

## تعیین اعتبار مدل RothC جهت برآورد توان ترسیب کربن خاک بوم‌نظامی بازسازی شده، تحت دو سناریوی اقلیمی متفاوت

جبار فلاحی<sup>۱</sup> - پرویز رضوانی مقدم<sup>۲\*</sup> - مهدی نصیری محلاتی<sup>۳</sup> - محمد علی بهدانی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۳/۱۹

### چکیده

تغییرات اقلیمی ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای به ویژه دی‌اکسید کربن، منجر به افزایش توجه به مسئله ترسیب کربن از طریق بازسازی و حفاظت از پوشش گیاهی شده و در این بین بوم‌نظام‌های مناطق خشک از جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند. از این رو، در این تحقیق اثرات بازسازی و حفاظت، بر روی توان ترسیب کربن خاک در منطقه اجرای پروژه بین‌المللی ترسیب کربن در استان خراسان جنوبی با رویکردی شبیه‌سازی، بررسی و اثرات تغییر اقلیم یعنی افزایش دما و کاهش میزان بارندگی بر وضعیت ترسیب کربن در منطقه مذکور مورد مطالعه قرار گرفت. عملیات بازسازی و حفاظت در منطقه مورد مطالعه از سال ۱۳۸۴ شروع شد و هشت سال پس از آن، در فاصله سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۱ نمونه‌برداری خاک به صورت هر دو ماه یکبار، انجام گرفت. در نهایت پس از جمع‌آوری ورودی‌های اقلیمی، خاکی و مدیریتی مورد نیاز برای مدل RothC، این مدل برای بوم‌نظام تحت بررسی، مورد ارزیابی و تعیین اعتبار قرار گرفت. علاوه بر این، وضعیت ترسیب کربن منطقه مورد مطالعه در شرایط تغییر اقلیم نیز بررسی گردید. نتایج حاصل از به‌کارگیری مدل RothC نشان داد که این مدل قابلیت به‌کارگیری در بوم‌نظام‌های نواحی گرم و خشک را داشته و به خوبی می‌تواند تغییرات کربن خاک را در طی زمان برآورد نماید؛ به طوری که مقادیر شاخص کارایی مدل، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا به ترتیب برابر ۰/۹۸، ۰/۹۸ درصد و ۰/۰۱ بود. بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی، روند تغییرات کربن خاک در فاصله زمانی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۵۰ در بوم‌نظام مورد بررسی افزایشی بوده و این عامل از اجرای عملیات حفاظت و نیز تغییر اقلیم احتمالی اثر خواهد پذیرفت. به طوری که، برآورد میزان کربن ترسیب شده در سال ۲۰۵۰ حاکی از بالاتر بودن آن در مناطق تحت حفاظت در مقایسه با نواحی تحت چرا می‌باشد. علاوه بر این، در اثر تغییر اقلیم یعنی افزایش دما و کاهش بارندگی پیش‌بینی شده برای منطقه مورد مطالعه، توان ترسیب کربن خاک با کاهش نسبی مواجه خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: ترسیب کربن، تغییر اقلیم، شبیه‌سازی، مدل RothC

### مقدمه

سال ۱۷۵۰ تاکنون به ترتیب ۳۱، ۱۵۱ و ۱۷ درصد گزارش شده است (۳۲). بیش از ۷۵ درصد دی‌اکسید کربن تولید شده توسط فعالیت‌های انسانی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی و بقیه آن ناشی از تغییر کاربری اراضی به خصوص بیابان‌زایی و تخریب جنگل‌ها می‌باشد (۴۸). میزان آزادسازی کربن از ابتدای انقلاب صنعتی، از طریق سوخت‌های فسیلی  $۲۷۰ \pm ۳۰$  پتاگرم<sup>۵</sup> و به دلیل تغییر کاربری و کشت و کار اراضی،  $۱۳۶ \pm ۵۵$  پتاگرم بوده است (۳۲). دما و بارندگی که در شرایط تغییر اقلیم دچار دگرگونی می‌شوند، از عوامل مهم موثر بر فرآیندهای اکوسیستم مانند فتوسنتز، انتقال کربن و تجزیه مواد آلی بوده و از این رو بیان می‌شود که تغییر اقلیم باعث اثرگذاری بر نقش و عمل اکوسیستم می‌گردد (۲۵). گزارش

استفاده بیش از حد از منابع سوخت‌های فسیلی، تغییر کاربری اراضی و افزایش جمعیت جهان و به دنبال آن گسترش روزافزون فعالیت‌های صنعتی جهت تأمین رفاه و برآورده نمودن نیازهای جمعیت رو به گسترش کره زمین، موجب شده است تا پس از انقلاب صنعتی تغییرات قابل ملاحظه‌ای در وضعیت آب و هوایی زمین به وجود آید (۴). گازهای دی‌اکسید کربن، متان و اکسید نیتروژن از عوامل مهم وقوع تغییر اقلیم جهانی هستند که مقدار افزایش آن‌ها از

۱، ۲ و ۳ - به ترتیب دانشجوی دکتری و استادان گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

\* - نویسنده مسئول: (Email: rezvani@um.ac.ir)

۴ - دانشیار گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند

ترسیب کربن نیز می‌توان با استفاده از مدل‌سازی، سال‌ها قبل از وقوع تغییرات، آن‌ها را شناسایی و عملیات مدیریتی مناسب را اتخاذ نمود (۲۴). مدل‌سازی یکی از ابزارهای مهم برای تخمین ذخیره کربن آلی خاک بوده و به این منظور مدل‌های مختلفی ساخته شده است که در بین آن‌ها مدل‌های RothC و Century بیشترین کاربرد را دارا می‌باشند (۱۴).

مدل RothC-26.3 از پرکاربردترین مدل‌ها در مطالعات مربوط به ترسیب کربن خاک می‌باشد که در ابتدا به منظور بررسی گردش کربن آلی خاک در تانامستد انگلستان و به کمک آزمایشات مزرعه‌ای طولانی مدت ساخته و پس از آن در طیف وسیعی از خاک‌ها و شرایط اقلیمی در غرب و مرکز اروپا مورد آزمایش قرار گرفت (۱۹ و ۲۷). پس از آن مدل مذکور در مقیاس منطقه‌ای و ملی در بسیاری از نقاط دنیا مورد بررسی و برای استفاده در اراضی زراعی، علفزارها و جنگل‌ها و برای خاک‌ها و اقلیم‌های مختلف توسعه یافت و علاوه بر این، در مطالعات مختلفی در بوم‌نظام‌های نواحی خشک مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفت (۱۴، ۱۹، ۲۴ و ۲۷). مدل RothC-26.3 به دلیل سادگی و در دسترس بودن ورودی‌هایش مورد توجه بسیاری از محققان می‌باشد (۱۴، ۱۹ و ۲۷).

در ایران مطالعات محدودی در زمینه ترسیب کربن صورت پذیرفته است (۵، ۱۰، ۱۱ و ۱۳). با این وجود در این مطالعات به موضوع استفاده از مدل‌های بازگردش کربن و نیز اثرات تغییر اقلیم بر روی کربن خاک توجهی نشده است. از این‌رو، ضرورت دارد تا در عرصه تحقیقات، این رهیافت‌ها نیز مورد توجه قرار گیرد. هدف از این مطالعه تعیین اعتبار مدل RothC برای برآورد توان ترسیب کربن خاک بوم‌نظامی بازسازی شده، تحت دو سناریوی اقلیمی متفاوت بود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه و نحوه نمونه‌برداری خاک

این پژوهش در محل اجرای پروژه بین‌المللی ترسیب کربن در استان خراسان جنوبی به مرکزیت ۵۹ درجه شرقی (طول جغرافیایی) و ۳۲ درجه شمالی (عرض جغرافیایی) و ارتفاع ۱۷۰۰ متر از سطح دریا، در محل موسوم به عرصه سه هزار هکتاری حسین آباد سریشه اجرا شد. اراضی بیابانی تخریب شده محل اجرای آزمایش در سال ۱۳۸۴ از طریق کشت گیاهانی مانند سوسن (*Iris reticulata*)، درمنه دشتی (*Artemisia sieberi*)، تاغ (*Haloxylon persicum*) و آتریپلکس (*Atriplex canescens*) مورد بازسازی و پس از آن مورد حفاظت قرار گرفت. در سال ۱۳۹۰ وضعیت ترسیب کربن نواحی تحت حفاظت به همراه منطقه‌ای ۵۰۰ هکتاری در مجاورت نواحی مذکور به عنوان تیپ شاهد (تحت چرا = عدم اجرای عملیات بازسازی و حفاظت) مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. بنابراین منطقه مورد مطالعه به دو تیپ

شده است که در شرایط تغییر اقلیم، رژیم‌های حرارتی و رطوبتی خاک و به دنبال آن ترکیب گونه‌های گیاهی اکوسیستم تغییر کرده و این پدیده‌ها ذخیره کربنی خاک را دگرگون می‌کند، چرا که بیوماس گیاهی شامل بقایا و مواد گیاهی هوایی و زیرزمینی برگشت یافته به خاک دچار تغییر می‌شود (۳۲).

کاهش تقاضا برای انرژی از طریق افزایش قیمت منابع انرژی یا بهبود کارایی مصرف انرژی، تغییر جهت از سمت مصرف سوخت‌های فسیلی به سمت منابع بدون کربن مانند انرژی هسته‌ای و منابع انرژی تجدید شونده و ترسیب کربن انتشار یافته به اتمسفر، سه روش عمده برای کاهش ورود دی‌اکسید کربن به اتمسفر می‌باشند (۲۶). افزایش نگرانی‌ها درباره پدیده گرمایش جهانی ناشی از گازهای گلخانه‌ای به خصوص دی‌اکسید کربن و به تبع آن تغییرات محیطی و اقلیمی ایجاد شده در مقیاس جهانی و منطقه‌ای، منجر به افزایش توجه به ترسیب دی‌اکسید کربن اتمسفری در اکوسیستم‌های خشکی شده است (۲۰، ۴۹ و ۴۱). بر پایه پیمان کیوتو، ورود کربن به اتمسفر باید از راه‌هایی مانند ایجاد و احیای جنگل‌ها و مراتع کاهش یابد و در این میان بوم-نظام‌های نواحی خشک به دلیل پایین بودن محتوای کربن آلی موجود در خاک‌شان و نیز به علت وسعت بالای این مناطق، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند (۵۲ و ۵۵). بر اساس بند ۳-۴ معاهده کیوتو مدیریت جنگل، مدیریت اراضی زراعی، مدیریت چرا و احیای مجدد پوشش گیاهی از جمله فعالیت‌هایی هستند که جهت عملیاتی نمودن ترسیب کربن باید مورد توجه قرار گیرند (۴۶).

افزایش نگرانی‌ها در زمینه گرمایش جهانی و تغییر اقلیم موجب شده است که به خاک و قابلیت آن در ترسیب کربن در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای شود (۱۳). کل مقدار کربن آلی موجود در خاک‌ها، تقریباً دو برابر موجودی کربن اتمسفر است؛ از این‌رو تغییر در کربن خاک اثرات قابل توجهی بر تغییر اقلیم برجا می‌گذارد (۳۶). گزارش شده است که تغییرات کربن آلی خاک به‌عنوان یکی از ذخایر کربن از عواملی مانند تغییرات اقلیمی و یا تغییر مدیریت و کاربری اراضی اثر می‌پذیرد (۱۴). به هر حال، با وجود همه این مسایل باید به این نکته نیز توجه داشت که ترسیب کربن در خاک نیز از پتانسیل محدودی برخوردار بوده و دائمی نیز نمی‌باشد و میزان تاثیر آن در جهت تخفیف اثرات تغییر اقلیم در مقایسه با راه‌کار کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز تقریباً غیرممکن بوده و از این‌رو ترسیب کربن و استفاده از تکنولوژی‌های نوین انرژی به‌عنوان یک راه‌کارها برای کاهش غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفری در کانون توجهات قرار دارد (۴۶).

مدل‌سازی ابزاری است که به کمک آن می‌توان امکان عملیاتی شدن تکنیک‌های مختلف مدیریت اراضی را ارزیابی و به کمک نتایج حاصله روش‌های برتر را انتخاب و مورد تحقیق قرار داد. در مطالعات

تحت تاثیر دما، کمبود رطوبت خاک و درصد پوشش گیاهی می‌باشد (۱۴ و ۱۹).

### عوامل موثر بر سرعت تجزیه در مدل RothC

اگر یک جزء فعال، دارای  $Y$  تن کربن در هکتار باشد، در پایان ماه مقدار آن به  $Y e^{-abck t}$  کاهش می‌یابد. در این معادله  $a$  ضریب تصحیح<sup>۸</sup> برای دما،  $b$  ضریب تصحیح برای رطوبت،  $c$  ضریب تصحیح برای پوشش خاک و  $k$  ثابت سرعت تجزیه برای جزء فعال مد نظر<sup>۹</sup> بوده و از آنجا که  $k$  بر اساس سرعت تجزیه سالبانه است، از این رو  $t$  نیز بیانگر زمانی معادل یک ماه یعنی (یک دوازدهم سال) می‌باشد (۱۹). بنابراین،  $Y(1 - e^{-abck t})$  مقدار موادی در یک جزء کربنی است که در طی یک ماه مشخص تجزیه می‌شود.

ثابت سرعت تجزیه ( $k$ ) در طی سال، برای هر یک از اجزای کربنی در جدول ۱ آورده شده است. این مقادیر از طریق میزان‌سازی مدل با اطلاعات حاصل از آزمایشات درازمدت مزرعه‌ای در رامستد به دست آمده (۲۸ و ۲۹) و معمولاً در زمان استفاده از مدل تغییر داده نمی‌شوند (۱۹).

جدول ۱- ثابت سرعت تجزیه ( $k$ ) در طی سال برای اجزای کربنی

مختلف در مدل RothC

HUM	BIO	RPM	DPM
۰/۰۲	۰/۶۶	۰/۳۰	۱۰/۰

ضریب تصحیح دما ( $a$ ) به کمک معادله ۱ برآورد شده که در این معادله  $T$  متوسط ماهیانه دمای هوا بر حسب درجه سانتیگراد می‌باشد (۱۹):

$$a = \frac{47.9}{1 + e^{(T-18.5)/5.7}} \quad (1)$$

برای برآورد ضریب تصحیح رطوبت ( $b$ ) ابتدا باید حداکثر مقدار کمبود رطوبت لایه سطحی خاک ( $TSMD$ )<sup>۱۰</sup> طبق معادله ۲ تعیین شود.

$$TSMD = -(20 + 1.3(\% \text{clay}) - 0.01(\% \text{clay})^2) \quad (2)$$

در صورتی که عمق نمونه‌برداری با ۲۳ سانتیمتر (عمق نمونه‌برداری در آزمایشات رامستد که مدل RothC در آنجا طراحی شده است) متفاوت باشد، باید حداکثر مقدار محاسبه شده  $TSMD$  بر ۲۳ تقسیم و در ضخامت واقعی لایه خاک (بر حسب سانتیمتر) ضرب شود (۱۹). بنابراین، برای بوم‌نظام مورد مطالعه در این آزمایش که عمق نمونه‌برداری خاک ۲۰ سانتیمتر و مقدار متوسط رس خاک هشت درصد بود، مقدار این شاخص  $25/87$  می‌باشد.

گیاهی کلی شامل تیپ گیاهی نواحی احیا و حفاظت شده و تیپ گیاهی شاهد یا تحت چرا، تقسیم‌بندی شد. سپس در فاصله سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۱ در هر یک از دو ناحیه تحت حفاظت و شاهد (تحت چرا)، تعداد ۱۰۰ محل نمونه‌برداری به‌طور تصادفی مشخص و نمونه برداری از عمق صفر تا ۲۰ سانتیمتری خاک با فواصل هر دو ماه یک‌بار صورت گرفت (روند تغییرات ماده آلی در خاک چندان سریع نمی‌باشد، اما برای تعیین اعتبار مدل نیاز به چندین زمان نمونه‌برداری است که البته بهتر است فواصل نمونه‌برداری بصورت سالبانه باشد). پس از مخلوط کردن نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده، عمل خشک کردن آنها در هوای آزاد و دور از نور خورشید انجام و سپس تعداد پنج نمونه خاک از هر تیپ گیاهی به آزمایشگاه منتقل و مقدار کربن آنها اندازه‌گیری شد (برای هر یک از دو تیپ گیاهی ۱۰۰ نمونه خاک اولیه با هم ترکیب و سپس از نمونه اختلاط یافته تعداد پنج نمونه برداشته شد). قابل ذکر است که منطقه شاهد و منطقه تحت حفاظت قبل از شروع عملیات احیاء شرایط مشابهی داشت؛ به طوری که گونه گیاهی غالب در هر دو منطقه مورد مطالعه درمنه دشتی (*Artemisia sieberi*) و کل سطح پوشش گیاهی نیز کمتر از ۵ درصد بود.

### ساختار مدل RothC (Rothamsted Carbon Model)

این مدل کربن آلی خاک (SOC)<sup>۱</sup> را به چهار جزء فعال و یک جزء غیرفعال<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی می‌کند (شکل ۱). اجزای فعال ماده آلی خاک عبارتند از: مواد گیاهی تجزیه‌پذیر (DPM)<sup>۳</sup>، مواد گیاهی مقاوم (RPM)<sup>۴</sup>، بیوماس میکروبی (BIO)<sup>۵</sup> و مواد آلی هوموسی شده (HUM)<sup>۶</sup>. در این مدل جزء غیر فعال، نسبتی از مواد آلی است که از نظر بیولوژیکی فعال نبوده و سن رادیوکربنی<sup>۷</sup> آن بیش از ۵۰۰۰ سال می‌باشد و بنابراین در چرخش کربن شرکت ندارد (۱۴، ۱۹ و ۳۰).

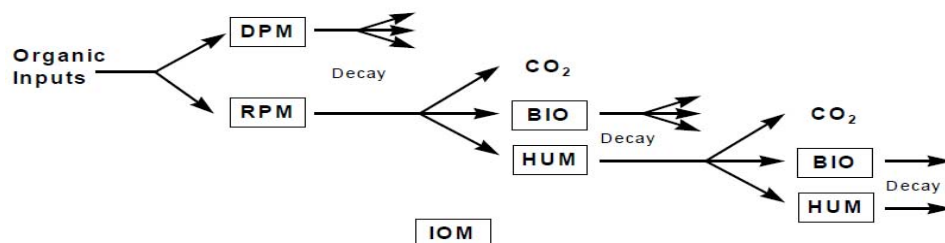
کربن گیاه بسته به نسبت DPM/ RPM مواد گیاهی وارد شده، به دو جزء DPM و RPM تقسیم می‌شود. این دو جزء به صورت نمایی تجزیه شده و تولید  $CO_2$  و BIO+HUM می‌کنند. مقدار رس خاک، یکی از عوامل مهم در این مدل می‌باشد؛ چرا که بر قدرت نگهداری آب خاک و سرعت تجزیه اثرگذار است و نسبت بین  $CO_2$  و BIO+HUM تولیدی را تعیین می‌کند. در این مدل سرعت تجزیه

- 1- Soil organic carbon
- 2- Inert
- 3- Decomposable plant material
- 4- Resistant plant material
- 5- Microbial biomass
- 6- Humified organic matter
- 7- Radiocarbon age

8 - Rate modifying factor

9 - Decomposition rate constant for that compartment

10 - Topsoil moisture deficit



شکل ۱- ساختار مدل RothC (۱۹)

اطلاعات درازمدت مربوط به میزان بارندگی، میزان تبخیر و دمای ماهیانه از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به محل اجرای پروژه که دارای اطلاعات درازمدت بود (ایستگاه هواشناسی شهرستان بیرجند) تهیه گردید.

اندازه‌گیری درصد کربن آلی خاک با استفاده از روش والکی و بلک (۵۳) انجام گرفت. برای اندازه‌گیری مقدار کل کربن موجود در هر هکتار خاک، اندازه‌گیری وزن مخصوص ظاهری مورد نیاز بود که برای این منظور از روش کلوخه استفاده شد (۱۶). در نهایت محاسبه میزان کربن آلی موجود در خاک بر حسب کیلوگرم در هکتار با استفاده از معادله ۴ صورت گرفت (۱۳).

$$TOC = 10000 \times OC (\%) \times Bd \times e \quad (4)$$

در این معادله  $TOC$  = مقدار کل کربن موجود در خاک (تن در هکتار)،  $OC$  = درصد کربن آلی،  $Bd$  = وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی متر مکعب) و  $e$  = عمق لایه نمونه برداری (سانتیمتر) می‌باشد.

بافت خاک جهت تعیین درصد رس موجود در آن، پس از آهک-زدایی، با استفاده از روش دانسیتمتری بایکاس (۱۷) تعیین شد که به طور متوسط مقدار رس در خاک بوم‌نظام مورد بررسی، هشت درصد بود.

برای محاسبه محتوای ماده آلی پایدار ( $IOM^3$ ) که سن رادیوکربنی آن بیش از پنجاه هزار سال است، از معادله ۵ استفاده شد (۲۲).

$$IOM = 0.049/SOC^{1.139} \quad (5)$$

در این معادله  $SOC$ ، کل کربن آلی بر حسب تن در هکتار (محاسبه شده به کمک معادله ۴) می‌باشد.

پوشش خاک در این مدل به طور ماهیانه و به دو صورت Covered و Fallow تعریف می‌گردد. با توجه به حضور گونه‌های گیاهی غالب در تمام طول سال در سطح بوم‌نظام مورد بررسی، برای

در نهایت ضریب تصحیح دما ( $b$ ) برای هر ماه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

اگر  $acc. TSM D^1 < 0.444 \max. TSM D$  باشد،  $b=1$  در نظر گرفته شده و در غیر اینصورت مقدار  $b$  به استفاده از معادله ۳ تعیین می‌شود:

$$b = 0.2 + (1.0 - 0.2) \times \frac{\max TSM D - acc TSM D}{(\max TSM D - 0.444 \max TSM D)} \quad (3)$$

مقدار ضریب پوشش خاک ( $c$ ) در خاک دارای پوشش گیاهی ۰/۶ و در خاک لخت ۱ می‌باشد (۱۹). بنابراین، در مطالعه کنونی مقدار  $c$ ، به طور ثابت ۰/۶ بود.

### ورودی‌های مدل RothC

ورودی‌های مدل RothC عبارتند از (۱۴ و ۱۹):

داده‌های اقلیمی: بارندگی ماهیانه (mm)، تبخیر ماهیانه (mm)، میانگین ماهیانه دمای متوسط هوا ( $^{\circ}C$ ).

داده‌های خاکی: محتوای رس خاک (بر حسب درصد)، کربن آلی پایدار ( $IOM$ ) بر حسب تن در هکتار، ذخیره کربن آلی ابتدایی خاک (بر حسب تن در هکتار)، عمق لایه مورد بررسی (بر حسب سانتیمتر).

داده‌های کاربری و مدیریت زمین: وضعیت پوشش گیاهی در هر ماه (آیش یا دارای پوشش گیاهی)، مقدار بقایای گیاهی وارد شده در هر ماه (محاسبه شده توسط مدل به روش معکوس)، مقدار کود حیوانی (FYM) استفاده شده در هر ماه (t C/ha)، فاکتور کیفیت بقایا (نسبت  $DPM/RPM$ ).

در ادامه نحوه جمع‌آوری و اندازه‌گیری ورودی‌های مدل و نیز سایر شاخص‌های مدنظر در این آزمایش به تفکیک آورده شده است.

یکی از ورودی‌های مدل RothC، فاکتورهای اقلیمی می‌باشد که بهتر است از داده‌های درازمدت اقلیمی استفاده گردد. بر این اساس

1 - Accumulated topsoil moisture deficit  
2- Initial Soil Organic Carbon

صورت خروجی سالیانه اجرا گردید و بنابراین در فاصله بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۲ هفت داده شبیه‌سازی شده نیز به دست آمد. از اطلاعات اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده کربن کل برای تعیین اعتبار مدل استفاده گردید. برای این منظور از پارامترهای آماری  $R^2$ ،  $RMSE^2$  و  $PE^3$  استفاده شد (۳۴).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \quad (6)$$

$$PE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \quad (7)$$

در این معادلات  $O_i$  و  $S_i$  به ترتیب کربن آلی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در سال  $t$ ،  $\bar{O}$  متوسط داده‌های اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد سال دارای اطلاعات جفتی (اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده) می‌باشند (در این مطالعه اندازه‌گیری کربن خاک با فواصل هر دو ماه یکبار، در طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۱ صورت گرفت و بنابراین  $n$  تعداد ماه‌های دارای اطلاعات جفتی می‌باشد).

### سناریوهای اقلیمی

بر اساس پیش‌بینی‌های انجام شده، استان خراسان جنوبی در شرایط تغییر اقلیم با افزایش درجه حرارت و کاهش مقدار بارندگی مواجه خواهد شد. کوچکی و همکاران (۹) با بکارگیری مدل گردش عمومی UKMO میزان افزایش ماهیانه دما (درجه سانتیگراد) و کاهش درصد بارندگی را برای شهرستان بیرجند در طی سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۵۰ مدل‌سازی کردند. با استفاده از نتایج بدست‌آمده در پژوهش مذکور و با عنایت به اینکه بارندگی و دمای ماهیانه از ورودی‌های مدل RothC هستند، وضعیت ترسیب کربن در شرایط وقوع تغییر اقلیم در منطقه مورد مطالعه ارزیابی گردید. به طور خلاصه، مدل RothC بر اساس دو سناریوی اقلیمی اجرا گردید: ۱- ترسیب کربن در صورت ادامه روند شرایط اقلیمی درازمدت (عدم وقوع تغییر اقلیم) و ۲- ترسیب کربن در شرایط وقوع تغییر اقلیم.

### نتایج و بحث

#### کربن آلی و وزن مخصوص ظاهری خاک

وزن مخصوص ظاهری خاک در ناحیه تحت حفاظت حدود ۱۴٪ کمتر از منطقه شاهد (تحت چرا) بود (جدول ۲). این نتایج با یافته‌های سایر محققان مطابقت دارد (۲، ۳۱، ۳۳، ۳۵، ۵۰). بالاتر بودن وزن مخصوص ظاهری و به عبارتی دیگر پایین‌تر بودن درصد منافذ در اراضی تحت چرا، به ویژه در لایه سطحی خاک، به اثر لگدکوبی

تمامی ماه‌های سال از گزینه Covered استفاده گردید. مقدار مواد گیاهی تجزیه‌پذیر و مواد گیاهی مقاوم نیز بر اساس روش ارائه شده توسط شیراتو و یوکوزاوا (۴۲) اندازه‌گیری و نسبت مذکور برای گیاهان غالب بوم‌نظام مورد مطالعه به طور متوسط ۰/۷۴ برآورد گردید.

مقدار ورودی بقایای گیاهی عبارت است از مقدار کربنی که در هر ماه (t C/ha) به خاک افزوده می‌شود. از آنجا که مقدار این ورودی به ندرت مشخص است، لذا اغلب مواقع برای برآورد آن، مدل به صورت معکوس اجرا می‌گردد که در جریان آن با توجه به اطلاعات خاکی، مکانی و اقلیمی موجود، مقدار این پارامتر در هر ماه تعیین می‌شود (۱۹). در این روش با استفاده از داده‌های آب و هوایی و مدیریت زمین (تشریح شده در مراحل قبل)، مقدار کربن خاک (تن کربن/هکتار، محاسبه شده با معادله ۴)، نسبت DPM/RPM (توضیح داده شده در مرحله قبل) و وارد کردن سال نمونه‌برداری از خاک، کربن ماهیانه برگشت داده شده به خاک (از طریق بقایای گیاهی) محاسبه گردید. یکی دیگر از ورودی‌های مدل RothC، مقدار ماهیانه کود حیوانی مصرف شده است. در جریان انجام این تحقیق از هیچ کود حیوانی (FYM) استفاده نشد.

#### کالیبراسیون مدل

با تغییر فاکتورهای اقلیمی (دما و بارندگی) و نیز پوشش خاک، ضرایب تجزیه  $(a, b, c)$  به‌طور خودکار در درون مدل تغییر می‌یابند. بنابراین با وارد کردن اطلاعات اقلیمی در درون مدل، سرعت تجزیه بسته به رطوبت خاک، دما و نیز وضعیت پوشش گیاهی در هر ماه (آیش یا دارای پوشش گیاهی) برای منطقه مورد مطالعه، تغییر می‌یابد (۳۰). از طرفی با توجه به اینکه کربن ورودی از طریق بقایا، یکی از پارامترهای مهم در کالیبراسیون این مدل است (۲۷)، لذا در ابتدای شبیه‌سازی، مقادیر این پارامتر در بخش ورودی‌های مدل به نحوی تغییر داده شد تا مقادیر کربن شبیه‌سازی شده توسط مدل، با مقادیر اندازه‌گیری شده در ابتدای دو سال ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ برابر گردد.

#### تعیین اعتبار مدل

با توجه به اینکه برای تعیین اعتبار مدل نیاز به بیش از دو نقطه اندازه‌گیری شده بود و با عنایت به اینکه تعداد نقاط سالیانه اندازه‌گیری شده در مدل فقط دو سال بود (ابتدای سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱)؛ لذا به منظور تعیین اعتبار مدل، نمونه‌برداری از خاک ناحیه تحت حفاظت در فاصله بین دو سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۲ به صورت هر دو ماه یکبار نیز صورت گرفت، از این رو هفت زمان نمونه‌برداری و به عبارتی هفت داده اندازه‌گیری شده برای کربن کل ثبت گردید. سپس مدل در بازه زمانی مذکور به صورت خروجی ماهیانه و پس از آن به

2 - Root mean square error

3 - Performance efficiency

1 - Known soil, site and weather data

مرتعی جهان بوده که از پتانسیل بالایی جهت تغییر میزان ذخیره کربن در این اکوسیستمها برخوردار است و تاثیر خود را از طریق تغییر در میزان بیوماس گیاهی، تغییر در میکروکلیم و در نهایت تغییر ترکیب و تنوع گونه‌های اعمال می‌نماید (۱).

نتایج نشان داد که میزان کربن موجود در لایه ۲۰ سانتی‌متری خاک در نواحی حفاظت شده در طی دو سال ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ به ترتیب حدود ۳ درصد و ۵ درصد بیشتر از منطقه تحت چرا (شاهد) بود (جدول ۳). با توجه به ساختار فیزیکی مناسب‌تر خاک در نواحی حفاظت شده (جدول ۲) که باعث رشد مناسب‌تر جامعه گیاهی می‌شود و نیز درصد پوشش گیاهی بالاتر در این نواحی (۲۱)، بالتبع میزان تثبیت دی‌اکسید کربن در طی فرآیند فتوسنتز و در نتیجه انتقال ترکیبات کربنی به ذخیره کربنی خاک از طریق ترشحات ریشه‌ای و بقایای گیاهی بیشتر بوده و در نهایت میزان موجودی کربن خاک از اجرای عملیات بازسازی و حفاظت تاثیر مثبت پذیرفته است.

در پژوهش مشابهی در مراتع تخریب شده شمال چین، اثرات چرا و حفاظت بر ترسیب کربن مطالعه و گزارش شد که چرا بیش از حد باعث افزایش سطح خاک لخت و کاهش ذخیره کربن سیستم گیاه-خاک شد؛ در حالی که، بازسازی و احیای پوشش گیاهی و عملیات قرق توان ترسیب کربن این سیستم را افزایش داد (۵۶). آذرینوند و همکاران (۱) نیز گزارش کردند که چرا باعث کاهش ۲۷ درصدی ذخیره کربن آلی خاک در مراتع قوشه در استان سمنان گردید، که بیانگر نقش مؤثر این عامل در تغییر محتوی کربن خاک می‌باشد. همچنین اسلیمانی و همکاران (۴۴) در مطالعه‌ای درازمدت در اکوسیستمی بیابانی در کشور الجزایر، دریافتند که چرا باعث کاهش پوشش گیاهی به خصوص گونه‌های گیاهی چند ساله و نهایتاً ماده آلی خاک، در مقایسه با مناطق حفاظت شده می‌شود. بنابراین، از مجموع نتایج آزمایش کنونی و مطالعات انجام شده در اکوسیستم‌های مشابه می‌توان دریافت که چرا مدیریت نشده در بوم‌نظام‌های بیابانی، باعث کاهش درصد پوشش گیاهی و توان ترسیب کربن می‌شود. البته باید تاکید نمود که واکنش تیپ‌های گیاهی مختلف یکسان نبوده و از طرفی شاید چرا کنترل شده در این مناطق دارای اثر سودمندی نیز باشد که لازم است در پژوهش‌های آتی مورد تحقیق قرار گیرد.

دامها به‌خصوص در چرا زودرس و در هنگام مرطوب بودن خاک و نیز به کمتر بودن بقایای گیاهی و ماده آلی در اراضی تحت چرا، نسبت داده شده است (۲ و ۳۵). گزارش شده که بین وزن مخصوص ظاهری و درصد کربن آلی خاک رابطه‌ای متقابل وجود دارد، به طوری که افزایش مقدار ماده آلی خاک، وزن مخصوص ظاهری را کاهش و درصد منافذ و میزان نفوذپذیری خاک را افزایش داده و به این طریق باعث کاهش میزان رواناب می‌گردد؛ نهایتاً کاهش میزان رواناب، میزان هدر رفتن کربن از طریق فرسایش را کاهش می‌دهد (۲، ۸، ۱۲ و ۴۰). این موارد با یافته‌های آزمایش کنونی مورد تایید قرار می‌گیرد، به طوری که، نواحی تحت حفاظت، درصد کربن بیشتر و وزن مخصوص ظاهری کمتری دارند (جدول ۲ و ۳).

نتایج نشان داد که مدیریت بازسازی و حفاظت می‌تواند در افزایش درصد کربن آلی خاک مؤثر باشد. مقدار این شاخص در نواحی تحت حفاظت، به‌طور متوسط ۱۶ درصد بیشتر از منطقه تحت چرا (تیپ شاهد) بود (جدول ۲). نتایج این پژوهش با یافته‌های ورامش و همکاران (۱۳) در خصوص تفاوت در درصد کربن آلی خاک، بین نواحی احیاء شده و ناحیه شاهد و نیز نتایج لی و همکاران (۳۳) مبنی بر نقش عملیات حفاظت در بهبود درصد ماده آلی خاک، مطابقت دارد. در مورد اثر چرا بر میزان کربن آلی خاک گزارش‌های متفاوتی وجود دارد (۱، ۷، ۱۳ و ۳۳). این تفاوت‌ها به عواملی مختلفی مانند تفاوت‌های اقلیمی، خصوصیات خاک، موقعیت اکوسیستم، ترکیب جامعه گیاهی و مدیریت چرا بستگی دارد (۱ و ۳۵).

در مطالعه‌ای در کشور چین گزارش شد که چرا باعث کاهش کربن آلی خاک به میزان ۱۶/۴ درصد در مقایسه با مناطق حفاظت شده می‌شود (۳۳). مین یون و همکاران (۳۵) نیز در پژوهش دیگری در کشور چین گزارش کردند که تیمارهای حفاظتی اعمال شده بر روی مرتع، به خصوص چرا کنترل شده در مقایسه با چرا آزاد باعث بهبود قابل توجه ذخیره کربن موجود در خاک شد. آنها دلیل کاهش کربن خاک در شرایط چرا آزاد را به مواردی مانند از بین رفتن اندام هوایی گیاه در اثر چرا و کاهش عمق و تراکم ریشه‌ها نسبت داده و بیان داشتند که اعمال چرا کنترل شده باعث تحریک رشد گیاه و در نتیجه افزایش تولید گیاه و ترسیب کربن و انتقال آن به خاک می‌شود. در نهایت آنچه روشن بنظر می‌رسد این است که چرا دام یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین نوع کاربری زمین در اراضی

جدول ۲- وزن مخصوص ظاهری و درصد کربن آلی خاک در نواحی حفاظت شده در مقایسه با ناحیه تحت چرا در طی دو سال ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱

نواحی مطالعاتی	وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتیمتر مکعب)	درصد کربن آلی خاک (OC)	
		۱۳۹۰	۱۳۹۱
منطقه حفاظت شده	۱/۳۸	۰/۲۰۷	۰/۲۱۷
منطقه تحت چرا (شاهد)	۱/۶	۰/۱۷۵	۰/۱۷۸

خوبی می‌تواند وضعیت مقدار کربن آلی منطقه مورد مطالعه را شبیه‌سازی نماید. با توجه به اینکه در معادله مربوط به رگرسیون خطی بین مقادیر کربن اندازه‌گیری شده و مقادیر کربن شبیه‌سازی شده، شیب خط تقریباً برابر با یک و عرض از مبدا نزدیک به صفر می‌باشد، لذا مدل RothC کارایی لازم جهت تخمین روند تغییرات کربن خاک را دارد (شکل ۲). همچنین از آنجا که ضریب تبیین ( $R^2$ ) برای مدل مورد بررسی معادل با ۰/۹۸ برآورد شده است؛ از این رو، این مدل برای بوم‌نظام بیابانی مورد مطالعه توانسته است به خوبی روند تغییرات کربن خاک را در طی دوره مورد مطالعه شبیه‌سازی نماید (شکل ۲). گزارش شده است که یک مدل زمانی می‌تواند بهترین پیش‌بینی و بازتولید داده‌های آزمایشی را داشته باشد که شیب خط رگرسیونی برابر با یک، عرض از مبدا آن برابر با صفر، ضریب تبیین برابر با یک و جذر میانگین مربعات خطای نرمال کمتر از ۱۰، شود (۳). علاوه بر این، مقدار شاخص کارایی مدل (PE) نیز نزدیک به یک (۰/۹۸) به دست آمد؛ گزارش شده است که مقدار این شاخص حداکثر برابر با یک بوده و این مقدار به معنای حداکثر برآزش است (۳۹)؛ بنابراین مدل RothC می‌تواند برآزشی نسبتاً کامل بین داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده ارائه دهد. در پژوهش مشابهی مقدار ضریب تبیین مدل RothC برای سه نوع مدیریت اراضی در کشور چین ۰/۶۶، ۰/۶۷ و ۰/۸۶ به دست آمد (۲۷). در مطالعه دیگری نیز با بکارگیری مدل RothC، مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال در چندین سیستم مدیریتی کمتر از ۱۰ گزارش گردید (۵۱). محققان دیگری نیز مدل RothC را از طریق تعدیل مقدار کربن گیاهی بازگشتی به خاک کالیبره کرده‌اند (۱۵، ۳۰ و ۳۸). به طور کلی، این مدل برای بسیاری از اراضی جنگلی، مرتعی و زراعی و بسیاری از خاک‌ها و اقلیم‌ها در سراسر جهان استفاده شده و علاوه بر این، در مطالعات مختلفی در مناطق خشک مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفته است (۱۴، ۱۹، ۲۴، ۲۷ و ۳۶). در بسیاری از این مطالعات، مدل RothC با دقت قابل قبولی، روند تغییرات کربن آلی خاک را در طی زمان برآورد نموده است (۲۲، ۴۵ و ۵۵).

همانطور که عزیزاده و همکاران (۷) نقش چرای بلندمدت را بر ترسیب کربن منفی و تاثیر قرق میان‌مدت را مثبت ارزیابی کردند و آنها دلیل این مسئله را به نابودی و کم شدن تعداد گونه‌های گیاهی به خصوص گونه درمنه دشتی در اثر افزایش فعالیت موجودات مهره‌دار و بی‌مهره در شرایط اعمال قرق بلندمدت نسبت داده و بیان داشتند که انجام چرا در حد معقول و سبک سبب افزایش میزان ترسیب کربن می‌گردد. از این رو می‌توان نقش کلی عملیات بازسازی و حفاظت را بر ترسیب کربن مثبت ارزیابی نمود، اما اولاً آثار این پدیده در تمامی اقلیم‌ها و پوشش‌های گیاهی یکسان نبوده و ثانیاً در هر منطقه خاص نیز طول دوره حفاظت می‌تواند عامل مهمی بر روند پیشرفت فرآیند ترسیب کربن باشد.

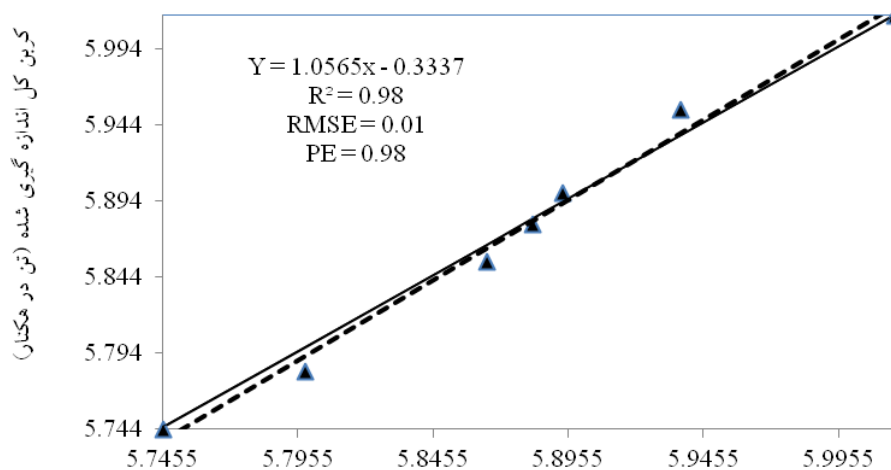
شدت افزایش موجودی کربن آلی خاک در فاصله دو سال نمونه‌گیری، در مناطق تحت حفاظت بیش از دو برابر منطقه تحت چرا بود، به طوری که میزان افزایش ذخیره کربن کل از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۱ در مناطق تحت حفاظت به طور متوسط حدود ۵ درصد (۲۷۲ کیلوگرم) و در منطقه تحت چرا حدود ۲ درصد (۹۶ کیلوگرم) برآورد گردید (جدول ۳). دلیل این موضوع را می‌توان به بالاتر بودن درصد پوشش گیاهی در مناطق تحت حفاظت در مقایسه با ناحیه تحت چرا نسبت داد، زیرا درصد پوشش گیاهی ۳/۳ برابری مناطق تحت حفاظت، می‌تواند روند افزایش کربن آلی خاک را در طی زمان تسریع نماید (۲۱). لازم به ذکر است که ماده آلی خاک در طی زمان در صورت تداوم عملیات حفاظتی، در نهایت در اکوسیستم مورد مطالعه به یک حد نسبتاً ثابتی خواهد رسید که زمان رسیدن به این حد، ارتباط مستقیمی با عوامل مدیریتی مرتع و شرایط اکولوژیکی منطقه خواهد داشت. دیانتی و همکاران (۶) نیز در پژوهشی در مراتع نیمه-خشک استان خراسان شمالی، گزارش کردند که عملیات قرق باعث افزایش سالانه ترسیب کربن در حدود ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار می‌شود.

### برآورد کربن آلی و تعیین اعتبار مدل

نتایج تعیین اعتبار مدل نشان داد که مدل RothC با دقت بسیار

جدول ۳- موجودی کربن آلی موجود در لایه ۲۰ سانتیمتری خاک در ناحیه حفاظت شده در مقایسه با ناحیه تحت چرا، در طی سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱

نواحی مطالعاتی	موجودی کربن آلی (کیلوگرم در هکتار تا عمق ۲۰ سانتیمتر)		میزان افزایش کربن آلی در طی یکسال (کیلوگرم در هکتار تا عمق ۲۰ سانتیمتر)
	سال ۱۳۹۰	سال ۱۳۹۱	
منطقه حفاظت شده	۵۷۴۴	۶۰۱۶	۲۷۲
منطقه تحت چرا (شاهد)	۵۶۰۰	۵۶۹۶	۹۶



کربن کل شبیه سازی شده (تن در هکتار)

شکل ۲- خط رگرسیونی بین مقادیر کربن اندازه گیری شده و شبیه سازی شده برای منطقه حفاظت شده با فواصل دوماهه در فاصله زمانی سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۲ (خط ممند نشان دهنده خط ۱:۱ می باشد (Y=X))

می شود (۱۸).

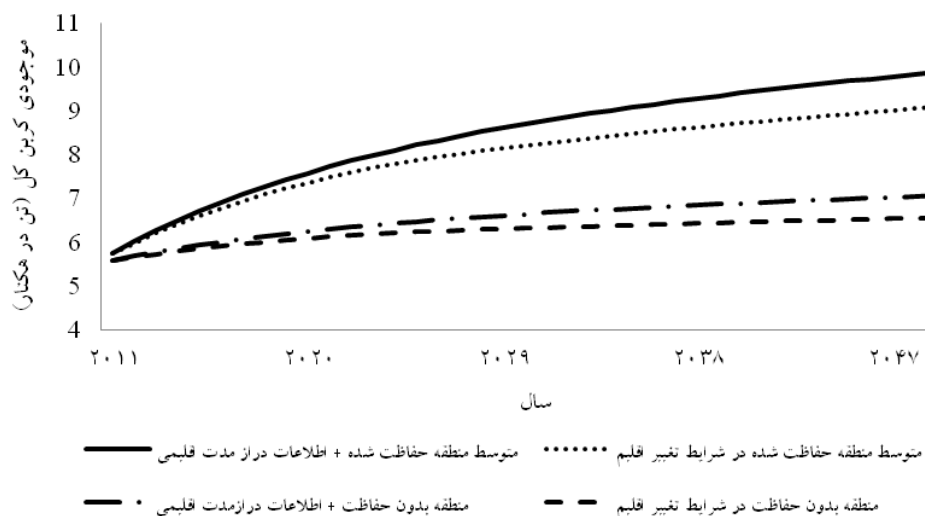
شبیه سازی اثر تغییر اقلیم نشان داد که با افزایش دما و کاهش بارندگی، میزان کربن کل موجود در خاک ناحیه مورد بررسی در شرایط وقوع تغییر اقلیم در مقایسه با شرایط عدم وقوع تغییر اقلیم کمتر بوده و با نزدیک شدن به سال مرجع نهایی (۲۰۵۰) تفاوت موجود از نظر مقدار کل کربن خاک بین دو سناریوی اقلیمی بیشتر خواهد شد (شکل ۳). تودوروویچ و همکاران (۵۱) اظهار داشتند که در مورد اثر افزایش دما بر مواد آلی خاک تردید وجود دارد که آیا افزایش دما بدلیل افزایش سرعت معدنی شدن، باعث کاهش ماده آلی شده و یا اینکه بدلیل افزایش میزان تولید گیاهی و در نتیجه مقدار بقایای گیاهی، باعث افزایش ماده آلی خاک خواهد گردید. با این حال اسمیت و همکاران (۴۷) در مطالعه ای در روسیه و اوکراین و نیز موندینی و همکاران (۳۶) در پژوهشی در کشور ایتالیا، ضمن بکارگیری مدل RothC گزارش کردند که در شرایط تغییر اقلیم به علت افزایش سرعت تجزیه ناشی از افزایش دما، میزان معدنی شدن ماده آلی افزایش و ذخیره کربنی خاک کاهش خواهد یافت.

ژو و همکاران (۵۴) نیز در پژوهشی در کشور ایرلند اثرات افزایش دما و کاهش بارندگی تابستانه در شرایط تغییر اقلیم را بر موجودی کربن خاک منفی ارزیابی نمودند. فالون و همکاران (۲۳) در پژوهشی در کشورهای کنیا، اردن، هند و برزیل گزارش کردند که در شرایط تغییر اقلیم، بارندگی تعیین کننده تغییرات کربن خاک می باشد؛ به نحوی که افزایش میزان بارندگی از طریق افزایش تولید اولیه خالص و در نتیجه افزایش مقدار بقایای برگشتی به خاک، سبب افزایش موجودی کربن خاک می گردد؛ با این وجود آنها در مقیاس جهانی تغییرات دما را عامل موثرتری بر ذخیره کربن خاک دانستند.

#### پیش بینی روند ذخیره کربنی کل

کربن کل که شامل اجزای فعال (مواد گیاهی قابل تجزیه، مواد گیاهی مقاوم، بیوماس میکروبی و مواد گیاهی هوموسی شده) و غیر فعال کربن خاک می شود (۱۹)، از مدیریت بوم نظام و تغییر شرایط اقلیمی تاثیر می پذیرد (شکل ۳). در هر دو سناریوی اقلیمی مورد مطالعه، مقدار کربن کل خاک در نواحی تحت حفاظت بیشتر از نواحی تحت چرا بود. گزارش شده است که تخلیه کربن خاک در اثر تخریب خاک، مدیریت ناصحیح و کاربری غلط اراضی تسریع می گردد (۳۲). سطوح کربن خاک، حاصل تعادل میان نهاده ها (بقایای گیاهان) و ستاده ها (تجزیه میکروبی، آتش سوزی، فرسایش و آبشویی) است که به وسیله اقلیم، رژیم های آشفستگی، ترکیب جامعه گیاهی و میکروارگانیسم ها و زمان تغییر می یابد (۱۳). به نظر می رسد، در مناطق حفاظت شده تعادل بهتری بین نهاده ها و ستاده ها وجود داشته و این مسئله بیشتر از حیث مقدار بقایای گیاهی وارد شده به خاک و نیز میزان فرسایش و آبشویی خاک قابل توجه است. بنابراین، وقتی پوشش گیاهی و ظرفیت تولیدی مراتع و چراگاه ها تحت تاثیر چرای مفرط دام قرار نگیرد و تعداد دام در حد ظرفیت نگهداری باشد، مقدار مواد آلی خاک تغییر چندانی نمی کند، اما در نواحی تحت چرای شدید، علاوه بر تخریب پوشش گیاهی، پیامدهای دیگری مانند فرسایش تشدید شونده خاک و کاهش ذخایر کربن نیز به وقوع خواهد پیوست (۱). به هر صورت، کاربری زمین اثرات قابل توجهی بر ذخیره کربنی خاک بر جا می گذارد؛ به طوری که در پژوهشی در برزیل نیز ضمن بکارگیری مدل RothC بیان شد که مدیریت اراضی نقش مهمی در میزان ذخیره کربنی خاک داشته و تبدیل اراضی جنگلی به مراتع مدیریت شده، سبب کاهش قابل توجهی در موجودی کربن خاک





شکل ۳- روند تغییرات کربن کل موجود در لایه ۲۰ سانتیمتری خاک تحت تاثیر عملیات بازسازی بوم‌نظام و تغییر اقلیم

در طی زمان در بوم‌نظام مورد مطالعه برآورد نماید. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که با ادامه مدیریت حفاظت می‌توان موجودی کربن خاک را بهبود بخشید و در ضمن بروز احتمالی تغییر اقلیم آثاری منفی بر موجودی کربن خاک برجا خواهد گذاشت.

### سپاسگزاری

بخشی از هزینه‌های اجرای این تحقیق از طریق معاونت محترم پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد (طرح کد ۱۶۶۳۷) تامین شده است که بدینوسیله تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین جا دارد از مساعدت‌ها و حمایت‌های اداره کل منابع طبیعی استان خراسان جنوبی، آقای مهندس علیرضا یاری مدیر اجرایی و آقایان محمد فتحی، غلامرضا خراشادی‌زاده و محمد کرمانی از پرسنل پروژه بین المللی ترسیب کربن تشکر و قدردانی گردد. از مشاوره‌های دکتر کوین کلمن (Prof. Kevin Coleman) از مرکز تحقیقاتی رتامستد و دکتر پت اسمیت (Prof. Pete Smith) استاد دانشگاه آبردین (Aberdeen) که در قسمت اجرای مدل مساعدت نمودند، نیز سپاسگزاری می‌گردد.

به هر ترتیب قید این نکته ضروری است که اثر تغییر اقلیم بر ذخایر کربنی خاک در نواحی حاره‌ای، معتدله و شمالی کره زمین متفاوت است (۳۲).

دما اولین عامل موثر در پیشرفت فرآیندهای میکروبی خاک شناخته شده و حتی اثر چشم‌گیری در تغییرات پوشش گیاهی اعمال می‌کند، به طوری که از نظر تثریکی هر درجه افزایش در متوسط دمای سالیانه، معادل تغییر ۲۰۰ کیلومتری نواحی رویشگاهی به سمت قطب<sup>۱</sup> می‌گردد (۳۲ و ۳۷). بنابراین، به نظر می‌رسد که تغییر رژیم دمایی اکوسیستم در شرایط تغییر اقلیم با تاثیر بر میزان و سرعت واکنش‌های تجزیه‌ای خاک و نیز ترکیب و تنوع گیاهی محیط، اثرات چشم‌گیری بر بودجه کربنی اکوسیستم اعمال نماید.

### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که با اجرای عملیات بازسازی و حفاظت می‌توان ساختار فیزیکی و ذخیره کربنی خاک را در بوم‌نظام‌های تخریب شده نواحی گرم و خشک بهبود بخشید. علاوه بر این، مدل RothC با دقت خوبی توانست روند تغییرات کربن خاک را

### منابع

- ۱- آذرنیوند ح، جنیدی جعفری ح، زارع چاهوکی م.ع، جعفری م. و نیکو ش. ۱۳۸۸. بررسی اثر چرای دام بر ترسیب کربن و ذخیره ازت در مراتع با گون درمنه دشتی در استان سمنان. مرتع ۴: ۶۱۰-۵۹۰.

- ۲- آقامحسنی فشمی م.، زاهدی ق.ا.، فرج پور م. و خراسانی ن. ۱۳۸۷. تاثیر قرق و چرا بر روی کربن آلی و وزن مخصوص ظاهری خاک: مطالعه موردی در مراتع دامنه جنوبی البرز مرکزی. دانش کشاورزی ایران ۵(۴): ۳۷۵-۳۸۱.
- ۳- امیری لاریجانی ب.، طهماسبی سوستانی ز.، نعمت زاده ق.، امیری ا. و اصفهانی م. ۱۳۹۰. شبیه سازی مراحل نمو فنولوژیک و طول دوره رشد به رقم برنج در سنین مختلف گیاهچه با استفاده از مدل ORYZA2000. علوم زراعی ایران ۱۳(۳): ۴۶۶-۴۸۰.
- ۴- بابائیان ا.، نجفی نیک ز.، زابل عباسی ف.، حبیبی نوخندان م.، ادب ح. و ملبوسی ش. ۱۳۸۸. ارزیابی تغییر اقلیم کشور در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ میلادی با استفاده از ریز مقیاس نمایی داده های گردش عمومی جو ECHO-G. جغرافیا و توسعه ۱۶: ۱۵۲-۱۳۵.
- ۵- بردبار ک. و مرتضوی جهرمی م. ۱۳۸۵. بررسی پتانسیل ذخیره کربن در جنگل کاری های اکالیپتوس و آکاسیا در مناطق غربی استان فارس. پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی ۷۰: ۱۰۳-۹۵.
- ۶- دیانتی تیلکی ق.ع.، نقی پور برج ع.ا.، توکلی ح.، حیدریان آقاخانی م. و افخم الشعرا س. ۱۳۸۸. تأثیر قرق بر میزان ترسیب کربن خاک و زیتوده گیاهی در مراتع نیمه خشک استان خراسان شمالی. مرتع ۳(۴): ۶۶۸-۶۷۹.
- ۷- علیزاده م.، مهدوی م.، جوری م.ح.، مهدوی خ. و ملک پور ب. ۱۳۹۰. برآورد مقدار ترسیب کربن خاک در مراتع استپی (مطالعه موردی: مراتع استپی رودشور ساوه). مرتع ۵(۲): ۱۷۰-۱۶۳.
- ۸- کلاهچی ن. ۱۳۸۴. بررسی ترسیب کربن در گیاهان بوته ای مراتع همدان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران.
- ۹- کوچکی ع.، نصیری م. و کمالی غ.ع. ۱۳۸۶. مطالعه شاخص های هواشناسی ایران در شرایط تغییر اقلیم. پژوهش های زراعی ایران ۱۵(۱): ۱۴۳-۱۳۳.
- ۱۰- فروزه م.ر.، حشمتی غ.ع.، قنبریان غ.ع. و مصباح ح. ۱۳۸۷. مقایسه توان ترسیب کربن سه گونه بوته ای گل آفتابی، سیاه گینه و درمنه دشتی در مراتع خشک ایران (مطالعه موردی: دشت گربایگان فسا). مجله محیط شناسی ۴۶: ۷۲-۶۵.
- ۱۱- محمودی طالقانی ع.، زاهدی امیری ق.، عادل ا. و ثاقب طالبی خ. ۱۳۸۶. برآورد میزان ترسیب کربن در جنگل های تحت مدیریت (مطالعه موردی جنگل گلبن در شمال کشور). تحقیقات جنگل و صنوبر ایران ۱۵(۳): ۲۵۲-۲۴۱.
- ۱۲- نیک نهاد قرماخر ح. و مارامایی م.ق. ۱۳۹۰. مطالعه اثرات تغییر کاربری اراضی بر خصوصیات خاک (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کچیک). مدیریت خاک و تولید پایدار ۱(۲): ۹۶-۸۱.
- ۱۳- ورامش س.، حسینی م.، عبدی ن. و اکبری نیا م. ۱۳۸۹. اثرهای جنگل کاری در افزایش ترسیب کربن و بهبود برخی ویژگی های خاک. مجله جنگل ایران ۲(۱): ۳۵-۲۵.
- 14- Barancikova G., Halas J., Guttekova M., Makovnikova J., Navakova 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 Resarch, 5(1): 1-9.
- 15- Bhattacharyya T., Pal D.K., Deshmukh A.S., Deshmukh R.R., Ray S.K., Chandran P., Mandal C., Telpande B., Nimje A.M. 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.
- 16- Blake G.R., and Hartge K.H. 1986. Bulk density. p. 363-376. In Klute, A. (Ed.) Methods of Soil Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods. Soil Science Society of America Publication. Madison, WI.
- 17- Bouyoucos G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. Agronomy Journal, 56: 464-465.
- 18- Cerri C.E.P., Easter M., Paustian K., Killian K., Coleman K., Bernoux M., Falloon P., Powlson D.S., Batjes N., Milne E., and Cerri C.C. 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.
- 19- Coleman K., and Jenkinson D.S. 2008. RothC-26.3: A model for the turnover of carbon in soil, Model description and windows users guide. Rothamsted Research Harpenden Herts. ISBN 0951445685. Pp47. Available at [http://www.rothamsted.ac.uk/aen/carbon/mod26\\_3\\_win.pdf](http://www.rothamsted.ac.uk/aen/carbon/mod26_3_win.pdf).
- 20- Deckmyn G., Eckmyn B., Muys B., Garcia-quijanow J., and Ceulemans R. 2004. Carbon sequestration following afforestation of agricultural soils: comparing oak/beech forest to short-rotation poplar coppice combining a process and a carbon accounting model. Global Change Biology, 10: 1482-1491.
- 21- Fallahi J., Rezvani Moghaddam P., Nassiri Mahallati M., and Behdani M.A. 2012. The use of diversity indices to assess the effect of restoration and conservation on plant diversity of a rangeland in South Khorasan Province, Iran. Journal of Biodiversity and Ecological Sciences, 2(2): 87-98.
- 22- Falloon P.D., Smith P., Coleman K., and Marshall S. 1998. Estimating the size of the inert organic matter pool for

- use in the Rothamsted carbon model. *Soil Biology and Biochemistry*, 30: 1207–1211.
- 23- Falloon P., Jones C.D., Cerri C.E., Al-Adamat R., Kamoni P., Bhattacharyya T., Easter M., Paustian K., Killian K., Coleman K., and Milne E. 2007. Climate change and its impact on soil and vegetation carbon storage in Kenya, Jordan, India and Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 122: 114-124.
  - 24- Farage P.K., Ardo J., Olsson L., Rienzi E.A., Ball A.S., and Pretty J.N. 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: 457-472.
  - 25- Gorissen A., Tietema A., Joosten N.N., Estiarte M., Penuelas J., Sowerby A., Emmett B.A., and Beier C. 2010. Climate change affects carbon allocation to the soil in shrublands. *Ecosystems*, 7: 650–661.
  - 26- Grimston M.C., Karakoussis V., Fouquet R., Van der Vorst R., Pearson P., and Leach M. 2001. The European and global potential of carbon dioxide sequestration in tackling climate change. *Climate Policy*, 1: 155–171.
  - 27- 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.
  - 28- Jenkinson D.S., Hart P.B.S., Rayner J.H., and Parry L.C. 1987. Modelling the turnover of organic matter in long-term experiments at Rothamsted. *Intecol Bulletin*, 15: 1-8.
  - 29- Jenkinson D.S., Harkness D.D., Vance E.D., Adams D.E., and Harrison A.F. 1992. Calculating net primary production and annual input of organic matter to soil from the amount and radiocarbon content of soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 24(4): 295-308.
  - 30- Kaonga M.L., 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.
  - 31- Krzic M., Newma R.F., Broersma K., and Bomke A.A. 1999. Soil compaction of forest plantation in interior British Colombia. *Journal of Range Manage*, 52: 644-671.
  - 32- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123: 1 -22.
  - 33- Li C., Hao X., Zhao M., Han G., and Willms W.D. 2008. Influence of historic sheep grazing on vegetation and soil properties of a desert Steppe in Inner Mongolia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 128: 109-116.
  - 34- Liu D.L., Chan K.Y., Conyers M.K., Li G., and Poile G.J. 2011. Simulation of soil organic carbon dynamics under different pasture managements using the RothC carbon model. *Geoderma*, 165: 69–77.
  - 35- Min-yun X., Kun W., and Fan X. 2011. Effects of grassland management on soil organic carbon density in agropastoral zone of Northern China. *African Journal of Biotechnology*, 10(24): 4844-4850.
  - 36- Mondinia C., Coleman K., and Whitmore A.P. 2012. Spatially explicit modelling of changes in soil organic C in agricultural soils in Italy, 2001–2100: Potential for compost amendment. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 153: 24– 32.
  - 37- Ozenda P., and Borel J.L. 1990. The possible responses of vegetation to a global climate change. p. 221–249. In Boer M., and Groot, R.S. (Ed.) *Landscape-Ecological Impact of Climate Change*. IOS Press, Washington.
  - 38- Paul K.I., Polglase P.J., and Richards G.P. 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.
  - 39- Paul K.I., and Polglase P.J. 2004. Prediction of decomposition of litter under eucalypts and pines using the FullCAM model. *Forest Ecology and Management*, 191: 73–92.
  - 40- Perie C., and Ouimet R. 2008. Organic carbon, organic matter and bulk density relationships in boreal forest soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 88: 315-325.
  - 41- Shi X.Z., Wang H.J., Yu D.S., C.Weindorf D., Cheng X.F., Pan X.Z., Sun W.X., and Chen J.M. 2009. Potential for soil carbon sequestration of eroded areas in subtropical China. *Soil and Tillage Research*, 105: 322–327.
  - 42- 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.
  - 43- Skjemstad J.O., Spouncer L.R., Cowie B., and Swift R.S. 2004. Calibration of the Rothamsted organic carbon turnover model (RothC ver. 26.3), using measurable soil organic carbon pools. *Australian Journal of Soil Research*, 42: 79–88.
  - 44- Slimani H., Aidoud A., and Roze F. 2010. 30 Years of protection and monitoring of a steppic rangeland undergoing desertification. *Journal of Arid Environments*, 74: 685-691.
  - 45- Smith P., Smith J.U., Powlson D.S., McGill W.B., Arah J.R. M., Chertov O.G., Coleman K.C, Franko U., Frolking S., Enkinson D.S., Jensen L.S., Kelly R.H., Klein-Gunnewiek H., Komarov A.S., Li C., Molina J.A., Mueller T., Parton W.J., Thornley J.M., and Whitmore A.P. 1997. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using seven long-term experimental datasets. *Geoderma*, 81: 153-225.
  - 46- Smith P. 2004. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *Europ Journal of Agronomy*, 20: 229–236.
  - 47- 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.
- 48- Snyder C.S., Bruulsema T.W., Jensen T.L., and Fixen P.E. 2008. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 133: 247–266.
- 49- Spargo J.T., M.Alley M., F.Follett R., and V.Wallace J. 2008. Soil carbon sequestration with continuous no-till management of grain cropping systems in the Virginia coastal plain. *Soil and Tillage Research*, 100: 133–140.
- 50- Stavi I., Ungar E.D., Lavee H., and Sarah P. 2008. Grazing-induced spatial variability of soil bulk density and content of moisture, organic carbon and calcium carbonate in a semi-arid rangeland. *Catena*, 75: 288-296.
- 51- Todorovic G.R., Stemmer M., Tatzber M., Katzlberger C., Spiegel H., Zehetner F., and Gerzabek M.H. 2010. Soil-carbon turnover under different crop management: Evaluation of RothC-model predictions under Pannonian climate conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173: 662–670.
- 52- Tschakert P., Khouma M., and Sene M. 2004. Biophysical potential for soil carbon sequestration in agricultural systems of the Old Peanut Basin of Senegal. *Journal of Arid Environments*, 59: 511–533.
- 53- Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of the Degtareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29-38.
- 54- Xu X., Liu W., and Kiely G. 2010. 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 and Environment*, 140 (4-3): 372–381.
- 55- Yokozawa M., Shirato Y., Sakamoto T., Yonemura S., Nakai M., and Ohkura T. 2010. Use of the RothC model to estimate the carbon sequestration potential of organic matter application in Japanese arable soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, 56: 168-176.
- 56- Yong Z.S., Ha L.Z., and Tong H.Z. 2003. Influences of grazing and exclosure on carbon sequestration in degraded sandy grassland, Inner Mongolia, North China. *Journal of Agricultural Research*, 46(4): 321-328.



## Validation of RothC Model for Evaluation of Carbon Sequestration in a Restored Ecosystem Under Two Different Climatic Scenarios

J. Fallahi<sup>1</sup>- P. Rezvani Moghaddam<sup>2\*</sup>- M. Nassiri Mahallati<sup>3</sup>- M.A. Behdani<sup>4</sup>

Received:12-02-2013

Accepted:09-06-2013

### Abstract

Climate change by increasing concentrations of greenhouse gases, particularly carbon dioxide, has led to increase attention to the carbon sequestration through the restoration and protection of vegetation cover. In this regards, ecosystems of arid regions have a special importance. In this study the effects of reconstruction and conservation, on soil carbon sequestration of the region of the International Carbon Sequestration Project in Hussein Abad, South Khorasan province of Iran was investigated by a simulation approach using RothC model. In addition, the effects of climate change (increasing temperature and decreasing rainfall) on soil carbon sequestration potential was studied. In the studied area, replanting was done in 2004 and then soil samples were taken every two months during 2010-2011. After collecting the required input data for RothC model (climate, soil and management input data), the model was evaluated and validated for the study area. Moreover, soil carbon sequestration was studied under climate change condition. The simulation results revealed that the RothC model is applicable in rangelands of dry and warm regions, because it estimated the soil carbon changes over the time with proper accuracy. The amounts of model performance index,  $R^2$  and RMSE were 0.98, 98% and 0.01, respectively. Simulation study indicated that soil carbon storage will increase from 2011 to 2050 and will be affected by climate change and protection programs. Based on model estimation the amounts of soil carbon in protected areas will be higher than non-protected areas. Moreover, in non-climate change scenario the amounts of soil carbon will be higher than climate change scenario in 2050.

**Keywords:** Carbon Sequestrations, Climate Change, Simulation, RothC model

---

1,2,3- PhD Student and Professors, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, Respectively

(\*- Corresponding Author Email: rezvani@um.ac.ir)

4- Associate Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Iran