

# Investigating and Simulating the Effect of Climate Change, Grazing and Manure Application on Organic Carbon Storage of Forest Soils at Different Altitudes with the Century Model

## ABSTRACT

Forest soils are recognized as one of the most important carbon sinks on Earth, playing a critical role in climate balance and greenhouse gas mitigation. This study investigated the effects of altitude, climate change, grazing, and manure application on soil organic carbon (SOC) stock in forest soils of Talesh County, Iran. The Century model was used to investigate the effects of climate and management factors on soil organic carbon storage. The results showed that SOC stock increased with increasing altitude due to higher precipitation and lower temperature. The Century model estimated SOC stock with high accuracy. The defined scenarios for the Century model showed that climate change with reduced precipitation and increased temperature significantly decreased SOC stock. The negative effect of climate change was more pronounced at higher altitudes. Grazing also reduced SOC stock, especially at higher altitudes. In contrast, manure application increased SOC stock, and its positive effect was more pronounced at higher altitudes. In the climate change scenario with manure application, manure application largely compensated for the negative effect of climate change, but did not completely neutralize it. The results of this study indicate that soil organic carbon simulation models are accurate tools for predicting the effects of climate change, grazing, and manure application. In addition, the conservation of high- altitude forests and optimal forest management are of particular importance to prevent the loss of SOC stock and to combat climate change.

**KEYWORDS:** *Soil organic carbon storage, Climate change, Grazing, Manure application, Century model*

# بررسی و شبیه سازی اثر تغییر اقلیم، چرای دام و مصرف کود دامی بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی ارتفاعات مختلف با مدل سنچری

## چکیده

خاک‌های جنگلی به عنوان یکی از مهم‌ترین مخازن کربن در زمین شناخته می‌شوند که نقش بسیار مهمی در تعادل اقلیم و کاهش گازهای گلخانه‌ای دارند. در این تحقیق، اثر ارتفاع، تغییر اقلیم، چرای دام و مصرف کود دامی بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی شهرستان تالش مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی اثرات عوامل اقلیمی و مدیریتی بر ذخیره کربن آلی خاک‌ها از مدل سنچری استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع، به دلیل بارندگی بیش‌تر و دمای کم‌تر، ذخیره کربن آلی خاک‌ها افزایش می‌یابد. مدل سنچری ذخیره کربن آلی خاک را با دقت بالا تخمین زد. صحنه‌بندی‌های تعریف شده برای مدل سنچری نشان داد که تغییر اقلیم با کاهش بارندگی و افزایش دما، ذخیره کربن آلی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. اثر منفی تغییر اقلیم در ارتفاعات بیش‌تر است. چرای دام نیز ذخیره کربن آلی را به ویژه در ارتفاعات مرتفع‌تر، کاهش می‌دهد. در مقابل، مصرف کود دامی باعث افزایش ذخیره کربن آلی خاک‌ها می‌شود و اثر مثبت آن در ارتفاعات بیش‌تر است. در صحنه‌بندی تغییر اقلیم توام با مصرف کود دامی، کود دامی تا حد زیادی اثر منفی تغییر اقلیم را جبران می‌کند، اما به طور کامل آن را خنثی نمی‌کند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدل‌های شبیه‌سازی کربن آلی خاک، ابزارهای دقیقی برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم، چرا و کود دامی هستند. همچنین حفظ ارتفاعات جنگلی و مدیریت بهینه جنگل برای جلوگیری از کاهش ذخیره کربن آلی و مقابله با تغییرات اقلیمی، اهمیت ویژه‌ای دارد.

واژه‌های کلیدی: ذخیره کربن آلی خاک، تغییر اقلیم، چرا، کود دامی، مدل سنچری

کربن آلی خاک به عنوان یک شاخص کلیدی در کیفیت خاک‌های جنگلی، نقشی حیاتی در تعدیل آب و هوا، حفظ رطوبت خاک، چرخه مواد مغذی و سلامت زیست‌بوم ایفا می‌کند (Lal, 2005). خاک‌های جنگلی ارتفاعات مختلف، به دلیل تنوع در شرایط آب و هوایی، پوشش گیاهی و مدیریت، مقادیر متفاوتی از کربن آلی را در خود ذخیره می‌کنند و دارای ویژگی‌های متفاوتی هستند. ارتفاع از سطح دریا با چندین مکانیزم بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی تاثیر می‌گذارد. با افزایش ارتفاع، دمای هوا به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (Körner, 2007). این امر باعث کند شدن فرآیندهای تجزیه و معدنی شدن مواد آلی در خاک می‌شود (Fang et al., 2005). در نتیجه، مواد آلی بیش‌تری در خاک انباشته شده و ذخیره کربن آلی خاک افزایش می‌یابد (Jobbágy & Jackson, 2000). همچنین، با افزایش ارتفاع، بارندگی نیز افزایش می‌یابد (Körner, 2007) و بارندگی بیش‌تر به معنی رطوبت خاک بیش‌تر و در نتیجه، افزایش رشد گیاه، فعالیت بیولوژیکی و تولید مواد آلی است (Chapin et al., 2002). از طرف دیگر، رطوبت بیش‌تر می‌تواند به شستشوی مواد آلی از خاک نیز منجر شود (Lal, 2004). نوع پوشش گیاهی نیز با ارتفاع تغییر می‌کند. جنگل‌های متراکم در ارتفاعات پایین‌تر و مراتع و چمنزارها در ارتفاعات بالاتر غالب هستند (Körner, 2007). به طور کلی، جنگل‌ها به دلیل داشتن زیست‌توده بیش‌تر، کربن بیشتری را در خاک ذخیره می‌کنند (Dixon et al., 1993). شیب و جهت دامنه نیز بر ذخیره کربن آلی خاک تاثیر می‌گذارد. در دامنه‌های شیب‌دار، فرسایش خاک بیش‌تر شده و مواد آلی بیش‌تری از خاک شسته می‌شود (Lal, 2004). نوع و ترکیب مواد مادری خاک نیز بر ذخیره کربن آلی خاک تاثیر گذارد است. خاک‌هایی که از مواد مادری با قابلیت نگهداری آب بیش‌تر تشکیل شده‌اند، قادر به ذخیره کربن آلی بیش‌تری نیز هستند (Sanderman et al., 2004). در بررسی اثر ارتفاع منطقه بر ذخیره‌سازی کربن آلی و ویژگی‌های خاک در جنگل‌های ارسباران نشان داده شد که با افزایش ارتفاع، ذخیره کربن آلی خاک به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد (Ejlali et al., 2020). در جنگل‌های خیرودکنار نوشهر نیز بررسی تاثیر نوع پوشش جنگلی و ارتفاع بر ذخیره کربن آلی و خصوصیات خاک نشان داد که بیش‌ترین مقدار ذخیره کربن آلی در تپه جنگلی راش-ممرز و در ارتفاعات بالاتر مشاهده می‌شود (Fahim et al., 2013).

متأسفانه، سطوح جهانی کربن آلی خاک به دلیل عوامل مختلفی از جمله تغییر اقلیم، چرای بیش از حد دام و مصرف نامناسب کودهای دامی در حال کاهش است (IPCC, 2021). این امر نگرانی‌های جدی در مورد پیامدهای منفی بر عملکرد زیست‌بوم‌های جنگلی و تشدید تغییرات اقلیمی ایجاد کرده است.

افزایش دما ناشی از تغییر اقلیم سرعت تجزیه مواد آلی موجود در خاک را افزایش می‌دهد و منجر به کاهش ذخیره کربن آلی خاک می‌شود (Luo et al., 2018). از طرفی دیگر، تغییرات الگوی بارندگی، به ویژه وقوع بارندگی‌های شدید، می‌تواند باعث فرسایش خاک و از دست رفتن کربن آلی خاک گردد (Fang et al., 2020). علاوه بر این، تغییر اقلیم می‌تواند بر ترکیب جوامع گیاهی و افزایش آتش‌سوزی‌های جنگلی تاثیر بگذارد که این عوامل نیز به طور غیرمستقیم بر ذخیره کربن آلی خاک اثر می‌گذارند. تحقیقات متعددی در سطح جهان به بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی در ارتفاعات مختلف پرداخته‌اند. مطالعه‌ای در سوئد نشان داد که افزایش دما در ۵۰ سال گذشته، ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی را ۱۰٪ کاهش داد (Jansson and Berglund, 2003). تحقیقات در آلپ سوئیس نیز نشان داد که ذوب شدن یخچال‌های طبیعی و افزایش بارندگی، فرسایش خاک را افزایش داد و باعث کاهش ذخیره کربن آلی خاک شد (Haerberli et al., 2007).

چرای بیش از حد دام، با فشرده کردن خاک، کاهش پوشش گیاهی و افزایش فرسایش، منجر به کاهش قابل توجه ذخیره کربن آلی خاک می‌شود (Conant et al., 2010). در مقابل، شیوه‌های چرای کنترل شده مانند چرا به صورت چرخشی یا سیستم‌های تلفیقی

جنگل و مرتع می‌توانند با افزایش پوشش گیاهی و بهبود کیفیت خاک، به افزایش ذخیره کربن آلی خاک کمک کنند (Fornara et al., 2019). مطالعه‌ای در ایالات متحده نشان داد که چرای دام در مراتع مرتفع، ذخیره کربن آلی خاک را ۲۰٪ کاهش داد (Knapp and Schipper et al., 1998). تحقیقات در نیوزیلند نیز نشان داد که چرای دام در جنگل، ذخیره کربن آلی را ۱۵٪ کاهش داد (Smith, 2007).

کود دامی به عنوان منبعی از مواد آلی و مواد مغذی، می‌تواند در کوتاه مدت با افزایش کربن ورودی به خاک، ذخیره کربن آلی خاک را افزایش دهد (Oelrich et al., 2022). با این حال، استفاده بیش از حد کود دامی می‌تواند منجر به شسته‌شدن نیترات و فسفر، آلودگی آب و خاک و انتشار گازهای گلخانه‌ای شود (Macdonald et al., 2015). بنابراین، مدیریت صحیح مصرف کود دامی برای حفظ تعادل بین مزایا و معایب آن در افزایش ذخیره کربن آلی خاک و آلودگی محیط زیست ضروری است. مطالعه‌ای در چین نشان داد که مصرف کود دامی به مدت ۲۰ سال، ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی را ۲۵٪ افزایش داد (Guo and Gifford, 2002). تحقیقات در انگلستان نشان داد که مصرف کود دامی به همراه مدیریت پایدار جنگل، ذخیره کربن آلی را ۱۰٪ افزایش داد (Smith et al., 2004). کود دامی بعنوان یک منبع غذایی و ترکیبات آلی باعث رشد بهتر گیاهان شده و ذخیره کربن آلی خاک‌ها را از طریق برگشت بیش تر بقایای گیاهی به خاک افزایش می‌دهد (Smith, 2016).

مدل سنچری ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی تغییرات ذخیره کربن آلی خاک تحت صحنه‌بندی‌های (Scenario) مختلف اقلیمی، مدیریتی و کاربری اراضی است. این مدل با در نظر گرفتن فرآیندهای بیوشیمیایی و فیزیکی پیچیده خاک، می‌تواند به طور دقیق تغییرات ذخیره کربن آلی خاک را در طول زمان پیش‌بینی کند (Kirschbaum et al., 2005; Bahn et al., 2014).

با توجه به ویژگی‌های متنوع خاک‌های جنگلی ارتفاعات، شناخت تأثیر عواملی مانند تغییر اقلیم، چرای دام و مصرف کود دامی بر ذخیره کربن آلی آن‌ها در هر منطقه، برای حفظ و افزایش این ذخیره ارزشمند که نقشی حیاتی در تعدیل آب و هوا، سلامت زیست‌بوم و باروری جنگل دارد، ضروری است. به همین دلیل این مطالعه با دو هدف کلی زیر انجام شد:

۱- بررسی و شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم، چرای دام و مصرف کود دامی بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی ارتفاعات مختلف با استفاده از مدل سنچری.

۲- ارائه راهبردهای مدیریتی پایدار برای افزایش جذب و ذخیره کربن در خاک‌های جنگلی با توجه به شرایط اقلیمی، نوع جنگل و شیوه‌های بهره‌برداری از آن.

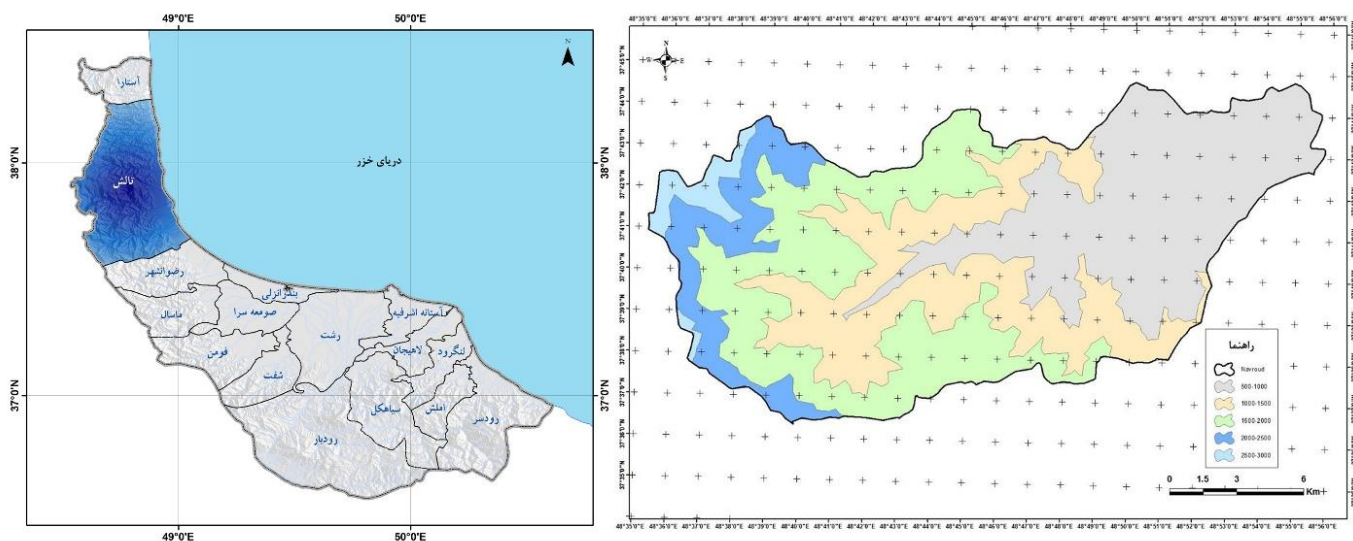
## ۲- مواد و روش‌ها

برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم، چرای دام و مصرف کود دامی بر میزان ذخیره کربن آلی و تصاعد گاز دی اکسید کربن از خاک‌های جنگلی ارتفاعات مختلف، یک منطقه کوهستانی در شهرستان تالش استان گیلان انتخاب و خاک‌های جنگلی این منطقه که دارای ارتفاع ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ متر از سطح دریا بودند مورد نمونه‌برداری قرار گرفتند. در این پژوهش از خاک‌های جنگلی چهار طبقه ارتفاعی مختلف (۵۰۰-۱۰۰۰، ۱۰۰۰-۱۵۰۰، ۱۵۰۰-۲۰۰۰ و ۲۰۰۰-۲۵۰۰ متر از سطح دریا) نمونه مرکب خاک تهیه گردید. طبقات ارتفاعی به گونه‌ای انتخاب گردیدند که تغییرات دما و بارندگی بین طبقات ارتفاعی مختلف محسوس باشد. ویژگی‌های خاک‌های جنگلی

ارتفاعات مختلف در دو سال متوالی (سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱) و بصورت تکراردار اندازه‌گیری و داده‌های بدست آمده از ویژگی‌های خاک به همراه داده‌های هواشناسی طبقات ارتفاعی مختلف برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل سنچری در شبیه‌سازی ذخیره کربن آلی خاک‌ها و تصاعد گاز دی اکسید کربن استفاده گردید. سپس، با تعریف صحنه‌بندی‌های تغییر اقلیم، چرای دام و مصرف کود دامی برای مدل سنچری تاثیر این عوامل بر ذخیره کربن آلی و تصاعد گاز دی اکسید کربن از خاک‌های جنگلی مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفت.

## ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

خاک‌های جنگلی مورد مطالعه در مسیر اسالم به خلخال و در طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۶ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۶ دقیقه شمالی قرار داشتند. میانگین بارندگی سالانه منطقه مورد مطالعه حدود ۱۶۰۰ میلی‌متر و مساحت کل آن حدود ۱۵۰ هزار هکتار بود. خاک‌های جنگلی مورد بررسی، از شیب شمالی و از ارتفاعات ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ متری از سطح دریا، در چهار طبقه ارتفاعی، انتخاب شدند. پوشش غالب این خاک‌های جنگلی را گونه‌های گیاهی شمشاد هیرکانی (*Celtis caucasica*)، لهله خزری (*Alnus subcordata*)، آکاسیای ابریشمی (*Platycladus orientalis*)، بلوط (*Quercus brantii*)، دودو (*Juglans nigra*) و گردو (*Juglans regia*) تشکیل می‌دادند.

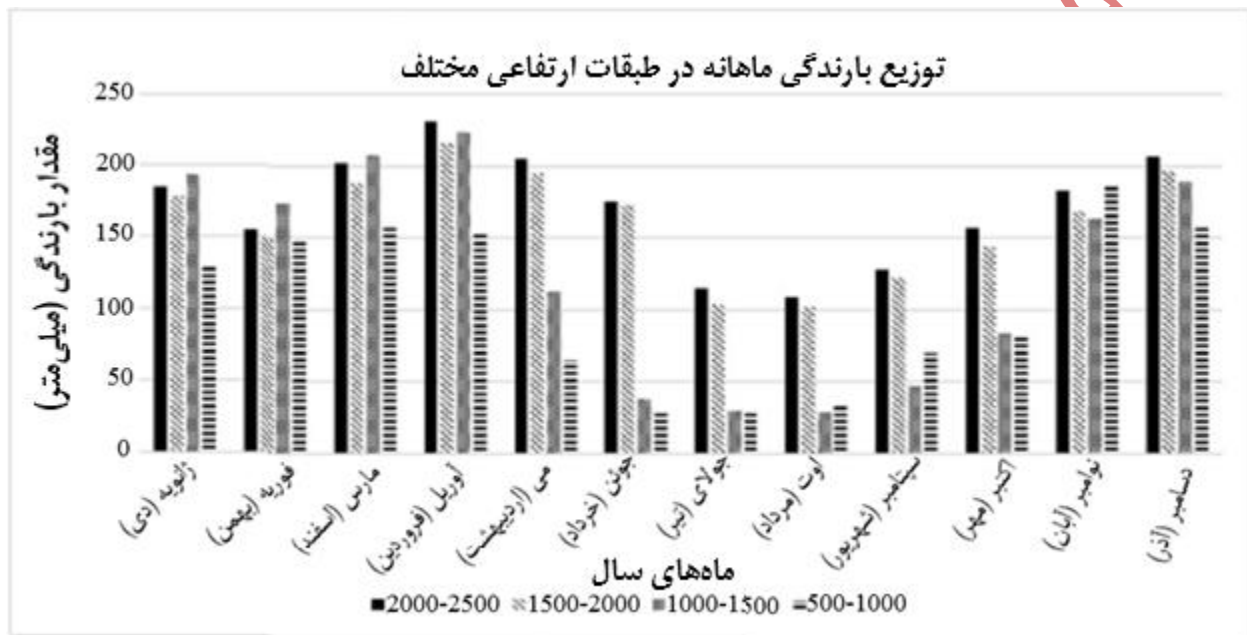


شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در استان گیلان.

## ۲-۲- روش جمع‌آوری داده‌های هواشناسی طبقات ارتفاعی

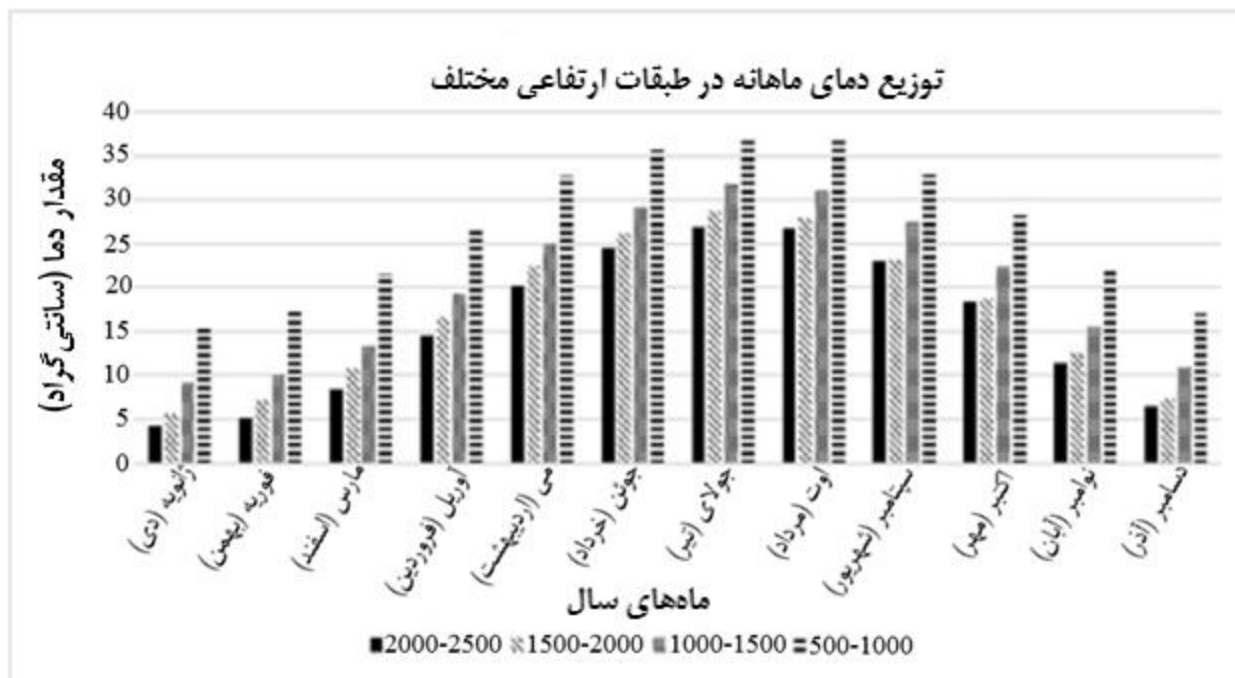
داده‌های هواشناسی طبقات ارتفاعی مختلف اطلاعات ارزشمندی برای مطالعه و مدل‌سازی پدیده‌های جوّی در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی فراهم می‌کنند. در این مطالعه، داده‌های هواشناسی طبقات ارتفاعی از پایگاه داده TerraClimate جمع‌آوری گردید. پایگاه داده TerraClimate یک پایگاه داده شبکه‌بندی‌شده جهانی با قدرت تفکیک بالا است که داده‌های هواشناسی را برای هر چهار کیلومتر در چهار کیلومتر بر روی زمین تخمین می‌زند. مقیاس زمانی داده‌های هواشناسی استفاده شده در این مطالعه سال‌های ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ است. در این مطالعه، میانگین ماهیانه و سالیانه داده‌های ۶۵ ساله دما، بارندگی و تبخیر و تعرق از این پایگاه داده استخراج

شد. مقدار دما به طور مستقیم در پایگاه داده TerraClimate وجود ندارد. به همین دلیل، دمای ماهیانه واقعی با استفاده از دماهای بیشینه و کمینه و میانگین آن‌ها محاسبه شد. برای استخراج داده‌ها از این پایگاه داده، پوشه داده‌های مکانی مربوط به هر طبقه ارتفاعی تهیه شدند. سپس، با استفاده از توابع و دستورالعمل‌های رایانه‌ای تعریف شده در محیط برنامه‌نویسی متلب، مقادیر بارش، تبخیر و تعرق و دمای حداکثر و حداقل برای هر شیپ‌فایل مرتبط با یک طبقه ارتفاعی مشخص، استخراج و به سری‌های زمانی ماهیانه تبدیل شدند. در نهایت، با گرفتن میانگین سری‌های زمانی ماهیانه، مقادیر میانگین دما، بارش و تبخیر و تعرق ماهیانه برای هر طبقه ارتفاعی مجزا محاسبه شدند. توزیع ماهیانه بارندگی، دما و تبخیر و تعرق طبقات ارتفاعی مختلف در نمودارها ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. نمودار ۴ نیز منعکس کننده میانگین سالیانه بارندگی، دما و تبخیر و تعرق در طبقات ارتفاعی مختلف است.

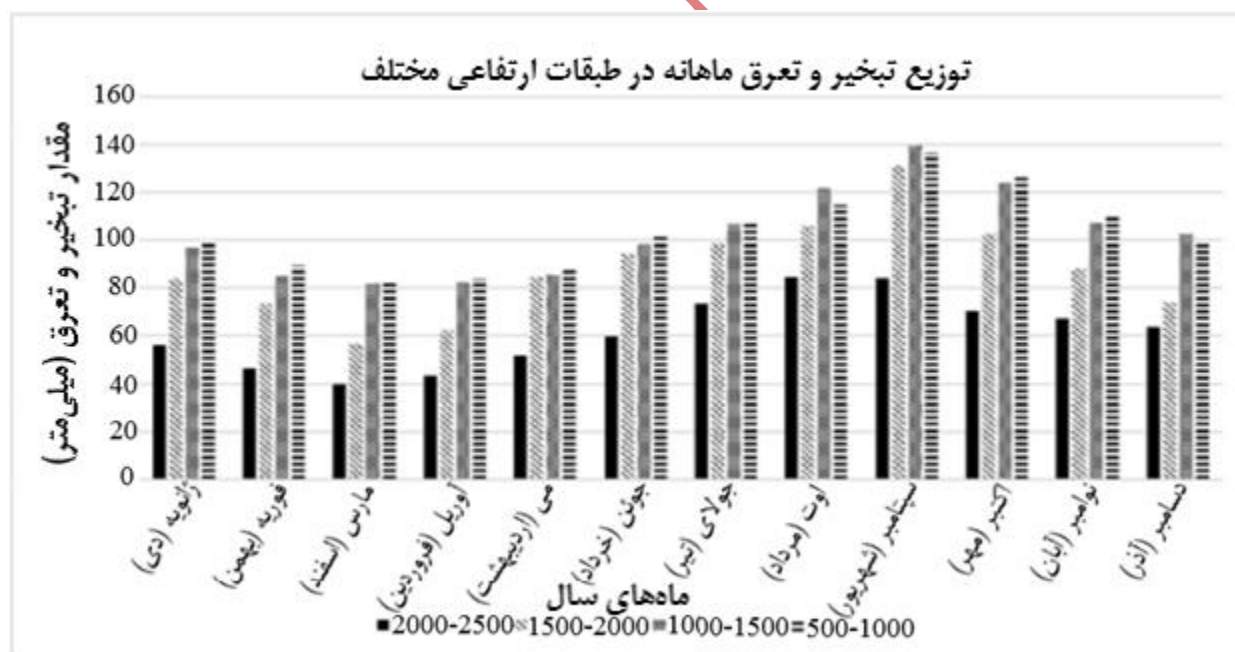


نمودار ۱: توزیع بارندگی ماهیانه در طبقات ارتفاعی مورد مطالعه.

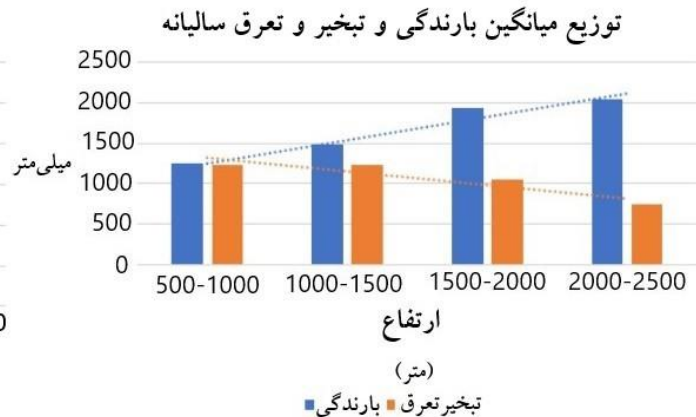
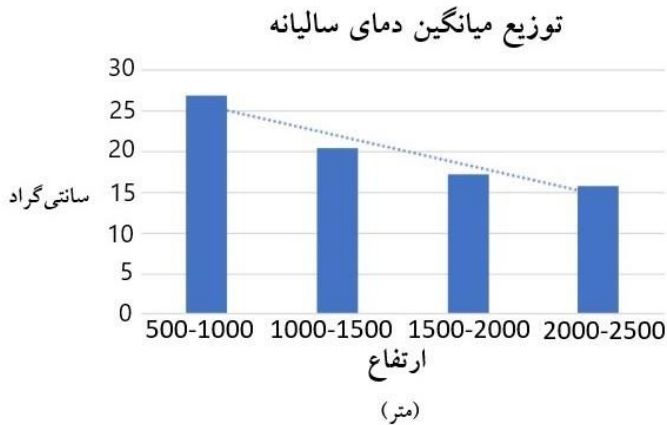




نمودار ۲: توزیع دما ماهیانه در طبقات ارتفاعی مورد مطالعه.



نمودار ۳: توزیع تبخیر و تعرق ماهیانه در طبقات ارتفاعی مورد مطالعه.



نمودار ۴: توزیع میانگین بارندگی، تبخیر و تعرق و دمای سالیانه در طبقات ارتفاعی مورد مطالعه.

## ۲-۳- نمونه برداری از خاک‌های جنگلی

برای نمونه برداری از خاک‌های جنگلی واقع در طبقات ارتفاعی مختلف (۵۰۰-۱۰۰۰، ۱۰۰۰-۱۵۰۰، ۱۵۰۰-۲۰۰۰ و ۲۰۰۰-۲۵۰۰ متر از سطح دریا) در هر طبقه ارتفاعی، ۱۵ هکتار از اراضی جنگلی انتخاب و به سه قسمت مساوی پنج هکتاری که هر کدام نماینده یک تکرار بودند تقسیم گردید. سپس در هر تکرار، از چهار نقطه و از عمق ۰-۳۵ سانتی متری خاک یک نمونه فرعی خاک تهیه گردید. نقاط نمونه برداری به گونه‌ای انتخاب شدند که سطح پنج هکتاری اراضی جنگلی را پوشش دهد سپس نمونه‌های فرعی خاک برداشت شده از نقاط مختلف در هر تکرار با هم مخلوط و یک نمونه مرکب اصلی که نماینده یک تکرار بود تهیه گردید. بنابراین در هر طبقه ارتفاعی سه نمونه مرکب اصلی خاک و برای چهار طبقه ارتفاعی مورد مطالعه در مجموع ۱۲ نمونه مرکب اصلی خاک وجود داشت که جامعه آماری آزمایش را تشکیل می‌دادند. بدلیل سنگلاخ بودن خاک‌های جنگلی، امکان نمونه برداری از عمق بیشتر از ۳۵ سانتی متر میسر نگردید. همچنین ۳۶ نمونه دست نخورده خاک از عمق ۰-۱۰، ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ سانتی متری برای اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری خاک طبقات ارتفاعی مختلف نیز تهیه گردید. نمونه‌های مرکب اصلی پس از جمع‌آوری، هوا خشک شدند و پس از عبور از الک دو میلی‌متری، در آزمایشگاه با روش‌های استاندارد تجزیه شدند. بافت خاک با روش هیدرومتر (Huluka and Miller, 2014)، جرم مخصوص ظاهری با روش استوانه (Al-Shammary et al., 2018)، درصد کربن آلی خاک با روش واکلی و بلک (De Vos et al., 2007)، pH خاک در گل اشباع و هدایت الکتریکی در عصاره اشباع خاک (Zhang and Wienhold, 2002) اندازه‌گیری شدند. نتایج تجزیه خاک و اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول، هر داده میانگین سه تکرار است.



**جدول ۱:** اطلاعات مربوط به مقادیر شن، سیلت و رس، نوع بافت، ذخیره و درصد کربن آلی، جرم مخصوص ظاهری، اسیدیته و هدایت الکتریکی برای هر چهار طبقه ارتفاعی مورد مطالعه.

ارتفاع از سطح دریا (متر)	مقدار شن (درصد)	مقدار رس (درصد)	مقدار سیلت (درصد)	بافت خاک Soil Texture	ذخیره کربن آلی Organic Carbon Stocks (تن بر هکتار)	درصد کربن آلی Organic Carbon Contents (درصد)	جرم مخصوص ظاهری خاک Bulk Density (گرم بر سانتی متر مکعب)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی Electrical Conductivity (دسی زیمنس بر متر)
۵۰۰-۱۰۰۰	۱۷/۱۵	۳۹/۴۵	۴۳/۴۰	Silty Clay Loam	۴۲/۷۷	۰/۹۴	۱/۲۹	۵/۴۹	۰/۴۲
۱۰۰۰-۱۵۰۰	۱۳/۰۷	۳۷/۹۰	۴۹/۰۳	Silty Clay Loam	۶۷/۰۳	۱/۶۸	۱/۱۴	۵/۴۴	۰/۳۶
۱۵۰۰-۲۰۰۰	۱۳/۶۹	۳۹/۰۱	۴۷/۳۰	Silty Clay Loam	۷۹/۶۴	۲/۰۵	۱/۱۰	۵/۲۹	۰/۲۶
۲۰۰۰-۲۵۰۰	۱۰/۹۰	۳۹/۳۵	۴۹/۷۵	Silty Clay Loam	۹۷/۲۰	۲/۶۲	۱/۰۵	۵/۱۹	۰/۱۹

برای اندازه‌گیری میزان ذخیره کربن آلی خاک بر حسب کیلو گرم بر هکتار از رابطه ۱ برای هر چهار طبقه ارتفاعی استفاده گردید (Qiu et al., 2013).

$$CS = 1000 \times \%SOC \times Bd \times d \quad (\text{رابطه ۱})$$

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

## ۲-۴-۲- واسنجی و اعتبارسنجی مدل سنچری

مدل سنچری یک مدل پرکاربرد برای شبیه‌سازی پویایی کربن و نیتروژن در سامانه‌های خاک-گیاه است. انجام واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای اطمینان از عملکرد مدل در ارائه صحیح پویایی کربن و نیتروژن در سامانه‌های خاک-گیاه الزامی است و هم‌راستایی خروجی مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده لازم و ضروری می‌باشد (Gomes and Varriale, 2004).

## ۲-۴-۲-۱- واسنجی

واسنجی شامل تنظیم پارامترهای مدل برای تطبیق خروجی مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه است (Gomes and Varriale, 2004). این فرآیند معمولاً با مقایسه خروجی مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی از ماده آلی خاک، زیست‌توده گیاهی و سایر متغیرهای مرتبط انجام می‌شود و سپس پارامترهای مدل تا زمانی که مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده تطابق داشته باشند، تنظیم می‌شوند (Gomes and Varriale, 2004).

در این مطالعه، مقدار پارامتر (2) PDRX یا حداکثر تولید ناخالص جنگل با وارد کردن ویژگی‌هایی مانند نیتروژن کل، گوگرد قابل جذب، بافت خاک و اجزاء آن، داده‌های اقلیمی، جرم مخصوص ظاهری و عمق خاک متعلق به طبقه ارتفاعی اول و استفاده از پیش‌فرض‌های مدل برای سایر پارامترها، تخمین زده شد. سپس با تغییر این پارامتر، می‌توان اختلاف بین مقدار کربن آلی تخمین‌زده شده و مقدار کربن آلی اندازه‌گیری شده را به حداقل رساند (Althoff et al., 2018).

## ۲-۴-۲-۲ اعتبارسنجی

اعتبارسنجی شامل آزمودن توانایی مدل برای پیش‌بینی نتایج آینده بر اساس شرایط فعلی است (Bortolon et al., 2011). این فرآیند معمولاً با مقایسه داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی که در زمان یا مکان دیگری و متفاوت از داده‌های میدانی استفاده در واسنجی، جمع‌آوری شده‌اند انجام می‌شود. اگر مدل توانایی پیش‌بینی دقیق این داده‌های اندازه‌گیری شده مستقل را داشته باشد، به عنوان اعتبارسنجی شناخته می‌شود (Bortolon et al., 2011).

برای اعتبارسنجی مدل سنچری، داده‌های مربوط به نیتروژن کل، گوگرد قابل جذب، بافت و اجزاء آن، داده‌های آب و هوایی، جرم مخصوص ظاهری و عمق خاک متعلق به طبقات ارتفاعی دوم، سوم و چهارم به مدل داده شد. برای سایر پارامترها، از پارامترهای طبقه اول که واسنجی شده بودند استفاده شد. سپس ذخیره کربن آلی شبیه سازی شده برای طبقات ارتفاعی دوم، سوم و چهارم با مقادیر اندازه‌گیری شده آن‌ها مقایسه گردید (Wang et al., 2012). برای انجام این مقایسه و نشان دادن میزان انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده، از رگرسیون خطی (Montgomery et al., 2021) و شاخص‌های آماری ضریب تبیین (Zhang, 2017) (رابطه ۲)، ضریب همبستگی پیرسون (Sedgwick, 2012) (رابطه ۳)، جذر میانگین مربعات خطا (Chicco et al., 2021) (رابطه ۴) و کارایی مدل‌سازی (Lin et al., 2017) (رابطه ۵) استفاده گردید. واسنجی و اعتبارسنجی مدل کربن سنچری نیازمند انتخاب دقیق داده‌های ورودی، مانند داده‌های آب و هوا، خصوصیات خاک و پارامترهای رشد گیاهان هستند (Nascimento et al., 2012). همچنین، در نظر گرفتن تغییرات مکانی و زمانی این ورودی‌ها، و همچنین هر گونه خطا یا عدم قطعیت مرتبط با آن‌ها نیز مهم است (Nascimento et al., 2012). واسنجی و اعتبارسنجی مدل سنچری مراحل حیاتی در حصول اطمینان از دقت مدل در ارائه پویایی کربن و نیتروژن در سامانه‌های خاک-گیاه هستند و می‌توانند برای پیش‌بینی‌های قابل اطمینان پاسخ‌های زیست‌بوم به تغییرات شرایط محیطی استفاده شوند (Althoff et al., 2018). به عنوان مثال، مدل سنچری می‌تواند برای پیش‌بینی تاثیر تغییرات آب و هوایی و کاربری اراضی بر روی سامانه‌های خاک-گیاه استفاده شود (Stergiadi et al., 2016). این مدل می‌تواند به عنوان یک ابزار قدرتمند برای مدیریت پایدار منابع طبیعی و بهبود کیفیت خاک و آب استفاده شود (Althoff et al., 2018).

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (S_i - \sigma)(O_i - \sigma)]^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \sigma)^2} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

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

$$RMSE = \frac{100}{\sigma} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

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

## ۲-۵- صحنه‌بندی‌های بکار رفته در مدل سنچری

### ۲-۵-۱- صحنه‌بندی تغییر اقلیم

در این مطالعه، از مدل سنچری برای بررسی و شبیه‌سازی تأثیر تغییر اقلیم بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی مورد مطالعه استفاده شد. صحنه‌بندی مورد استفاده شامل کاهش میزان بارندگی به میزان ۲/۱۵ میلی‌متر و افزایش میزان دما به میزان ۰/۴ سانتی‌گراد در هر دهه بود. این صحنه‌بندی براساس تغییرات بارندگی و دمای پیش‌بینی شده توسط مدل‌های آب و هوایی برای استان گیلان اعمال گردید (Kazemi et al., 2016).

### ۲-۵-۲- صحنه‌بندی‌های مدیریت

#### ۲-۵-۲-۱- چرای دام

با توجه به اینکه جنگل‌های تالش توسط احشام افراد محلی مورد چرای قرار می‌گیرند، در این پژوهش برای بررسی و شبیه‌سازی تأثیر چرای دام بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی از مدل سنچری استفاده گردید. صحنه‌بندی‌های بکار رفته شامل وضعیت بدون چرای سبک، چرای متوسط و چرای سنگین بود. در چرای سبک، متوسط و سنگین فرض بر این بود که بترتیب صفر تا ۲۵، ۲۵ تا ۵۰ و ۵۰ تا ۱۰۰ درصد از تولید اولیه توسط دام مصرف می‌شود (Chang et al., 2015).

#### ۲-۵-۲-۲- مصرف کود دامی

با توجه به شست‌شوی مواد غذایی از خاک‌های جنگلی در اثر بارندگی زیاد، مصرف کود دامی می‌تواند به تامین مواد غذایی کافی و رشد بهتر درختان و افزایش ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی کمک نماید. بعلاوه چنانچه تغییر اقلیم با کاهش بارندگی و افزایش دما همراه باشد، مصرف کود دامی می‌تواند از کاهش ذخیره کربن آلی این خاک‌ها در اثر تغییر اقلیم جلوگیری کند. به همین دلیل صحنه‌بندی مصرف کود دامی به میزان ۴۰ تن هر چهار سال یک‌بار و صحنه‌بندی تغییر اقلیم به همراه مصرف کود دامی نیز اعمال گردیدند (Lugato et al., 2014).

### ۲-۶- تجزیه‌های آماری

به‌منظور بررسی تأثیر ارتفاع منطقه بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی از طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار استفاده گردید. تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ انجام شد (McCormick and Salcedo, 2017).

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- آب و هوای منطقه مورد مطالعه

شرایط آب و هوایی حاکم بر خاک‌های جنگلی ارتفاعات مختلف، متفاوت بود. میانگین بارندگی سالیانه از ۱۲۴۷/۲۶ میلی‌متر در طبقه ارتفاعی اول تا ۲۰۵۲/۰۲ میلی‌متر در طبقه ارتفاعی چهارم متغیر بود (نمودار ۴). این نشان می‌دهد که میزان بارندگی با افزایش ارتفاع به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. میانگین دما سالیانه در طبقه ارتفاعی اول ۲۶/۹۳ سانتی‌گراد و در طبقه ارتفاعی چهارم ۱۵/۸۳ سانتی‌گراد بود (نمودار ۴). این نشان می‌دهد که دما با افزایش ارتفاع به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. میانگین تبخیر و تعرق سالیانه

نیز به تبعیت از دما، با افزایش ارتفاع کاهش یافت و از ۱۲۳۸/۳۸ میلی‌متر در طبقه ارتفاعی اول به ۷۴۰/۷۶ میلی‌متر در طبقه ارتفاعی چهارم کاهش یافت (نمودار ۴). به لحاظ توزیع ماهیانه بارندگی و دما نیز، بالاترین میانگین بارندگی ماهیانه در ماه‌های آذر، دی، بهمن، اسفند، فروردین و اردیبهشت و کم‌ترین آن‌ها در ماه‌های خرداد، تیر، مرداد، شهریور و مهر مشاهده گردید (نمودار ۱). این نشان می‌دهد که بارندگی در فصل زمستان و اوایل بهار در منطقه مورد مطالعه بیش‌تر و در اواخر بهار و فصل تابستان کم‌تر است. بالاترین میانگین دمای ماهیانه نیز در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد و کم‌ترین آن در ماه‌های آذر، دی و بهمن مشاهده گردید (نمودار ۲). این نشان می‌دهد که در منطقه مورد مطالعه دما در فصل تابستان بیش‌تر و در فصل زمستان کم‌تر است. بالاترین میانگین تبخیر و تعرق ماهیانه در ماه‌های تیر، مرداد، شهریور، مهر و آبان و کم‌ترین آن در ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت مشاهده گردید (نمودار ۳). این نشان می‌دهد که در منطقه مورد مطالعه، میزان تبخیر و تعرق در فصل تابستان و پائیز بیش‌تر و در اواخر فصل زمستان و اوایل فصل بهار کم‌تر است.

### ۳-۲- خصوصیات خاک‌های جنگلی مورد مطالعه

برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های جنگلی ارتفاعات به این شرح بود. عمق خاک‌ها کم (۷۵ سانتی‌متر)، مواد مادری آن‌ها یکسان، بافت خاک‌ها لوم رسی سیلتی، واکنش خاک‌ها اسیدی (۵/۱۹ - ۵/۴۹)، قابلیت هدایت الکتریکی آن‌ها کم (۰/۴۲ - ۰/۱۹ دسی‌زیمنس بر متر) و جرم مخصوص ظاهری خاک‌ها در محدوده ۱/۲۹ - ۱/۰۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب قرار داشت (جدول ۱).

غلظت کربن آلی نیز در آن‌ها از ۰/۹۴ تا ۲/۶۲ درصد متغییر بود (جدول ۱). مقایسه ویژگی‌های خاک‌های جنگلی در ارتفاع مختلف نشان داد که با افزایش ارتفاع، تراکم پوشش گیاهی و غلظت کربن آلی افزایش یافت، ولی pH، میزان هدایت الکتریکی، جرم مخصوص ظاهری و شوری خاک کاهش یافت (جدول ۱). افزایش غلظت کربن آلی در خاک‌های مرتفع‌تر را می‌توان به بارندگی بیش‌تر و دمای کم‌تر نسبت داد (شکل ۴). بارندگی بیش‌تر منجر به افزایش مواد آلی خاک از طریق برگشت بیش‌تر بقایای گیاهی به خاک می‌شود (Smith et al., 2002). دمای کم‌تر نیز باعث کاهش فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک و در نتیجه کاهش تجزیه مواد آلی می‌شود (Banday et al., 2019). کاهش میزان جرم مخصوص ظاهری خاک در ارتفاعات را می‌توان به ماده آلی بیش‌تر نسبت داد. ماده آلی دارای وزن مخصوص کم‌تری نسبت به مواد معدنی خاک است. بنابراین، افزایش ماده آلی در خاک باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری آن می‌شود (Beutler et al., 2017). با افزایش بارندگی در ارتفاعات ترکیبات قلیایی، آهک و املاح محلول از خاک شسته شده و این امر باعث اسیدی شدن خاک و کاهش شوری و هدایت الکتریکی آن می‌شود (Amirpour et al., 2016).

### ۳-۳- تأثیر ارتفاع منطقه بر غلظت و ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر ارتفاع منطقه بر غلظت و ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی در سطح احتمال یک درصد ( $P \leq 0/01$ ) معنی‌دار است (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین‌ها نیز گویای افزایش غلظت و ذخیره کربن آلی خاک با افزایش ارتفاع از سطح دریا بودند (جدول ۳). بیش‌ترین غلظت و ذخیره کربن آلی به ترتیب با مقادیر ۲/۶۲ درصد و ۹۷/۲۰ تن در هکتار در طبقه ارتفاعی چهارم و کم‌ترین مقادیر آن‌ها به میزان ۰/۹۴ درصد و ۴۲/۷۷ تن در هکتار در طبقه ارتفاعی اول مشاهده شد (جدول ۳). تحلیل همبستگی پیرسون نشان داد که غلظت و ذخیره کربن آلی خاک با ارتفاع و بارندگی منطقه همبستگی مثبت و معنی‌دار ( $P \leq 0/01$ ) و با دما همبستگی منفی و معنی‌دار ( $P \leq 0/01$ ) دارد (جدول ۴). به عبارت دیگر، افزایش بارندگی و کاهش دما در اثر افزایش ارتفاع،

با افزایش غلظت و ذخیره کربن آلی خاک همراه بود (منصوری و همکاران، ۱۳۹۶). نتایج این مطالعه با یافته‌های پژوهش‌های مشابه در سایر نقاط جهان همسو است. به عنوان مثال، مطالعه‌ای در منطقه هیمالیای هند، افزایش غلظت و ذخیره کربن آلی خاک با افزایش ارتفاع را تأیید کرده است (Pandey et al., 2015). افزایش غلظت و ذخیره کربن آلی خاک با افزایش ارتفاع را می‌توان به دو عامل کلیدی از جمله افزایش کربن ورودی به خاک و کاهش کربن خروجی از خاک نسبت داد. با افزایش بارندگی در ارتفاعات، پوشش گیاهی انبوه‌تر شده و برگشت بقایای و میزان کربن ورودی به خاک افزایش می‌یابد (Knapp et al., 2017; Rocci et al., 2023). کاهش دما با افزایش ارتفاع نیز از سرعت تجزیه ماده آلی کاسته و کربن خروجی از خاک را کاهش می‌دهد (Schindlbacher et al., 2010).

جدول ۲: نتایج تجزیه واریانس تاثیر ارتفاع منطقه بر غلظت و ذخیره کربن آلی خاک.

میانگین مربعات Mean square	درجه آزادی df	منبع تغییرات S.O.V
ذخیره کربن آلی Organic Carbon Stocks	درصد کربن آلی خاک Organic Carbon Content	ارتفاع از سطح دریا Altitude
۱۴۷۹/۲۲۳**	۱/۴۸۷**	۳
۰/۲۰۹	۰/۰۲۶	۶
		اشتباه Error

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

جدول ۳: مقایسه میانگین‌های بررسی تاثیر ارتفاع منطقه بر غلظت و ذخیره کربن آلی خاک.

ارتفاع Altitude				ویژگی‌های خاک Soil properties
۲۰۰۰-۲۵۰۰	۱۵۰۰-۲۰۰۰	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۵۰۰-۱۰۰۰	درصد کربن آلی Organic Carbon Content (%)
۲/۶۲ <sup>a</sup>	۲/۰۵ <sup>b</sup>	۱/۶۸ <sup>c</sup>	۰/۹۴ <sup>d</sup>	ذخیره کربن آلی Organic Carbon Stocks (t/ha)
۹۷/۲۰ <sup>a</sup>	۷۹/۶۴ <sup>b</sup>	۶۷/۰۳ <sup>c</sup>	۴۲/۷۷ <sup>d</sup>	

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

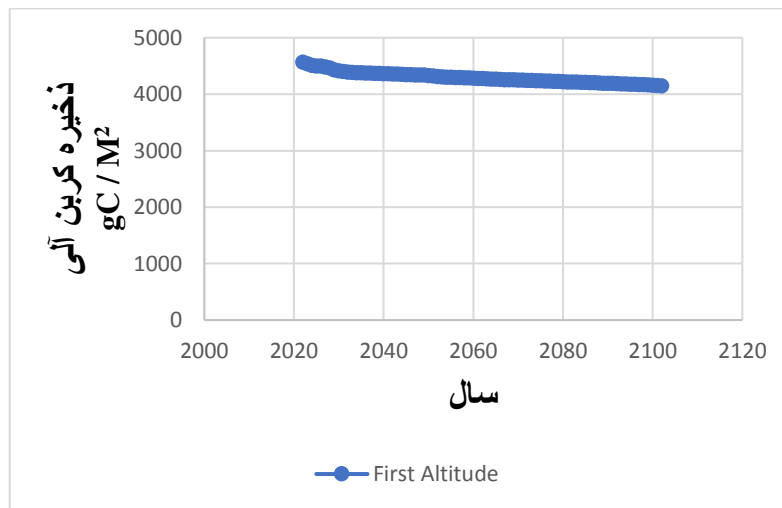
جدول ۴: ضرایب همبستگی پیرسون (r) برای ارتفاع منطقه، بارندگی و دما با غلظت و ذخیره کربن آلی خاک.

ذخیره کربن آلی Organic Carbon Stocks	درصد کربن آلی Organic Carbon Content	ارتفاع از سطح دریا Altitude
۰/۹۹۳**	۰/۹۹۳**	بارندگی Precipitation
۰/۹۶۰*	۰/۹۵۸*	دما Temperature
-۰/۹۷۱*	-۰/۹۷۰*	

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

### ۳-۴- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل سنچری

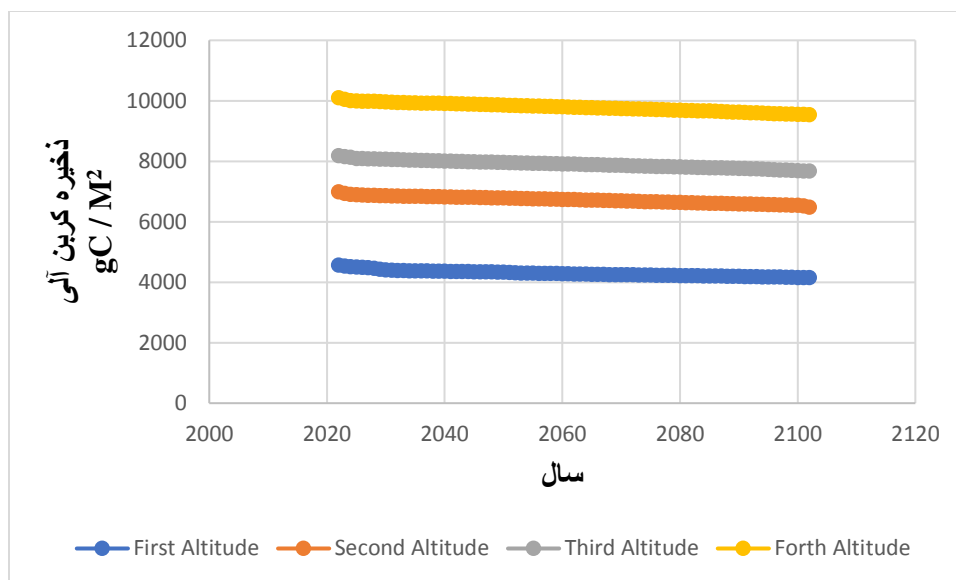
نتایج واسنجی مدل سنچری برای ذخیره کربن آلی خاک، در اولین طبقه ارتفاعی منطقه مورد مطالعه، نشان داد که مقدار ذخیره کربن آلی شبیه‌سازی شده توسط مدل با مقدار اندازه‌گیری شده آن بسیار نزدیک است. ذخیره کربن آلی خاک در اولین طبقه ارتفاعی منطقه مورد مطالعه به میزان ۴۲/۷۷ تن بر هکتار تا عمق ۳۵ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد و مدل نیز مقدار ۴۵/۶۸ تن بر هکتار را شبیه‌سازی نمود که مدل مقدار ۲/۹۱ تن بر هکتار، کربن آلی بیش‌تری را شبیه‌سازی کرده است (شکل ۲).



شکل ۲: خروجی مدل برای ذخیره کربن آلی طبقه ارتفاعی اول در منطقه مورد مطالعه تا سال ۲۱۰۲.

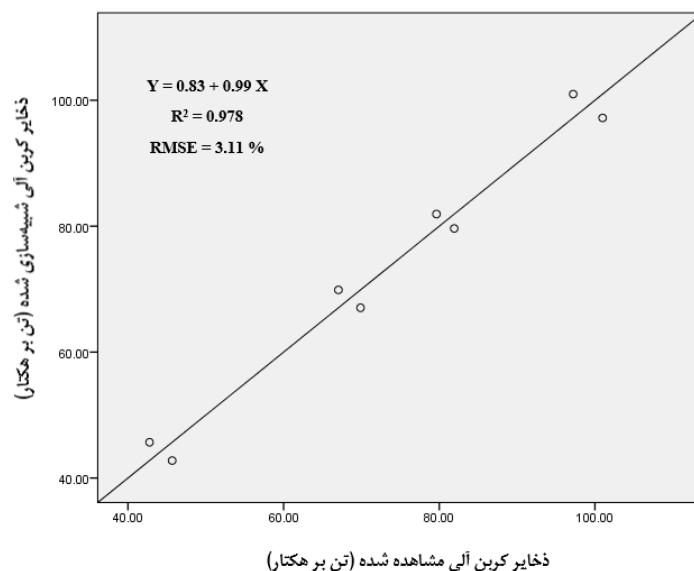
سپس مدل برای سه طبقه ارتفاعی دیگر اجرا گردید تا دقت مدل در شبیه‌سازی ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی منطقه مورد مطالعه، مورد ارزیابی قرار گیرد. مقادیر ذخیره کربن آلی اندازه‌گیری شده برای طبقات ارتفاعی دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۶۷/۰۳، ۷۹/۶۴ و ۹۷/۲۰ تن بر هکتار و مقادیر شبیه‌سازی شده آن‌ها توسط مدل نیز به ترتیب ۶۹/۸۸، ۸۱/۹۲ و ۱۰۰/۹۸ تن بر هکتار بودند. بنابراین، مدل برای طبقات ارتفاعی دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۲/۸۵، ۲/۲۸ و ۳/۷۸ تن بر هکتار کربن آلی بیش‌تری از مقادیر اندازه‌گیری شده آن‌ها، شبیه‌سازی کرده است (شکل ۳).





شکل ۳: خروجی مدل برای ذخیره کربن آلی طبقات ارتفاعی مختلف در منطقه مورد مطالعه تا سال ۲۱۰۲ (وضعیت کنونی).

نتایج مربوط به رگرسیون خطی (شکل ۴)، شاخص‌های آماری ضریب تبیین و ضریب همبستگی پیرسون، جذر میانگین مربعات خطا و همچنین راندمان مدل‌سازی (جدول ۵) که برای اعتبارسنجی مدل لازم می‌باشند، نشان می‌دهند که این مدل با دقت بسیار بالایی ذخیره کربن آلی خاک‌ها را در منطقه مورد مطالعه شبیه‌سازی کرده است. حداکثر اختلاف بین مقدار ذخیره کربن آلی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برابر با ۳/۷۸ تن بر هکتار (۳/۸۹ درصد) و مربوط به طبقه ارتفاعی چهارم بود. کم‌ترین اختلاف نیز برای طبقه ارتفاعی سوم به میزان ۲/۲۸ تن بر هکتار (۲/۸۶ درصد) به دست آمد. وجود ضریب تبیین ( $R^2$ ) ۰/۹۸ نشان می‌دهد که ۹۸ درصد تغییرات ذخیره کربن شبیه‌سازی شده توسط مدل از تغییرات ذخیره کربن اندازه‌گیری شده منشا 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 ۰/۹۹ 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 ۳/۱۱ بود. فارینا و همکاران (۲۰۱۳) از جذر میانگین مربعات خطا به عنوان مهم‌ترین فاکتور در ارزیابی مدل استفاده کردند. راندمان مدل‌سازی نیز برابر با ۰/۹۸ بود که نشان می‌دهد مدل بطور دقیقی روند تغییرات ذخایر کربن آلی خاک را در چهار طبقه ارتفاعی مورد مطالعه توصیف می‌کند.



شکل ۴: اعتبارسنجی مدل با مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده ذخایر کربن آلی در هر چهار طبقه ارتفاعی در سال ۲۰۲۲.

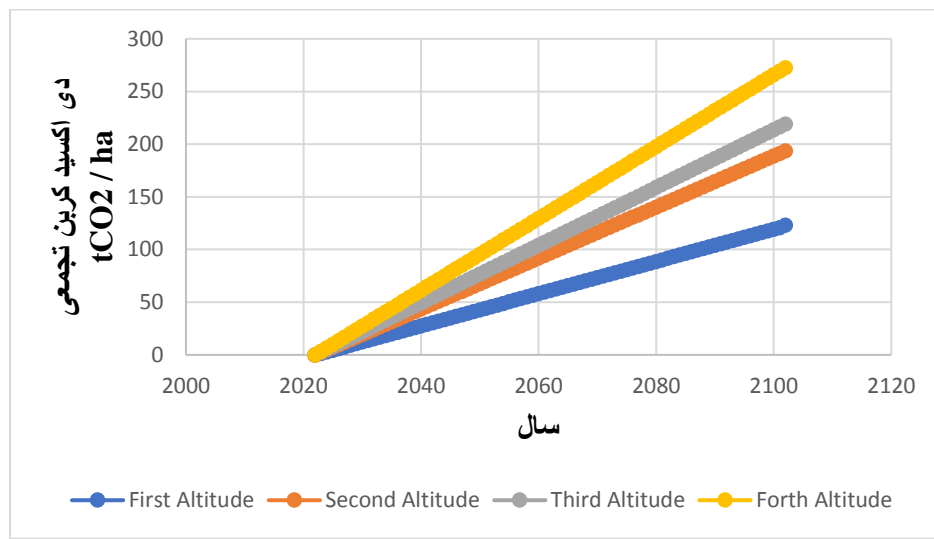
جدول ۵: شاخص‌های آماری محاسبه شده برای اعتبارسنجی مدل.

شاخص‌های آماری Statistical Indicators				پارامتر Parameters
راندمان مدل‌سازی Model Efficiency	جذر میانگین مربعات خطا Root Mean Square Error	ضریب تبیین Coefficient of Explanation	ضریب همبستگی Correlation Coefficient	کربن آلی Organic Carbon
۰/۹۸	۳/۱۱	۰/۹۸	۰/۹۹	

### ۳-۵- شبیه‌سازی صحنه‌بندی‌های مختلف توسط مدل سنجری

#### ۳-۵-۱- صحنه‌بندی حفظ وضعیت کنونی

در صحنه‌بندی اول، که حفظ وضعیت کنونی است، مدل نشان می‌دهد که ذخیره کربن آلی خاک با گذشت زمان اندکی کاهش خواهد یافت (شکل ۳). میزان کاهش ذخیره کربن آلی خاک از ۲/۴۸ تن در هکتار برای طبقه اول ارتفاعی تا ۹/۵۷ تن در هکتار برای طبقه چهارم ارتفاعی متغیر خواهد بود. این کاهش می‌تواند به دلیل عوامل مختلفی از جمله فرسایش خاک، شست‌شوی مواد غذایی و کاهش باروری جنگل باشد (Hua et al., 2018). در هر صورت، این میزان تغییرات در طی ۸۰ سال، اندک می‌باشد و می‌توان گفت که ذخیره کربن آلی در این خاک‌ها به حالت تعادل است. مدل همچنین نشان می‌دهد که مقدار تجمعی گاز دی‌اکسید کربن خروجی از خاک با گذشت زمان افزایش می‌یابد (شکل ۵). تصاعد گاز دی‌اکسید کربن از خاک ناشی از تنفس ریشه و تجزیه کربن آلی خاک است (Cardinael et al., 2020). علاوه بر این، مقدار تصاعد تجمعی گاز دی‌اکسید کربن در هر طبقه ارتفاعی بسته به شرایط آب و هوایی آن طبقه متفاوت است. در طبقات ارتفاعی بالاتر، که میزان کربن ورودی به خاک و محتوای کربن آلی خاک بیش‌تر است، مقدار تصاعد تجمعی گاز دی‌اکسید کربن نیز بیش‌تر است (Cardinael et al., 2020). زیرا در حالت تعادل، میزان کربن ورودی و خروجی با هم برابر می‌باشند.



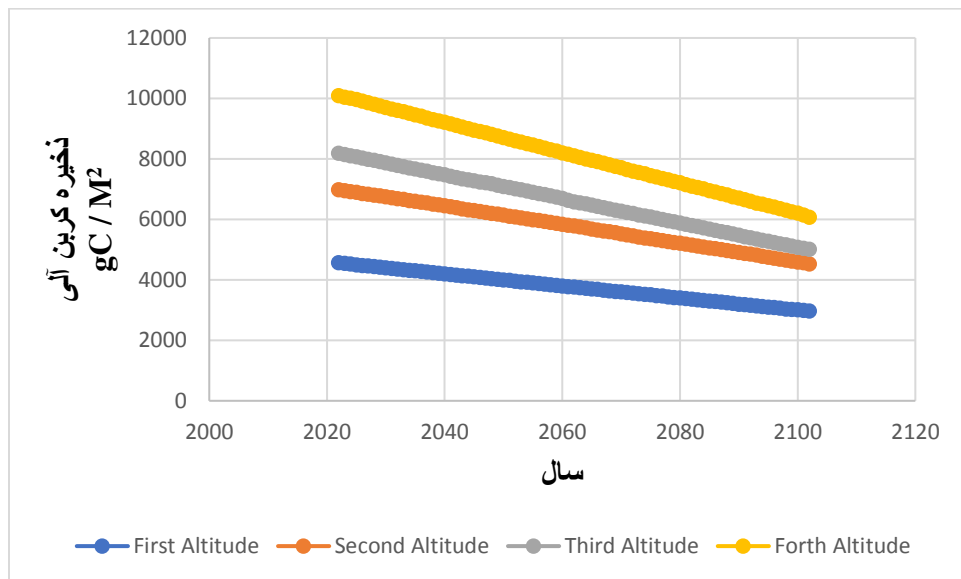
شکل ۵: خروجی مدل برای دی اکسید کربن تجمعی تا سال ۲۱۰۲ در هر چهار طبقه ارتفاعی در منطقه مورد مطالعه (وضعیت کنونی).

### ۳-۵-۲- صحنه‌بندی تغییر اقلیم و تأثیر آن بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی

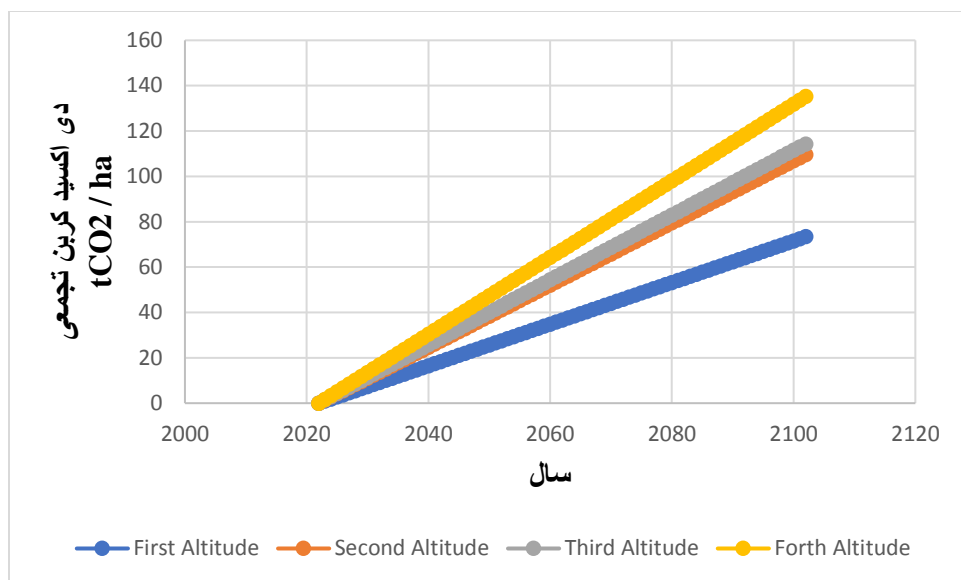
تغییر اقلیم یکی از چالش‌های مهم قرن حاضر است که می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر زیست بوم‌های مختلف، از جمله جنگل‌ها، داشته باشد (Ripple et al., 2020). جنگل‌ها به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین ذخایر کربن آلی زمین، نقش مهمی در جذب و ذخیره سازی دی اکسید کربن اتمسفری دارند (Pan et al., 2011). اما تغییر اقلیم می‌تواند تأثیر منفی بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی داشته باشد. براساس پیش‌بینی‌های انجام شده، استان گیلان در آینده با کاهش میزان بارندگی و افزایش دما مواجه خواهد شد (Kazemi et al., 2016). مدل سنچری که یک مدل اقلیمی جهانی است، نشان می‌دهد که چنانچه تغییر اقلیم پیش‌بینی شده در استان گیلان رخ دهد، ذخیره کربن آلی تمام طبقات ارتفاعی کاهش می‌یابد و این کاهش برای مناطق مرتفع‌تر، بیش‌تر خواهد بود (شکل ۶). میزان کاهش ذخیره کربن آلی خاک‌ها از ۲۸/۳۶ درصد در طبقه ارتفاعی اول تا ۳۶/۳۵ درصد در طبقه ارتفاعی چهارم متغیر خواهد بود (شکل ۶). یعنی بطور متوسط ۳۲/۳۵ درصد از ذخیره کربن آلی فعلی این خاک‌ها طی ۸۰ سال آینده (تا سال ۲۱۰۲) به گاز دی اکسید کربن تبدیل و از خاک خارج می‌گردد (شکل ۷). در این مدت، خاک‌های جنگلی ارتفاعات مختلف به منبعی برای تولید گاز دی اکسید کربن اتمسفری تبدیل می‌شوند.

کاهش ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی را می‌توان به عوامل متعددی مرتبط با تغییر اقلیم نسبت داد که از جمله آن‌ها می‌توان به افزایش دما، کاهش میزان بارندگی و تغییر الگوی بارش اشاره کرد. افزایش دما سرعت تجزیه میکروبی مواد آلی خاک را افزایش داده و منجر به آزاد شدن گاز دی اکسید کربن به اتمسفر و در نهایت کاهش ذخیره کربن آلی خاک می‌شود (Yang et al., 2007; Banday et al., 2019). همچنین، کاهش بارندگی مستقیماً بر رشد گیاهان و در نتیجه میزان مواد آلی ورودی به خاک تأثیر گذاشته و ذخیره کربن آلی را کاهش می‌دهد (Smith et al., 2002; Zhang et al., 2019). علاوه بر این، تغییر الگوی بارندگی، به ویژه افزایش شدت بارش‌ها، می‌تواند باعث افزایش فرسایش خاک شود (Fang et al., 2020). فرسایش خاک به نوبه خود منجر به از بین رفتن لایه‌های سطحی خاک که غنی از مواد آلی هستند شده و در نتیجه، ذخیره کربن آلی خاک را کاهش می‌دهد (Fang et al., 2020).

کاهش ذخیره کربن آلی در خاک‌های جنگلی پیامدهای منفی متعددی به دنبال دارد. این امر موجب افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تشدید پدیده گرمایش زمین می‌شود (IPCC, 2014). از طرفی، کیفیت و حاصل‌خیزی خاک‌های جنگلی نیز بطور منفی تحت تاثیر قرار گرفته و سبب کاهش رشد درختان و افت بهره‌وری جنگل می‌گردد (Lal, 2005). همچنین، با کاهش کربن آلی، ساختمان خاک ضعیف شده و تخلخل آن کاهش می‌یابد که در نهایت منجر به افزایش خطرات زیست محیطی مانند فرسایش خاک و سیلاب می‌شود (Jobbagy and Jackson, 2000).



شکل ۶: خروجی مدل برای ذخیره کربن آلی طبقات ارتفاعی مختلف در منطقه مورد مطالعه تا سال ۲۱۰۲ (صحنه‌بندی تغییر اقلیم).



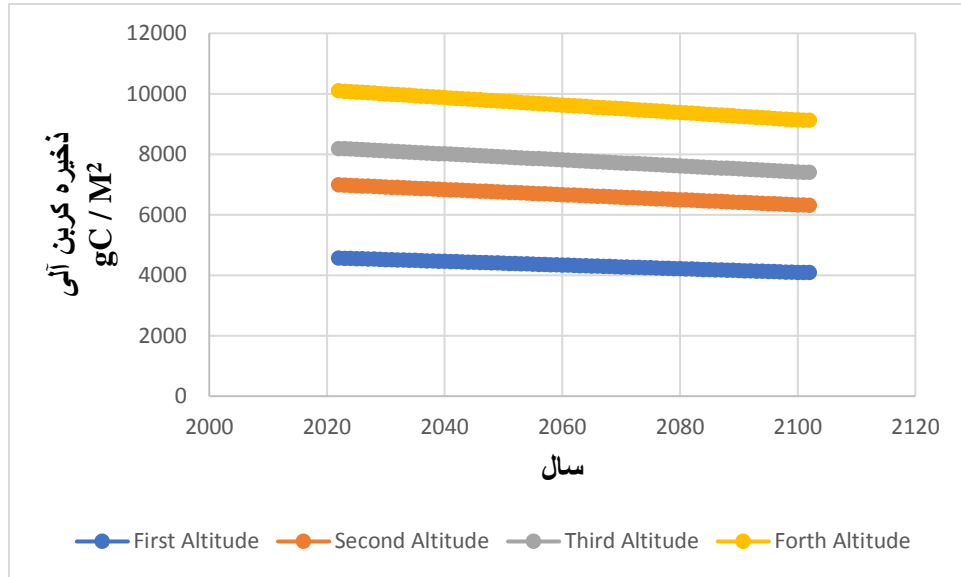
شکل ۷: خروجی مدل برای دی اکسید کربن تجمعی تا سال ۲۱۰۲ در هر چهار طبقه ارتفاعی در منطقه مورد مطالعه (صحنه‌بندی تغییر اقلیم).

### ۳-۵-۳- صحنه‌بندی چرای دام و تاثیر آن بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی

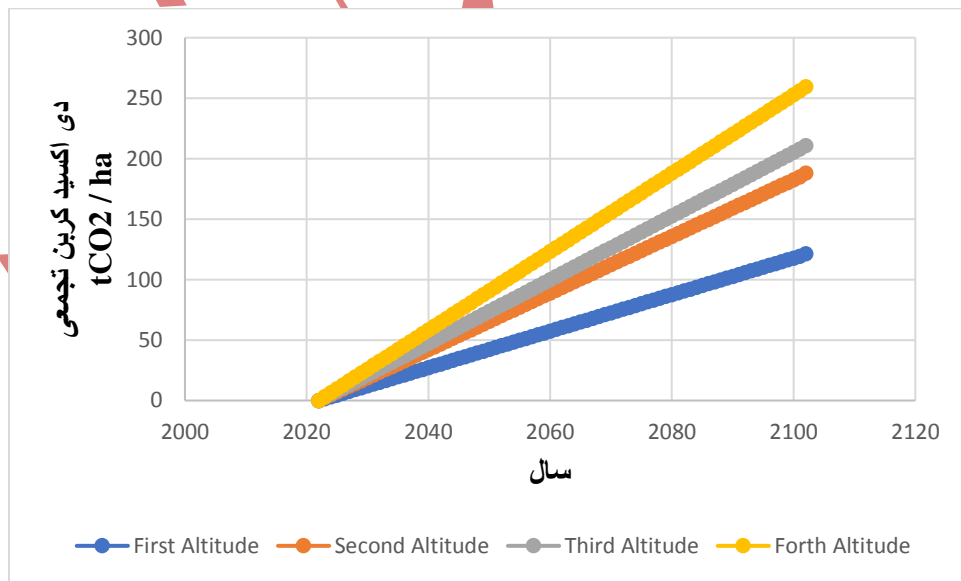
دامداری یکی از فعالیت‌های مهم اقتصادی در مناطق جنگلی شهرستان تالش است و دام‌ها در این منطقه عمدتاً برای تولید گوشت، شیر و محصولات لبنی پرورش داده می‌شوند. به همین دلیل در این مطالعه، تاثیر چرای دام بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی مورد بررسی قرار گرفت و شبیه‌سازی شد. در این مطالعه، چهار صحنه‌بندی برای چرای دام در نظر گرفته شد: بدون چرای دام (۲۵ درصد از علوفه در دسترس توسط احشام مصرف می‌شود)، چرای متوسط (۵۰ درصد از علوفه در دسترس توسط احشام مصرف می‌شود) و چرای سنگین (۷۵ درصد از علوفه در دسترس توسط احشام مصرف می‌شود) (Török et al., 2018). نتایج نشان داد که چرای دام می‌تواند باعث کاهش قابل توجهی در ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی شود. میزان کاهش ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی به شدت چرای دام و شرایط آب و هوایی حاکم بر خاک‌ها، بستگی داشت. در چرای سبک، متوسط و سنگین، میزان کاهش ذخیره کربن آلی خاک‌ها به ترتیب ۱/۰۰ تا ۴/۳۷ (شکل ۸)، ۳/۸۵ تا ۸/۷۸ (شکل ۱۰) و ۸/۳۴ تا ۱۸/۰۵ درصد (شکل ۱۲) نسبت به وضعیت بدون چرای دام بود. در این بررسی، میزان کاهش ذخیره کربن آلی خاک برای مناطق مرتفع‌تر، بیش‌تر بود. این نتایج نشان می‌دهد که مدیریت چرای دام در مناطق جنگلی شهرستان تالش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و چرای نامناسب می‌تواند باعث کاهش ذخیره کربن آلی خاک‌ها و در نتیجه کاهش باروری جنگل و تشدید اثرات نامطلوب تغییر اقلیم شود.

چرای دام می‌تواند تاثیر مثبت و منفی بر زیست بوم جنگل داشته باشد. بعضی مطالعات نشان داده‌اند که چرای گاوها می‌تواند باعث افزایش تنوع زیستی و رشد گونه‌های گیاهی نادر در زیست بوم‌های مرتعی شود (Bakker et al., 2010). مطالعه دیگری نشان داد که چرای دام باعث بهبود سلامت خاک از طریق افزایش ماده آلی خاک و چرخش مواد غذایی گردید (Teague et al., 2013). البته باید توجه داشت که تاثیرات مثبت چرای دام بستگی به مدیریت مناسب آن، مثل چرای تناوبی و اجتناب از چرای مفرط دارد. در غیر این صورت چرای نامناسب باعث تاثیرات نامطلوب زیست محیطی مثل فرسایش خاک، از دست رفتن تنوع زیستی، تخریب پوشش گیاهی و آلودگی آب می‌شود (Zhang et al., 2020). از آنجا که کربن آلی خاک یکی از مهم‌ترین مولفه‌های چرخه کربن جهانی است و نقش مهمی در

کاهش اثرات سوء تغییر اقلیم دارد، مدیریت چرا از اهمیت ویژه ای برخوردار است و چرا نامناسب دام می تواند باعث کاهش ذخیره کربن آلی خاک شود. این کاهش به دلیل کاهش بقایای گیاهی ورودی به خاک و افزایش فعالیت میکروارگانیسم های تجزیه کننده است (Chen et al., 2019).

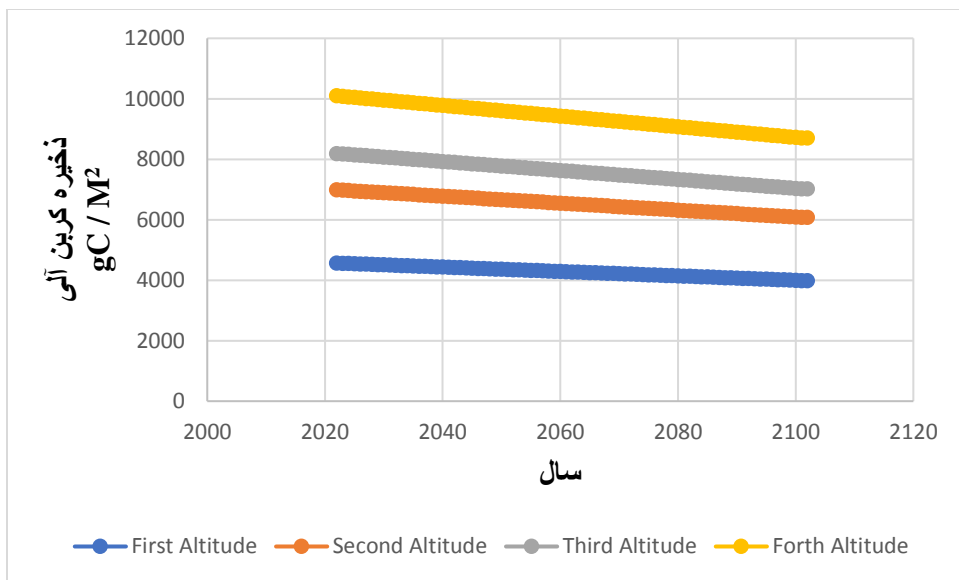


شکل ۸: خروجی مدل برای ذخیره کربن آلی طبقات ارتفاعی مختلف در منطقه مورد مطالعه تا سال ۲۱۰۲ (صحنه بندی چرا کم).

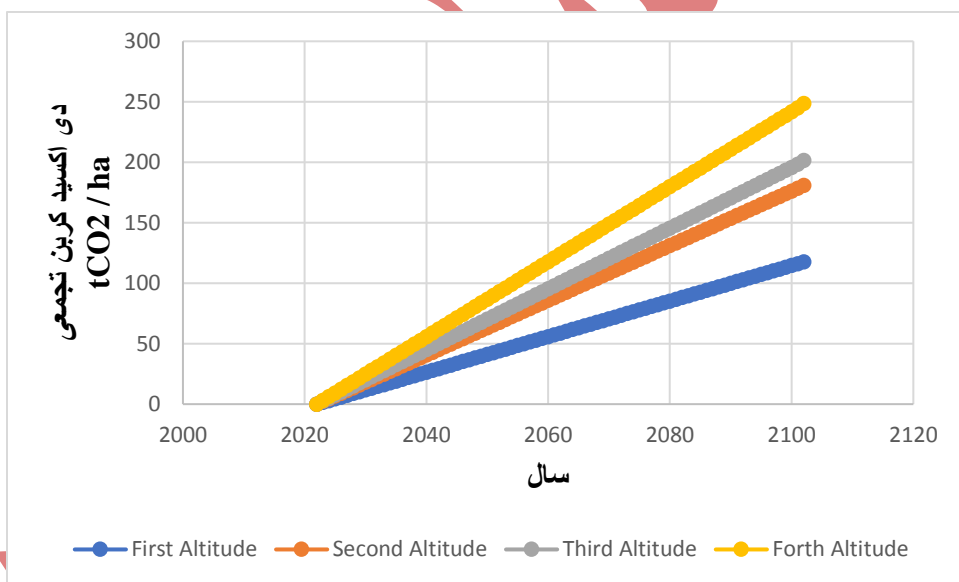


شکل ۹: خروجی مدل برای دی اکسید کربن تجمعی تا سال ۲۱۰۲ در هر چهار طبقه ارتفاعی در منطقه مورد مطالعه (صحنه بندی چرا کم).

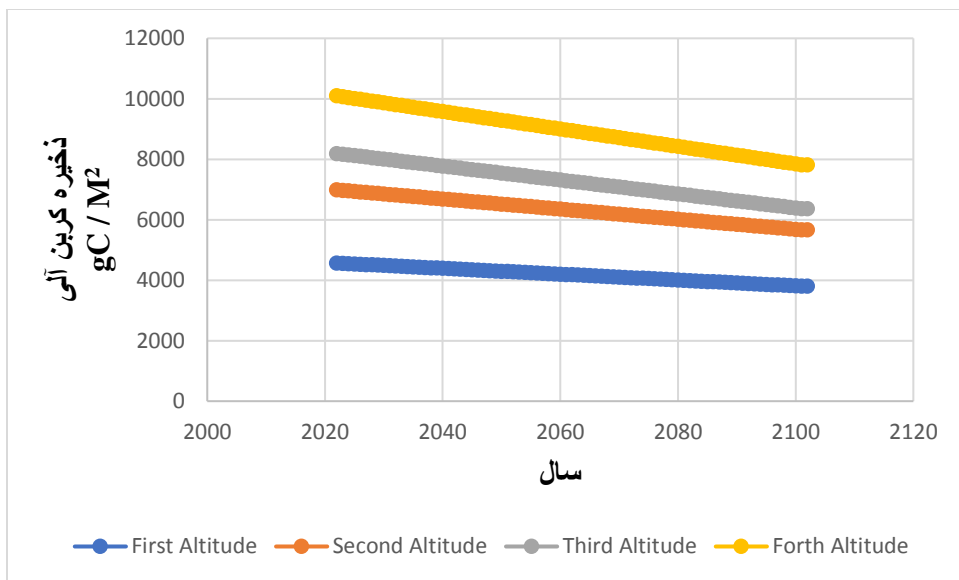




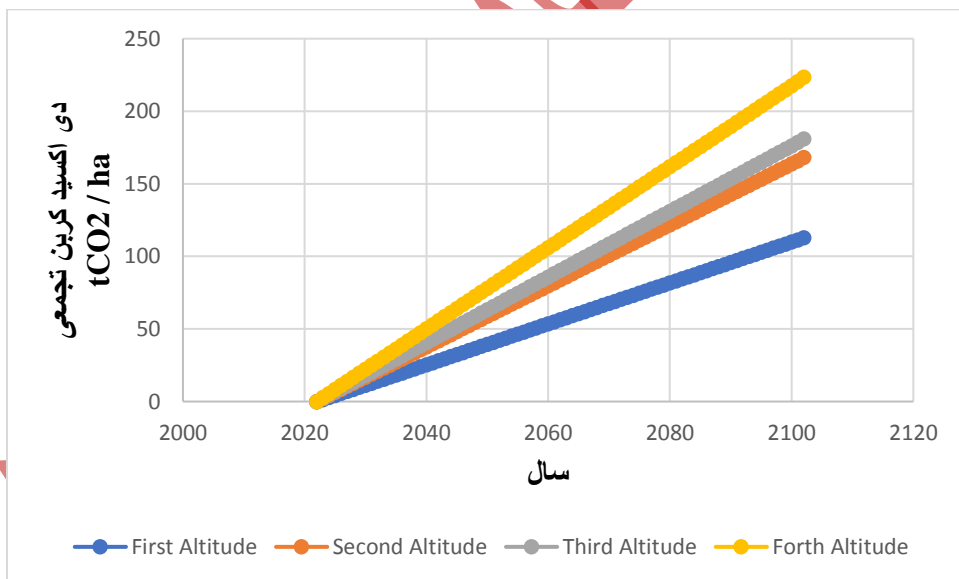
شکل ۱۰: خروجی مدل برای ذخیره کربن آلی طبقات ارتفاعی مختلف در منطقه مورد مطالعه تا سال ۲۱۰۲ (صحنه‌بندی چرا متوسط).



شکل ۱۱: خروجی مدل برای دی اکسید کربن تجمعی تا سال ۲۱۰۲ در هر چهار طبقه ارتفاعی در منطقه مورد مطالعه (صحنه‌بندی چرا متوسط).



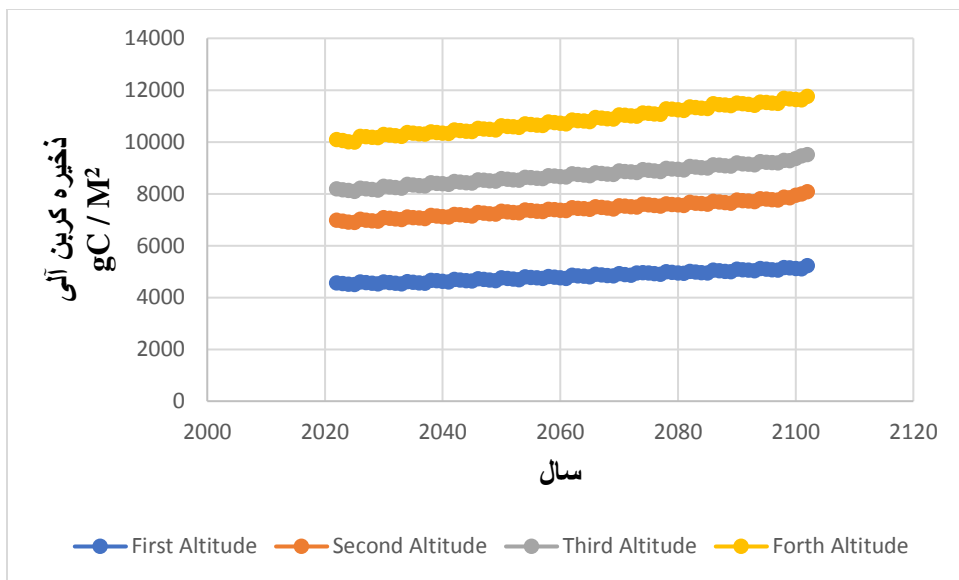
شکل ۱۲: خروجی مدل برای ذخیره کربن آلی طبقات ارتفاعی مختلف در منطقه مورد مطالعه تا سال ۲۱۰۲ (صحنه‌بندی چرا شدید).



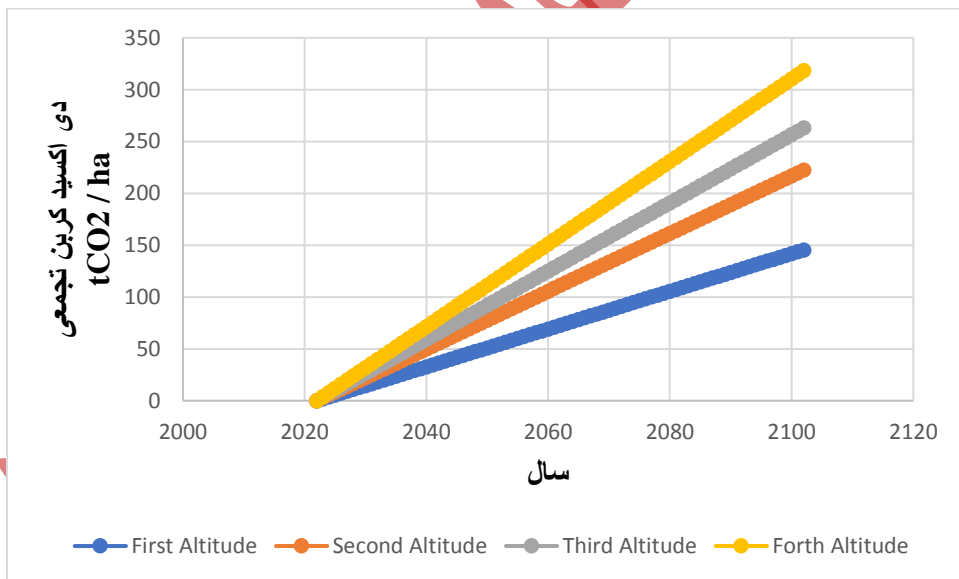
شکل ۱۳: خروجی مدل برای دی اکسید کربن تجمعی تا سال ۲۱۰۲ در هر چهار طبقه ارتفاعی در منطقه مورد مطالعه (صحنه‌بندی چرا شدید).

### ۳-۵-۴- صحنه‌بندی مصرف کود دامی و تاثیر آن بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی

یکی از مشکلات خاک‌های جنگلی واقع در ارتفاعات، فرسایش خاک و شست‌شوی مواد غذایی در اثر بارندگی زیاد می‌باشد که کاهش باروری جنگل و کاهش ذخیره کربن آلی این خاک‌ها را به همراه دارد (Tsui et al., 2004). علاوه بر آن، اسیدی شدن زیاد خاک‌های جنگلی نیز از حاصل‌خیزی آن‌ها می‌کاهد (Jones, 2010). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میزان بارندگی خاک‌های جنگلی زیاد و از ۱۲۴۷/۲۶ میلی‌متر در طبقه ارتفاعی اول تا ۲۰۵۰/۰۲ میلی‌متر در طبقه ارتفاعی چهارم متغیر بود (نمودار ۴). pH این خاک‌ها نیز اسیدی و در محدوده ۴/۵۹ تا ۵/۱۹ قرار داشت (جدول ۱). برای غلبه بر مشکلات ذکر شده، مصرف کودهای دامی می‌تواند به عنوان یک راهکار عملی مطرح شود (Stockmann et al., 2013). کودهای دامی علاوه بر آزادی‌سازی مواد غذایی مورد نیاز جنگل، می‌توانند در کاهش فرسایش خاک و افزایش ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی، مخصوصاً هنگامی که تغییر اقلیم اتفاق می‌افتد، موثر باشند (Rhodes, 2014). به همین دلیل، تأثیر مصرف کود دامی به عنوان یک اقدام مدیریتی بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی توسط مدل سنچری بررسی و شبیه‌سازی گردید. میزان مصرف کود دامی به میزان ۴۰ تن در هکتار و با تناوب هر چهار سال یک بار در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی مدل سنچری نشان داد که ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی با مصرف کود دامی افزایش یافت (Lal, 2009) و این افزایش از ۲۶/۱۲ درصد در طبقه ارتفاعی اول تا ۲۹/۵۱ درصد در طبقه ارتفاعی چهارم متغیر بود (شکل ۱۴). تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که مصرف کود دامی می‌تواند باعث افزایش حاصل‌خیزی خاک و رشد درختان جنگلی بشود. در مطالعه‌ای که در چین انجام شد مصرف کود خوک در یک جنگل تخریب شده باعث بهبود حاصل‌خیزی خاک و افزایش رشد درختان شد (Li et al., 2021). در مطالعه دیگری در فنلاند تأثیر کود گاوی بر رشد و جذب مواد غذایی درختان کاج اسکات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مصرف کود گاوی باعث افزایش رشد درختان و جذب مواد غذایی توسط آن‌ها شد (Saravesi et al., 2008). در پژوهش دیگری در هند تأثیر کود بز بر خواص خاک و رشد درختان یک جنگل تخریب شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مصرف کود دامی باعث افزایش حاصل‌خیزی خاک و رشد درختان شد (Singh et al., 2011). در برزیل نیز تأثیر مقادیر مختلف کود گاوی بر رشد درختان اکالیپتوس و خصوصیات خاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کود دامی باعث بهبود حاصل‌خیزی خاک و افزایش رشد درختان شد. اما مقادیر زیاد کود اثر منفی روی pH خاک و فراهمی عناصر غذایی داشت (Fischer et al., 2010). این تحقیقات پیشنهاد می‌کنند که کاربرد کود دامی می‌تواند تأثیر مثبت روی حاصل‌خیزی خاک و رشد درختان داشته باشد. اما مقدار بهینه و توالی مصرف کود ممکن است بسته به شرایط خاص هر زیست بوم فرق کند.



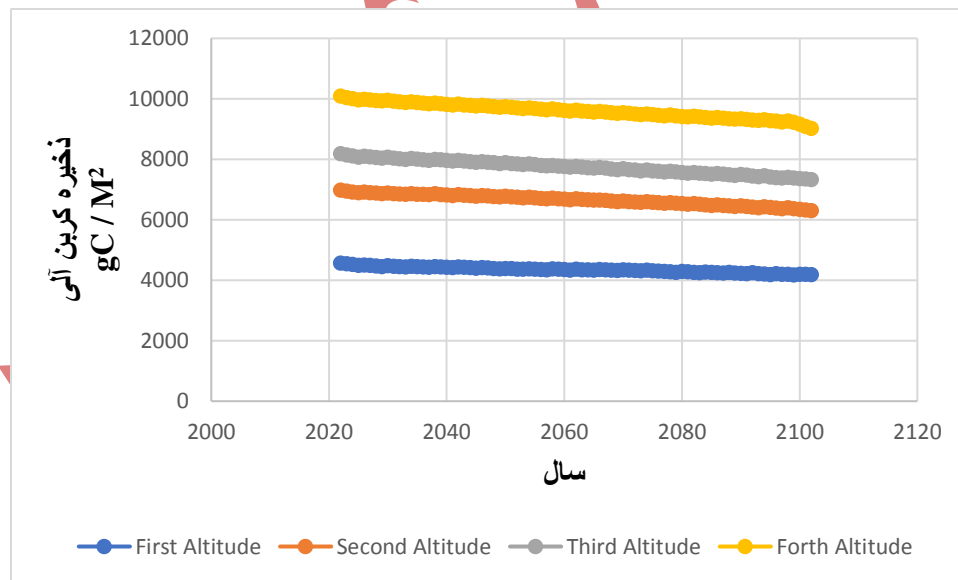
شکل ۱۴: خروجی مدل برای ذخیره کربن آلی طبقات ارتفاعی مختلف در منطقه مورد مطالعه تا سال ۲۱۰۲ (صحنه‌بندی کود دامی).



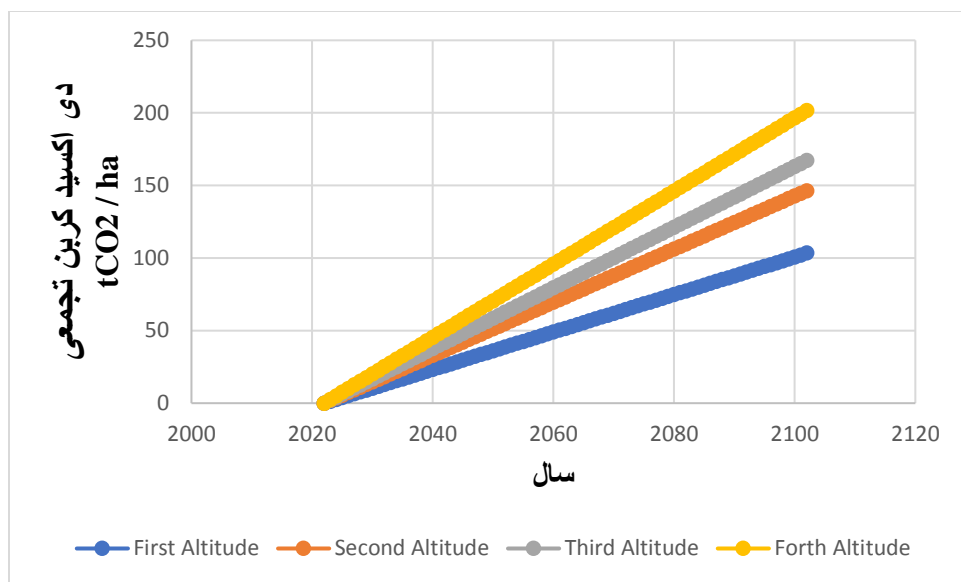
شکل ۱۵: خروجی مدل برای دی اکسید کربن تجمعی تا سال ۲۱۰۲ در هر چهار طبقه ارتفاعی در منطقه مورد مطالعه (صحنه‌بندی کود دامی).

### ۳-۵-۵- صحنه‌بندی تغییر اقلیم توام با مصرف کود دامی و تاثیر آن بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی

مدل سنچری نشان داد که تغییر اقلیم باعث کاهش ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی استان گیلان می‌شود (شکل ۶). میزان کاهش ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی در طبقات ارتفاعی مختلف متفاوت است و از ۲۸/۳۶ درصد برای طبقه ارتفاعی اول تا ۳۶/۳۵ درصد برای طبقه ارتفاعی چهارم متغیر می‌باشد (شکل ۶) (Chang et al., 2018). این مدل همچنین نشان داد که مصرف کود دامی باعث افزایش ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی می‌شود (شکل ۱۴). میزان افزایش ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی در طبقات ارتفاعی مختلف، متفاوت است و از ۲۶/۱۲ درصد برای طبقه ارتفاعی اول تا ۲۹/۵۱ درصد برای طبقه ارتفاعی چهارم متغیر می‌باشد (شکل ۱۴) (Chang et al., 2018). اجرای صحنه‌بندی تغییر اقلیم توام با مصرف کود دامی نشان داد که اگرچه مصرف کود دامی می‌تواند تا حدودی زیادی اثر سوء تغییر اقلیم را بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی جبران نماید، اما نمی‌تواند به طور کامل این اثر را خنثی کند (شکل ۱۶). در این شرایط کاهش ذخیره کربن آلی خاک‌های طبقات ارتفاعی مختلف از ۱/۴۹ درصد در طبقه ارتفاعی اول تا ۵/۴۲ درصد در طبقه ارتفاعی چهارم متغیر است (شکل ۱۶) (Molina-Montenegro et al., 2016). یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که تغییر اقلیم یک تهدید جدی برای ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی استان گیلان است و این تهدید مخصوصاً در طبقات ارتفاعی بالاتر، بیش‌تر است. ولی مصرف کود دامی می‌تواند تا حدود زیادی اثر سوء تغییر اقلیم را بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی کاهش دهد، اما نمی‌تواند به طور کامل این اثر را خنثی نماید. مدیریت پایدار جنگل‌های استان گیلان مستلزم توجه به اثر سوء تغییر اقلیم و انجام اقدامات مدیریتی مناسب برای کاهش این اثرات می‌باشد. اقداماتی نظیر کاهش فشارهای انسانی بر جنگل، مصرف کود دامی و توسعه کشت‌های چوبی کم‌اثر می‌تواند اثر سوء تغییر اقلیم بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی را کاهش دهد.



شکل ۱۶: خروجی مدل برای ذخیره کربن آلی طبقات ارتفاعی مختلف در منطقه مورد مطالعه تا سال ۲۱۰۲ (صحنه‌بندی تغییر اقلیم و مصرف کود دامی).



شکل ۱۷: خروجی مدل برای دی اکسید کربن تجمعی تا سال ۲۱۰۲ در هر چهار طبقه ارتفاعی در منطقه مورد مطالعه (صحنه‌بندی تغییر اقلیم و مصرف کود دامی).

### ۳-۵-۶- تأثیر صحنه‌بندی‌های مختلف بر تصاعد تجمعی گاز دی اکسید کربن

گاز دی اکسید کربن یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای است که نقش مهمی در گرمایش جهانی دارد. کشاورزی یکی از بخش‌های اصلی تولید گاز دی اکسید کربن است (Cole et al., 1997; IPCC, 2000; Paustian et al., 2004; Smith et al., 2007). میزان تصاعد گاز دی اکسید کربن از خاک می‌تواند به دلیل عوامل مختلفی مانند تغییر اقلیم، چرای دام و مصرف کود دامی تغییر کند. نتایج شبیه‌سازی تصاعد گاز دی اکسید کربن تجمعی در صحنه‌بندی‌های مختلف و طی سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۱۰۲ نشان داد که:

صحنه‌بندی‌های تغییر اقلیم و چرای دام باعث کاهش تصاعد گاز دی اکسید کربن در واحد سطح در مقایسه با وضعیت کنونی می‌شوند (شکل‌های ۷، ۹، ۱۱ و ۱۳). این کاهش احتمالاً به دلیل کاهش تولید بقایای گیاهی در اثر خشک‌سالی و چرای دام مفرط است.

صحنه‌بندی تغییر اقلیم توام با مصرف کود دامی باعث کاهش تصاعد گاز دی اکسید کربن در واحد سطح در مقایسه با وضعیت کنونی می‌شود، اما میزان این کاهش به اندازه میزان کاهش صحنه‌بندی‌های تغییر اقلیم و چرای دام نیست (شکل ۱۷). این کاهش کم‌تر، احتمالاً به دلیل افزایش تولید بقایای گیاهی در اثر مصرف کود دامی است.

صحنه‌بندی مصرف کود دامی باعث افزایش تصاعد گاز دی اکسید کربن نسبت به وضعیت کنونی می‌شود (شکل ۱۵) (Rey et al., 2020). این افزایش به دلیل افزایش میزان کربن ورودی به خاک از طریق مصرف کود دامی است.

با گذشت زمان خاک با محیط اطراف خود به تعادل می‌رسد و میزان کربن خروجی به صورت گاز دی اکسید کربن با میزان کربن ورودی به صورت بقایای گیاهی برابر می‌شود (Hamilton et al., 2002). بنابراین گاز دی اکسید کربن خروجی در صحنه‌بندی‌ها مختلف در واقع انعکاسی از میزان کربن ورودی به خاک است. در صحنه‌بندی‌هایی که میزان کربن ورودی به خاک کاهش می‌یابد میزان



تصادد گاز دی اکسید کربن نیز کاهش می‌یابد. برعکس در صحنه‌بندی‌هایی که میزان کربن ورودی به خاک افزایش می‌یابد میزان کربن خروجی یا تصاعد گاز دی اکسید کربن نیز افزایش می‌یابد.

این نتایج نشان می‌دهد که تغییر اقلیم، چرا، و مصرف کود دامی می‌توانند تاثیر متفاوتی بر تصاعد تجمعی گاز دی اکسید کربن از خاک داشته باشند.

#### ۴- جمع‌بندی

زیست بوم‌های جنگلی نقش مهمی در کاهش گاز دی اکسید کربن اتمسفری و ذخیره آن در خاک به صورت کربن آلی دارند. پژوهشی بر روی خاک‌های جنگلی ارتفاعات تالش استان گیلان انجام شد تا تاثیر تغییر اقلیم و مدیریت جنگل بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی و تصاعد گاز دی اکسید کربن تجمعی مورد مطالعه قرار گیرد. مدل سنچری این امکان را فراهم آورد تا تاثیر رویدادهای طبیعی و انسانی بر ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی و تصاعد گاز دی اکسید کربن تجمعی شبیه‌سازی و بررسی شود. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییر اقلیم که با کاهش میزان بارندگی و افزایش دما همراه باشد، باعث کاهش ذخیره کربن آلی خاک‌های جنگلی می‌شود. این کاهش برای نقاط مرتفع‌تر، بیش‌تر است. چراي دام نیز با کاهش بقایای گیاهی ورودی به خاک، باعث کاهش ذخیره کربن آلی خاک می‌شود. هر چه شدت چرا بیش‌تر باشد، این کاهش نیز بیش‌تر است. مصرف کود دامی با تأمین مواد غذایی برای درختان جنگلی و تولید هوموس در خاک، باعث افزایش ذخیره کربن آلی خاک شده و اثر سوء تغییر اقلیم و چرا را کاهش می‌دهد. در این پژوهش، میزان تصاعد گاز دی اکسید کربن تجمعی، انعکاسی از میزان کربن ورودی به خاک در صحنه‌بندی‌های مختلف بود. به عبارت دیگر، مشاهده شد که با افزایش میزان کربن ورودی به خاک، میزان تصاعد گاز دی اکسید کربن نیز افزایش می‌یابد و بالعکس. نتایج این تحقیق نشان داد که مدیریت پایدار جنگل و حفظ خاک‌های جنگلی ارتفاعات، مستلزم کاهش اثر سوء تغییر اقلیم و فشارهای انسانی مثل تجاوز به حریم جنگل و چراي دام است. تغذیه جنگل با کود دامی نیز می‌تواند با تأمین مواد غذایی برای درختان، به‌عنوان یک اقدام مدیریتی مناسب از اثر سوء تغییر اقلیم و چراي بی‌رویه در این جنگل‌ها بکاهد. در دسترس نبودن این ارتفاعات و نبودن داده‌های هواشناسی برای آن‌ها، از جمله محدودیت‌های تحقیق در این ارتفاعات بودند. در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود که تأثیر عواملی چون آتش‌سوزی و دادن آهک برای کنترل pH اسیدی این خاک‌ها نیز مورد مطالعه قرار گیرد.

#### منابع

Al-Shammary, A. A., Kouzani, A. Z., Saeed, T. R., Lahmod, N. R., & Mouazen, A. M. (2019). Evaluation of a novel electromechanical system for measuring soil bulk density. *Biosystems Engineering*, 179, 140-154.

Althoff, T. D., Menezes, R. S. C., de Siqueira Pinto, A., Pareyn, F. G. C., de Carvalho, A. L., Martins, J. C. R., ... & Sampaio, E. V. D. S. B. (2018). Adaptation of the century model to simulate C and N dynamics of Caatinga dry forest before and after deforestation. *Agriculture, ecosystems & environment*, 254, 26-34.

Amirpour, M., Shorafa, M., Gorji, M., & Naghavi, H. (2016). Effect of subsurface water retention using polyethylene membranes with surface mulch and irrigation on moisture, temperature and salinity of sandy soil of an arid region in Iran. *Advances in Environmental Sciences*, 8 (1), 33-41.

- 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.
- Badeyan, Z., & Mansouri, M. (1396). Estimation of Carbon Sequestration by *Atriplex canescens* Species at the Surface Unit Level and Investigating the Relationship Between Carbon Sequestration and Soil and Vegetation Factors in Cheshme Ali, Qazvin Region. *Human and the Environment*, 15 (4), 01-10.
- Bahn, M., Reichstein, M., Ciais, P., et al. (2014). Soil respiration in heterotrophic and autotrophic compartments in Europe. *Global Change Biology*, 20 (12), 3911-3922.
- Bakker, J. D., Rudebusch, F., & Moore, M. M. (2010). Effects of long-term livestock grazing and habitat on understory vegetation. *Western North American Naturalist*, 70 (3), 334-344.
- Beutler, S. J., Pereira, M. G., Tassinari, W. D. S., Menezes, M. D. D., Valladares, G. S., & Anjos, L. H. C. D. (2017). Bulk density prediction for Histosols and soil horizons with high organic matter content. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 41.
- Bortolon, E. S. O., Mielniczuk, J., Tornquist, C. G., Lopes, F., & Bergamaschi, H. (2011). Validation of the Century model to estimate the impact of agriculture on soil organic carbon in Southern Brazil. *Geoderma*, 167, 156-166.
- Cardinael, R., Chevallier, T., Guenet, B., Girardin, C., Cozzi, T., Pouteau, V., & Chenu, C. (2020). Organic carbon decomposition rates with depth and contribution of inorganic carbon to CO<sub>2</sub> emissions under a Mediterranean agroforestry system. *European Journal of Soil Science*, 71 (5), 909-923.
- Chang, X., Bao, X., Wang, S., Wilkes, A., Erdenetssetseg, B., Baival, B., ... & Damdinsuren, B. (2015). Simulating effects of grazing on soil organic carbon stocks in Mongolian grasslands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 212, 278-284.
- Chang, R., Li, N., Sun, X., Hu, Z., Bai, X., & Wang, G. (2018). Nitrogen addition reduces dissolved organic carbon leaching in a montane forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 127, 31-38.
- Chen, S., Arrouays, D., Angers, D. A., Chenu, C., Barré, P., Martin, M. P., ... & Walter, C. (2019). National estimation of soil organic carbon storage potential for arable soils: A data-driven approach coupled with carbon-landscape zones. *Science of the Total Environment*, 666, 355-367.
- Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 7, e623.
- Conant, R.T., Paustian, K., & Parton, W.J. (2010). Grassland sediments as a source and sink for atmospheric greenhouse gases. *Nature Geoscience*, 3 (1), 71-77.
- Cole, C. V., Duxbury, J., Freney, J., Heinemeyer, O., Minami, K., Mosier, A., ... & Zhao, Q. (1997). Global estimates of potential mitigation of greenhouse gas emissions by agriculture. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 49, 221-228.
- Davidson, E. A., & Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440 (7081), 165-173.
- De Vos, B., Lettens, S., Muys, B., & Deckers, J. A. (2007). Walkley-Black analysis of forest soil organic carbon: recovery, limitations and uncertainty. *Soil Use and Management*, 23 (3), 221-229.
- Fang, C., Smith, P., Moncrieff, J. B., & Smith, J. U. (2020). Land use and management effects on soil organic carbon in the UK. *Soil Use and Management*, 36 (1), 105-116.
- 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.

- Fischer, M., Bossdorf, O., Gockel, S., Hänsel, F., Hemp, A., Hessenmöller, D., ... & Weisser, W. W. (2010). Implementing large-scale and long-term functional biodiversity research: The Biodiversity Exploratories. *Basic and applied Ecology*, 11 (6), 473-485.
- Gomes, A. G., & Varriale, M. C. (2004). *Modelagem de ecossistemas: uma introdução*. Ed. UFSM.
- Guo, M., Zhao, B., Wen, Y., Hu, J., Dou, A., Zhang, Z., ... & Zhu, J. (2022). Elevational pattern of soil organic carbon release in a Tibetan alpine grassland: Consequence of quality but not quantity of initial soil organic carbon. *Geoderma*, 428, 116148.
- Haeblerli, W., Hoelzle, M., Paul, F., & Zemp, M. (2007). Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global change: The Swiss Alps. *Mountain Research and Development*, 27 (2), 180-190.
- Hamilton, J. G., DeLucia, E. H., George, K., Naidu, S. L., Finzi, A. C., & Schlesinger, W. H. (2002). Forest carbon balance under elevated CO<sub>2</sub>. *Oecologia*, 131, 250-260.
- Hua, L. C., Lin, J. L., Syue, M. Y., Huang, C., & Chen, P. C. (2018). Optical properties of algal organic matter within the growth period of *Chlorella* sp. and predicting their disinfection by-product formation. *Science of the Total Environment*, 621, 1467-1474.
- Huluka, G., & Miller, R. (2014). Particle size determination by hydrometer method. *Southern Cooperative Series Bulletin*, 419, 180-184.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2000). *Land Use, Land-Use Change, and Forestry: A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Jansson, P. E., & Berglund, S. (2003). Climate change and soil carbon sequestration from afforestation of marginal agricultural land in Sweden. *Forest Ecology and Management*, 182 (1-3), 35-46.
- Kazemi Rad, L., & Mohammadi, H. (2016). Evaluation of an Appropriate General Circulation Model for Predicting Climate Change in Gilan Province. *Geography and Natural Hazards*, 4 (4), 55-74.
- Knapp, A.K. and Smith, M.D., 1998. Variation among biomes in temporal trends in soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 1620-1625.
- Knapp, L. J., McMillan, J. M., & Harris, N. B. (2017). A depositional model for organic-rich Duvernay Formation mudstones. *Sedimentary geology*, 347, 160-182.
- Lal, R. (2009). Soils and world food security.
- Lal, R. (2015). Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture. *Journal of soil and water conservation*, 70 (3), 55A-62A.
- Li, S., Li, J., Shi, L., Li, Y., & Wang, Y. (2021). Role of phosphorous additives on nitrogen conservation and maturity during pig manure composting. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 17981-17991.
- Lin, F., Chen, X., & Yao, H. (2017). Evaluating the use of Nash-Sutcliffe efficiency coefficient in goodness-of-fit measures for daily runoff simulation with SWAT. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22 (11), 05017023.
- Liu, W., Chen, S., Qin, X., Baumann, F., Scholten, T., Zhou, Z., ... & Qin, D. (2012). Storage, patterns, and control of soil organic carbon and nitrogen in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Environmental Research Letters*, 7 (3), 035401.
- Luo, Y., Zhou, X., Wang, Z., & Zhang, D. (2018). Climate change and soil organic carbon dynamics in terrestrial ecosystems: A review. *Global Change Biology*, 24 (11), 4551-4563.

- Lugato, E., Bampa, F., Panagos, P., Montanarella, L., & Jones, A. (2014). Potential carbon sequestration of European arable soils estimated by modelling a comprehensive set of management practices. *Global change biology*, 20 (11), 3557-3567.
- Mehrjou, F., Barzehkar, M., Hashemi, S. H., & Mohammadi, A. (1393). Investigating Changes in Physicochemical and Biological Factors in the Vermicomposting Process Using Cattle Manure and Earthworm (*Eisenia foetida*) as Substrate. *Human and the Environment*, 12 (1), 75-83.
- McCormick, K., & Salcedo, J. (2017). *SPSS statistics for data analysis and visualization*. John Wiley & Sons.
- Molina-Montenegro, M. A., Oses, R., Torres-Díaz, C., Atala, C., Zurita-Silva, A., & Ruiz-Lara, S. (2016). Root-endophytes improve the ecophysiological performance and production of an agricultural species under drought condition. *AoB Plants*, 8, plw062.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley & Sons.
- Nascimento, A. F. D., Mendonça, E. D. S., Leite, L. F. C., Scholberg, J., & Neves, J. C. L. (2012). Calibration and validation of models for short-term decomposition and N mineralization of plant residues in the tropics. *Scientia Agricola*, 69, 393-401.
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., ... & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333 (6045), 988-993.
- Pandey, J., Singh, A. V., Singh, R., Kaushik, P., & Pandey, U. (2015). Atmospheric deposition coupled terrestrial export of organic carbon in Ganga River (India): linking cross-domain carbon transfer to river DOC. *International Aquatic Research*, 7, 273-285.
- Paustian, K., Babcock, B., Kling, C., Hatfield, J., Lal, R., McCarl, B., ... & Zilberman, D. (2004). *In Agricultural Mitigation of Greenhouse Gases: Science and Policy Options; Council on Agricultural Science and Technology (CAST) (Vol. 141)*. Report.
- 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.
- Ray, R. L., Griffin, R. W., Fares, A., Elhassan, A., Awal, R., Woldesenbet, S., & Risch, E. (2020). Soil CO<sub>2</sub> emission in response to organic amendments, temperature, and rainfall. *Scientific reports*, 10 (1), 5849.
- Rhodes, C. J. (2014). Soil erosion, climate change and global food security: challenges and strategies. *Science progress*, 97 (2), 97-153.
- Ripple, W. J., Wolf, C., Newsome, T. M., Barnard, P., & Moomaw, W. R. (2020). World scientists' warning of a climate emergency. *BioScience*, 70 (1), 8-100.
- Rocci, K. S., Bird, M., Blair, J. M., Knapp, A. K., Liang, C., & Cotrufo, M. F. (2023). Thirty years of increased precipitation modifies soil organic matter fractions but not bulk soil carbon and nitrogen in a mesic grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 185, 109145.
- Saravesi, K., Markkola, A., Rautio, P., Roitto, M., & Tuomi, J. (2008). Defoliation causes parallel temporal responses in a host tree and its fungal symbionts. *Oecologia*, 156, 117-123.
- Sedgwick, P. (2012). Pearson's correlation coefficient. *Bmj*, 345.
- Schindlbacher, A., de Gonzalo, C., Díaz- Pinés, E., Gorriá, P., Matthews, B., Inclán, R., ... & Jandl, R. (2010). Temperature sensitivity of forest soil organic matter decomposition along two elevation gradients. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 115 (G3).

Schipper, L.A., Parfitt, R.L., and Ross, D.J., 2007. Long-term effects of grazing on soil physical and chemical properties in a temperate hill country pasture. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 50, 27-38.

Shedayi, A. A., Xu, M., Naseer, I., & Khan, B. (2016). Altitudinal gradients of soil and vegetation carbon and nitrogen in a high-altitude nature reserve of Karakoram ranges. *SpringerPlus*, 5, 1-14.

Sheikh, M. A., Kumar, M., & Bussmann, R. W. (2009). Altitudinal variation in soil organic carbon stock in coniferous subtropical and broadleaf temperate forests in Garhwal Himalaya. *Carbon balance and management*, 4, 1-6.

Singh, N., Pal, N., Mahajan, G., Singh, S., & Shevkani, K. (2011). Rice grain and starch properties: Effects of nitrogen fertilizer application. *Carbohydrate polymers*, 86 (1), 219-225.

Smith, P., Smith, J.U., Powlson, D.S., Angus, J.F., and Robertson, G.P., 2004. Arable and grassland soil carbon sequestration in Scotland from 1978 to 2003. *Global Change Biology*, 10, 1831-1839.

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.

Smith, J. U., Smith, P., Monaghan, R., & MacDonald, A. J. (2002). When is a measured soil organic matter fraction equivalent to a model pool?. *European Journal of Soil Science*, 53 (3), 405-416.

Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., ... & Towprayoon, S. (2007). Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118 (1-4), 6-28.

Stergiadi, M., Van Der Perk, M., De Nijs, T., & Bierkens, M. F. (2016). Effects of climate change and land management on soil organic carbon dynamics and carbon leaching in northwestern Europe. *Biogeosciences*, 13 (5), 1519-1536.

Stockmann, U., Adams, M. A., Crawford, J. W., Field, D. J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., ... & Zimmermann, M. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 80-99.

Teague, R., Provenza, F., Kreuter, U., Steffens, T., & Barnes, M. (2013). Multi-paddock grazing on rangelands: why the perceptual dichotomy between research results and rancher experience?. *Journal of Environmental management*, 128, 699-717.

TerraClimate.

[https://climate.northwestknowledge.net/TERRACLIMATE/index\\_directDownloads.php](https://climate.northwestknowledge.net/TERRACLIMATE/index_directDownloads.php)

Török, P., Penksza, K., Tóth, E., Kelemen, A., Sonkoly, J., & Tóthmérész, B. (2018). Vegetation type and grazing intensity jointly shape grazing effects on grassland biodiversity. *Ecology and Evolution*, 8 (20), 10326-10335.

Tsui, C. C., Chen, Z. S., & Hsieh, C. F. (2004). Relationships between soil properties and slope position in a lowland rain forest of southern Taiwan. *Geoderma*, 123 (1-2), 131-142.

Wang, F. P., Wang, X. C., Yao, B. Q., Zhang, Z. H., Shi, G. X., Ma, Z., ... & Zhou, H. K. (2018). Effects of land-use types on soil organic carbon stocks: a case study across an altitudinal gradient within a farm-pastoral area on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, 15 (12), 2693-2702.

Wang, X., Williams, J. R., Gassman, P. W., Baffaut, C., Izaurralde, R. C., Jeong, J., & Kiniry, J. R. (2012). EPIC and APEX: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55 (4), 1447-1462.

Xu, Y., Ge, X., Gao, G., Yang, Y., Hu, Y., Li, Z., & Zhou, B. (2023). Divergent contribution of microbial- and plant-derived carbon to soil organic carbon in Moso bamboo forests left unmanaged. *Catena*, 233, 107481.

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.

Zhang, R., & Wienhold, B. J. (2002). The effect of soil moisture on mineral nitrogen, soil electrical conductivity, and pH. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 63, 251-254.

Zhang, D. (2017). A coefficient of determination for generalized linear models. *The American Statistician*, 71 (4), 310-316.

Zhang, L., Zheng, Q., Liu, Y., Liu, S., Yu, D., Shi, X., ... & Fan, X. (2019). Combined effects of temperature and precipitation on soil organic carbon changes in the uplands of eastern China. *Geoderma*, 337, 1105-1115.

Zhang, Z., Gong, J., Wang, B., Li, X., Ding, Y., Yang, B., ... & Zhang, W. (2020). Regrowth strategies of *Leymus chinensis* in response to different grazing intensities. *Ecological Applications*, 30 (5), e02113.

Zeng, Y., Fang, N., & Shi, Z. (2020). Effects of human activities on soil organic carbon redistribution at an agricultural watershed scale on the Chinese Loess Plateau. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 303, 107112.

پندرہواں باب



# Impact of Climate Change, Grazing and Manure Application on Organic Carbon Storage in High-Altitude Forest Soils: A Century Model Analysis

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Forests are vital global carbon sinks, orchestrating climate regulation, biodiversity preservation, and human well-being. They excel at storing atmospheric carbon as soil organic matter, but this critical function faces threats from climate change and anthropogenic activities like grazing and manure application. This research delves into the intricate interplay of these factors and their impact on organic carbon content in the temperate forests of Talesh, Iran, paving the way for sustainable forest management strategies.

### Materials and Methods

Across four distinct altitude classes (500-1000, 1000-1500, 1500-2000, and 2000-2500 meters above sea level), capturing a range of climatic and environmental gradients, soil samples were analyzed for organic carbon content, soil texture, pH, and salinity. Annual mean precipitation and temperature varied significantly with altitude, with precipitation decreasing (1,247.26 to 2,052.02 millimeters) and temperature falling (26.93 to 15.83 degrees Celsius) as elevation increased. Evapotranspiration followed similar patterns, decreasing from 1,238.38 to 740.76 millimeters across the gradient. To explore the potential impacts of climate change, grazing, and manure application under various scenarios, the renowned Century C Model, a tool for simulating soil organic carbon dynamics, was employed.

### Results

While soil texture, pH, and salinity showed no significant variation across altitudes, a remarkable positive correlation emerged between altitude and organic carbon content. Higher altitudes, characterized by increased rainfall and lower temperatures, fostered an environment conducive to greater storage, with the highest levels (97.46 tons per hectare) observed at 2,000-2,500 meters and the lowest (44.23 tons per hectare) found at 500-1,000 meters. The Century C Model demonstrated remarkable accuracy in its predictions, boasting a correlation coefficient and coefficient of determination exceeding 0.98.

The model paints a concerning picture under the status quo scenario, predicting a gradual decrease in soil organic carbon storage over time. This reduction, ranging from 2.48 to 9.57 tons per hectare across the altitude classes, can be attributed to factors like soil erosion, nutrient leaching, and reduced forest fertility. The cumulative release of carbon dioxide due to soil organic matter decomposition further contributes to rising CO<sub>2</sub> levels, with higher emission rates observed at higher elevations due to their greater carbon input and storage.

Climate change simulations reveal a particularly alarming scenario. A projected decrease in rainfall (2.15 millimeters per 10 years) coupled with a temperature increase (0.4 degrees Celsius) is predicted to cause a substantial decrease (28.36-36.35%) in organic carbon storage across all altitude classes, with higher altitudes exhibiting greater vulnerability.

Grazing's negative impact on organic carbon content was undeniable, increasing linearly with intensity and further amplified at higher altitudes. In contrast, manure application at a rate of 40 tons per hectare every four years demonstrably increased organic carbon levels, again with a more pronounced effect at higher elevations. However, combining the simulated climate change scenario with manure application revealed a nuanced picture. While manure use effectively mitigated some of the negative impacts, it could not entirely counteract them, with organic carbon reductions of 1.49 to 5.42% still observed under these combined conditions. The study identified several factors influencing soil carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions: climate change, grazing, and livestock manure application. Climate change and grazing scenarios both exhibited reduced CO<sub>2</sub> emissions compared to the current state. This likely stems from decreased plant residue production induced by drought (climate change) and excessive grazing pressure.

Combining climate change with livestock manure application also led to lower CO<sub>2</sub> emissions compared to the baseline, but the effect was smaller than observed in both climate change and grazing scenarios. This suggests that, while manure application supplements soil carbon through added organic matter, its potential reduction effect on CO<sub>2</sub> emissions appears limited in these circumstances.

In contrast, the livestock manure application scenario alone generated increased CO<sub>2</sub> emissions. This is directly attributable to the enhanced carbon input into the soil via manure application, ultimately fueling microbial respiration and CO<sub>2</sub> release.

### Conclusion

This research emphasizes the critical role of elevation in controlling organic carbon storage within forest soils. Additionally, it reaffirms the remarkable accuracy of the Century C Model in simulating these dynamics. The findings paint a sobering picture of the threats posed by climate change and grazing to carbon storage. However, they also highlight the potential benefits of responsible manure application, albeit with limitations. These insights underscore the importance of preserving diverse forest elevations and implementing sustainable management practices. Minimizing detrimental activities and promoting organic carbon replenishment through responsible manure application and other strategies emerge as crucial steps in combatting climate change and ensuring the long-term health of our vital forest ecosystems.

**KEYWORDS:** *Soil organic carbon storage, Climate change, Grazing, Manure application, Century model*