



Simulating changes in organic carbon of forest soils due to climate change at different altitudes using the Roth C Model

Mehran Misaghi^{a*}, Ahmad Golchin^b, Mohammadsadegh Askari^c

^a PhD in Soil Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

^b Professor in Soil Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

^c Assistant Professor in Soil Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Received: 19 December 2023

Revised: 9 January 2024

Accepted: 2 March 2024

Abstract

This study explores the influence of land altitude on soil organic carbon (SOC) storage in the forest soils of Talesh County, Gilan Province. Soil samples were collected from four distinct altitudinal ranges (500–1000, 1000–1500, 1500–2000, and 2000–2500 meters above sea level) with comparable intrinsic characteristics. Composite soil samples were taken from a depth of 0–35 cm, and the concentration of soil organic carbon, combined with soil bulk density from undisturbed samples, was used to calculate SOC stocks.

Statistical comparisons were conducted using a randomized complete block design (RCBD). The Roth C model was employed to estimate the organic carbon content of the soils. Climatic data and soil organic carbon content at each altitude were utilized to calibrate and validate the model. To assess potential variations in SOC storage under changing conditions, diverse climate change scenarios were simulated using the Roth C model.

The findings revealed that as land elevation increased, SOC storage also increased, primarily due to higher precipitation and lower temperatures at higher altitudes. The Roth C model demonstrated high precision in estimating SOC levels, with correlation and determination coefficients of 0.97 and 0.95, respectively.

The model further suggested that under current climate conditions, soil organic carbon remains stable over time. At equilibrium, the carbon input into the soil through plant residues equals the carbon output from the soil as carbon gas emissions.

Keywords: Soil Carbon (SOC), Altitude Gradient, Forest Ecosystems, Carbon Sequestration, Roth C model, Climate change Scenarios.

* .Corresponding author: Mehran Misaghi Email: misaghi.mehran@yahoo.com Tel: +989921851182

How to cite this Article: Misaghi, M., Golchin, A., & Askari, .. S. (2024). Simulating Changes in Organic Carbon of Forest Soils Due to Climate Change at Different Altitudes Using the Roth C Model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(3) 150-183.



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)



شبیه سازی تغییرات کربن آلی خاک های جنگلی در اثر تغییر اقلیم در ارتفاعات مختلف

با استفاده از مدل Roth C

مهران میثاقی^۱ - دکتری مهندسی خاک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

احمد گلچین - استاد مهندسی خاک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

محمدصادق عسکری - استادیار مهندسی خاک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۹/۲۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲

چکیده

این پژوهش به بررسی تأثیر ارتفاع و تغییر اقلیم بر ذخیره کربن آلی خاک های جنگلی شهرستان تالش در استان گیلان پرداخته است. نمونه های مرکب خاک از عمق ۰ - ۳۵ سانتی متری و از چهار محدوده ارتفاعی (۵۰۰-، ۱۰۰۰-، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰- و ۲۵۰۰-۲۰۰۰ متر بالاتر از سطح دریا) جمع آوری و غلظت کربن آلی و سایر ویژگی های خاک در آن ها اندازه گیری گردید. نتایج نشان می دهد با افزایش ارتفاع از سطح دریا، ذخیره کربن آلی خاک به دلیل افزایش بارندگی و کاهش دما، افزایش می یابد. بیشترین ذخیره مربوط به ارتفاعات ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر (۹۷.۴۶ تن در هکتار) و کمترین آن مربوط به ارتفاعات ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر (۴۴.۲۳ تن در هکتار) بود. مدل روتامستد (Roth C) به طور دقیق و با ضریب همبستگی و تبیین بالای ۰.۹۵، ذخیره کربن آلی خاک ها را تخمین زد. در شرایط فعلی، کربن ورودی و خروجی خاک در تعادل و تقریباً معادل ۱.۲۹ تا ۲.۷۶ تن در هکتار در سال است. طبق سناریوهای مدل سازی، کاهش بارندگی (۲.۱۵ میلی متر در هر ۱۰ سال) و افزایش دما (۰.۴ سانتی گراد)، باعث کاهش ۳۳.۵۴ تا ۴۰.۰۱ درصدی ذخیره کربن آلی در همه طبقات ارتفاعی، به ویژه در نقاط مرتفع تر خواهد شد. در این حالت، خاک به منبعی برای تولید گاز کربنیک تبدیل می شود. برعکس، افزایش بارندگی و کاهش دما باعث افزایش ۱۳.۸۴ تا ۱۸.۹۴ درصدی ذخیره کربن آلی در همه طبقات ارتفاعی، به ویژه در نقاط مرتفع تر خواهد شد. در این حالت، خاک به مخزنی برای نگهداری گاز

^۱ Email: misaghi.mehran@yahoo.com

^۱ نویسنده مسئول: ۰۹۹۲۱۸۵۱۱۸۲

کربنیک اتمسفری به شکل هوموس تبدیل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد مدل‌های شبیه‌سازی دینامیک کربن آلی خاک، ابزارهای دقیقی برای پیش‌بینی و بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر این ذخایر، به‌ویژه در خاک‌های جنگلی هستند. این پژوهش تأکید می‌کند حفظ ارتفاعات جنگلی و مدیریت اقلیمی برای جلوگیری از کاهش ذخیره کربن و مقابله با تغییرات اقلیمی، اهمیت ویژه‌ای دارد.

کلیدواژه‌ها: کربن آلی خاک، شیب ارتفاعی، اکوسیستم‌های جنگلی، جذب کربن، مدل Roth C، سناریوهای تغییر اقلیم.

۱-مقدمه

ماده آلی خاک (SOM)^۱ یکی از پیچیده‌ترین اجزاء خاک به حساب می‌آید، زیرا از بقایای گیاهی، میکروبی و جانوری که در مراحل مختلف تجزیه هستند، تشکیل شده است و این مخلوط ناهمگن با اجزای غیرآلی مرتبط است (Christensen, 1992). ماده آلی خاک یک شاخص مهم در کیفیت خاک است و کمیت و کیفیت آن در حفظ حاصلخیزی طولانی مدت خاک سهم بسزایی دارد (Zhao, Liu, Wang & Zhao, 2015; Ramesh, 2013; Manjaiah, Tomar & Ngachan, 2013).

کربن آلی خاک (SOC)^۲ یک عامل تعیین‌کننده در عملکرد اکوسیستم‌های کشاورزی است و مقدار آن در یک خاک معین با تفاوت بین میزان کربن ورودی به خاک (بقایای گیاهی و ریشه) و مقدار کربن خروجی از آن (انتشار CO₂ به هوا) مشخص می‌شود. چندین عامل کنترل‌کننده مانند توپوگرافی (Kaveh, Mahdian, 2017; Mansuri, Karimi, 2017; Parvizi, Sokouti Oskoue & Masihabadi, 2014; Cardinael et al., 2017)، آب و هوا (Emamy & Parvizi, 2017; Muñoz-Rojas, Abd-Elmabod, Zavala, De la Rosa & Jordán, 2017)، نوع خاک (Li et al., 2017; Zhao et al., 2015; Kashi Zenouzi, Shafiee & Jafari, 2016)، عمق نمونه‌برداری (Li et al., 2017)، ترکیب کانی‌شناسی (Dwivedi et al., 2017)، نوع پوشش گیاهی (Komarov et al., 2017; Rousta, 2017)، نحوه استفاده از زمین و شیوه‌های مدیریتی (Wang et al., 2015) و برهم‌کنش بین آن‌ها میزان کربن ورودی و خروجی را کنترل و بر مقدار کربن آلی خاک تأثیر می‌گذارند. درک عواملی که بر ذخیره‌سازی کربن آلی در خاک تأثیر می‌گذارند برای مدیریت پایدار در

¹ Soil Organic Matter (SOM)

² Soil Organic Carbon (SOC)

کاربری اراضی بسیار مهم است. ارتفاع زمین از سطح دریا می‌تواند ذخیره کربن آلی را از طریق تغییر پارامترهای آب‌وهوایی، تغییر میزان فرسایش خاک، تغییر پوشش گیاهی و تغییر فرایندهای خاک‌سازی تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، ارزیابی تأثیر ارتفاع زمین بر ذخیره‌سازی کربن آلی برای برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار در کاربری اراضی ضروری است.

ذخیره‌سازی کربن، فرایندی است که در آن دی‌اکسید کربن جو در مخازن طبیعی یا مصنوعی مانند جنگل‌ها، اقیانوس‌ها و خاک ترسیب و ذخیره می‌شود (Gibbins & Chalmers, 2008). جنگل‌ها یکی از بزرگ‌ترین مخازن طبیعی کربن در زمین هستند و حدود ۳۰ درصد از ذخیره کربن جهانی را تشکیل می‌دهند. اهمیت ذخیره‌سازی کربن در جنگل‌ها به دلیل نقش آن‌ها در کاهش تغییرات اقلیمی در سال‌های اخیر مورد توجه زیاد قرار گرفته است. به‌علاوه جنگل‌ها خدمات اکوسیستمی متنوعی را ارائه می‌دهند که شامل حفظ تنوع زیستی، ذخیره‌سازی آب و حفاظت از خاک است. همچنین با ایجاد معاش برای جوامع محلی، حمایت از گردشگری و تولید محصولات چوبی و غیر چوبی به توسعه پایدار نیز کمک می‌کنند.

مطالعات متعدد نشان داده است که ارتفاع زمین بر توزیع و میزان ذخیره‌سازی کربن آلی در اکوسیستم‌های جنگلی تأثیر می‌گذارد (Zhu et al., 2010; Bangroo, Najar & Rasool, 2017). شیب و ارتفاع می‌تواند بر رطوبت، دما و در دسترس بودن مواد مغذی خاک تأثیر بگذارد که این عوامل به‌نوبه خود بر تجزیه مواد آلی و تشکیل کربن آلی در خاک تأثیرگذار است. چندین مطالعه نشان داده‌اند که ذخیره کربن آلی خاک با افزایش ارتفاع به دلیل تجمع مواد آلی در لایه‌های بالایی خاک و کاهش سرعت تجزیه افزایش می‌یابد (Zhang et al., 2019). آن‌ها اعلام نمودند که جنگل‌هایی که در ارتفاعات بیش‌تر واقع شده‌اند، معمولاً دارای دمای کمتر و بارندگی بیشتری هستند که باعث رشد بیشتر گیاهان از یک طرف و تجزیه کم‌تر مواد آلی خاک از طرف دیگر می‌شود. در نتیجه دی‌اکسید کربن بیشتری از جو جذب و در زیست‌توده گیاه ذخیره می‌شود که بعداً به‌صورت بقایای گیاهی به خاک اضافه می‌شود.

باین‌حال، مطالعات دیگر نشان داده‌اند که ذخیره کربن آلی خاک با افزایش شیب و ارتفاع به دلیل افزایش فرسایش و شستشوی خاک کاهش می‌یابد (Wang et al., 2015). آن‌ها در مطالعه خود نشان دادند که محتوای کربن آلی خاک با افزایش ارتفاع به دلیل دماهای کم‌تر و فصول رشد کوتاه‌تر که منجر به رشد کم‌تر گیاهان

می‌شود، کاهش می‌یابد. این نتایج متناقض نشان می‌دهد رابطه بین ارتفاع زمین و ذخیره‌سازی کربن آلی خاک پیچیده و بسته به شرایط خاص اکوسیستم جنگلی، نوع خاک و نوع پوشش‌های گیاهی متفاوت است.

ارتفاع زمین از سطح دریا، یک عامل کلیدی در تشکیل خاک است و باعث ایجاد یک رابطه قوی بین کربن آلی خاک و ویژگی‌های زمین در مقیاس‌های مزرعه‌ای می‌شود (Papiernik et al., 2007). اگرچه چندین مطالعه سعی کرده‌اند به رابطه بین کربن آلی خاک و ارتفاع زمین بپردازند، ولی اطلاعات کمی در مورد تعاملات آن‌ها وجود دارد (Senthilkumar, Kravchenko & Robertson, 2009). دو دلیل برای مقدار بیش‌تر مواد آلی در ارتفاعات کم‌تر گزارش شده است یکی این‌که در ارتفاعات کم‌تر در مقایسه با ارتفاعات بیش‌تر رطوبت نسبی هوا بیش‌تر است. دوم این‌که در ارتفاعات بیش‌تر مواد آلی از طریق رواناب و فرسایش به نقاط پایین‌تر منتقل می‌شود (Quideau, 2002). همچنین سطوح بالاتری از ماده آلی در شیب‌های شمالی در مقایسه با شیب‌های جنوبی به دلیل وجود دمای کم‌تر وجود دارد. کربن آلی خاک در نواحی تپه‌ای، عمدتاً تحت تأثیر نوع پوشش گیاهی و همچنین ارتفاع قرار می‌گیرد، زیرا ارتفاع تا حد زیادی بر عوامل اقلیمی، عمدتاً دما و رطوبت تأثیر می‌گذارد (Ahmad Dar & Somaiah, 2015). به‌طورکلی، مقدار کربن آلی خاک با افزایش ارتفاع تغییر می‌کند (Sinoga, Pariente, Diaz & Murillo, 2012; Choudhury, Fiyaz, Mohapatra & Ngachan, 2016)، زیرا متغیرهای آب‌وهوایی با ارتفاع تغییر می‌کنند. گاهی اوقات با افزایش ارتفاع، میزان بارندگی سالانه افزایش می‌یابد که این امر فرآیندها، ویژگی‌ها و توسعه خاک را کنترل می‌کند (Dahlgren, Boettinger, 1997; Huntington & Amundson, 1997) و تولید زیست‌توده گیاهی و کربن آلی خاک را افزایش می‌دهد (Sinoga et al., 2012). تغییرات ارتفاعی همچنین دما را تغییر می‌دهد که سرعت تجزیه و تجمع کربن آلی خاک را کنترل می‌کند (Choudhury et al., 2016). گروهی از محققین بیان کردند که در هند با افزایش میزان بارندگی، میزان کربن آلی خاک افزایش یافت اما با افزایش دما، میزان کربن آلی خاک کاهش یافت (Bhattacharyya et al., 2010). بنابراین، اقلیم تأثیر مستقیمی بر نوع و کمیت پوشش گیاهی، سرعت هوازدگی و شدت آب‌شویی دارد و در نتیجه کمیت و کیفیت کربن آلی خاک و کیفیت خاک را تعیین می‌کند (Dahlgren et al., 1997; Sinoga et al., 2012).

مدل‌سازی دینامیک کربن آلی خاک برای پیش‌بینی تغییرات کربن آلی در آینده تحت تأثیر سناریوهای متنوع تغییرات اقلیمی می‌تواند به درک اثرات متقابل ارتفاع زمین و اقلیم بر ذخیره‌سازی کربن آلی خاک کمک کند (Don et al., 2024). مدل‌های کربن آلی به‌عنوان ابزارهای ارزشمندی برای درک تعاملات پیچیده بین تغییر اقلیم، خاک و گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرند (Parton, Schimel, Cole & Ojima, 1987). با درک بهتر این فرایندها، توانایی ما در توسعه راهبردهای مؤثر برای کاهش تغییرات اقلیمی و ترویج توسعه پایدار نیز بهبود خواهد یافت (Aguilera, Lassaletta, Gattinger & Gimeno, 2013).

مدل Roth C^۱، مدل پرکاربردی برای پیش‌بینی دینامیک کربن آلی خاک در اکوسیستم‌های جنگلی در شرایط آب‌وهوایی متفاوت است. این مدل دینامیک کوتاه‌مدت را شبیه‌سازی می‌کند و ورودی‌های آن ماده آلی خاک، نرخ تجزیه و فرآیندهای کانی‌ساز را شامل می‌شود و می‌تواند برای شبیه‌سازی تغییرات کربن آلی خاک در شرایط محیطی و اقلیمی مختلف استفاده شود.

مطالعات متعددی از این مدل برای بررسی اثرات ارتفاع بر ذخیره‌سازی کربن آلی خاک استفاده کرده‌اند. به‌عنوان مثال، گروهی از محققین، از مدل Roth C برای شبیه‌سازی دینامیک کربن آلی خاک در یک اکوسیستم جنگلی کوهستانی در جنوب غربی چین استفاده کردند و دریافتند که ذخیره کربن آلی خاک با افزایش گرادیان شیب به دلیل افزایش فرسایش کاهش می‌یابد (Li et al., 2017). برخی دیگر طی مطالعه‌هایی در چین با استفاده از مدل Roth C نشان دادند که کربن آلی خاک در طول دهه‌های آینده به دلیل تغییر اقلیم کاهش می‌یابد (Wan, Lin, Xiong & Guo, 2011). گروهی مطالعه‌ای را با هدف آزمایش عملکرد مدل Roth C با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده از پنج نوع پوشش جنگلی هیرکانی (شمال ایران) و همچنین پیش‌بینی تغییرات کربن آلی خاک تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم انجام دادند (Soleimani, Hosseini, 2017). نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که مقادیر کربن آلی خاک شبیه‌سازی شده با داده‌های اندازه‌گیری شده همبستگی مناسبی (ضریب تعیین بین ۰/۶۴ تا ۰/۹۱) دارد که نشان‌دهنده کارایی مناسب مدل Roth C در این مناطق است. آن‌ها اعلام نمودند که تا سال ۲۰۹۹ به‌طور کلی ذخایر کربن آلی خاک تحت تمام پوشش‌های مورد مطالعه و سناریوهای تغییر اقلیم تعریف شده کاهش یافت.

¹ Rothamsted Carbon Model

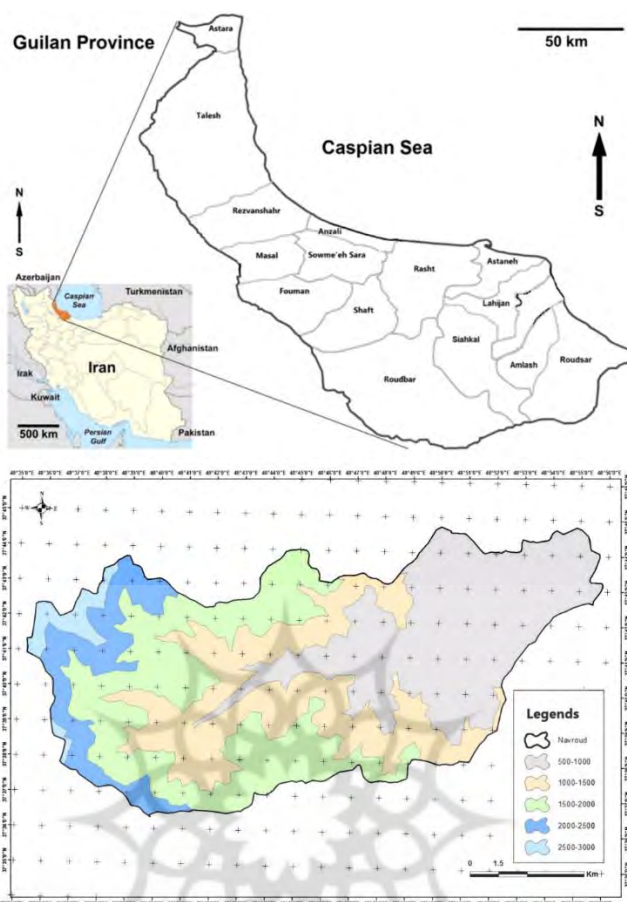
اما میزان کاهش کربن آلی خاک بین مدل‌های آب‌وهوایی، سناریوهای انتشار گاز گلخانه‌ای، دوره‌های زمانی و پوشش‌های مختلف گیاهی متفاوت بود.

اگرچه عامل ارتفاع زمین از سطح دریا نقش مهمی در مقدار کربن آلی خاک‌های جنگل دارد، ولی تأثیر تغییر اقلیم بر میزان تغییرات کربن آلی خاک در ارتفاعات مختلف ناشناخته است. لذا هدف تحقیق حاضر شبیه‌سازی رفتار کربن آلی خاک در ارتفاعات مختلف زمین در پاسخ به تغییر اقلیم است. مطالعه تغییرات کربن آلی نشان خواهد داد که در آینده این اکوسیستم‌ها چه وضعیتی خواهند داشت، آیا به منبعی برای تولید CO₂ اتمسفری تبدیل می‌شوند و یا مخزنی برای نگهداری دی‌اکسید کربن باقی خواهند ماند. به‌طور کلی مدل‌ها با ارائه اطلاعات در خصوص نحوه تغییر کربن آلی ذخیره شده در خاک که در پاسخ به عوامل آب‌وهوایی و مدیریتی اتفاق می‌افتد، نقش کلیدی در درک، مدیریت و کاهش اثر سو تغییر اقلیم دارند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در جنگل‌های شهرستان تالش که در مسیر اسالم به خلخال قرار دارد، انجام گرفته است (شکل ۱). شهرستان تالش از شهرستان‌های استان گیلان است که دارای اقلیم معتدل و مرطوب است. میزان بارندگی سالانه آن در ایستگاه هواشناسی آستارا (شمالی‌ترین نقطه) ۱۴۴۶ میلی‌متر و در ایستگاه هواشناسی رضوان‌شهر (جنوبی‌ترین نقطه) ۱۸۰۰ میلی‌متر است. مختصات جغرافیایی شهرستان تالش ۳۷.۷۹ درجه شمالی و ۴۸.۹۰ درجه شرقی است. جنگل‌های مورد مطالعه در ارتفاع ۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متری از سطح دریا قرار داشتند و مساحت آن‌ها حدود ۱۵۰ هزار هکتار بود. این جنگل‌ها زیستگاه ۱۵۰ گونه درختی (۳۶ گونه بومی) از جمله شمشاد هیرکانی (*Celtis caucasica*)، لهله خزری (*Alnus subcordata*)، آکاسیای ابریشمی (*Platycladus orientalis*)، بلوط (*Quercus brantii*)، دودو (*Juglans nigra*) و گردو (*Juglans regia*) می‌باشند.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ایران و استان گیلان

Fig.1. Geographical location of the study area in Iran and Gilan province

به کمک نقشه‌های جغرافیایی و تحلیل ارتفاعی در محیط نرم‌افزار QGIS از هر ۵۰۰ متر ارتفاع، یک طبقه ارتفاعی انتخاب و به دلیل نبود ایستگاه هواشناسی مجزا در هر طبقه ارتفاعی برای دریافت داده‌های هواشناسی (دما، بارش و تبخیر و تعرق)، از داده‌های شبکه‌بندی شده جهانی با قدرت تفکیک بالا در مرکز ملی تحقیقات جوی استفاده شد (ترا کلایمت). داده‌های این مجموعه از قدرت تفکیک بسیار بالایی برخوردار بودند که برای این مطالعه بسیار مناسب است. قدرت تفکیک مکانی متغیرهای آب‌وهوایی در این پایگاه به‌طور تقریبی ۴ کیلومتر است، به عبارت دیگر برای هر چهار کیلومتر در چهار کیلومتر داده‌های هواشناسی تخمین زده شده است که نشان از قدرت تفکیک بالا این پایگاه دارد. مقیاس زمانی داده‌های استفاده شده در این مطالعه سال‌های ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ می‌باشد. مطالعه حاضر چهار طبقه ارتفاعی (۵۰۰-۱۰۰۰، ۱۰۰۰-۱۵۰۰، ۱۵۰۰-۲۰۰۰، ۲۰۰۰-۲۵۰۰ متری) را شامل می‌شود، که برای به دست آوردن داده‌های

آب‌وهوای آن‌ها از داده‌های شبکه‌بندی شده جهانی استفاده گردید و شیپ فایل‌های مربوط به هر طبقه ارتفاعی به صورت مجزا و برحسب مقیاس متر استخراج شد.

در این پایگاه داده، مقادیر دما به طور مستقیم وجود نداشت. به همین دلیل به کمک دماهای بیشینه و کمینه در آن پایگاه میانگین دمای ماهیانه واقعی محاسبه گردید (ترا کلایمت).

از آنجاکه شیپ فایل‌های اولیه دارای مقیاس متریک بودند و مقیاس داده‌های شبکه‌ی جهانی بر حسب درجه بود، مقیاس داده‌های شیپ فایل‌ها با استفاده از نرم‌افزار متلب به مقیاس درجه تبدیل شد. سپس، با استفاده از توابع و اسکریپت‌های تعریف شده در محیط برنامه‌نویسی متلب برای هر شیپ‌فایل مرتبط با یک طبقه ارتفاعی، مقادیر بارش، تبخیر و تعرق و دمای حداکثر و حداقل استخراج و به سری‌های زمانی ماهانه تبدیل شدند. در نهایت با گرفتن میانگین سری‌های زمانی ماهانه، مقادیر میانگین دما، بارش و تبخیر و تعرق ماهانه برای هر طبقه ارتفاعی محاسبه شد.

مقادیر محاسبه شده میانگین بارش، دما و میزان تبخیر و تعرق ماه‌های مختلف سال به ترتیب در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است که مربوط به سال‌های ۱۹۵۸ تا سال ۲۰۲۲ هستند. در جدول ۴ نیز، متوسط ماهانه پارامترهای هواشناسی برای هر چهار طبقه ارتفاعی از سال ۱۹۵۸ تا سال ۲۰۲۲ ارائه شده است.

جدول ۱- میانگین بارندگی (میلی‌متر) ماه‌های مختلف سال در طبقات ارتفاعی مورد مطالعه.

Table1- Average rainfall (mm) for different months of the year in the elevation classes under study

Nov (آبان)	Oct (مهر)	Sep (شهریور)	Aug (مرداد)	Jul (تیر)	Jun (خرداد)	May (اردیبهشت)	Apr (فروردین)	Mar (اسفند)	Feb (بهمن)	Jan (دی)	Elev.(m) ارتفاع
187.33	82.44	69.85	23.60	29.64	30.52	64.46	154.60	157.41	147.40	130.79	500-1000
163.13	83.93	47.57	28.45	29.81	37.78	112.42	223.30	206.96	173.69	192.77	1000-1500
168.57	144.21	122.98	102.02	103.29	172.92	195.47	215.93	188.21	149.71	177.37	1500-2000
183.20	157.35	127.82	108.62	115.28	175.39	205.09	231.22	202.01	154.55	184.74	2000-2500

جدول ۲- میانگین دما (سانتی‌گراد) ماه‌های مختلف سال در طبقات ارتفاعی مورد مطالعه.

Table2- Average temperature (°C) for different months of the year in the elevation classes under study

Dec (آذر)	Nov (آبان)	Oct (مهر)	Sep (شهریور)	Aug (مرداد)	Jul (تیر)	Jun (خرداد)	May (اردیبهشت)	Apr (فروردین)	Mar (اسفند)	Feb (بهمن)	Jan (دی)	Elev.(m) ارتفاع
17.06	21.90	28.27	32.81	36.66	37.19	35.62	32.64	26.72	21.57	17.36	15.41	500-1000
11	15.62	22.50	27.46	31.12	31.84	29.11	24.93	19.33	13.28	10.04	9.15	1000-1500
7.45	12.52	18.73	23.18	28.87	28.63	26.16	22.49	16.69	10.86	7.21	5.56	1500-2000
6.50	11.35	18.35	23.02	26.76	26.89	24.53	20.19	14.56	8.38	5.10	4.26	2000-2500

جدول ۳- میانگین تبخیر تعرق (میلی‌متر) ماه‌های مختلف سال در طبقات ارتفاعی مورد مطالعه.

Table3- Average evapotranspiration (mm) for different months of the year in the elevation classes under study

Dec (آذر)	Nov (آبان)	Oct (مهر)	Sep (شهریور)	Aug (مرداد)	Jul (تیر)	Jun (خرداد)	May (اردیبهشت)	Apr (فروردین)	Mar (اسفند)	Feb (بهمن)	Jan (دی)	Elev.(m) ارتفاع
98.2	111	126	136.5	114.5	107	101.3	88.14	83.47	82.22	89.25	99.2	500-1000
102	106	123	139.3	121.7	106	98.34	85.36	82.22	81.78	84.97	97.1	1000-1500
73.9	87.8	102	131.1	105.7	98.8	94.21	84.37	62.37	56.54	73.42	84.0	1500-2000
63.5	67.2	70.1	83.94	84.84	73.6	59.84	51.92	43.34	39.76	46.47	56.3	2000-2500

جدول ۴- میانگین بارندگی، دما و تبخیر و تعرق سالیانه در طبقات ارتفاعی مورد مطالعه.

Table4- Average annual rainfall, temperature, and evapotranspiration in the elevation classes under study

تبخیر تعرق Evapotranspiration (mm)	دما Temperature (°C)	بارش Rainfall (mm)	ارتفاع Elevation (m)
1238.38	26.93	1247.26	500-1000
1231.15	20.45	148.10	1000-1500
1055.05	17.28	1937.41	1500-2000
740.76	15.83	2052.01	2000-2500

همان‌طور که در جدول‌ها دیده می‌شود، با افزایش ارتفاع منطقه متوسط بارندگی سالیانه روند افزایشی و میانگین درجه حرارت سالیانه روندی کاهشی دارد.

۲-۲- نمونه‌برداری خاک و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

برای بررسی تأثیر ارتفاع منطقه از سطح دریا بر ذخیره کربن آلی خاک چهار طبقه ارتفاعی مختلف در امتداد شیب شمالی منطقه مورد مطالعه، شامل ارتفاعات ۱۰۰۰-۵۰۰، ۱۵۰۰-۱۰۰۰، ۲۰۰۰-۱۵۰۰ و ۲۵۰۰-۲۰۰۰ متری از سطح دریا انتخاب شدند.

در هر طبقه ارتفاعی، حدود ۱۵ هکتار از اراضی جنگلی انتخاب و به سه قسمت پنج هکتاری تقسیم شد و هر قسمت به‌عنوان یک تکرار در نظر گرفته شد. سپس، در هر تکرار ۵ پروفیل حفر گردید و در هر پروفیل از عمق ۰-۳۵ سانتی‌متری خاک یک نمونه تهیه گردید (به دلیل سنگلاخ بودن خاک‌ها امکان نمونه‌برداری از اعماق بیش‌تر میسر نگردید). سپس نمونه‌های خاک به دست آمده از پروفیل‌های مختلف هر تکرار باهم ترکیب شدند و یک نمونه مرکب خاک تهیه گردید به‌طوری‌که در هر طبقه ارتفاعی ۳ نمونه مرکب خاک وجود داشت. با توجه به وجود چهار طبقه ارتفاعی در این پژوهش تعداد ۱۲ نمونه مرکب خاک جامعه

آماری این تحقیق را تشکیل می‌دادند. همچنین ۱۲ نمونه دست‌نخورده (عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر) نیز برای اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری خاک تهیه گردید.

پس از اتمام مرحله نمونه‌برداری، نمونه‌های خاک هوا خشک شدند و پس عبور از الک دو میلی‌متری برای اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی به آزمایشگاه منتقل شدند. در آزمایشگاه، کربن آلی به روش واکلی و بلک (Walkley & Black, 1934)، بافت خاک به روش هیدرومتر (Gee & Or, 2002) و جرم مخصوص ظاهری خاک به روش استوانه (Blake & Hartge, 1986) اندازه‌گیری شد.

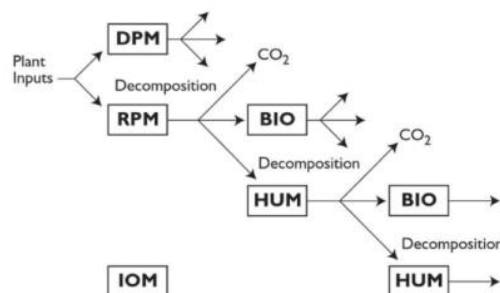
۲-۳- شبیه‌سازی رفتار کربن آلی خاک در سناریوهای مختلف آب‌وهوایی

برای مدل‌سازی رفتار کربن آلی خاک در سناریوهای مختلف آب‌وهوایی از مدل Roth C نسخه ۲.۱ استفاده گردید.

در این مدل، منحصرراً به عوامل خاکی توجه نشده و مقدار کربن گیاهی که سالیانه از طریق زیتوده گیاهی به خاک اضافه می‌شود، در مدل گنجانده شده است. با استفاده از این مدل می‌توان چگونگی تجزیه بقایای گیاهی وارده به خاک را در شرایط آب‌وهوایی مختلف مشخص نمود و تأثیر آن را بر کربن آلی خاک تعیین نمود (Ponce-Hernandez, Koohafkan & Antoine, 2004).

۲-۳-۱- ویژگی‌های مدل Roth C

مدل Roth C برای دینامیک کربن آلی در خاک‌های غیر باتلاقی طراحی شده است و تأثیر نوع خاک، دما، رطوبت و پوشش گیاهی را با استفاده از یک دوره ماهانه بر میزان کربن آلی خاک و کربن زیست‌توده میکروبی موردبررسی قرار می‌دهد (Kaczynski, Siebielec, Hanegraaf & Korevaar, 2017). در مدل Roth C مواد آلی به پنج جز اساسی، شامل ماده آلی خثشی (IOM)، ماده گیاهی قابل تجزیه (DPM)، ماده گیاهی مقاوم به تجزیه (RPM)، زیست‌توده میکروبی (BIO) و مواد آلی هوموسی شده (HUM) تقسیم می‌شود (Jenkinson & Coleman, 2008) (شکل ۲). دو جزء ماده گیاهی قابل تجزیه و ماده گیاهی مقاوم به تجزیه مربوط به بقایای گیاهی ورودی به خاک بوده و دو جزء زیست‌توده میکروبی و مواد آلی هوموسی شده مربوط به مواد آلی خاک است (Nemoto, 2010).



شکل ۲- ساختار مدل (Roth C)

Fig.2. Structure of the Roth C model (Jenkinson & Coleman, 2008)

برای محاسبه کربن آلی ذخیره شده در خاک بر حسب تن بر هکتار از رابطه (۱) برای هر چهار طبقه ارتفاعی استفاده شد (Nieto, Castro & Fernández-Ondoño, 2013; Qiu et al., 2013).

$$\text{رابطه ۱: } CS = 10000 \times \%SOC \times Bd \times d$$

که در این رابطه، CS: کربن آلی ذخیره شده در خاک بر حسب کیلوگرم بر هکتار، SOC: درصد کربن آلی خاک، Bd: جرم مخصوص ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب و d: عمق نمونه‌برداری بر حسب سانتی متر است.

۲-۳-۲- متغیرهای ورودی مدل Roth C

بارندگی و تبخیر و تعرق ماهانه: داده‌های بارندگی (میلی‌متر) و تبخیر (میلی‌متر) از سطح آزاد برای محاسبه کمبود رطوبت خاک سطحی (TSMD) به کار گرفته می‌شوند و دستیابی به آن‌ها برای محاسبه کمبود رطوبت خاک سطحی آسان‌تر از اندازه‌گیری ماهانه کمبود رطوبت خاک سطحی واقعی است. اگر میزان تبخیر از سطح آزاد در دسترس نباشد، می‌توان متوسط تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه را با استفاده از داده‌های هواشناسی تعیین و به کمک رابطه (۲) تبخیر از سطح آزاد را محاسبه و شبیه‌سازی نمود (Jenkinson & Coleman, 2008).

$$\text{رابطه ۲: } \text{Evaporation} = \text{'Mean potential transpiration'}/0.75$$

که در این رابطه، Evaporation: تبخیر از سطح آزاد و Mean potential transpiration: متوسط تبخیر تعرق پتانسیل می‌باشد.

متوسط درجه حرارت ماهانه هوا: در این مدل درجه حرارت هوا بیشتر از دمای خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد، زیرا درجه حرارت هوا به آسانی قابل دستیابی است. در سطح خاک، متوسط درجه حرارت ماهانه هوا نشان‌دهنده متوسط درجه حرارت ماهانه خاک است (Jenkinson & Coleman, 2008). مقدار رس: درصد رس برای محاسبه مقدار آب در دسترس گیاه که در خاک می‌تواند نگه داشته شود، به کار می‌رود. همچنین، درصد رس بر سرعت تجزیه مواد آلی خاک نیز تأثیرگذار است (Jenkinson & Coleman, 2008).

نسبت DPM/RPM: نسبت ماده گیاهی قابل تجزیه به ماده گیاهی مقاوم به تجزیه از جمله شاخص‌های تعیین کننده نرخ تجزیه مواد گیاهی ورودی به خاک می‌باشد. پوشش خاک: این متغیر برای نشان دادن مزروعی بودن یا بایر بودن خاک ضروری است که در خاک مزروعی سطح خاک دیرتر خشک می‌شود (Jenkinson & Coleman, 2008). میزان بقایای گیاهی ورودی به خاک: مقدار بقایای گیاهی که ماهانه به خاک اضافه می‌شود (تن در هکتار در ماه) در مدل وارد می‌شود. مقدار کود دامی FYM: این ورودی متفاوت از ورودی بقایای تازه گیاهی در نظر گرفته شده است (تن در هکتار در ماه).

عمق لایه نمونه‌برداری شده خاک: به طور معمول خاک سطحی از عمق صفر تا ۲۳ سانتی‌متر است که بسته به شرایط منطقه و نوع پروژه عمق نمونه‌برداری می‌تواند متفاوت باشد. مدل Roth C به مقادیر پارامترهای HUM, BIO, RPM, DPM و IOM نیاز دارد که مقدار اولیه آن‌ها شناخته شده نیست و فقط مقدار کربن آلی خاک پارامتر قابل دسترس و اندازه‌گیری می‌باشد. به منظور دستیابی به مقادیر اجزا مختلف کربن آلی خاک، مدل می‌تواند مقادیر این پارامترها را از مقدار کربن آلی خاک تخمین و شبیه‌سازی کند. به منظور دستیابی به نتایج واقعی کالیبره کردن مدل از اهمیت بالایی برخوردار است و تجزیه‌های آزمایشگاهی کربن آلی خاک باید دقیق و قابل اعتماد باشد تا بتوان نتایج رضایت‌بخشی را از مدل دریافت نمود.

مدل Roth C ویژگی‌هایی مطلوبی مانند قابلیت یادگیری، قابلیت تعمیم، ساختار ساده (Nemoto, 2010) دسترسی آسان به اطلاعات، سهولت استفاده از مفروضات، تعداد کم پارامترهای مورد نیاز (Zimmermann, Leifeld & Fuhrer, 2007) و قابلیت اجرا برای یک منطقه وسیع (Shirato & Yokozawa, 2005) را دارد. این ویژگی‌ها کارایی بالایی به مدل، در بعضی از کاربردها مانند سازگاری با شرایط منطقه، سطح دقت تخمین‌های مدل و به‌طورکلی در هر جا که نیاز به پیش‌بینی میزان کربن آلی خاک با استفاده از بقایای گیاهی و کوددهی باشد، می‌بخشد.

۲-۳-۳- سناریوهای انتخاب شده برای مدل Roth C

بر اساس پیش‌بینی‌های انجام‌شده، اقلیم کشور ایران و همچنین استان گیلان در حال تغییر بوده و در آینده با افزایش دما و کاهش بارندگی مواجه خواهد شد (Kazemi Rad & Mohammadi, 2016). آن‌ها با تعریف سناریوهای A2 و B1 برای مدل‌های گردش عمومی جو MPEH5 و HADCM3 و با استفاده از مدل LARS-WG خروجی این مدل‌ها را ریز مقیاس نموده و میزان تغییرات دمای هوا و بارندگی را برای هر ۱۰ سال پیش‌بینی کردند. براساس نتایج پژوهش آن‌ها، به ازای هر ۱۰ سال دمای هوا ۰/۴ سانتی‌گراد افزایش و میزان بارش ۲/۱۵ میلی‌متر کاهش می‌یابد. لذا یکی از سناریوهای تعریف شده برای مدل Roth C نتایج به‌دست آمده از مطالعه کاظمی و همکاران (Kazemi Rad & Mohammadi, 2016) است که وضعیت ترسیب کربن را در شرایط وقوع تغییر اقلیم در منطقه مورد مطالعه و ارزیابی قرار می‌دهد. جدول ۵ سناریوهای تعریف شده برای مدل Roth C را نشان می‌دهد.

جدول ۵- سناریوهای در نظر گرفته شده برای مدل Roth C.

Table5- Scenarios considered for the Roth C model

سناریو Scenario	مدیریت Management	بازه زمانی (میلادی) Time period
-	شرایط کنونی Current conditions	1958-2022
1	حفظ وضعیت کنونی Maintaining the current conditions	2022-2102
	تغییر اقلیم با افزایش ۰/۴ سانتی‌گراد دما و کاهش ۲/۱۵ میلی‌متر بارندگی به ازای هر ۱۰ سال	
2	Climate change with a 0.4°C increase in temperature and a 2.15 mm decrease in rainfall per decade	2022-2102

	تغییر اقلیم با کاهش ۰/۴ سانتی‌گراد دما و افزایش ۲/۱۵ میلی‌متر بارندگی به ازای هر ۱۰ سال	
3	Climate change with a 0.4°C decrease in temperature and a 2.15 mm increase in rainfall per decade	2022-2102

سناریوهای انتخاب شده در مدل برای سال‌های ۲۰۲۲ الی ۲۱۰۲ شامل حفظ وضعیت کنونی (سناریو ۱)، تغییر اقلیم با افزایش دمای هوا و کاهش میزان بارش به ازای هر ۱۰ سال (سناریو ۲) و تغییر اقلیم با کاهش دمای هوا و افزایش میزان بارش به ازای هر ۱۰ سال (سناریو ۳) هستند.

۲-۳-۴- کالیبراسیون مدل Roth C

با تغییر فاکتورهای اقلیمی (دما و بارندگی) که از ورودی‌های مدل می‌باشند و نیز نوع پوشش خاک، ضرایب تجزیه مواد آلی مرتبط با دما و پوشش خاک به‌صورت خودکار درون مدل تغییر می‌یابد. بنابراین با وارد کردن اطلاعات اقلیمی مربوط به طبقه ارتفاعی اول در مدل، سرعت تجزیه ماهیانه وابسته به دما، رطوبت خاک و وضعیت پوشش گیاهی برای منطقه مورد مطالعه تغییر می‌یابد. از آنجا که میزان کربن آلی خاک به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری می‌گردد این پارامتر در کالیبراسیون مدل Roth C از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با وارد کردن میزان کربن آلی خاک در مدل میزان کربن ورودی از طریق بقایای گیاهی توسط مدل تخمین و شبیه‌سازی می‌شود. با تغییر میزان کربن ورودی به خاک از طریق بقایای گیاهی، مدل را به‌گونه‌ای کالیبره می‌کنیم که میزان کربن آلی تخمین زده شده توسط مدل با میزان کربن آلی اندازه‌گیری شده برابر یا تقریباً مساوی شود.

۲-۳-۵- اعتبارسنجی مدل Roth C

برای اعتبارسنجی، مقادیر ذخیره کربن آلی خاک شبیه‌سازی شده توسط مدل با مقادیر محاسبه شده در مناطق ارتفاعی دوم، سوم و چهارم مقایسه شد و برای انجام این مقایسه و نشان دادن میزان انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده و محاسبه شده، از رگرسیون خطی (Su, Yan & Tsai, 2012) و شاخص‌های آماری ضریب تبیین (Menard, 2000) (رابطه ۳)، ضریب همبستگی پیرسون (Cohen et al., 2009) (رابطه ۴)، جذر میانگین مربعات خطا (Chai & Draxler, 2014) (رابطه ۵) و راندمان مدل‌سازی (Krause, Boyle & Bäse, 2005) (رابطه ۶) استفاده گردید که برای انجام این محاسبات از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ استفاده شد.

ارتفاع	مقدار	مقدار	مقدار	ذخیره کربن	جرم مخصوص	هدایت الکتریکی
Altitude (m)	شن Sand (%)	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	آلی Organic Carbon Stocks (t/ha)	ظاهری خاک Soil bulk density (gr/cm ³)	اسیدیته PH
				بافت خاک Soil Texture		Electrical Conductivity (ds/m)

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

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

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

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \sigma)^2} \quad \text{رابطه ۶}$$

۲-۴- آنالیزهای آماری

به منظور بررسی تأثیر ارتفاع منطقه بر ذخیره کربن آلی خاک از طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار استفاده گردید. تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۲ انجام شد (Field, 2024).

۳- نتایج و بحث

اطلاعات مربوط به مقادیر شن، سیلت و رس، نوع بافت، ذخیره کربن آلی، جرم مخصوص ظاهری، اسیدیته و هدایت الکتریکی برای هر چهار طبقات ارتفاعی در جدول ۶ نشان داده شده است. خاک‌های جنگلی مورد مطالعه دارای ویژگی‌های یکسانی بودند و از لحاظ میزان رس و نوع بافت، مشابه بودند. همگی فاقد آهک بودند و واکنش اسیدی داشتند و مقدار شوری آن‌ها کم بود.

جدول ۶- اطلاعات مربوط به مقادیر شن، سیلت و رس، نوع بافت، ذخیره کربن آلی، جرم مخصوص ظاهری، اسیدیته و هدایت الکتریکی برای هر چهار طبقه ارتفاعی مورد مطالعه

Table 6- Data on sand, silt, clay content, texture type, organic carbon stock, bulk density, acidity, and electrical conductivity for each of the four elevation classes under study

0.42	5.49	1.29	44.23	Silty Clay Loam	43.40	39.45	17.15	500-1000
0.36	5.44	1.14	67.20	Silty Clay Loam	49.03	37.90	13.07	1000-1500
0.26	5.29	1.10	79.47	Silty Clay Loam	47.30	39.01	13.69	1500-2000
0.19	5.19	1.05	97.46	Silty Clay Loam	49.75	39.35	10.90	2000-2500

نتایج تجزیه واریانس مربوط به اثر ارتفاع منطقه از سطح دریا، بر ذخیره کربن آلی خاک‌ها در جدول ۷ و نتایج مقایسه میانگین‌ها در جدول ۸ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که اثر عامل ارتفاع از سطح دریا بر غلظت و ذخیره کربن آلی خاک در سطح یک درصد ($P \geq 0.01$) معنی‌دار است (جدول ۷) و با افزایش ارتفاع از سطح دریا، غلظت و ذخیره کربن آلی خاک‌ها نیز افزایش یافتند. به‌طوری‌که بیش‌ترین مقادیر آن‌ها مربوط به طبقه ارتفاعی ۲۵۰۰-۲۰۰۰ متری به میزان ۲۰.۶۲٪ و ۹۷.۴۶ تن بر هکتار و کم‌ترین مقادیر آن‌ها، مربوط به طبقه ارتفاعی ۵۰۰-۱۰۰۰ متری به میزان ۰.۹۴٪ و ۴۴.۲۳ تن بر هکتار بود (جدول ۸). نتیجه این پژوهش با نتیجه بسیاری از پژوهش‌های دیگر در مناطق مختلف دنیا هم‌خوانی دارد (Dieleman, Venter, Ramachandra, Krockenberger & Bird, 2013; Banday, Bhardwaj & Pala, 2019; Zhang et al., 2021).

یک پژوهش در مغولستان دلیل افزایش کربن آلی خاک در ارتفاعات بالاتر را ناشی از افزایش زیست‌توده گیاهی در اثر بارش‌های بیشتر بیان کرده است (Smith et al., 1997). در جدول ۹ نیز نتایج آزمون همبستگی پیرسون بین ارتفاع از سطح دریا و بارندگی منطقه با غلظت و ذخیره کربن آلی خاک ارائه شده است و همان‌طور که ملاحظه می‌شود بین غلظت و ذخیره کربن آلی خاک با ارتفاع منطقه از سطح دریا $r = 0.993^{***}$ و $r = 0.958^{***}$ و میزان بارندگی $r = 0.960^{**}$ همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد. در پژوهشی دیگری که در ارتفاعات شمال غربی هیمالیا انجام شد، افزایش میزان کربن آلی خاک با افزایش ارتفاع را به‌سرعت پایین تجزیه مواد آلی در ارتفاعات نسبت داده شد (Banday et al., 2019). به دلیل کاهش دما در ارتفاعات بالاتر، فعالیت میکروبی کندتر شده و در نتیجه تجزیه مواد آلی و هدر رفت آن کاهش می‌یابد (Yang, Mohammad, Feng, Zhou & Fang, 2007). همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، در این پژوهش نیز با افزایش ارتفاع از سطح دریا، متوسط دمای سالیانه منطقه کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار متوسط دمای سالیانه مربوط به طبقه ارتفاعی ۵۰۰-۱۰۰۰ متری به میزان ۲۶.۹۳ سانتی‌گراد و کم‌ترین مقدار آن مربوط به طبقه ارتفاعی ۲۰۰۰-۲۵۰۰ متری به مقدار ۱۵.۸۳ سانتی‌گراد است که این کاهش دما در ارتفاعات بالاتر، باعث کاهش سرعت تجزیه مواد آلی و در نتیجه بالا رفتن مقدار ذخیره آن می‌شود

(Li, Wang, Endo, Zhao & Kakubari, 2010; Deng, Liu & Shangguan, 2014; Njeru et al., 2017).

جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۸) نشان می‌دهد بیش‌ترین غلظت و ذخیره کربن آلی در خاک‌های واقع شده در طبقه ارتفاعی ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متری به میزان ۲.۶۲ درصد و ۹۷.۴۶ تن بر هکتار اندازه‌گیری شد که به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از غلظت و ذخیره کربن آلی اندازه‌گیری شده در سایر طبقات ارتفاعی بود. با کاهش ارتفاع اراضی از سطح دریا غلظت و ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. به‌طوری‌که کم‌ترین غلظت و ذخیره کربن آلی به میزان ۰.۹۴ درصد و ۴۴.۲۳ تن بر هکتار در طبقه ارتفاعی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر اندازه‌گیری شد (جدول ۸).

جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس تأثیر ارتفاع از سطح دریا منطقه بر غلظت و ذخیره کربن آلی و ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی در منطقه مورد مطالعه.

Table 7- Results of variance analysis on the impact of altitude above sea level on organic carbon concentration and stock in forest soils in the study area

میانگین مربعات Mean square			منبع تغییرات S.O.V
ذخیره کربن آلی Organic Carbon Stocks	درصد کربن آلی خاک Organic Carbon Content	درجه آزادی df	
**1479.223	1.487 **	3	ارتفاع Altitude
0.209	0.026	6	خطا Error

*, **, و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و غیرمعنی‌دار.

جدول ۸- مقایسه میانگین‌های بررسی تأثیر ارتفاع منطقه بر غلظت و ذخیره کربن آلی خاک.

Table 8- Comparison of means regarding the effect of altitude on organic carbon concentration and stock in soil

ارتفاع Altitude				ویژگی‌های خاک Soil properties
2000-2500	1500-2000	1000-1500	500-1000	
2.62 ^a	2.05 ^b	1.68 ^c	0.94 ^d	درصد کربن آلی Organic Carbon Content (%)
97.46 ^a	79.47 ^b	67.20 ^c	44.23 ^d	ذخیره کربن آلی Organic Carbon Stocks (t/ha)

حروف متفاوت نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد در آزمون دانکن است.

جدول ۹- ضرایب همبستگی پیرسون (r) برای ارتفاع از سطح دریا، بارش و دما با غلظت و ذخیره کربن آلی اندازه‌گیری شده در مورد مطالعه.

Table 9- Pearson correlation coefficients (r) for altitude, precipitation, and temperature with measured organic carbon concentration and stock in the study area

ذخیره کربن آلی Organic Carbon Stocks	درصد کربن آلی Organic Carbon Content	
0.993**	0.993**	ارتفاع Altitude
0.960*	0.958*	بارش Precipitation
-0.971*	0.970*	دما Temperature

*, **, ns به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و غیرمعنی‌دار.

۳-۱- کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل

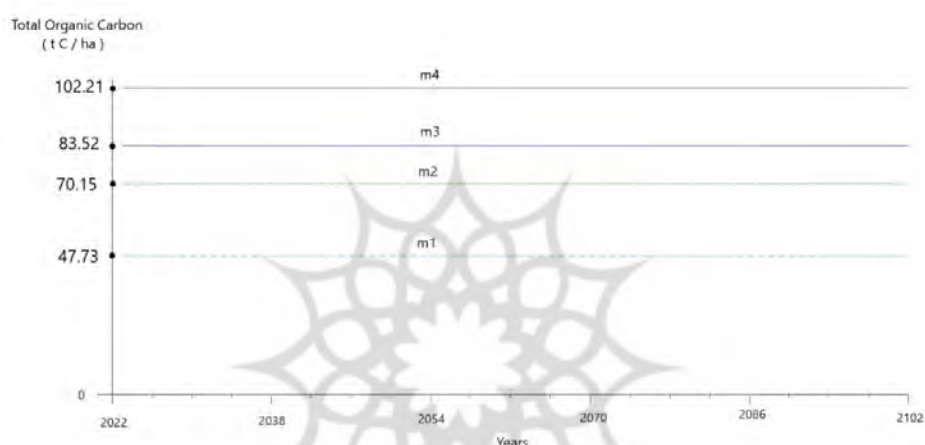
نتایج به‌دست آمده از کالیبراسیون مدل برای ذخیره کربن آلی خاک در اولین طبقه ارتفاعی منطقه مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ذخیره کربن آلی شبیه‌سازی شده توسط مدل با مقدار اندازه‌گیری شده آن تقریباً برابر است. ذخیره کربن آلی خاک در اولین طبقه ارتفاعی منطقه مورد مطالعه به میزان، ۴۴.۲۳ تن بر هکتار اندازه‌گیری شده است و مدل نیز مقدار ۴۷.۷۳ تن بر هکتار را شبیه‌سازی کرده است که مدل مقدار ۳.۵ تن بر هکتار کربن آلی بیشتری را شبیه‌سازی کرده است (شکل ۳).



شکل ۳- خروجی مدل برای ذخیره کربن آلی در طبقه ارتفاعی اول منطقه مورد مطالعه تا سال ۲۱۰۲.

Fig.3. Model output for organic carbon stock in the first elevation class of the study area until 2102.

ذخیره کربن آلی خاک مربوط به سه طبقه ارتفاعی دیگر بعد از اعمال کالیبراسیون به مدل داده شد تا دقت مدل در شبیه‌سازی ذخیره کربن آلی خاک، مورد ارزیابی قرار گیرد. ذخیره کربن آلی (تن بر هکتار) اندازه‌گیری شده برای طبقات ارتفاعی دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۶۷.۲۰، ۷۹.۴۷ و ۹۷.۴۶ و مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل برای این طبقات ارتفاعی به ترتیب ۷۰.۱۵، ۸۳.۵۲ و ۱۰۲.۲۱ است. بدین ترتیب، مدل برای طبقات ارتفاعی دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۲.۹۵، ۴.۰۵ و ۴.۷۵ تن بر هکتار کربن آلی بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده، نشان می‌دهد (شکل ۴).

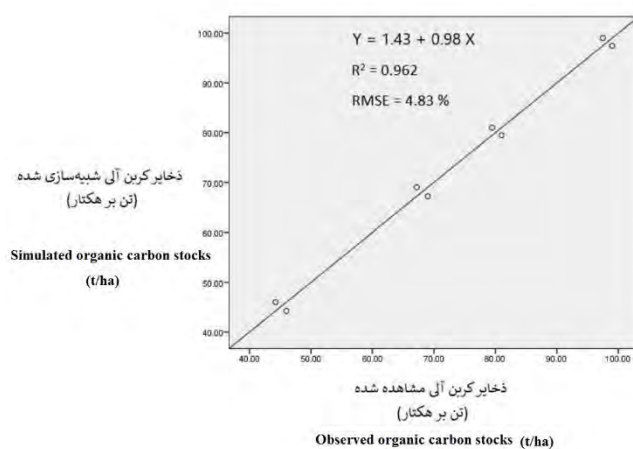


شکل ۴- خروجی مدل برای ذخیره کربن آلی خاک در هر چهار طبقه ارتفاعی در منطقه مورد مطالعه تا سال ۲۱۰۲.

Fig.4. Model output for organic carbon stock in soil for all four elevation classes in the study area until 2102

در شکل ۴، نمودارهای m1، m2، m3 و m4 به ترتیب مربوط به طبقات ارتفاعی اول، دوم، سوم و چهارم هستند که نشان می‌دهند ذخیره کربن آلی خاک ارتفاعات مختلف با محیط به حالت تعادل است و با گذشت زمان تغییر نمی‌کند.

نتایج مربوط به رگرسیون خطی در شکل ۵ و شاخص‌های آماری ضریب تبیین و ضریب همبستگی پیرسون، جذر میانگین مربعات خطا و همچنین راندمان مدل‌سازی که برای اعتبارسنجی مدل لازم می‌باشند، در جدول ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۵- اعتبارسنجی مدل با مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده ذخایر کربن آلی در هر چهار طبقه ارتفاعی در سال ۲۰۲۲.

Fig.5. Model validation by comparing simulated and observed organic carbon stock data in all four elevation classes in 2022

جدول ۱۰- شاخص‌های آماری محاسبه شده برای اعتبارسنجی مدل.

Table 10- Statistical indices calculated for model validation

Statistical Indices شاخص‌های آماری				پارامتر
راندمان مدل‌سازی	جذر میانگین مربعات خطا	ضریب تبیین	ضریب همبستگی	Parameter
Modeling efficiency	RMSE	Coefficient of determination	Correlation	
0.94	4.83	0.95	0.97	کربن آلی
				Organic Carbon

نتایج نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند با دقت بسیار بالا ذخیره کربن آلی خاک را در منطقه مورد مطالعه شبیه‌سازی کند. حداکثر اختلاف بین داده‌های ذخیره کربن آلی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برابر با ۴.۷۵ تن بر هکتار (۴.۶۵ درصد) که مربوط به طبقه ارتفاعی چهارم است و کمترین اختلاف نیز برای طبقه ارتفاعی دوم به میزان ۲.۹۵ تن بر هکتار (۴.۲۰ درصد) به دست آمد. وجود ضریب تبیین ($R^2 = 0.95$) نشان می‌دهد ۹۵ درصد تغییرات ذخیره کربن شبیه‌سازی شده توسط مدل از تغییرات ذخیره کربن اندازه‌گیری شده منشأ می‌گیرد و اختلاف واریانس مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی کم می‌باشد (Smith et al., 1997). ضریب همبستگی برای ذخیره کربن آلی شبیه‌سازی شده توسط مدل بزرگ‌تر از صفر و برابر با ۰.۹۷ است که نشان‌دهنده درجه بالایی از ارتباط و همبستگی مثبت بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده است.

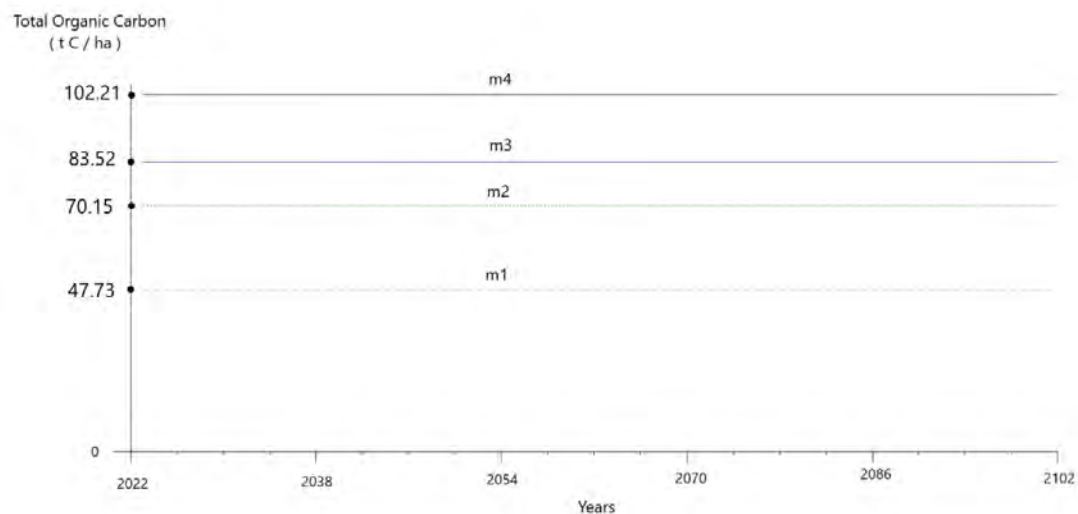
جذر میانگین مربعات خطا در حد اطمینان ۹۵ درصد برای ذخایر کربن آلی خاک برابر ۴۸۳ بود. محققین از جذر میانگین مربعات خطا به عنوان مهم‌ترین فاکتور در ارزیابی مدل استفاده کردند (Farina, Coleman & Whitmore, 2013). راندمان مدل‌سازی نیز برابر ۰.۹۴ و مثبت بود که نشان می‌دهد که این مدل دقیق روند تغییر ذخایر کربن آلی خاک را در چهار طبقه ارتفاعی مورد مطالعه توصیف می‌کند.

۳-۲- شبیه‌سازی سناریوهای مختلف توسط مدل

سناریوهای انتخاب شده برای مدل برای سال‌های ۲۰۲۲ الی ۲۱۰۲ شامل حفظ وضعیت کنونی (سناریو ۱)، تغییر اقلیم با افزایش دمای هوا و کاهش میزان بارش به ازای هر ۱۰ سال (سناریو ۲) و تغییر اقلیم با کاهش دمای هوا و افزایش میزان بارش به ازای هر ۱۰ سال (سناریو ۳) می‌باشند.

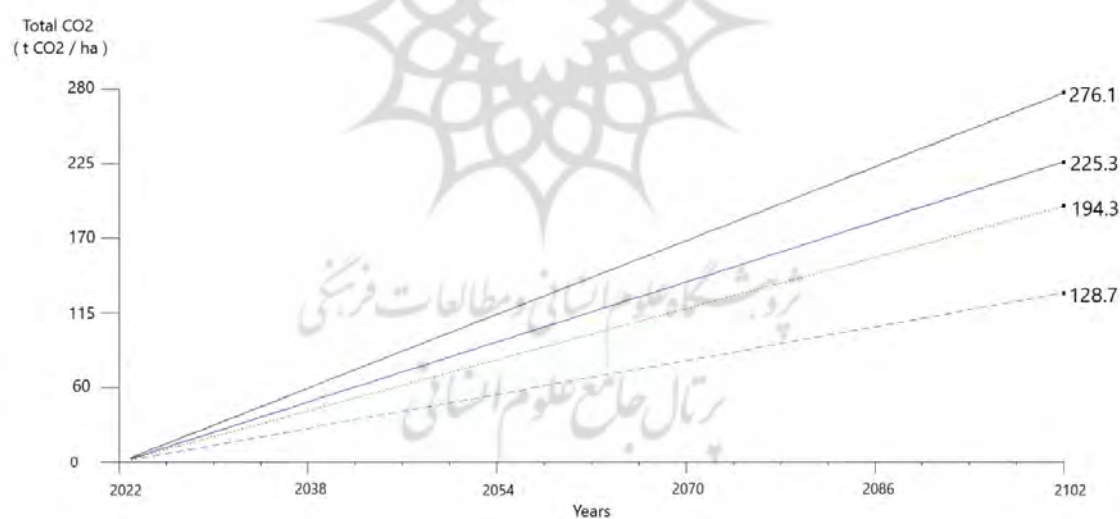
۳-۲-۱- سناریو اول (سناریو بدون تغییر اقلیم)

در سناریو اول، که حفظ وضعیت کنونی است نتیجه مدل حاکی از در تعادل بودن ذخیره کربن آلی خاک با محیط دارد (شکل ۶). به این صورت که مقدار کربن ورودی با خروجی برابر است و ذخیره کربن آلی خاک با زمان تغییر نمی‌کند. در شکل ۶، نمودارهای m_1 ، m_2 ، m_3 و m_4 به ترتیب مربوط به طبقات ارتفاعی اول، دوم، سوم و چهارم هستند که نشان می‌دهد ذخیره کربن آلی خاک با محیط در حالت تعادل است و قدرمطلق مقدار ذخیره کربن آلی در طبقات ارتفاعی مختلف به دلیل متفاوت بودن شرایط آب‌وهوایی، مختلف است ولی در هر سال مقداری دی‌اکسید کربن (CO_2) تولید می‌شود که همان کربن خروجی است و مدل نشان می‌دهد که مقدار تجمعی دی‌اکسید کربن با گذر زمان افزایش می‌یابد (شکل ۷). علاوه بر این مقدار CO_2 تولیدی در هر طبقه ارتفاعی بسته به شرایط آب‌وهوایی آن منطقه متفاوت است و از ۲۷۶.۱ تن بر هکتار در سال در بالاترین طبقه ارتفاعی تا ۱۲۸.۷ تن بر هکتار در سال در پایین‌ترین طبقه ارتفاعی تغییر می‌کند (شکل ۷).



شکل ۶- خروجی مدل برای ذخیره کربن آلی خاک در هر چهار طبقه ارتفاعی تا سال ۲۱۰۲ (سناریو بدون تغییر اقلیم).

Fig.6. Model output for organic carbon stock in soil in all four elevation classes until 2102 (no climate change scenario)

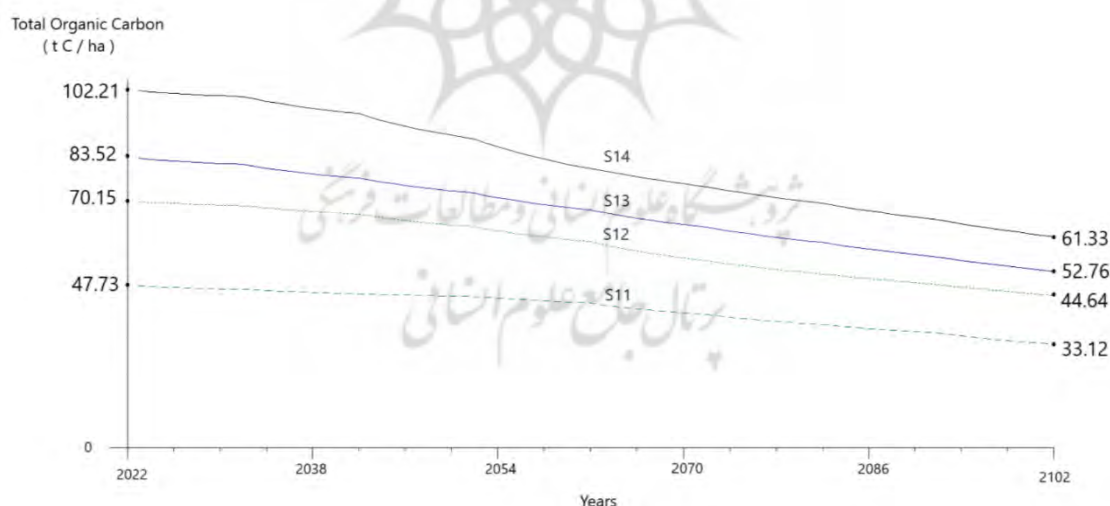


شکل ۷- خروجی مدل برای دی اکسید کربن تجمعی تا سال ۲۱۰۲ در هر چهار طبقه ارتفاعی در منطقه مورد مطالعه (سناریو بدون تغییر اقلیم).

Fig.7. Model output for cumulative carbon dioxide until 2102 in all four elevation classes in the study area (no climate change scenario)

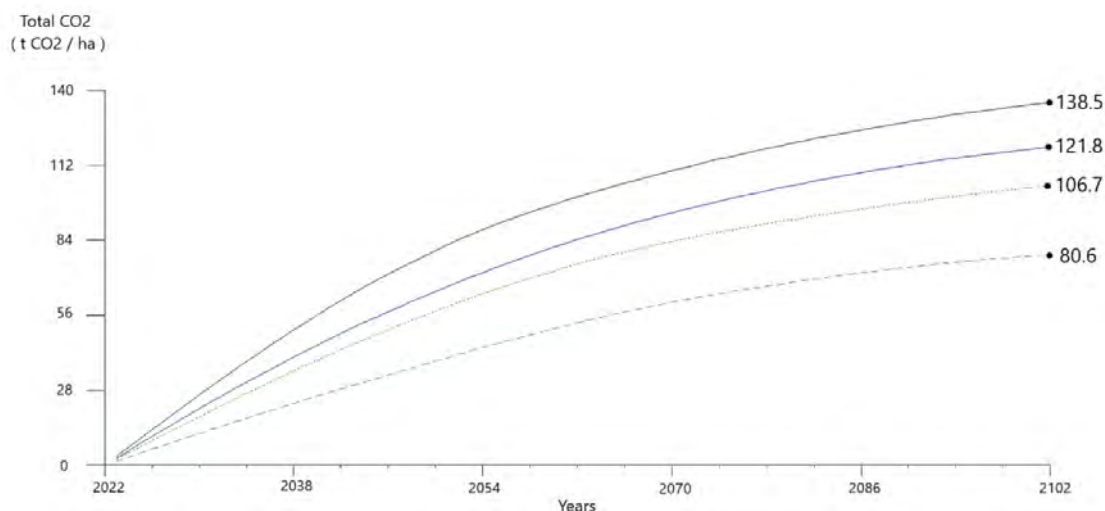
۳-۲-۲- سناریو دوم (سناریو با تغییر اقلیم)

در سناریو دوم تغییر اقلیم با افزایش ۰.۴ سانتی‌گراد دما و کاهش ۲.۱۵ میلی‌متر بارش به ازای هر ۱۰ سال اعمال شد. مدل نشان داد که تا سال ۲۱۰۲ میلادی، میزان ذخیره کربن آلی خاک نسبت به وضعیت کنونی (سناریو ۱) کاهش می‌یابد (شکل ۸). بر اساس این سناریو تا پایان سال ۲۱۰۲ میلادی در طبقات ارتفاعی اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۳۳.۱۲، ۴۴.۶۴، ۵۲.۷۶ و ۶۱.۳۳ تن بر هکتار ذخیره کربن آلی برآورد شد (شکل ۸) که به ترتیب ۳۳.۵۴، ۳۶.۳۶، ۳۶.۸۳ و ۴۰.۰۱ درصد کم‌تر از ذخیره کربن آلی طبقه ارتفاعی مشابه در سناریو اول می‌باشد. در شکل ۸، نمودارهای s11، s12، s13 و s14 به ترتیب شبیه‌سازی مدل از ذخیره کربن آلی در طبقات ارتفاعی اول، دوم، سوم و چهارم با اعمال سناریو دوم است و همان‌طور که ملاحظه می‌شود کاهش ذخیره کربن آلی برای نقاط مرتفع‌تر بیش‌تر است (شکل ۸). نمودار تجمعی دی‌اکسید کربن (CO₂) مربوط به سناریو دوم در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در سناریو دوم نیز مقدار تجمعی دی‌اکسید کربن با گذر زمان افزایش می‌یابد ولی مقدار تولید آن کم‌تر از سناریو اول است که این امر به دلیل کاهش میزان کربن ورودی به خاک است (شکل ۹).



شکل ۸- خروجی مدل برای ذخیره کربن آلی خاک در هر چهار طبقه ارتفاعی تا سال ۲۱۰۲ در منطقه مورد مطالعه با اعمال تغییرات اقلیمی (سناریو دوم).

Fig.8. Model output for organic carbon stock in soil in all four elevation classes until 2102 in the study area with climate change (second scenario)



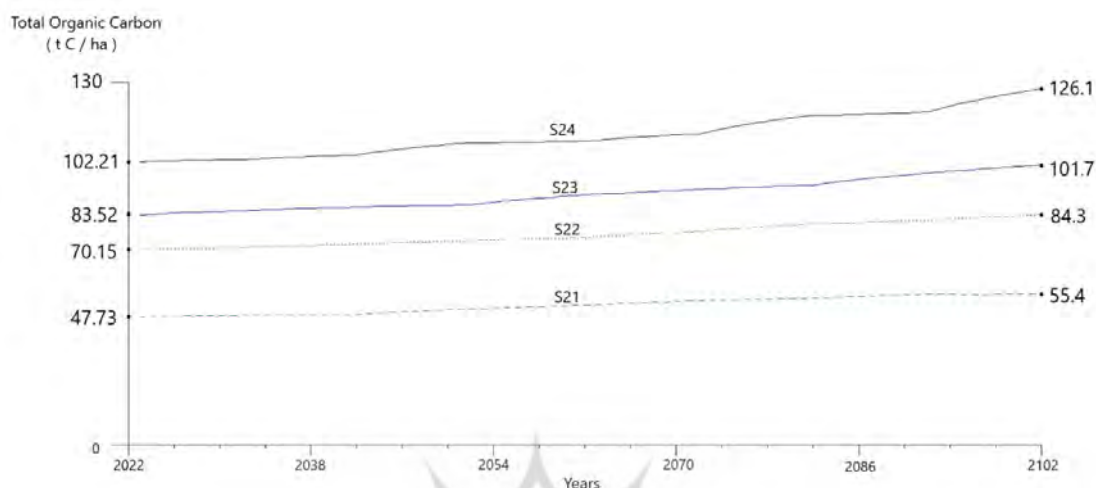
شکل ۹- خروجی مدل برای دی اکسید کربن تجمعی تا سال ۲۱۰۲ در هر چهار طبقه ارتفاعی در منطقه مورد مطالعه با اعمال تغییرات اقلیمی (سناریو دوم).

Fig.9. Model output for cumulative carbon dioxide until 2102 in all four elevation classes in the study area with climate change (second scenario)

۳-۲-۳- سناریو سوم (سناریو با تغییر اقلیم)

در سناریو سوم، تغییر اقلیم به صورت عکس سناریو دوم اعمال گردید (شکل ۱۰). دلیل انتخاب این سناریو، نشان دادن اهمیت تغییر اقلیم و پارامترهای هواشناسی بر ذخیره کربن آلی خاک بود. در این سناریو، کاهش ۰.۴ سانتی گراد دما و افزایش ۲.۱۵ میلی متر بارش به ازای هر ۱۰ سال اعمال شد (شکل ۱۰). بر اساس این سناریو تا پایان سال ۲۱۰۲ میلادی در طبقات ارتفاعی اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۵۵.۴۰، ۸۴.۳۰، ۱۰۱.۷۰ و ۱۲۶.۱۰ تن بر هکتار ذخیره کربن آلی برآورد می شود (شکل ۱۰) که به ترتیب ۱۳.۸۴، ۱۶.۷۸، ۱۷.۸۷ و ۱۸.۹۴ درصد بیش تر از ذخیره کربن آلی طبقه ارتفاعی مشابه در سناریو اول می باشد. در شکل ۱۰، نمودارهای s21، s22، s23 و s24 به ترتیب شبیه سازی مدل از ذخیره کربن آلی خاک در طبقات ارتفاعی اول، دوم، سوم و چهارم با اعمال سناریو سوم است که نشان می دهد ذخیره کربن آلی خاک در نقاط مرتفع تر بیش تر افزایش می یابد (شکل ۱۰). نمودار تجمعی دی اکسید کربن (CO₂) تولیدی مربوط به سناریو سوم نیز در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که مقدار تجمعی دی اکسید کربن با گذر زمان افزایش

می‌یابد (شکل ۱۱) و مقدار تولید آن نیز بیش‌تر از سناریو اول است که دلیل آن افزایش مقدار کربن ورودی با اعمال این سناریو می‌باشد.



شکل ۱۰- خروجی مدل برای ذخیره کربن آلی خاک در هر چهار طبقه ارتفاعی تا سال ۲۱۰۲ در منطقه مورد مطالعه با اعمال تغییرات اقلیمی (سناریو سوم).

Fig.10. Model output for organic carbon stock in soil in all four elevation classes until 2102 in the study area with climate change (third scenario)

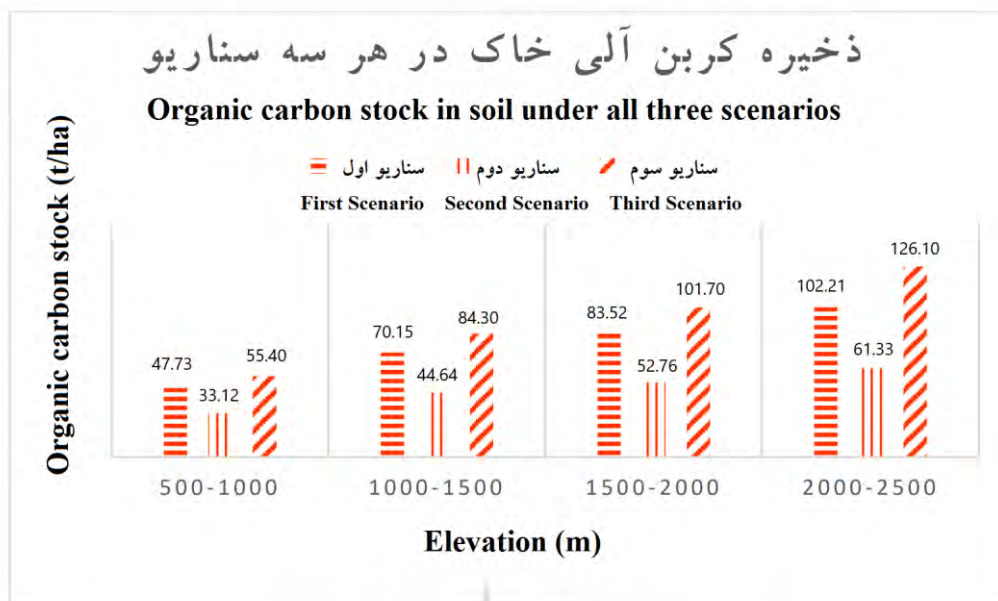


شکل ۱۱- خروجی مدل برای دی‌اکسید کربن تجمعی تا سال ۲۱۰۲ در هر چهار طبقه ارتفاعی در منطقه مورد مطالعه با اعمال تغییرات اقلیمی (سناریو سوم).

Fig.11. Model output for cumulative carbon dioxide until 2102 in all four elevation classes in the study area with climate change (third scenario)

نتایج حاصل از اعمال هر سه سناریو، با یافته‌های سایر محققین مطابقت داشت (Yokozawa et al., 2010; Fallahi, Rezvani Moghaddam, Nassiri Mahallati & Behdani, 2013; Soleimani et al., 2017). گروهی با استفاده از این مدل کاهش محتوای کربن آلی خاک را در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم نسبت به سناریو بدون تغییر اقلیم برای دهه‌های آینده در سراسر اسپانیا پیش‌بینی نمودند (Jebari, Del Prado, Pardo, Rodriguez Martin & Álvaro-Fuentes, 2018). تحقیقات نشان داده است که در میان پارامترهای اقلیمی، دما و بارندگی بیشترین تأثیر را بر مقدار ماده آلی خاک دارد (Shakiba & Rahn timer, 2003). شواهد حاکی از آن است که مقدار کربن آلی خاک با کاهش میزان بارندگی کاهش می‌یابد، ولی در هر سطحی از بارش مقدار ماده آلی خاک با افزایش دمای هوا کاهش می‌یابد (Singh, Pandey, Sidhu, Sarkar & Sagar, 2011). نتایج اکثر مطالعات انجام شده نشان می‌دهد افزایش دمای هوا با افزایش سرعت تجزیه میکروبی و فرایند معدنی شدن باعث کاهش مقدار ماده آلی خاک می‌شود (Smith et al., 1997; Köchy, Don, van der Molen, Freibauer, 2015) و تعداد کمتری از محققین نیز بر این باورند که افزایش دمای هوا موجب افزایش میزان تولید بقایای گیاهی و در نتیجه باعث افزایش کربن ورودی به خاک و در نهایت میزان ماده آلی خاک می‌شود (Rampazzo Todorovic et al., 2010)، که با یافته‌های این پژوهش هم‌خوانی ندارد.

در شکل ۱۲ به‌طور خلاصه مقدار کربن آلی ذخیره شده در هر چهار طبقه ارتفاعی در هر سه سناریو اعمال شده نشان داده شده است و این شکل نشان می‌دهد در تمام سناریوها نقاط مرتفع‌تر، دارای ذخیره کربن آلی بیشتری نسبت به نقاط پست‌تر هستند. علاوه بر این در اثر تغییر اقلیمی که با کاهش بارندگی و افزایش دما همراه می‌باشد ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی طبقات ارتفاعی مختلف کاهش می‌یابد. در صورتی‌که چنانچه تغییر اقلیم با کاهش دما و افزایش بارندگی همراه باشد ذخیره کربن آلی خاک افزایش می‌یابد و این افزایش برای نقاط مرتفع‌تر بیش‌تر است.



شکل ۱۲- مقدار ذخیره کربن آلی در هر چهار طبقه ارتفاعی منطقه مورد مطالعه در هر سه سناریو اعمال شده

Fig.12. Amount of organic carbon stock in each of the four elevation classes in the study area for all three applied scenarios.

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، تأثیر ارتفاع از سطح دریا و تغییر اقلیم بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی در منطقه تالش استان گیلان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع از سطح دریا، ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل عواملی مانند افزایش میزان بارندگی و کاهش دما است. تغییر اقلیم نیز می‌تواند بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی تأثیر قابل توجهی داشته باشد. در صورتی که تغییر اقلیم منجر به افزایش دما و کاهش بارندگی شود، ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی کاهش خواهد یافت. در مقابل، اگر تغییر اقلیم منجر به کاهش دما و افزایش بارندگی شود، ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی افزایش خواهد یافت. این مطالعه نشان داد خاک‌های جنگلی، به‌ویژه خاک‌های واقع شده در ارتفاعات بالاتر، نقش مهمی در جذب و ذخیره کربن اتمسفری دارند. تغییر اقلیم می‌تواند این نقش را تحت تأثیر قرار دهد؛ بنابراین، مدیریت پایدار جنگل‌ها و خاک‌های جنگلی، برای کاهش اثرات تغییر اقلیم بر محیط‌زیست، ضروری است. در مطالعات آینده، باید به کمک مدل‌های موجود، تأثیر اقدامات مدیریتی که باعث کاهش سرعت تجزیه ماده آلی و هدر رفت آن به‌صورت گاز کربنیک می‌شود، مورد بررسی قرار گیرند.

همچنین، در دسترس نبودن داده‌های هواشناسی برای خاک‌های جنگلی واقع در ارتفاعات، یکی از محدودیت‌های این پژوهش است که در آینده باید به آن توجه شود.

References

- Aguilera, E., Lassaletta, L., Gattinger, A., & Gimeno, B. S. (2013). Managing soil carbon for climate change mitigation and adaptation in Mediterranean cropping systems: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 168, 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.02.003>
- Ahmad Dar, J., & Somaiah, S. (2015). Altitudinal variation of soil organic carbon stocks in temperate forests of Kashmir Himalayas, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4204-9>
- Banday, M., Bhardwaj, D. R., & Pala, N. A. (2019). Influence of forest type, altitude and NDVI on soil properties in forests of North Western Himalaya, India. *Acta Ecologica Sinica*, 39(1), 50-55. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2018.06.001>
- Bangroo, S. A., Najar, G. R., & Rasool, A. (2017). Effect of altitude and aspect on soil organic carbon and nitrogen stocks in the Himalayan Mawer Forest Range. *Catena*, 158, 63-68. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.017>
- Bhattacharyya, R., Prakash, V., Kundu, S., Srivastva, A. K., Gupta, H. S., & Mitra, S. (2010). Long term effects of fertilization on carbon and nitrogen sequestration and aggregate associated carbon and nitrogen in the Indian sub-Himalayas. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 86, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10705-009-9270-y>
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Particle density. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*. Arnold Klute 5, 377-382. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c14>
- Cardinael, R., Chevallier, T., Cambou, A., Béral, C., Barthès, B. G., Dupraz, C., ... & Chenu, C. (2017). Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236, 243-255. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.011>
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247-1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Choudhury, B. U., Fiyaz, A. R., Mohapatra, K. P., & Ngachan, S. (2016). Impact of land uses, agrophysical variables and altitudinal gradient on soil organic carbon concentration of North-Eastern Himalayan Region of India. *Land Degradation & Development*, 27(4), 1163-1174. <https://doi.org/10.1002/ldr.2338>
- Christensen, B. T. (1992). Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Advances in Soil Science*, 20, 1-90. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2930-8_1

- Cohen, I., Huang, Y., Chen, J., Benesty, J., Benesty, J., Chen, J., ... & Cohen, I. (2009). Pearson correlation coefficient. *Noise reduction in speech processing*, 1-4. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00296-0_5
- Dahlgren, R. A., Boettinger, J. L., Huntington, G. L., & Amundson, R. G. (1997). Soil development along an elevational transect in the western Sierra Nevada, California. *Geoderma*, 78(3-4), 207-236. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00034-7)
- Deng, L., Liu, G. B., & Shangguan, Z. P. (2014). Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: a synthesis. *Global Change Biology*, 20(11), 3544-3556. <https://doi.org/10.1111/gcb.12508>
- Dieleman, W. I., Venter, M., Ramachandra, A., Krockenberger, A. K., & Bird, M. I. (2013). Soil carbon stocks vary predictably with altitude in tropical forests: Implications for soil carbon storage. *Geoderma*, 204, 59-67. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.04.005>
- Don, A., Seidel, F., Leifeld, J., Kätterer, T., Martin, M., Pellerin, S., ... & Chenu, C. (2024). Carbon sequestration in soils and climate change mitigation—Definitions and pitfalls. *Global Change Biology*, 30(1), e16983. <https://doi.org/10.1111/gcb.16983>
- Dwivedi, D., Riley, W. J., Torn, M. S., Spycher, N., Maggi, F., & Tang, J. Y. (2017). Mineral properties, microbes, transport, and plant-input profiles control vertical distribution and age of soil carbon stocks. *Soil Biology and Biochemistry*, 107, 244-259. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.12.019>
- Fallahi, J., Rezvani Moghaddam, P., Nassiri Mahallati, M., & Behdani, M. A. (2013). Validation of RothC model for evaluation of carbon sequestration in a restored ecosystem under two different climatic scenarios. *Water and Soil*, 27(3), 656-668. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.26092>
- Farina, R., Coleman, K., & Whitmore, A. P. (2013). Modification of the RothC model for simulations of soil organic C dynamics in dryland regions. *Geoderma*, 200, 18-30. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.01.021>
- Field, A. (2024). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. Sage publications limited.
- Gee, G. W. & Or, D. (2002) *Particle Size Analysis*. In: Dane, J.H. and Topp, G.C., Eds., *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*, Soils Science Society of America, Book Series No. 5, Madison, 255-293. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c12>
- Gibbins, J., & Chalmers, H. (2008). Carbon capture and storage. *Energy Policy*, 36(12), 4317-4322. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.058>
- Jebari, A., Del Prado, A., Pardo, G., Rodriguez Martin, J. A., & Álvaro-Fuentes, J. (2018). Modeling regional effects of climate change on soil organic carbon in Spain. *Journal of Environmental Quality*, 47(4), 644-653. <https://doi.org/10.2134/jeq2017.07.0294>
- Jenkinson, D. S., & Coleman, K. (2008). The turnover of organic carbon in subsoils. Part 2. Modelling carbon turnover. *European Journal of Soil Science*, 59(2), 400-413. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01026.x>
- Kaczynski, R., Siebielec, G., Hanegraaf, M. C., & Korevaar, H. (2017). Modelling soil carbon trends for agriculture development scenarios at regional level. *Geoderma*, 286, 104-115. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.026>

- Kashi Zenouzi, L., Shafiee, B., & Jafari, A. A. (2016). Investigating the Effect of Some Environmental Factors on Organic Carbon in ZilberChay Watershed. *Journal of Water and Soil Science*, 20(76), 207-218. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.20.76.207>
- Kaveh, A., Mahdian, M. H., Parvizi, Y., Sokouti Oskouei, R., & Masihabadi, M. H. (2014). Investigating effects of topography, soil and climate factors on soil organic carbon storage in drylands of Kermanshah Province. *Desert Management*, 2(4), 51-65. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/jdmal.2014.16659>
- Kazemi Rad, L., & Mohammadi, H. (2016). Climate change assessment by using LARS-WG model in Gilan Province (Iran). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 4(4), 55-74. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geo.v4i4.38892>
- Köchy, M., Don, A., van der Molen, M. K., & Freibauer, A. (2015). Global distribution of soil organic carbon–Part 2: Certainty of changes related to land use and climate. *Soil*, 1(1), 367-380. <https://doi.org/10.5194/soil-1-367-2015>
- Komarov, A., Chertov, O., Bykhovets, S., Shaw, C., Nadporozhskaya, M., Frolov, P., ... & Zubkova, E. (2017). Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. I. Problem formulation, model description, and testing. *Ecological Modelling*, 345, 113-124. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.08.007>
- Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89-97. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- Li, J., Shi, J., Zhang, D. D., Yang, B., Fang, K., & Yue, P. H. (2017). Moisture increase in response to high-altitude warming evidenced by tree-rings on the southeastern Tibetan Plateau. *Climate Dynamics*, 48, 649-660. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-016-3101-z>
- Li, P., Wang, Q., Endo, T., Zhao, X., & Kakubari, Y. (2010). Soil organic carbon stock is closely related to aboveground vegetation properties in cold-temperate mountainous forests. *Geoderma*, 154(3-4), 407-415. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.023>
- Mansuri, E., Karimi, A., Emamy, H., & Parvizi, Y. (2017). Investigation the Factors affecting soil organic carbon along a gradient climate in Kermanshah Province. *Journal of Natural Environment*, 70(1), 197-210. <https://doi.org/10.22059/jne.2017.134974.1031>
- Menard, S. (2000). Coefficients of determination for multiple logistic regression analysis. *The American Statistician*, 54(1), 17-24. <https://doi.org/10.1080/00031305.2000.10474502>
- Muñoz-Rojas, M., Abd-Elmabod, S. K., Zavala, L. M., De la Rosa, D., & Jordán, A. (2017). Climate change impacts on soil organic carbon stocks of Mediterranean agricultural areas: A case study in Northern Egypt. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 238, 142-152. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.001>
- Nemoto, R. (2010). *Long-term soil carbon changes in different agricultural management systems under past and future climate*. Doctoral dissertation, University of Bern. <https://occrdata.unibe.ch/students/theses/msc/35.pdf>

- Nieto, O. M., Castro, J., & Fernández-Ondoño, E. (2013). Conventional tillage versus cover crops in relation to carbon fixation in Mediterranean olive cultivation. *Plant and Soil*, 365, 321-335. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1395-0>
- Njeru, C. M., Ekesi, S., Mohamed, S. A., Kinyamario, J. I., Kiboi, S., & Maeda, E. E. (2017). Assessing stock and thresholds detection of soil organic carbon and nitrogen along an altitude gradient in an east Africa mountain ecosystem. *Geoderma Regional*, 10, 29-38. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.04.002>
- Papiernik, S. K., Lindstrom, M. J., Schumacher, T. E., Schumacher, J. A., Malo, D. D., & Lobb, D. A. (2007). Characterization of soil profiles in a landscape affected by long-term tillage. *Soil and Tillage Research*, 93(2), 335-345. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.05.007>
- Parton, W. J., Schimel, D. S., Cole, C. V., & Ojima, D. S. (1987). Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 51(5), 1173-1179. <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100050015x>
- Ponce-Hernandez, R., Koohafkan, P., & Antoine, J. (2004). *Assessing carbon stocks and modelling win-win scenarios of carbon sequestration through land-use changes* (Vol. 1). Food & Agriculture Org.
- Qiu, W., Li, Q., Lei, Z. K., Qin, Q. H., Deng, W. L., & Kang, Y. L. (2013). The use of a carbon nanotube sensor for measuring strain by micro-Raman spectroscopy. *Carbon*, 53, 161-168. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.10.043>
- Quideau, S. A. (2002). *Organic matter accumulation*. *Encyclopedia of Soil Science*, 26, 1-4.
- Ramesh, T., Manjaiah, K. M., Tomar, J. M. S., & Ngachan, S. V. (2013). Effect of multipurpose tree species on soil fertility and CO₂ efflux under hilly ecosystems of Northeast India. *Agroforestry Systems*, 87, 1377-1388. <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9645-6>
- Rampazzo Todorovic, G., Stemmer, M., Tatzber, M., Katzlberger, C., Spiegel, H., Zehetner, F., & 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(5), 662-670. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800311>
- Rousta, M. J., Soleimanpour, S. M., Enayati, M., & Pakparvar, M. (2022). Effect of vegetation type and soil chemical properties on the organic carbon content in the soil of flood spreading fields of Kowsar station. <https://doi.org/10.52547/ifej.10.19.171>
- Senthilkumar, S., Kravchenko, A. N., & Robertson, G. P. (2009). Topography influences management system effects on total soil carbon and nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 73(6), 2059-2067. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0392>
- Shakiba, A., & Rahnama, M. (2003). The impact of climate change on soil carbon variations. In *Third Regional Conference on Climate Change, Meteorological Organization, Isfahan*. [In Persian] <https://civilica.com/doc/12499>
- Shirato, Y., & Yokozawa, M. (2005). Applying the Rothamsted Carbon Model for long-term experiments on Japanese paddy soils and modifying it by simple tuning of the decomposition rate. *Soil Science & Plant Nutrition*, 51(3), 405-415. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2005.tb00046.x>

- Singh, S. K., Pandey, C. B., Sidhu, G. S., Sarkar, D., & Sagar, R. (2011). Concentration and stock of carbon in the soils affected by land uses and climates in the western Himalaya, India. *Catena*, 87(1), 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.05.008>
- Sinoga, J. D. R., Pariente, S., Diaz, A. R., & Murillo, J. F. M. (2012). Variability of relationships between soil organic carbon and some soil properties in Mediterranean rangelands under different climatic conditions (South of Spain). *Catena*, 94, 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.06.004>
- Smith, P., Smith, J. U., Powlson, D. S., McGill, W. B., Arah, J. R. M., Chertov, O. G., ... & Whitmore, A. P. (1997). A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*, 81(1-2), 153-225. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00087-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00087-6)
- Soleimani, A., Hosseini, S. M., Bavani, A. R. M., Jafari, M., & Francaviglia, R. (2017). Simulating soil organic carbon stock as affected by land cover change and climate change, Hyrcanian forests (northern Iran). *Science of The Total Environment*, 599, 1646-1657. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.077>
- Su, X., Yan, X., & Tsai, C. L. (2012). Linear regression. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 4(3), 275-294. <https://doi.org/10.1002/wics.1198>
- TerraClimate. https://climate.northwestknowledge.net/TERRACLIMATE/index_directDownloads.php
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wan, Y., Lin, E., Xiong, W., & Guo, L. (2011). Modeling the impact of climate change on soil organic carbon stock in upland soils in the 21st century in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 141(1-2), 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.02.004>
- Wang, J., Wang, X., Xu, M., Feng, G., Zhang, W., & Lu, C. A. (2015). Crop yield and soil organic matter after long-term straw return to soil in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 102, 371-381. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9710-9>
- Yang, Y., Mohammad, A., Feng, J., Zhou, R., & Fang, J. (2007). Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. *Biogeochemistry*, 84, 131-141. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9109-z>
- Yokozawa, M., Shirato, Y., Sakamoto, T., Yonemura, S., Nakai, M., & Ohkura, T. (2010). Use of the RothC model to estimate the carbon sequestration potential of organic matter application in Japanese arable soils. *Soil Science & Plant Nutrition*, 56(1), 168-176. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2009.00422.x>
- Zhang, J., Bei, S., Li, B., Zhang, J., Christie, P., & Li, X. (2019). Organic fertilizer, but not heavy liming, enhances banana biomass, increases soil organic carbon and modifies soil microbiota. *Applied Soil Ecology*, 136, 67-79. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.12.017>
- Zhang, Y., Ai, J., Sun, Q., Li, Z., Hou, L., Song, L., ... & Shao, G. (2021). Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by vegetation types and altitude across the mountainous

- regions in the Yunnan Province, south-western China. *Catena*, 196, 104872. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104872>
- Zhao, Y. G., Liu, X. F., Wang, Z. L., & Zhao, S. W. (2015). Soil organic carbon fractions and sequestration across a 150-yr secondary forest chronosequence on the Loess Plateau, China. *Catena*, 133, 303-308. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.05.028>
- Zhu, B., Wang, X., Fang, J., Piao, S., Shen, H., Zhao, S., & Peng, C. (2010). Altitudinal changes in carbon storage of temperate forests on Mt Changbai, Northeast China. *Journal of Plant Research*, 123, 439-452. <https://doi.org/10.1007/s10265-009-0301-1>
- Zimmermann, M., Leifeld, J., & Fuhrer, J. (2007). Quantifying soil organic carbon fractions by infrared-spectroscopy. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(1), 224-231. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.07.010>

