پذیر به مواد گیاهی مقاوم<sup>۶</sup> (کیفیت لاشبرگ) به داخل مخزن‌های RPM و DPM تقسیم‌بندی می‌کند و سپس مواد گیاهی به شکل CO<sub>2</sub>، زیتوده میکروبی و مواد آلی هوموسی شده تجزیه می‌شوند. مدل RothC برای اجرای مدل در دو حالت طراحی شده است؛ حالت Forward با دانستن میزان ورودی کربن گیاه به خاک، تغییرات کربن آلی خاک محاسبه می‌شود و حالت Inverse هنگامی که ورودی کربن گیاهی با استفاده از کربن آلی خاک محاسبه می‌شود (Kamoni *et al.*, 2007b). مدل RothC برخلاف مدل Century توانایی شبیه‌سازی رشد و تولید گیاهی را ندارد و همچنین قادر به شبیه‌سازی مدیریت‌های مختلف مانند چرای دام، فرسایش، کوددهی و آبیاری نیست. در مطالعه حاضر از مدل RothC نسخه 26.3 برای شبیه‌سازی پویایی ذخیره کربن آلی خاک (Coleman and Jenkinson, 1996) استفاده شد. داده‌های ورودی مهم برای اجرای مدل RothC در جدول (۱) آورده شده است.

7. Pool  
8. Passive  
9. Slow  
10. Active  
11. Equilibrium  
12. Baseline

1. Decomposable Plant Material=DPM  
2. Resistant Plant Material=RPM  
3. Microbial Biomass  
4. Hummified Organic Matter  
5. Radiocarbon age  
6. DPM/RPM

گردد، ادامه یافت ( Kamoni et al., 2007; Tornquist et al., 2009; Wilson et al., 2009). همچنین خط مبنا یا دوره تعادل برای مدل RothC بر مبنای وضعیت دانستن مقدار کل کربن آلی اولیه خاک<sup>۱</sup>، مقدار رس، شرایط اقلیمی، پوشش سطحی خاک و همچنین مقدار ماده آلی پایدار<sup>۲</sup> برای عمق ۲۰ سانتی متری خاک که با استفاده از معادله (۲) محاسبه می‌گردد ( Falloon et al., 1998); در مراتع باجگاه تا سال ۱۳۶۶ اجرا شد (جدول ۲). در این معادله، IOM و TOC به ترتیب ماده آلی پایدار خاک و کل کربن آلی خاک است.

$$IOM = 0.049 TOC^{1.139} \quad (\text{رابطه ۲})$$

تعادل به طوری رشد می‌دهد که به میزان ذخیره کربن آلی خاک در سال پایانی (در اینجا منظور میزان ذخیره کربن آلی خاک در سال ۱۳۶۶ است) برسد. از آنجایی که مدل Century توانایی شبیه‌سازی مدیریت‌های مختلف را دارد، دوره تعادل (۱۰ هزار سال) برای این مدل تحت پوشش گراس‌های C<sub>3</sub> به‌عنوان پوشش گیاهی بومی و چرای سبک دام تا سال ۱۳۴۲، چرای متوسط تا سال ۱۳۵۸ (Vanaee et al., 2017) و مدیریت بدون چرای دام از سال ۱۳۶۶ اجرا شد. واسنجی مدل Century با تغییر دادن مقادیر پیش‌فرض مدل تا زمانی که مقادیر کربن شبیه‌سازی شده پس از ۱۰ هزار سال با کربن اندازه‌گیری شده در سال ۱۳۶۶ برابر

جدول ۱. داده‌های ورودی مهم به مدل‌های RothC و Century برای اجرا و اعتبارسنجی آن‌ها (Kamoni et al., 2007a).

Century	RothC	مدل / داده‌ها
درصد شن، رس و سیلت	درصد رس	داده‌های ورودی خاک
وزن مخصوص ظاهری خاک	وزن مخصوص ظاهری خاک	
ذخیره کربن آلی اولیه خاک	ذخیره کربن آلی اولیه خاک	
بارش کل	بارش کل	داده‌های ماهانه هواشناسی
حداکثر درجه حرارت	میانگین درجه حرارت	
حداقل درجه حرارت	کل تبخیر از طشت آزاد	
نوع اکوسیستم (مرتع، کشاورزی...)	کربن ورودی از طریق لاشبرگ به خاک	داده‌های مدیریتی
نوع رخداد: طبیعی (بارندگی، فرسایش، تغییر اقلیم) و مدیریتی (شدت چرای دام، آبیاری، کوددهی)	DPM/RPM	
وقایع تقویم گیاهی (کاشت تا برداشت)، زمان چرای دام، زمان وقوع فرسایش، زمان آبیاری ...	کربن ورودی به خاک از طریق کود پوشش خاک	
درصد کربن آلی خاک	درصد کربن آلی خاک	داده‌های اعتبارسنجی
وزن مخصوص ظاهری خاک	وزن مخصوص ظاهری خاک	
عمق خاک	عمق خاک	
زیتوده میکروبی خاک*	زیتوده میکروبی خاک*	
عمر کربن ۱۳ خاک*	عمر کربن ۱۴ خاک*	

به غیر از موارد مشخص شده با علامت (\*) بقیه پارامترها جزء ورودی‌های ضروری هستند.

### اجرای مدل Century و RothC

با معرفی مدیریت بدون چرای دام و وقوع فرسایش آبی به میزان ۱۰۷۰ کیلوگرم در هکتار در سال (Torabi, 1995) به فایل مدیریت مدل Century، این مدل از سال ۱۳۶۶ هجری شمسی (۱۹۸۷ میلادی) به‌عنوان سال مبنای شبیه‌سازی تحت شرایط فرسایش ذکر شده و مدیریت بدون چرای دام تا سال ۱۴۲۹ هجری شمسی (۲۰۵۰ میلادی) اجرا شد. همچنین با توجه به این امر که مدل RothC قادر به شبیه‌سازی اثر فرسایش و اقدامات مدیریتی بر کربن خاک نیست، این مدل تحت پوشش گیاهی

واسنجی مدل RothC نیز به‌وسیله اجرای مدل برای شرایط آب و هوایی و خاکی مراتع باجگاه برای ۱۰ هزار سال در حالت تعادل<sup>۳</sup> و با نقطه پایانی در سال ۱۳۶۶ (سال ۱۹۸۷ میلادی) انجام شد. مدل به‌طور مکرر اجرا شد و خروجی‌های مدل در هر اجرا بازدید شده و کربن ورودی گیاهی مکرر تصحیح شد تا مقدار ذخیره کربن آلی خاک اندازه‌گیری شده با مقدار ذخیره کربن آلی خاک شبیه‌سازی شده در مراتع باجگاه در ۱۳۶۶ (پایان ۱۹۸۷ میلادی) برابر گردد (Francaviglia et al., 2012; Soleimani et al., 2017; Farina et al., 2017).

3 Equilibrium state

1 Initial total SOC  
2 Inert Organic Matter (IOM)

گراس‌های C<sub>3</sub> با در نظر گرفتن فاکتور کیفیت لاشبرگ به میزان ۰/۶۷ برای این مراتع و همچنین با توجه به شرایط ویژه منطقه از لحاظ خصوصیات خاک، گیاه و اقلیم، از سال ۱۳۶۶ (۱۹۸۷ میلادی) تا سال ۱۴۲۹ (۲۰۵۰ میلادی) اجرا شد.

جدول ۲. داده‌های ورودی به مدل RothC و Century برای اجرای دوره تعادل در مراتع باجگاه و واسنجی مدل‌ها.

مرجع	مقدار	پارامتر
مطالعه حاضر	۲۹° ۳۶' N - ۵۲° ۳۲' E	موقعیت
آمار ۴۳ ساله (۱۳۹۳-۱۳۵۰)	۳۸۸/۴۴	بارش (میلی‌متر)
ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز	۱۳/۴۵	درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد)
	۶۴۳	کل تبخیر (میلی‌متر)
مطالعه حاضر	۱۲/۷۴ و ۵۳/۳۸، ۳۳/۸۸	بافت خاک (رس، سیلت و شن) (درصد)
"	۱/۲۶۵	وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
"	۷/۹۳	اسیدیته
"	۲۰	عمق خاک (سانتی‌متر)
"	۲/۵۶	ماده آلی پایدار (تن بر هکتار)
Abtahi et al. (1987)	۳۲۲۸/۵۳	ذخیره کربن آلی اولیه خاک (گرم بر مترمربع) <sup>a</sup>
مطالعه حاضر	۲۹/۴۶۹	کربن لاشبرگ (گرم بر مترمربع)
"	۳۸/۹۴۷	کربن زیتوده بالازمینی (گرم بر مترمربع)
"	۵۶/۴۰۱	کربن زیتوده زیرزمینی (گرم بر مترمربع)
"	۱/۰۵	کربن ورودی به خاک (تن کربن بر هکتار) <sup>b</sup>
"	۰/۶۷	DPM/RPM <sup>c</sup>
"	C <sub>3</sub> گراس	پوشش گیاهی بومی

(a) میانگین ۳۰ نمونه خاک در سال ۱۳۶۶ در مراتع باجگاه. (b) کربن ورودی به خاک با استفاده از روش Inverse در مدل RothC بر مبنای دانستن میزان کل کربن آلی خاک در یک منطقه با خصوصیات خاص اقلیمی برای پوشش گیاهی محاسبه می‌شود. (c) DPM/RPM (نسبت مواد گیاهی تجزیه‌پذیر به مواد گیاهی مقاوم به تجزیه) بیانگر سرعت تجزیه مواد گیاهی است با استفاده از راهنمای مدل برای پوشش‌های گیاهی مختلف تعیین می‌گردد.

### ارزیابی کارایی مدل RothC و Century

مقایسه شدند. شاخص‌ها و تست‌های آماری استفاده شده در این مطالعه برای ارزیابی کارایی مدل‌ها شامل ضریب تبیین (R<sup>2</sup>)، ضریب همبستگی (r)، میانگین مطلق خطا (MAE<sup>1</sup>)، تفاوت میانگین (MD)، درصد میانگین مربعات خطا (RMSE%)، RMSE<sub>0.05</sub> و آزمون t استیودنت نمونه‌های مستقل بودند.

در این مطالعه برای ارزیابی کارایی مدل‌ها مقادیر ذخیره کربن آلی خاک شبیه‌سازی شده توسط هر دو مدل Century و RothC با داده‌های اندازه‌گیری شده در سال‌های ۱۳۸۷ (Moosavi, 2011) و ۱۳۹۳ (نتایج تحقیق حاضر) (جدول ۳) بر مبنای آنالیزهای آماری

جدول ۳. ذخیره کربن آلی خاک اندازه‌گیری شده، حاصل از مطالعات پیشین و مطالعه حاضر در مراتع باجگاه.

ذخیره کربن آلی خاک (گرم در مترمربع)	زمان نمونه برداری (میلادی)	زمان نمونه برداری (هجری شمسی)	مرجع و سال	نام منطقه
۳۴/۲۱	مارس، ۲۰۰۹	اسفند، ۱۳۸۷	Moosavi, 2011	مراتع باجگاه
۳۶۴۹	سپتامبر، ۲۰۱۴	شهریور، ۱۳۹۳		
۳۷۰۸	دسامبر، ۲۰۱۴	دی، ۱۳۹۳	تحقیق حاضر	مراتع باجگاه

ضریب تبیین (R<sup>2</sup>)، اندازه‌ای از سهم واریانس کل داده‌های مشاهده شده است که به وسیله داده‌های شبیه‌سازی شده توضیح داده می‌شود (Smith et al., 1996; Smith et al., 1997). بر مبنای نظر Hammer and Muchow (1994) شرط لازم برای استفاده از مدل‌ها، ضریب تبیین بالاتر از ۶۰ درصد می‌باشد.

مقایسه شدند. شاخص‌ها و تست‌های آماری استفاده شده در این مطالعه برای ارزیابی کارایی مدل‌ها شامل ضریب تبیین (R<sup>2</sup>)، ضریب همبستگی (r)، میانگین مطلق خطا (MAE<sup>1</sup>)، تفاوت میانگین (MD)، درصد میانگین مربعات خطا (RMSE%)، RMSE<sub>0.05</sub> و آزمون t استیودنت نمونه‌های مستقل بودند.

شده،  $t$  استیودنت جدول برای درجه آزادی  $n-2$  و تعداد مشاهدات می‌باشد.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{O})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2]^{1/2} [\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2]^{1/2}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$RMSE = \frac{100}{\bar{O}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{n} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$RMSE_{0.05} = \frac{100}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SE_i - t_{m0.95})^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{n} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i) / n}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2 - \left( \left[ \sum_{i=1}^n (S_i - O_i) \right]^2 / n \right)}{(n-1)(n)}}} \quad (\text{رابطه ۹})$$

بعد از ارزیابی کارایی مدل‌ها، بر مبنای شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط هر دو مدل RothC و Century در فاصله زمانی ۶۳ ساله از سال ۱۹۸۷ (سال ۱۳۶۶ هجری شمسی) تا پایان سال ۲۰۵۰ میلادی (۱۴۲۹ هجری شمسی)، درصد تغییرات ذخیره کربن آلی خاک (Soleimani et al., 2017) (معادله ۱۰) و همچنین نرخ ترسیب کربن خاک (Francaviglia et al., 2017) (معادله ۱۱) برای این دوره زمانی محاسبه شد.

$$(\%) = 100 \times \frac{(\text{ذخیره کربن آلی خاک در ۱۹۸۷} - \text{ذخیره کربن آلی خاک در ۲۰۵۰})}{\text{ذخیره کربن آلی خاک در ۱۹۸۷}}$$

(رابطه ۱۱)

$$\text{نرخ ترسیب کربن خاک} = \frac{(\text{ذخیره کربن آلی خاک در ۱۹۸۷} - \text{ذخیره کربن آلی خاک در ۲۰۵۰})}{63} \quad (\text{تن بر هکتار در سال})$$

ارزیابی کارایی دو مدل RothC و Century در این مطالعه بکار گرفته شد. نتایج تست‌های آماری استفاده شده برای ارزیابی شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط هر دو مدل RothC و Century در مراتع نیمه‌خشک باجگاه در جدول (۴) نشان داده شده است.

ضریب همبستگی ( $r$ ) درجه ارتباط بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد و با استفاده از معادله (۴) محاسبه گردید. همچنین برای بررسی خطای مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل‌ها از شاخص‌های درصد میانگین مربعات خطا (RMSE%) و میانگین مطلق خطا (MAE) استفاده شد. شاخص‌های RMSE و MAE که نشان‌دهنده تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده هستند به ترتیب با استفاده از معادله‌های (۵) و (۶) محاسبه شدند (Smith et al., 1996; Smith and Smith, 2007). طبق نظر Smith et al. (1996) هرگاه RMSE از  $RMSE_{0.05}$  کوچک‌تر باشد از لحاظ آماری داده‌های اندازه‌گیری شده با شبیه‌سازی شده برابرند و تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد ( $p < 0.05$ ) بین آن‌ها وجود ندارد. میزان  $RMSE_{0.05}$  نیز با استفاده از معادله (۷) محاسبه گردید. در این مطالعه برای برآورد کم‌برآوردی<sup>۱</sup> یا بیش‌برآوردی<sup>۲</sup> مدل‌ها از شاخص تفاوت میانگین (MD) استفاده شد، به طوری که مقادیر منفی و مثبت این شاخص به ترتیب نشان‌دهنده بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی مدل است و با استفاده از معادله (۸) محاسبه شد. همچنین هرچقدر که MD به صفر نزدیک باشد بیانگر خطای پایین بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده است. در نهایت برای بررسی معنی‌داری بین ذخیره کربن آلی خاک شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های RothC و Century با مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمون  $t$  استیودنت نمونه‌های مستقل (معادله ۹) استفاده شد. روابط استفاده شده برای محاسبه شاخص‌های مختلف در این مطالعه  $O_i$ ,  $S_i$ ,  $\bar{O}$ ,  $\bar{S}$ ,  $SE_i$ ،  $t_{m0.95}$  و  $n$  به ترتیب مقادیر مشاهده شده، مقادیر شبیه‌سازی شده، میانگین مقادیر مشاهده شده، میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، انحراف معیار مقادیر مشاهده (رابطه ۱۰)

## نتایج و بحث

ارزیابی کارایی مدل‌های RothC و Century با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده حاصل از مطالعات پیشین و مطالعه حاضر (جدول ۳) بر مبنای آنالیزهای آماری انجام شد. تست‌های آماری مشابه برای



جدول ۴. شاخص‌های آماری مربوط به اعتبارسنجی مدل‌های Century و RothC در مراتع نیمه‌خشک باجگاه (جنوب ایران).

تست‌های آماری	مدل	
	Century	RothC
میانگین (تن بر هکتار)	۳۳/۰۵	۳۵/۰۴
R <sup>2</sup>	۰/۹۷	۰/۹۹
r	۰/۹۸	۰/۹۹
RMSE	۸/۷۰	۴/۲۹
RMSE <sub>0.05</sub>	۲۹/۵۰	۲۹/۵۰
MAE	۲/۸۹	۰/۹۹
MD	۲/۹۱	۰/۹۲
t_محاسبه‌شده	۱/۶۳۵۳۶	۱/۱۰۹۰۵
t_جدول < t_محاسبه‌شده	۴/۳۰۳	۴/۳۰۳

<sup>a</sup> بیانگر بهترین حالت در اعتبارسنجی مدل‌ها می‌باشد.

هرچند که ارزش RMSE بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط هر دو مدل Century و RothC کمتر از ۱۰ درصد بود (جدول ۴). Falloon and Smith (2002) تنها با استفاده از شاخص RMSE برای ارزیابی مدل‌های کربن بیان کردند که شبیه‌سازی‌های هر دو مدل Century و RothC برآزش مناسبی با داده‌های اندازه‌گیری شده در اکوسیستم‌های مرتعی، کشاورزی و جنگلی در اروپای غربی داشته است. همچنین نتایج این مطالعه با نتایج سایر مطالعات که با استفاده از دو مدل RothC و Century ذخیره طولانی‌مدت کربن آلی خاک را در آمازون، برزیل، کنیا و جنگل‌های هیرکانی ایران به‌طور مناسبی شبیه‌سازی کرده بودند (Cerri et al., 2007; Kamoni et al., 2007(a, b); Bortolon et al., 2011; Soleimani et al., 2017) همخوانی دارد. طبق نظر Smith et al. (1996) وقتی RMSE از RMSE<sub>0.05</sub> کمتر باشد از لحاظ آماری داده‌های اندازه‌گیری شده با داده‌های شبیه‌سازی شده برابری و تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد ( $p < 0.05$ ) بین آن‌ها وجود ندارد. میزان RMSE برای مدل Century و RothC به ترتیب با ارزش‌های ۴/۲۹ درصد و ۸/۷۰ درصد کمتر از RMSE<sub>0.05</sub> با ارزش عددی ۲۹/۵۰ بودند (جدول ۴)، بنابراین از لحاظ آماری تفاوتی بین ذخیره کربن آلی خاک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط هر دو مدل Century و RothC وجود ندارد ( $p < 0.05$ ).

مقادیر محاسبه شده نزدیک به صفر برای شاخص تفاوت میانگین (MD) بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نشان دهنده خطای پایین در شبیه‌سازی است (Smith et al., 2007; Smith and Smith, 1996). در مطالعه حاضر میزان

ضریب همبستگی (r) بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط هر دو مدل Century و RothC بزرگ‌تر از صفر و به ترتیب برابر ۰/۹۹ و ۰/۹۸ بود. ضریب همبستگی (r) بیانگر درجه‌ای از ارتباط بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده می‌باشد (Bortolon et al., 2011) که در مطالعه حاضر نشان دهنده همبستگی مثبت بین ذخیره کربن آلی خاک شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بود (جدول ۴). همچنین ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) بین ذخیره کربن آلی خاک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط هر دو مدل Century و RothC به ترتیب برابر ۰/۹۷ و ۰/۹۹ بود (جدول ۴) که نشان دهنده یک رابطه خطی معنی‌دار بین ذخیره کربن آلی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط هر دو مدل است. Hammer Muchow (1994) and تبیین بالاتر از ۶۰ می‌باشد. در مطالعه حاضر ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) محاسبه شده برای دو مدل Century و RothC نشان دهنده تفاوت خیلی ناچیز بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده و برآزش مناسب بین آن‌ها است.

همخوانی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده به‌وسیله محاسبه یک ارزش مطلق برای تفاوت کل ارزیابی می‌شود که به‌صورت میانگین مربعات خطا (RMSE) بیان می‌شود (Smith et al., 1996; Smith and Smith, 2007). میزان RMSE که نشان دهنده تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است برای مدل Century و RothC به ترتیب ۴/۲۹ درصد و ۸/۷۰ درصد بود (جدول ۴). مدل Century خطای کل بالاتری نسبت به مدل RothC در برآورد ذخیره کربن آلی خاک داشت

میزان RMSE در مدل Century نسبت به مدل RothC بیان کردند که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد. به طوری که در مطالعه حاضر همانند شاخص تفاوت میانگین (MD)، میزان RMSE برای مدل Century (۸/۷۰ درصد) بیشتر از مدل RothC (۴/۲۹ درصد) بود (جدول ۴). همچنین شاخص میانگین مطلق خطا (MAE) در مراتع نیمه خشک با جگه برای مدل Century با ارزش عددی ۲/۸۹ بیشتر از میانگین مطلق خطا برای مدل RothC با ارزش عددی ۰/۹۹ بود. به طور کلی مدل Century خطای کل بالاتری نسبت به مدل RothC در برآورد ذخیره کربن خاک در مراتع نیمه خشک با جگه داشته است اما ارزش RMSE بین مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده توسط هر دو مدل RothC و Century کمتر از ۱۰ درصد بود (جدول ۴).

بر مبنای تست های آماری مدل RothC ذخیره کربن آلی خاک را به صورت خیلی جزئی با خطای کمتری نسبت به مدل Century شبیه سازی کرده است (جدول ۴). Falloon and Smith (2002) بیان کردند که مدل RothC هنگامی که در وضعیت Inverse اجرا می شود (همانند رویکرد بکار گرفته شده در این تحقیق) برآوردهای مناسب تری نسبت به مدل Century ارائه می دهد که قطعاً به دلیل اجرا کردن های مکرر مدل و تغییر کربن سالانه ورودی به خاک برای نزدیک شدن کربن خاک مدل سازی شده به کربن اندازه گیری شده است. همچنین Shirato *et al.* (2005) نشان دادند که مدل RothC در سایت هایی که در آن هیچ گونه مواد آلی مانند کوددهی به عنوان ورودی به خاک اضافه نمی شود (همانند مطالعه حاضر) برآوردهای مناسب تری ارائه می دهد.

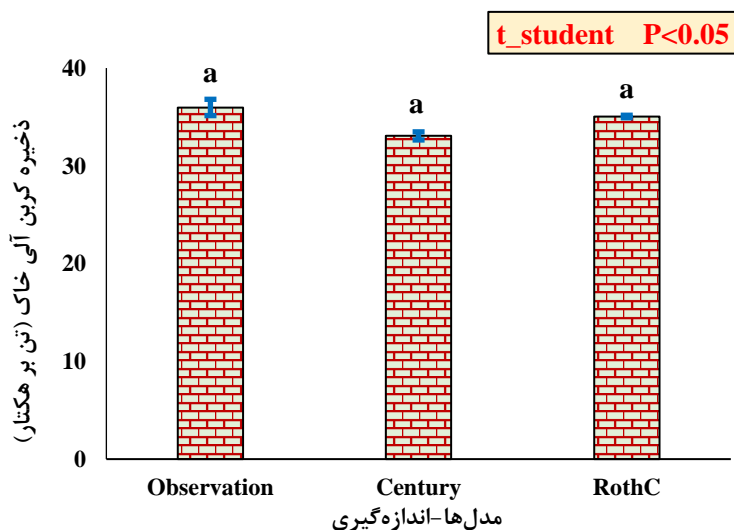
برای بررسی معنی داری بین ذخیره کربن آلی خاک شبیه سازی شده توسط هر کدام از مدل های RothC و Century با مقادیر اندازه گیری شده از آزمون t استیودنت نمونه های مستقل استفاده گردید. نتایج نشان داد که تفاوت معنی داری ( $p < 0.05$ ) بین ذخیره کربن آلی خاک شبیه سازی شده توسط مدل RothC و همچنین مدل Century با ذخیره کربن آلی خاک اندازه گیری شده در مراتع نیمه خشک با جگه وجود ندارد (جدول ۴). همچنین بین ذخیره کربن آلی خاک شبیه سازی شده توسط هر دو مدل RothC و Century نیز تفاوت معنی داری ( $p < 0.05$ ) وجود نداشت (شکل ۲). Byrne and Kiely (2008) بیان کردند نتایج هر دو مدل RothC و Century در مراتع منطقه گرک<sup>۲</sup> در جنوب ایرلند با غالبیت گراس های چندساله مشابه است. همچنین مقادیر ذخیره کربن آلی خاک اندازه گیری شده و شبیه سازی شده توسط هر دو مدل RothC و Century به طور مناسبی در نزدیکی خط

شاخص MD بین مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده در مدل RothC، ۰/۹۲ (تن بر هکتار) و در مدل Century، ۲/۹۱ (تن بر هکتار) بود (جدول ۴) که به ترتیب تقریباً ۲/۶ درصد و ۸/۱ درصد نسبت به داده های اندازه گیری شده، ذخیره کربن آلی خاک را کمتر برآورد کرده اند. بر مبنای این نتایج، شبیه سازی های هر دو مدل RothC و Century همخوانی مناسبی با ذخیره کربن آلی خاک اندازه گیری شده در مراتع نیمه خشک با جگه داشته اند.

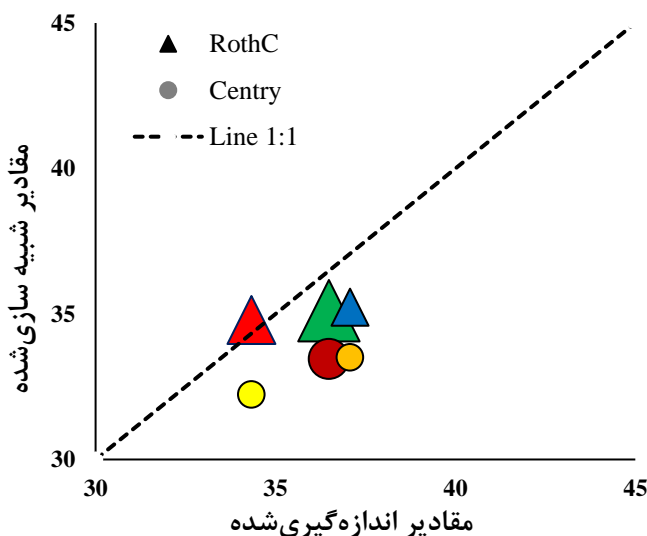
به طور کلی در مراتع نیمه خشک با جگه هر دو مدل RothC و Century میزان ذخیره کربن آلی خاک را نسبت به مقادیر اندازه گیری شده کم برآورد کرده بودند. همچنین مدل Century نسبت به مدل RothC مقادیر ذخیره کربن آلی خاک را در مراتع نیمه خشک با جگه کمتر برآورد کرده است (جدول ۴) به طوری که نسبت به ذخیره کربن آلی خاک اندازه گیری شده، مدل RothC و Century به ترتیب تقریباً ۲/۶ درصد و ۸/۱ درصد ذخیره کربن آلی خاک را کمتر برآورد کرده اند. RothC *et al.* (2011) تفاوت بین ذخیره کربن آلی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده توسط مدل RothC در مآلی سویل های جنوب پامپاس<sup>۱</sup> (آرژانتین) را حدود ۲٪ گزارش کردند، که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد. به طور میانگین میزان ذخیره کربن آلی خاک شبیه سازی شده در مراتع نیمه خشک با جگه طی دوره شبیه سازی (۲۰۱۴-۱۹۸۷) توسط مدل RothC، ۳۵/۰۴ (تن بر هکتار) و در مدل Century، ۳۳/۰۵ بود (جدول ۴) و تقریباً مدل RothC حدود ۶ درصد بیشتر از مدل Century ذخیره کربن آلی خاک را برآورد کرده است. نتایج این تحقیق با مطالعات پیشین که ذخیره کربن آلی خاک شبیه سازی شده توسط مدل RothC حدود ۷٪ بیشتر از مدل Century بود، نزدیک است (Kamoni *et al.*, 2007a). Diels *et al.* (2004) دلیل بیش برآوردی مدل RothC را تنظیم شدن و پارامتریابی مراحل تجزیه در مدل RothC با استفاده از داده های سایت معتدل در منطقه روتامستد انگلستان ذکر کردند (Diels *et al.*, 2004). از طرفی در مراتع نیمه خشک با جگه احتمالاً دلیل کم برآوردی ذخیره کربن آلی خاک شبیه سازی شده توسط مدل Century نسبت به مدل RothC، در نظر گرفتن اثر فرسایش باشد در صورتی که مدل RothC توانایی شبیه سازی اثر فرسایش بر ذخیره کربن آلی خاک را ندارد. در مراتع نیمه خشک با جگه خروجی هر دو سیستم مدل سازی مشابه و نزدیک به هم بود اما در مدل Century نسبت به مدل RothC، مقداری کم برآوردی ذخیره کربن آلی خاک بیشتر بود (جدول ۴). Cerri *et al.* (2007) بالاتر بودن میزان شاخص تفاوت میانگین (MD) یا به عبارتی کم برآوردی در مدل Century نسبت به مدل RothC را بالاتر بودن

نیمه خشک باجگاه تحت مدیریت بدون چرای دام ارائه داده‌اند و به‌عنوان ابزار مفیدی برای شبیه‌سازی و همچنین پیش‌بینی تغییرات کربن خاک در این مراتع می‌توانند بکار گرفته شوند. مطالعات پیشین نیز ارائه نتایج قابل قبول توسط دو مدل RothC و Century را در بین مدل‌های مختلف کربن بیان داشته‌اند (Byrne and Kiely, 2008; Cerri *et al.*, 2007; Falloon and Smith., 2007; Kamoni *et al.*, 2007(a, b); Smith *et al.*, 2007; Bortolon *et al.*, 2011; Francaviglia *et al.*, 2012; Soleimani *et al.*, 2017; Farina *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018).

۱:۱ پراکنش داشتند که بیانگر توانایی این مدل‌ها در پیش‌بینی دقیق ذخیره کربن آلی خاک در مراتع نیمه‌خشک باجگاه است (شکل ۳). Bhattacharyya *et al.* (2010)، بیان کردند کربن آلی خاک شبیه‌سازی شده توسط مدل Century با مقادیر اندازه‌گیری شده در منطقه موهانپور<sup>۱</sup> هند مطابقت دارد. همچنین Bhattacharyya *et al.* (2011)، در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از مدل RothC دریافتند که این مدل می‌تواند در بسیاری از سیستم‌های زیست- اقلیمی<sup>۲</sup> مورد استفاده قرار گیرد. بر مبنای نتایج مطالعه حاضر هر دو مدل کربن RothC و Century نتایج رضایت بخشی در شبیه‌سازی ذخیره کربن آلی خاک در مراتع



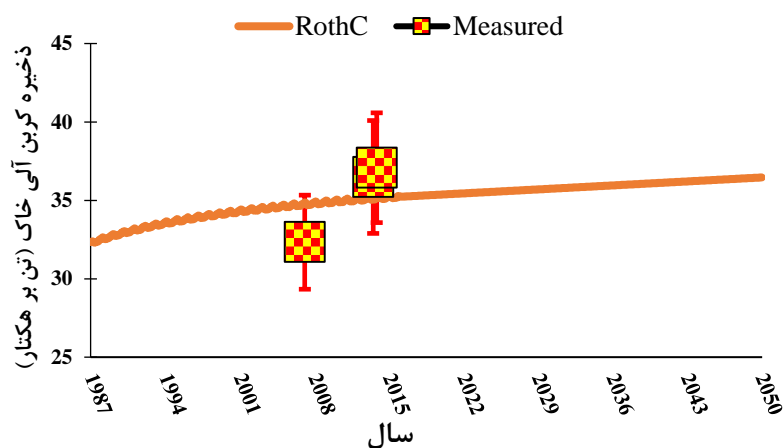
شکل ۲. مقایسه ذخیره کل کربن آلی خاک برآورد شده توسط مدل Century و RothC با مقادیر اندازه‌گیری شده در مراتع نیمه‌خشک باجگاه.



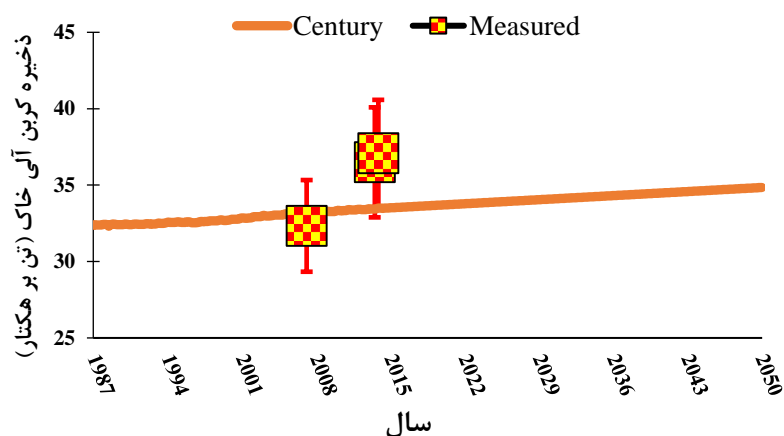
شکل ۳. ذخیره کربن آلی خاک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل Century و RothC در مقایسه با خط ۱ به ۱ در مراتع باجگاه.

کرده‌اند، همخوانی دارد ( Falloon and Smith., 2003; Kamoni et al., 2007(a, b); Smith et al., 2007; Hao et al., 2013; Farina et al., 2013; Soleimani et al., 2017). اعتبارسنجی خروجی‌های مدل، یک گام مهم برای پیش‌بینی‌های واقع‌گرایانه کربن آلی خاک است. اعتبارسنجی مدل‌ها موجب افزایش اعتماد به مدل و همچنین منجر به تشخیص بهتر روابط متقابل بین کربن خاک و شرایط مدیریتی و اقلیمی حاکم بر اکوسیستم‌ها خواهد گردید. بنابراین مدل‌های اعتبارسنجی شده قادر به ارائه تغییرات واقعی کربن خاک و همچنین پیش‌بینی کننده واقع‌گرایانه کربن خاک تحت سناریوهای مدیریتی و اقلیمی آینده هستند (Bortolon et al., 2011). مدل‌های شبیه‌سازی در ترکیب با داده‌های اندازه‌گیری شده می‌توانند ابزارهای پیشرفته‌ای برای برنامه‌ریزی‌های مدیریتی باشند (Soleimani et al., 2017).

ارزیابی‌های بصری همچنین نشان می‌دهد که همخوانی مناسبی بین ذخیره کربن آلی خاک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط هر دو مدل RothC و Century در مراتع نیمه‌خشک باجگاه وجود دارد (شکل ۴ و ۵). بر مبنای شبیه‌سازی‌های RothC و Century، حذف چرای متوسط دام در اواخر سال ۱۳۵۷ و لحاظ مدیریت بدون چرا در سال ۱۳۵۸ به بعد، موجب روند رو به رشد ذخایر کربن آلی خاک در مراتع نیمه‌خشک باجگاه شده است. به‌طور کلی در این مطالعه هر دو مدل افزایش ذخیره کربن آلی خاک را نسبت به سال مبنا (سال ۱۳۶۶ که واسنجی مدل بر مبنای آن انجام شد) به‌خوبی نشان داده‌اند (شکل ۴ و ۵). نتایج این مطالعه با سایر مطالعات پیشین که بیان داشته بودند هر دو مدل RothC و Century به‌طور مناسبی روند تغییرات ذخیره کربن آلی خاک را شبیه‌سازی



شکل ۴. ذخیره کربن آلی خاک شبیه‌سازی شده توسط مدل RothC در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده در مراتع باجگاه.



شکل ۵. ذخیره کربن آلی خاک شبیه‌سازی شده توسط مدل Century در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده در مراتع باجگاه.

رسیده و به ترتیب ۱۲/۹۲ و ۷/۹۲ درصد ذخیره کربن آلی خاک در مراتع نیمه‌خشک باجگاه نسبت به سال ۱۳۶۶ (سال ۱۹۸۷ میلادی)، افزایش یافته است (جدول ۵). همچنین بر مبنای شبیه‌سازی‌های مدل Century و RothC نرخ ترسیب کربن خاک در مراتع نیمه‌خشک باجگاه به ترتیب ۰/۰۶۶ و ۰/۰۴۰ (تن بر هکتار در سال) محاسبه گردید. Lal (2002) نرخ ترسیب کربن خاک در مراتع مناطق نیمه‌خشک را بین ۰/۰۳ تا ۰/۱۲ تن بر هکتار در سال گزارش کردند که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد.

در مراتع نیمه‌خشک باجگاه مقدار اولیه ذخیره کربن آلی خاک تحت گراس‌های C<sub>3</sub> به‌عنوان پوشش گیاهی طبیعی و بومی منطقه، قبل از آغاز این مطالعه در سال ۱۳۶۶ (سال ۱۹۸۷ میلادی)، ۳۲/۲۸۵۳ (تن بر هکتار) بود و هر دو مدل کربن RothC و Century یک افزایش در میزان ذخیره کربن آلی خاک را تا سال ۱۴۲۹ هجری شمسی (۲۰۵۰ میلادی) نسبت به سال ۱۳۶۶ (سال ۱۹۸۷ میلادی)، شبیه‌سازی کرده‌اند (جدول ۵). به‌طوری که بعد از گذشت ۶۳ سال در پایان سال ۲۰۵۰ میزان ذخیره کربن آلی خاک شبیه‌سازی شده توسط مدل RothC به ۳۶/۴۵۹ (تن بر هکتار) و در مدل Century به ۳۴/۸۴۴ (تن بر هکتار)

جدول ۵. نرخ ترسیب کربن و تغییرات ذخیره کربن آلی خاک شبیه‌سازی‌شده توسط مدل Century و RothC نسبت به ذخیره اولیه کربن خاک.

نرخ ترسیب کربن آلی خاک در ۱۹۸۷ (تن بر هکتار)		تغییرات نسبت به ۱۹۸۷ (%)		ذخیره کربن آلی خاک در پایان ۲۰۵۰ (تن بر هکتار)		ذخیره کربن آلی خاک در ۱۹۸۷ (تن بر هکتار)
Century	RothC	Century	RothC	Century	RothC	اندازه‌گیری شده
۰/۰۴۰	۰/۰۶۶	۷/۹۲	۱۲/۹۲	۳۴/۸۴۴	۳۶/۴۵۹	۳۲/۲۸۵۳

جلوگیری از انتشار و نرخ بالای ذخیره کربن خاک در زمین‌های احیاء شده، افزایش می‌دهد (Derner and Schuman, 2007; Morgan et al., 2010). این‌که آیا تجارت کربن می‌تواند از مدیریت مناسب مراتع ایران و به‌ویژه مراتع مناطق نیمه‌خشک کشور به‌منظور بهبود ذخایر کربن خاک به دست آید یا خیر، همچنان حفظ سطوح کربن آلی در خاک یک هدف بسیار مطلوب است، زیرا ماده آلی خاک اهمیت ویژه‌ای از چندین جنبه باروری، پایداری و کیفیت خاک دارد. هرچند که انگیزه برای حفظ سطوح کربن آلی خاک در کشور خیلی پایین است اما سیاست‌های تشویقی برای اجرای اقداماتی که سطوح کربن خاک را حفظ یا افزایش دهند، در داخل کشور ضروری است. مطالعاتی همانند مطالعه حاضر می‌تواند به تشخیص تغییرات شایسته در سیستم‌های مدیریت مراتع، جنگل و زمین‌های کشاورزی و کنار گذاشتن سیاست‌های مخرب کمک کند. برخی از این فعالیت‌ها در حال حاضر بدون انگیزه‌های سیاسی یا اقتصادی در داخل کشور در حال انجام شدن هستند ولی با اجرای برنامه‌های اجتماعی-اقتصادی ویژه می‌توان چنین اقدامات اجرایی را بیش از پیش افزایش داد.

### نتیجه‌گیری کلی

نتایج آزمون آماری نشان داد که هر دو مدل کربن RothC و Century، روند تغییرات ذخیره کربن آلی خاک را در مراتع نیمه‌خشک باجگاه به‌خوبی شبیه‌سازی کرده‌اند. هر دو مدل توانستند نتایج رضایت‌بخشی را در شبیه‌سازی ذخیره کربن خاک

### خط مشی‌های مدیریتی

مطالعات مدل‌سازی می‌تواند با بررسی اقدامات مدیریتی و انتخاب مدیریت مناسب موجب افزایش کربن خاک شود. نتایج حاصل از این مطالعه پیشنهاد می‌کند که مدیریت بدون چرای دام در مراتع نیمه‌خشک باجگاه موجب افزایش ترسیب کربن خاک شده و می‌تواند مزایای زیادی را از تجارت کربن برای کشور به ارمغان آورد. بر مبنای پروتکل کیوتو کشورهای ضمیمه همانند ایران متعهد شده‌اند که از طریق اقدامات مدیریتی مانند احیای پوشش گیاهی، مدیریت چرای دام، جنگل‌کاری، کشت گیاهان مناسب و غیره انتشار گازهای گلخانه‌ای را محدود و یا کاهش دهند. تجارت کربن به کشورهایی که میزان انتشار خود را از حد تعیین‌شده کاهش داده‌اند اجازه می‌دهد تا ظرفیت باقی‌مانده خود را به کشورهایی که میزان انتشار آن‌ها از حد تعیین‌شده فراتر است بفروشند. با اجرای این طرح‌ها، کشورهای توسعه نیافته علاوه بر جذب سرمایه خارجی و تکنولوژی بالاتر، درآمدهایی را نیز کسب می‌کنند. مقدار این درآمدها بسته به نوع و مقیاس طرح‌ها تقریباً برای کاهش هر تن گاز گلخانه‌ای پایه (دی‌اکسید کربن) درآمدی حدود ۱۰ یورو را نصیب صاحب پروژه می‌کند. کشورهای چین، هند و برزیل به ترتیب با کسب درآمد ۲/۲ میلیارد، ۴۰۰ میلیون و ۱۵۰ میلیون دلاری در سال ۲۰۱۱ به‌واسطه فروش گواهی‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کشورهای پیشرو در این زمینه هستند. از طرفی به‌طور غیرمستقیم تجارت کربن ممکن است مشوقی برای تبدیل اراضی زراعی تخریب شده به اراضی مرتعی باشد، یک حرکتی که به‌طور گسترده ترسیب کربن را از طریق

و قابلیت به کارگیری این مدل‌ها در ایران فقدان داده‌های مدیریت، اقلیم و خاک در درازمدت است. وجود داده کافی در درازمدت یک پیش‌نیاز ضروری برای مدل‌سازی کربن خاک در مقیاس محلی و ملی است. بنابراین ایجاد مزارع آزمایشی و ایستگاه‌های مطالعاتی در طیف وسیعی از خاک‌ها، کاربری‌ها، اقلیم‌ها و مدیریت‌های مختلف کشور که چنین داده‌هایی را در درازمدت برای مدل‌سازی کربن فراهم کنند، یک نیاز ضروری است. این مطالعه اطلاعات حیاتی و مهمی که می‌تواند در واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها برای ایجاد شبیه‌سازی و پیش‌بینی‌های بیشتر کربن خاک مورد نیاز باشد، را فراهم کند.

## REFERENCES

- Abtahi, A., Karimiyan, N. and Solhi, M. (1987). Semi-detailed pedology studies reports Bajgah's region-province of Fars. Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz University. 06.18.1991. (In Farsi).
- Ansari, V. (2009). Technical Principles-Implementation of Rangeland Improvement and Rehabilitation Projects. *Puneh Publishing*, 168 pp.
- Barancikova, G., Halas, J., Guttekova, M., Makovnikova, J., Novakova, M., Skalsky, R. and Tarasovicova, Z. (2010). Application of RothC model to predict soil organic carbon stock on agricultural soils of Slovakia. *Soil and Water Research*, 5, 1-9.
- Bhattacharyya, T., Pal, D.K., Williams, S., Telpandea, B.A., Deshmukha, A.S., Chandrana, P., Raya, S.K., Mandal, C., Easter, M. and Paustian, K. (2010). Evaluating the Century C model using two long-term fertilizer trials representing humid and semi-arid sites from India. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139, 264-272.
- Bhattacharyya, T., Pal, D.K., Deshmukh, A., Deshmukh, R., Ray, S., Chandran, P., Mandal, C., Telpandea, B., Nimje, A. and Tiwary, P. (2011). Evaluation of RothC model using four Long Term Fertilizer Experiments in black soils, India. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144, 222-234.
- Birdsey, R., Heath, I. and Williams, D. (2000). Estimation of Carbon Budget Model of the United State Forest Sector. *Advances in Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory, Measurements and Monitoring Conference*, Raleigh, North Carolina, USA, pp. 51-59.
- Blake, G.R. and Hartge, K.H. (1986). Bulk density. In Klute A (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods. Soil Science Society of America Publication*, 363-376.
- Bleuler, M., Farina, R., Francaviglia, R., Napoli, R. and 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.
- Borrelliet, P., Paustian, K., Panagos, P., Jones, A., Schütt, B. and Lugato, O. (2016). Effect of good agricultural and environmental conditions on erosion and soil organic carbon balance: A national case study. *Land Use Policy*, 50: 408-421.
- Bortolon, E.S.O., Mielniczuk, J., Tornquist, C.G., Lopes, F. and Bergamaschi, H. (2011). Validation of the Century model to estimate the impact of agriculture on soil organic carbon in Southern Brazil. *Geoderma*, 167-168, 156-166.
- Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465.
- Bremner, G.J. and Mulvaney, C.S. (1982). Nitrogen total. In: page, A.L., Miller, R.H., Keenry, R.R. (Eds.), *Methods of soil analysis, part 2. Seconded. American Society of Agronomy, Madison, WI*, 595-624.
- Byrne, K.A. and Kiely, G. (2008). Evaluation of Models (PaSim, RothC, CENTURY and DNDC) for Simulation of Grassland Carbon Cycling at Plot, Field and Regional Scale. Prepared for the Environmental Protection Agency, STRIVE Programme 2007-2013, County Wexford, Ireland, 47 pp.
- Cerri, C. E., Easter, M., Paustian, K., Killian, K., Coleman, K., Bernoux, M., Falloon, P., Powlson, D.S., Batjes, N. and Milne, E. (2007). Simulating SOC changes in 11 land use change chronosequences from the Brazilian Amazon with RothC and Century models. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 122, 46-57.
- Chen, Y., Li, Y., Zhao, X., Awada, T., Shang, W. and Han, J. (2012). Effects of Grazing Exclusion on Soil Properties and on Ecosystem Carbon and Nitrogen Storage in a Sandy Rangeland of Inner Mongolia, Northern China. *Environmental Management*, 50, 622-632.
- Coleman, K. and Jenkinson, D.S. (1996). RothC-26.3 – A model for the turnover of carbon in soil. In Powlson D S, Smith P, Smith J U (eds.) *Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets. Springer-Verlag, Heidelberg*, 237-246.

در این مراتع تحت مدیریت بدون چرای دام ارائه بدهند. به‌طور کلی نتایج شبیه‌سازی‌های مدل RothC و Century در مراتع نیمه‌خشک باجگاه نشان داد که الگوی تغییرات کربن آلی خاک و نتایج آنالیز آماری برای هر دو مدل مشابه است. بنابراین نتایج این تحقیق، مدل‌های RothC و Century را به‌عنوان مدل‌های مناسب و دقیق در شبیه‌سازی و پیش‌بینی ذخیره کربن آلی خاک تحت شرایط اقلیمی و مدیریتی آینده در این منطقه توصیه می‌کند. همچنین قابل ذکر است این مدل‌ها باید در مناطق بیشتری با شرایط آب و هوایی و خاکی مختلف کشور قبل از به‌کارگیری، ارزیابی شوند. یک نقص عمده در ارزیابی کارایی اجرا

- Coleman, K. and Jenkinson, D.S. (2008). RothC-26.3: A model for the turnover of carbon in soil, Model description and users guide (Windows version). Available online at [https://www.rothamsted.ac.uk/sites/default/files/RothC\\_guide\\_WIN.pdf](https://www.rothamsted.ac.uk/sites/default/files/RothC_guide_WIN.pdf). (verified on April 5, 2018).
- Cui, X., Wang, Y., Niu, H., Wu, J., Wang, S., Schnug, E., Rogasik, J., Fleckenstein, J. and Tang, Y. (2005). Effect of long-term grazing on soil organic carbon content in semiarid steppes in Inner Mongolia. *Ecological Research*, 20, 519-527.
- Derner, J. and Schuman, G. (2007). Carbon sequestration and rangelands: a synthesis of land management and precipitation effects. *Journal of Soil and Water Conservation*, 62, 77-85.
- Diels, J., Vanlauwe, B., Van der Meersch, M.K., Sanginga, N. and Merckx, R. (2004). Long-term soil organic carbon dynamics in a semi-humid tropical climate: <sup>13</sup>C data in mixed C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub> cropping and modelling with RothC. *Soil Biology and Biochemistry*, 36, 1739-1750.
- Falloon, P. and 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.
- Falloon, P. and Smith P. (2003). Accounting for changes in soil carbon under the Kyoto Protocol: need for improved long-term data sets to reduce uncertainty in model projections. *Soil Use Management*, 19, 265-269.
- 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 and Biochemistry*, 30, 1207-1211.
- Farage, P., J. Ardö, L. Olsson, E. Rienzi, A. Ball, and Pretty, J. (2007). The potential for soil carbon sequestration in three tropical dryland farming systems of Africa and Latin America: A modelling approach. *Soil and Tillage Research*, 94(2), 457-472.
- 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*, 200-201, 18-30.
- Farina, R., Marchetti, A., Francaviglia, R., Napoli, R. and Di Bene, C. (2017). Modeling regional soil C stocks and CO<sub>2</sub> emissions under Mediterranean cropping systems and soil types. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 238, 128-141.
- Field, C.B et al. (2014). Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. In Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 1132 pp.
- Francaviglia, R., Coleman, K., Whitmore, A.P., Doro, L., Urracci, G., Rubino, M. and Ledda, L. (2012). Changes in soil organic carbon and climate change—Application of the RothC model in agro-silvo-pastoral Mediterranean systems. *Agricultural Systems*, 112, 48-54.
- Francaviglia, R., Di Bene, C., Farina, R. and Salvati, L. (2017). Soil organic carbon sequestration and tillage systems in the Mediterranean Basin: a data mining approach. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 107, 125-137.
- Gifford, R. (1994). The global carbon cycle: a viewpoint on the missing sink. *Functional Plant Biology*, 21, 1-15.
- Guo, L., Falloon, P., Coleman, K., Zhou, B., Li, Y., Lin, E. and 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, 63-70.
- Hammer, G. and Muchow, R. (1994). Assessing climatic risk to sorghum production in water-limited subtropical environments I. Development and testing of a simulation model. *Field Crops Research*, 36, 221-234.
- Hao, C., Smith, J., Zhang, J., Meng, W. and Li, H. (2013). Simulation of soil carbon changes due to land use change in urban areas in China. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 7(2), 255-266.
- IPCC. (2007). Climate change 2007: The scientific basis. IPCC fourth assessment. A report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 18 pp.
- Izaurrealde, R., Williams, J.R., McGill, W.B., Rosenberg, N.J. and Jakas, M.Q. (2006). Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data. *Ecological Modelling*, 192, 362-384.
- Jones, M. and Donnelly, A. (2004). Carbon sequestration in temperate grassland ecosystems and the influence of management, climate and elevated CO<sub>2</sub>. *New Phytologist*, 164, 423-439.
- Kamoni, P., Gicheru, P., Wokabi, S., Easter, M., Milne, E., Coleman, K., Falloon, P. and Paustian, K. (2007a). Predicted soil organic carbon stocks and changes in Kenya between 1990 and 2030. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 122, 105-113.
- Kamoni, P., Gicheru, P., Wokabi, S., Easter, M., Milne, E., Coleman, K., Falloon, P., Paustian, K., Killian, K. and Kihanda, F. (2007b). Evaluation of two soil carbon models using two Kenyan long term experimental datasets. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 122, 95-104.
- Khalily, A. (2008). Ecological regions of Iran-vegetation types of Shiraz area. *Research Institute of Forests and Rangelands*, Technical publication No.390, 208 pp.
- Kirk, P.L. (1950). Kjeldahl method for total nitrogen. *Analytical Chemistry*, 22(2), 354-358.
- Kirschbaum, M., Schlamadinger, B., Cannell, M., Hamburg, S., Karjalainen, T., Kurz, W., Pringle, S., Schulze, E. and Singh, T. (2001). A generalised approach of accounting for biospheric carbon stock changes under the Kyoto Protocol. *Environmental Science and Policy*, 4, 73-85.
- Lal, R. (2002). Soil carbon dynamics in cropland and

- rangeland. *Environmental Pollution*, 116, 353-362.
- Lal, R. (2003). Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 29, 437-450.
- Lal, R., (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123, 1-22.
- McSherry, M.E. and Ritchie, M.E. (2013). Effects of grazing on grassland soil carbon: a global review. *Global Change Biology*, 19, 1347-1357.
- Medina-Roldán, E., Paz-Ferreiro, J. and Bardgett, R.D. (2012). Grazing exclusion affects soil and plant communities, but has no impact on soil carbon storage in an upland grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 149, 118-123.
- Moosavi, S.A. (2011). Spatial changes and the impact of water quality on soil hydraulic properties and the development functions artificial transfer and neural networks to estimate it. PhD Dissertation. College of Agriculture, University of Shiraz. (In Farsi).
- Morgan, J.A., Dugas, W.A., Frank, A.B., Haferkamp, M.R., Johnson, D.A., LeCain, D.R., Saliendra, N.Z. and Schuman, G.E. (2001). Impacts of grazing and fire on carbon fluxes in western rangelands. *Proceedings of The 9th U.S. Japan Workshop on Global Change*, 52 pp.
- Morgan, J.A., Follett, R.F., Allen, L.H., Del Grosso, S., Derner, J.S., Dijkstra, F., Franzluebbers, A., Fry, R., Paustian, K., Schoeneberger, M. (2010). Carbon sequestration in agricultural lands of the United States. *Journal of Soil and Water Conservation*, 65, 6A-13A.
- Muñoz-Rojas, M., Doro, L., Ledda, L. and Francaviglia, R. (2015). Application of CarboSOIL model to predict the effects of climate change on soil organic carbon stocks in agro-silvo-pastoral Mediterranean management systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 202, 8-16.
- Ouyang, W., Shan, Y., Hao, F. and Lin, C. (2014). Differences in soil organic carbon dynamics in paddy fields and drylands in northeast China using the CENTURY model. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 194, 38-47.
- Parton, W.J., Schimel, D.S., Cole, C. and Ojima, D. (1987). Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 51, 1173-1179.
- Shirato, Y., Paisancharoen, K., Sangtong, P., Nakviro, C., Yokozawa, M. and Matsumoto, N. (2005). Testing the Rothamsted Carbon model against data from long-term experiments on upland soils in Thailand. *European Journal of Soil Science*, 56(2), 179-188.
- Smith, J., Smith, P. and Addiscott, T. (1996). Quantitative methods to evaluate and compare soil organic matter (SOM) models. In *Evaluation of soil organic matter models*, Springer, 181-199.
- Smith, P., Smith, J., Powlson, D., McGill, W., Arah, J., Chertov, O., Coleman, K., Franko, U., Frolking, S. and Jenkinson, D. (1997). A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*, 81, 153-225.
- Smith, P. (2004). Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *European Journal of Agronomy*, 20, 229-236.
- Smith, P., Smith, J.U., Franko, U., Kuka, K., Romanenkov, V.A., Shevtsova, L.K., Wattenbach, M., Gottschalk, P., Sirotenko, O.D., Rukhovich, D.I., Koroleva, P.V., Romanenko, I.A. and 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, 105-119.
- Smith, J.U. and Smith, P. (2007). *Environmental Modelling. An Introduction*. Oxford University Press, Oxford, 192 pp.
- Soleimani, A., Hosseini, S.M., Massah Bavani, A., Jafari, M. and Francaviglia, R. (2017). Simulating soil organic carbon stock as affected by land cover change and climate change, Hyrcanian forests (northern Iran). *Science of the Total Environment*, 599-600, 1646-1657.
- Studdert, G.A., Monterubbianesi, M.G. and Domínguez, G.F. (2011). Use of RothC to simulate changes of organic carbon stock in the arable layer of a Mollisol of the southeastern Pampas under continuous cropping. *Soil and Tillage Research*, 117, 191-200.
- Torabi, M. (1995). Application of the GLEAMS model for reduction of runoff, sediment and potential evapotranspiration from agricultural watersheds. M.Sc. Dissertation. College of Agriculture, University of Shiraz. (In Farsi).
- Tornquist, C.G., Mielniczuk, J. and Cerri, C.E.P. (2009). Modeling soil organic carbon dynamics in Oxisols of Ibirubá (Brazil) with the Century Model. *Soil and Tillage Research*, 105, 33-43.
- Vanaee, F., Karami, P., Joneydi Jafari, H. and Nabialahi, K. (2017). Simulation of soil organic carbon dynamic in meadow ecosystems under different management practices using CENTURY model. *Journal of Rangeland*, 10(4), 439-449. (In Farsi).
- Walkley, A. and 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, 29-38.
- Wan, Y., Lin, E., Xiong, W., Li, Y. 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 and Environment*, 141, 23-31.
- Waters, C.M., Orgill, S.E., Melville, G.J., Toole, I.D. and Smith, W.J. (2016). Management of grazing intensity in the semi-arid rangelands of southern Australia—effects on soil and biodiversity. *Land Degradation and Development*, 28(4), 1363-1375.
- Wilson, C., Papanicolaou, A. and Abaci, O. (2009). SOM dynamics and erosion in an agricultural test field of the Clear Creek, IA watershed. *Hydrology*



- and Earth System Sciences Discussions*, 6, 1581-1619.
- Xu, W., Chen, X., Luo, G. and Lin, Q. (2011). Using the CENTURY model to assess the impact of land reclamation and management practices in oasis agriculture on the dynamics of soil organic carbon in the arid region of North-western China. *Ecological Complexity*, 8, 30-37.
- Yadav, V. and Malanson, G. (2008). Spatially explicit historical land use land cover and soil organic carbon transformations in Southern Illinois. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 123, 280-292.
- Zhang, C., Liu, G., Xue, S. and Sun, C. (2013). Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau, China. *European Journal of Soil Biology*, 54, 16-24.
- Zhang, X. (2018). Simulating eroded soil organic carbon with the SWAT-C model. *Environmental Modelling and Software*, 102, 39-48.