

An investigation on the effect of altitude on soil organic carbon storage and some other soil properties in Arasbaran forests

Elham Jozdaemi^{*1}, Ahmad Golchin², Kamran Moravej³

1. Corresponding Author, Dept. of Soil Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: ejozdaemi@znu.ac.ir

2. Dept. of Soil Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: agolchin2011@yahoo.com

3. Dept. of Soil Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: kmoravej@znu.ac.ir

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 03.17.2022

Revised: 09.03.2022

Accepted: 09.06.2022

Keywords:

Forest,
Organic carbon,
Soil depth,
Soil quality

ABSTRACT

Background and Objectives: Investigation of soil attributes is one of the ways to evaluate and manage forest ecosystems. Altitude is considered as one of the effective factors on the soil quality, especially soil organic carbon (OC). However, variation of the soil OC stocks at different altitudes of Arasbaran forests is still unknown. Therefore, this study was conducted to examine the spatial distribution of OC values, and some other chemical properties in different soil depths affected by altitude in Arasbaran forests.

Materials and Methods: In this study, a factorial experiment was conducted in a randomized complete block design in three replications. Overall, 60 soil samples were collected on a north slope of the region at four different altitude ranges, including 0–600, 600–1200, 1200–1800, and 1800–2400 m, and from five soil depths of 0–20, 20–40, 40–60, 60–80, and 80–100 cm. Then, the amounts of OC, cation exchange capacity (CEC), dilute-acid-soluble and hot-water-soluble carbohydrates, calcium carbonate, available phosphorus and potassium as well as soil acidity (pH) were determined in the soil samples.

Results: The results showed the significant effect of soil depth, altitude and their interaction on most of the studied soil properties. In fact, with increasing elevation and soil depth, the amount of OC, CEC, and dilute-acid-soluble carbohydrates increased and decreased, respectively, and a very strong correlation was found between them. Additionally, on average more than 50% of the OC was allocated to the top 20 cm of the soils at all four elevations that reduced averagely about 79% with increasing soil depth to the depth of 80–100 cm. Moreover, the highest increase rate of OC contents with altitude of about 9% was observed between the elevation ranges of 600–1200 and 1200–1800 m. Furthermore, with increasing altitude and soil depth, other soil properties such as pH, calcium carbonate, and available potassium showed a decrease of about 2%, 16%, and 16%, and an increase of around 4%, 16%, and 18%, respectively. In addition, with increasing soil depth, the amount of soil available phosphorus increased; meanwhile, the effect of altitude on this parameter was not significant.

Conclusion: Based on the findings of this study, soil OC stocks and overall the quality of Arasbaran forest soils are significantly affected by the factors of altitude and soil depth so that surface soils of higher elevations in the study area are of higher quality in terms of OC content, CEC, and dilute-

acid-soluble carbohydrates, which should be given more attention. In fact, considering the significant role of these soils in carbon sequestration, these areas should be preserved intact and undisturbed through proper management as well as various protection practices.

Cite this article: Jozdaemi, Elham, Golchin, Ahmad, Moravej, Kamran. 2022. An investigation on the effect of altitude on soil organic carbon storage and some other soil properties in Arasbaran forests. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 12 (3), 71-92.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/EJSMS.2022.20045.2055

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بررسی اثر ارتفاع منطقه بر ذخیره سازی کربن آلی و برخی دیگر از ویژگی های خاک در جنگل های ارسباران

الهام جزدائی*^۱، احمد گلچین^۲، کامران مروج^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم خاک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: e.jozdaemi@znu.ac.ir

۲. گروه علوم خاک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: agolchin2011@yahoo.com

۳. گروه علوم خاک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: kmoravej@znu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: بررسی ویژگی های خاک یکی از راه های ارزیابی و مدیریت اکوسیستم های جنگلی است. ارتفاع منطقه یکی از عوامل مؤثر بر ویژگی های کیفی خاک به ویژه محتوای کربن آلی آن محسوب می شود. با این وجود، تغییرات ذخیره کربن آلی خاک در ارتفاعات مختلف جنگل های ارسباران ناشناخته باقی مانده است. از این رو، این پژوهش به منظور بررسی توزیع مکانی مقادیر کربن آلی و برخی دیگر از ویژگی های شیمیایی تحت تأثیر ارتفاع منطقه و در عمق های مختلف خاک انجام گرفت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۵	
واژه های کلیدی: جنگل، عمق خاک، کربن آلی، کیفیت خاک	مواد و روش ها: در این پژوهش، یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. نمونه برداری خاک روی یک شیب شمالی منطقه مورد مطالعه، در چهار دامنه ارتفاعی مختلف شامل ۰-۶۰، ۶۰-۱۲۰، ۱۲۰-۱۸۰، ۱۸۰-۲۴۰ و ۲۴۰-۱۸۰ متری از سطح دریا و از پنج عمق مختلف خاک شامل ۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰، ۶۰-۸۰ و ۸۰-۱۰۰ سانتی متری جمعاً با ۶۰ نمونه صورت گرفت. سپس مقادیر کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، کربوهیدرات های قابل عصاره گیری با اسید و آب داغ، کربنات کلسیم، فسفر و پتاسیم قابل جذب و اسیدیته (pH) در نمونه های خاک تعیین شد.
	یافته ها: نتایج بیانگر اثر معنی دار عمق خاک، ارتفاع منطقه و اثرات متقابل شان بر اغلب ویژگی های مورد بررسی بود. در واقع، کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و کربوهیدرات های عصاره گیری شده با اسید با افزایش ارتفاع و عمق به ترتیب به طور معنی داری افزایش و کاهش یافتند و همبستگی بسیار بالایی بین آن ها مشاهده شد. به علاوه، عمق ۰-۲۰ سانتی متر سطحی خاک در هر چهار ارتفاع به طور متوسط بیش از ۵۰ درصد کربن آلی را به خود اختصاص داد که با افزایش عمق تا لایه ۸۰-۱۰۰ سانتی متری به طور میانگین با کاهش ۷۹ درصدی روبه رو

شد. بیشترین میزان افزایش محتوای کربن آلی با ارتفاع به میزان حدود ۹ درصد، بین دامنه‌های ۱۲۰۰-۱۲۰۰ و ۱۸۰۰-۱۲۰۰ متری مشاهده شد. سایر ویژگی‌های خاک هم‌چون pH خاک، کربنات کلسیم، پتاسیم قابل جذب با افزایش ارتفاع و عمق خاک به ترتیب حدود ۲، ۱۶ و ۱۶ درصد کاهش و ۴، ۱۶ و ۱۸ درصد افزایش یافتند. هم‌چنین، با افزایش عمق خاک میزان فسفر قابل جذب خاک افزایش یافت، هر چند اثر ارتفاع بر این ویژگی معنی‌دار نبود.

نتیجه‌گیری: بر اساس یافته‌های این پژوهش، ذخیره کربن آلی و به‌طور کلی کیفیت خاک‌های جنگل‌های ارسباران به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر عوامل ارتفاع منطقه و عمق خاک قرار دارد، به‌نحوی که خاک‌های سطحی موجود در نقاط با ارتفاع بیش‌تر در منطقه مورد مطالعه از کیفیت بالاتری به لحاظ محتوای کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و کربوهیدرات‌های قابل عصاره‌گیری با اسید برخوردار هستند که باید مورد توجه بیش‌تری قرار بگیرد. در واقع، با توجه به نقش مهم این خاک‌ها در ترسیب کربن، خاک‌های این مناطق باید از طریق مدیریت صحیح و اجرای عملیات حفاظتی مختلف به صورت بکر و دست‌نخورده حفظ شود.

استناد: جزدائی، الهام، گلچین، احمد، مروج، کامران (۱۴۰۱). بررسی اثر ارتفاع منطقه بر ذخیره‌سازی کربن آلی و برخی دیگر از ویژگی‌های خاک در جنگل‌های ارسباران. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۲ (۳)، ۹۲-۷۱.

DOI: 10.22069/EJSMS.2022.20045.2055



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

از آن‌جا که پایداری طولانی‌مدت اکوسیستم‌های جنگلی وابسته به حفظ کیفیت خاک است، آگاهی از وضعیت خاک‌های مناطق جنگلی در مدیریت جنگل بسیار مؤثر است (۱). کیفیت خاک، به شاخص‌های بسیاری از جمله ویژگی‌های شیمیایی، بیولوژیکی، فیزیکی، میکروبی و بیوشیمیایی خاک بستگی دارد (۲) که این ویژگی‌ها به‌طور قابل‌توجهی تحت‌تأثیر توپوگرافی منطقه قرار می‌گیرند (۳ و ۴).

ماده آلی عمدتاً به‌عنوان یکی از شاخص‌های اولیه کیفیت خاک در نظر گرفته می‌شود (۵). اما، از آن‌جا که مواد آلی به‌طور کلی فاقد ترکیب شیمیایی مشخصی هستند (۶)، کربن آلی خاک به‌عنوان یک بخش اساسی از مواد آلی خاک، یکی از ویژگی‌های کلیدی کیفیت خاک محسوب می‌شود (۷). در حقیقت، کربن آلی خاک یکی از بارزترین شاخص‌های کیفی خاک می‌باشد که ویژگی‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (۸).

ارتفاع منطقه از سطح دریا و عمق خاک از عوامل مؤثر بر ویژگی‌های کیفی خاک به‌ویژه محتوای کربن آلی خاک هستند (۹ و ۱۰). ارتفاع از سطح دریا به‌طور مستقیم تشعشعات خورشید و رطوبت خاک را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (۱۱). از آن‌جا که دمای خاک و هوا با افزایش ارتفاع تا حد مشخصی کاهش می‌یابد، به‌طور کلی، میزان کربن آلی با افزایش ارتفاع به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد (۱۲). در این زمینه، دیلمن و همکاران (۲۰۱۳) بیان کردند که دو عامل بارش و درجه حرارت، عوامل مؤثر بر افزایش کربن آلی خاک با ارتفاع منطقه می‌باشند (۱۳). هم‌چنین، براساس نتایج پژوهش‌های انجام شده، بیش‌ترین ذخیره کربن آلی خاک به لایه‌های سطحی خاک مربوط می‌باشد که با افزایش عمق از مقدار آن کاسته می‌شود (۱۰ و ۱۴). از طرفی، ذخیره نیتروژن خاک نیز

به میزان مواد آلی آن بستگی دارد. در این راستا، باندای و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که با افزایش ارتفاع منطقه میزان نیتروژن کل خاک‌های جنگل‌های شمال‌غرب هیمالیا افزایش یافت (۱۵). این پژوهش‌گران دلیل این افزایش را مقادیر بالاتر کربن آلی در خاک مناطق با ارتفاع بیش‌تر بیان کردند. هم‌چنین، ژانگ و همکاران (۲۰۲۱) رابطه خطی، مثبت و معنی‌داری را بین نیتروژن کل و کربن آلی خاک یافتند و بر این اساس بیان کردند که اغلب تغییرات در نیتروژن کل خاک به ذخیره کربن آلی خاک وابسته بوده و تجمع کربن می‌تواند ذخیره نیتروژن کل خاک را تحت‌تأثیر قرار دهد (۱۶).

علاوه بر این، برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک مانند pH، هدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی و پتاسیم خاک تحت‌تأثیر ارتفاع و عمق خاک هستند (۱۷ و ۱۸). در این راستا، پراگ و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی تأثیر ارتفاع بر pH خاک عنوان کردند که با افزایش ارتفاع، pH روند کاهشی داشت (۱۹). هم‌چنین، کرمان و حسینی (۲۰۱۶) در مطالعه خود در خاک‌های جنگلی استان ایلام گزارش کردند در همه عمق‌ها، با افزایش ارتفاع میزان هدایت الکتریکی خاک کاهش پیدا کرد (۱). ویلدونگ و گارلند (۱۹۸۸) نیز در منطقه مورد مطالعه خود روند افزایشی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با ارتفاع منطقه را گزارش کردند (۲۰). از سوی دیگر، بر اساس نتایج پژوهش‌های پیشین، میزان ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با افزایش عمق روند کاهشی دارد (۲۱). سانگ و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی توزیع مکانی میزان پتاسیم قابل‌دسترس خاک در یک دوره ۳۰ ساله در شرق چین، روند افزایشی میزان ذخیره پتاسیم در عمق یک متری خاک را گزارش کردند که ناشی از عواملی هم‌چون استفاده مداوم از کودها بود (۲۲). از طرفی، در مطالعات روند کاهشی میزان پتاسیم قابل‌جذب

خاک با افزایش ارتفاع منطقه ناشی از افزایش بارندگی نشان داده شده است (۱). به علاوه، برخی پژوهش‌گران افزایش میزان فسفر (۲۳) و کربنات‌های خاک (۲۴) با افزایش عمق در اثر آبشویی را گزارش کرده‌اند.

بر این اساس، از آنجا که عوامل عمق خاک و ارتفاع منطقه نقش مهمی در ویژگی‌های خاک و بویژه مقادیر کربن آلی خاک جنگل‌های مختلف دنیا ایفا می‌کنند، شناخت هرچه بیشتر تأثیر این عوامل می‌تواند به حفظ و ارتقاء کیفیت خاک‌های جنگلی کمک شایانی نماید. با توجه به این‌که پژوهشی در این مورد در جنگل‌های ارسباران استان آذربایجان شرقی صورت نگرفته است، بنابراین هدف از این مطالعه بررسی تأثیر ارتفاع از سطح دریا بر تغییرات ذخیره کربن آلی و برخی دیگر از ویژگی‌های شیمیایی خاک در عمق‌های مختلف خاک در این منطقه است که به‌واسطه آن می‌توان برنامه‌ریزی و مدیریت بهتری در راستای حفظ و نگهداری ذخیره کربن و کیفیت خاک‌های این منطقه به عمل آورد.

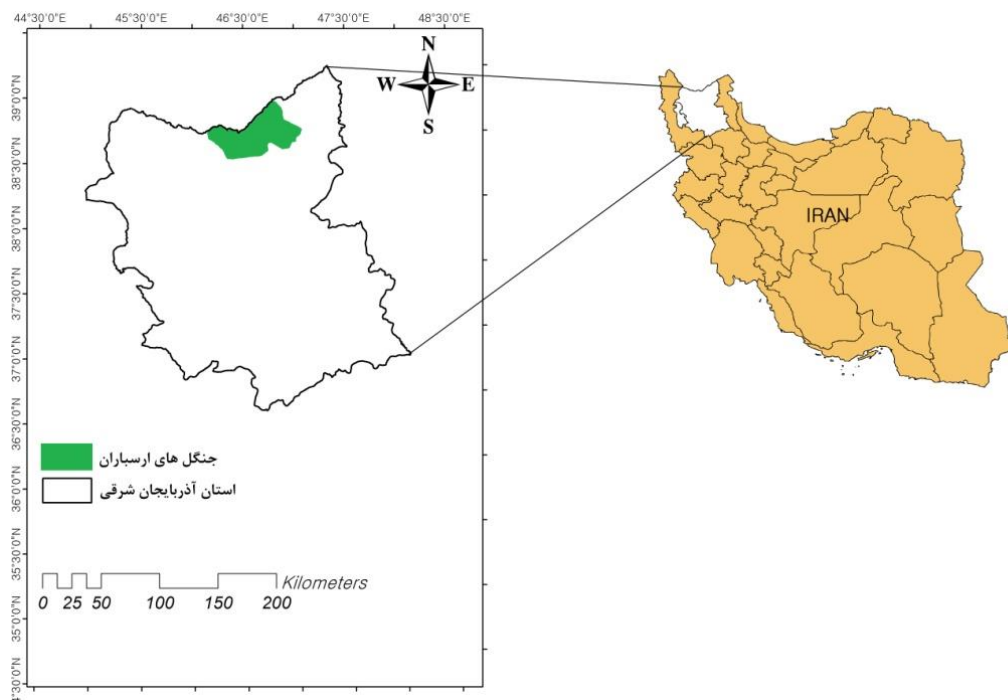
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: پژوهش حاضر در جنگل‌های منطقه ارسباران واقع در استان آذربایجان شرقی انجام شد. حوزه آبخیز ارسباران شمالی ۵۵۸۲۰۰ هکتار وسعت داشته و در موقعیت جغرافیایی ۴۵ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۲۷ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۲۵ دقیقه عرض شمالی

واقع شده (شکل ۱) و اقلیم این منطقه نیمه‌مرطوب معتدل گزارش شده است (۲۵). همچنین، خاک‌های منطقه مورد مطالعه دارای بافت سبک بودند که برای تمام عمق‌ها و ارتفاع‌های مورد بررسی لوم شنی تعیین شد. به علاوه، پوشش گیاهی غالب در منطقه مورد بررسی شامل درختان بلوط سیاه (*Quercus macranthera*)، بلوط سفید (*Quercus komarvii*)، ممرز (*Carpinus betulus*)، افرا (*Acer rubrum*)، اُرس (*Juniperus excels*)، سیاه تلو (*Paliurus spina-christi*)، ملج (*Ulmus glabra*)، بالش خرس (*Juniperus communis*)، گردو (*Juglans regia*) و نارون (*Ulmus*) می‌باشد.

نمونه‌برداری خاک و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی:

برای بررسی تأثیر ارتفاع منطقه از سطح دریا و عمق خاک بر ویژگی‌های شیمیایی خاک، در مرحله نمونه‌برداری، ابتدا روی یک شیب شمالی از منطقه مورد مطالعه، چهار طبقه ارتفاعی مختلف شامل ۶۰۰-۰، ۱۲۰۰-۶۰۰، ۱۸۰۰-۱۲۰۰ و ۲۴۰۰-۱۸۰۰ متری از سطح دریا انتخاب شد. اطلاعات مربوط به ویژگی‌های اقلیمی هر چهار دامنه ارتفاعی در جدول ۱ ارائه شده است (۲۶). با توجه به نتایج جدول ۱، درحالی‌که با افزایش ارتفاع منطقه متوسط بارندگی روند افزایشی داشته است، میزان درجه حرارت سالیانه روندی کاهشی نشان می‌دهد که از این‌رو، با افزایش ارتفاع منطقه دمای هوا کاهش و میزان رطوبت خاک افزایش می‌یابد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ایران و استان آذربایجان شرقی.

Figure 1. Geographical location of the study area within Iran and East Azerbaijan province.

جدول ۱- ویژگی‌های اقلیمی مربوط به ارتفاع‌های مورد بررسی از منطقه مورد مطالعه.

Table 1. Climatic characteristics related to the studied altitudes of the study area.

مینیوم مطلق دما Absolute minimum temperature (°C)	متوسط دمای سردترین ماه سال Mean temperature of the coldest month of the year (°C)	متوسط دمای گرم‌ترین ماه سال Mean temperature of the hottest month of the year (°C)	متوسط دمای سالانه Mean annual temperature (°C)	متوسط بارندگی سالانه Mean annual rainfall (mm)	ارتفاع Altitude (m)
-22	17	21	14	400	0-600
-26	10	15	8	550	600-1200
-31	-1	12	8	800	1200-1800
-34	-2	11	5	900	1800-2400

سانتی‌متری نمونه‌برداری انجام شد. پس از آن، خاک به‌دست آمده از اعماق مشابه گودال‌های یک تکرار با هم ترکیب شد و به‌عنوان نمونه‌های مرکب اعماق مختلف خاک در آن تکرار در نظر گرفته شد. بر این اساس، جامعه آماری مورد بررسی در این پژوهش با احتساب چهار سطح ارتفاع منطقه و پنج سطح عمق نمونه‌برداری و سه تکرار، شامل ۶۰ نمونه بود.

پس از انتخاب مناطق در طبقات ارتفاعی مورد نظر، در هر دامنه ارتفاعی حدود ۱۵ هکتار از سطح اراضی انتخاب و به سه قسمت پنج هکتاری تقسیم شد و هر قسمت به‌عنوان یک تکرار در نظر گرفته شد. سپس، در هر تکرار دو گودال (با ابعاد $1 \times 2 \times 1/5$) حفر گردید و در هر گودال از پنج عمق مختلف خاک شامل ۲۰-۰، ۴۰-۲۰، ۶۰-۴۰، ۸۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۰

احتمال پنج درصد مورد استفاده قرار گرفت. تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام شد. همچنین، همبستگی خطی بین ویژگی‌های خاک با استفاده از آزمون ضریب همبستگی پیرسون در محیط نرم‌افزار SPSS (نسخه ۱۶) بررسی شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مربوط به اثر ارتفاع منطقه، عمق خاک و اثرات توأم آن‌ها بر ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که اثر عوامل ارتفاع منطقه و عمق خاک و اثرات توأم آن‌ها بر میزان کربن آلی خاک‌های جنگلی منطقه ارسباران معنی‌دار ($P \leq 0.001$) بود (جدول ۲). از طرف دیگر همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، میزان کربن آلی خاک با افزایش ارتفاع منطقه و عمق خاک به ترتیب روند افزایشی و کاهش‌ی نشان داد. در واقع، بیش‌ترین مقدار کربن آلی خاک در ارتفاع ۲۴۰۰-۱۸۰۰ متری و عمق ۲۰-۰ سانتی‌متر سطحی خاک به میزان ۷۶/۱۲ گرم بر کیلوگرم خاک و کم‌ترین مقدار کربن آلی خاک در ارتفاع ۶۰۰-۰ متری و عمق ۱۰۰-۸۰ سانتی‌متری به‌میزان ۱۱/۱۱ گرم بر کیلوگرم خاک مشاهده گردید. این روند تغییرات کربن آلی با عمق خاک و ارتفاع منطقه توسط بسیاری از پژوهش‌گران و در مناطق مختلف دنیا گزارش شده است (۱۳، ۱۵، ۱۶). از طرف دیگر، اسمیت و همکاران (۲۰۰۲) دلیل افزایش کربن آلی خاک در ارتفاعات بالاتر را افزایش زیست‌توده گیاهی ناشی از بارش‌های بیش‌تر در ارتفاعات بیان کرده‌اند (۳۶). در این راستا، جدول ۴ نتایج آزمون همبستگی پیرسون بین عوامل عمق، ارتفاع و بارندگی منطقه با برخی ویژگی‌های شیمیایی مورد بررسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، بین کربن آلی و هر دو عامل

پس از اتمام مرحله نمونه‌برداری، نمونه‌های خاک هواخشک شدند و پس عبور از الک دو میلی‌متری برای اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی به آزمایشگاه منتقل شدند. در آزمایشگاه، کربن آلی به روش والکلی و بلک (۲۷) و pH خاک و هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک بر طبق روش شرح داده شده توسط کارتر و گریگوریچ (۲۰۰۸) تعیین شد (۲۸). علاوه بر این، ویژگی‌هایی هم‌چون میزان کربنات کلسیم معادل به روش گوچ (۲۹)، ظرفیت تبادل کاتیونی با استفاده از روش باور (۳۰)، فسفر قابل‌جذب با روش آلسن (۳۱)، پتاسیم قابل‌جذب (۳۲) و کربوهیدرات‌های قابل عصاره‌گیری در نمونه‌ها با دو روش عصاره‌گیری با اسید سولفوریک رقیق و آب داغ ۸۵ درجه سانتی‌گراد (۳۳) نیز در نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شد. همچنین، بافت خاک به روش هیدرومتری (۳۴) و جرم مخصوص ظاهری نمونه‌های خاک با روش کلوخه (۳۵) تعیین شد. در نهایت، میزان محتوای کربن آلی خاک در عمق‌های مورد بررسی در هر ارتفاع نیز با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$Cs = 100 \times BD \times D \times OC \quad (1)$$

که در آن، Cs محتوای کربن آلی در هر عمق بر حسب کیلوگرم بر هکتار، BD جرم مخصوص ظاهری بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، D عمق خاک بر حسب سانتی‌متر و OC غلظت کربن آلی در هر عمق بر حسب گرم بر کیلوگرم خاک است. سپس، به‌منظور تعیین میزان کل ذخیره کربن آلی خاک تا عمق یک متری، ذخیره کربن آلی به‌دست آمده در لایه‌های مختلف خاک جمع گردید (۱۶).

آنالیزهای آماری: در این پژوهش برای مقایسه میانگین داده‌ها، آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح

از فرسایش در ارتفاعات زیاد کاهش یافته و میزان کربن آلی خاک افزایش می‌یابد (۱۵). به بیان دیگر، کاهش دمای موجود در ارتفاعات بیش‌تر، فعالیت میکروبی و در نتیجه تجزیه مواد آلی را کند کرده که در نهایت کاهش هدررفت کربن آلی خاک را به دنبال دارد (۳۷). در این زمینه، پژوهش‌گران زیادی کاهش سرعت تجزیه مواد آلی را به تغییرات اقلیمی و به‌ویژه کاهش دما در ارتفاعات بالاتر نسبت داده‌اند (۳۸، ۳۹ و ۴۰).

ارتفاع منطقه ($r=0/99^{**}$) و بارندگی ($r=0/98^{**}$) همبستگی بسیار قوی و مثبت وجود دارد. اما بین کربن آلی و عمق خاک رابطه عکس و معنی‌دار ($r=-0/98^{**}$) مشاهده شد.

از سوی دیگر، باندای و همکاران (۲۰۱۹) افزایش میزان کربن آلی خاک با افزایش ارتفاع را به سرعت پایین تجزیه مواد آلی در ارتفاعات ارتباط می‌دهند (۱۵). در واقع، این پژوهش‌گران بیان می‌دارند که کندی سرعت تجزیه منجر به کاهش فرآیند معدنی شدن می‌شود و در نتیجه تلفات کربن آلی ناشی

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر عمق خاک و ارتفاع منطقه بر ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های جنگل ارسباران.

Table 2. Analysis of variance results for the effect of soil depth and altitude on the chemical properties of Arasbaran forest soils.

میانگین مربعات Mean squares								درجه آزادی df	منبع تغییرات S.O.V
کربوهیدرات‌های قابل‌عصاره‌گیری با آب داغ Hot-water-soluble carbohydrates	کربوهیدرات‌های قابل‌عصاره‌گیری با اسید Dilute-acid-soluble carbohydrates	کربنات کلسیم CaCO ₃	پتاسیم قابل‌جذب Available K	فسفر قابل‌جذب Available P	ظرفیت تبادل کاتیونی Cation exchange capacity	کربن آلی Organic carbon	pH اسیدیته		
0.0002 ^{ns}	0.0003 ^{ns}	0.75 [*]	96.73 [*]	0.05 ^{ns}	3.095 ^{ns}	3.17 ^{ns}	0.0018 ^{ns}	2	تکرار Replication
0.0003 ^{ns}	0.00095 ^{ns}	6.06 ^{***}	1863.45 ^{***}	0.36 ^{ns}	86.88 ^{***}	341.18 ^{***}	0.039 ^{***}	3	ارتفاع Altitude
0.0011 ^{**}	0.059 ^{***}	3.012 ^{***}	1062.30 ^{***}	19.38 ^{***}	1510.87 ^{***}	5749.68 ^{***}	0.137 ^{***}	4	عمق Depth
0.0007 ^{**}	0.0002 ^{ns}	0.031 ^{ns}	17.57 ^{ns}	0.337 ^{ns}	8.43 ^{***}	30.78 ^{***}	0.0018 ^{ns}	12	ارتفاع × عمق Depth × Altitude
0.0002	0.0003	0.2	20.49	0.25	1.36	4.58	0.0014	38	اشتباه Error
13.01	7.11	4.8	3.1	5.1	4.38	5.9	0.52		ضرب تغییرات (/)
									CV (%)

***، **، * و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۰۱ درصد، یک درصد، پنج درصد و غیرمعنی‌دار

***, **, * and ns significant at the level of 0.001%, 1%, 5%, and non-significant, respectively

جدول ۳- مقایسه میانگین ویژگی‌های شیمیایی اندازه‌گیری شده در ارتفاعات و عمق‌های مختلف خاک در جنگل ارسباران.
Table 3. Mean comparison of chemical properties measured at different altitudes and soil depths in Arasbaran forest.

ارتفاع Altitude (m)				ویژگی‌های خاک Soil properties	عمق خاک Soil depth (cm)
1800-2400	1200-1800	600-1200	0-600		
76.12 ^a	72.63 ^a	63.11 ^b	57.12 ^c	کربن آلی Organic carbon (g kg ⁻¹)	
50.06 ^a	46.90 ^b	42.67 ^b	38.63 ^d	ظرفیت تبادل کاتیونی Cation exchange capacity (cmol ⁺ kg ⁻¹)	
7.1 ^k	7.13 ^{jk}	7.12 ^{i-k}	7.15 ^{i-k}	اسیدیته pH	
7.29 ⁱ	7.85 ^{g-i}	8.28 ^{e-h}	9.11 ^{b-e}	کربنات کلسیم CaCO ₃ (%)	0-20
8.47 ^{fg}	7.77 ^{gh}	7.67 ^{gh}	7.37 ^h	فسفر قابل جذب Available P (mg kg ⁻¹)	
117.97 ^l	129.33 ^{jk}	139.04 ^{hi}	145.4 ^{f-h}	پتاسیم قابل جذب Available K (mg kg ⁻¹)	
0.35 ^a	0.34 ^a	0.32 ^a	0.33 ^a	کربوهیدرات‌های قابل عصاره‌گیری با اسید Dilute-acid-soluble carbohydrates (g kg ⁻¹)	
0.09 ^{c-f}	0.12 ^{a-d}	0.07 ^f	0.09 ^{d-f}	کربوهیدرات‌های قابل عصاره‌گیری با آب داغ Hot-water-soluble carbohydrates (g kg ⁻¹)	
58.61 ^c	52.47 ^d	46.15 ^e	41.02 ^f	کربن آلی Organic carbon (g kg ⁻¹)	
34.51 ^e	30.86 ^f	29.42 ^f	27.16 ^g	ظرفیت تبادل کاتیونی Cation exchange capacity (cmol ⁺ kg ⁻¹)	
7.15 ^{i-k}	7.20 ^{f-i}	7.19 ^{g-j}	7.26 ^{d-f}	اسیدیته pH	
7.77 ^{ih}	8.18 ^{f-h}	8.49 ^{d-h}	9.30 ^{a-d}	کربنات کلسیم CaCO ₃ (%)	20-40
9.35 ^{de}	9.16 ^{ef}	9.05 ^{ef}	9.68 ^{c-e}	فسفر قابل جذب Available P (mg kg ⁻¹)	
124.08 ^{kl}	141.27 ^{g-i}	149.88 ^{d-g}	146.83 ^{e-h}	پتاسیم قابل جذب Available K (mg kg ⁻¹)	
0.27 ^b	0.26 ^{bc}	0.27 ^b	0.27 ^b	کربوهیدرات‌های قابل عصاره‌گیری با اسید Dilute-acid-soluble carbohydrates (g kg ⁻¹)	
0.13 ^a	0.11 ^{a-c}	0.10 ^{a-c}	0.10 ^{a-c}	کربوهیدرات‌های قابل عصاره‌گیری با آب داغ Hot-water-soluble carbohydrates (g kg ⁻¹)	

ادامه جدول ۳-

Continue Table 3.

ارتفاع Altitude (m)				ویژگی‌های خاک Soil properties	عمق خاک Soil depth (cm)
1800-2400	1200-1800	600-1200	0-600		
33.77 ^g	32.37 ^g	28.72 ^h	26.71 ^h	کربن آلی Organic carbon (g kg ⁻¹)	
23.40 ^h	22.07 ^{hi}	21.35 ^{hj}	19.59 ^{jl}	ظرفیت تبادل کاتیونی Cation exchange capacity (cmol ⁺ kg ⁻¹)	
7.18 ^{h-j}	7.27 ^{d-f}	7.26 ^{e-g}	7.33 ^{cd}	اسیدیته pH	
8.04 ^{f-i}	8.46 ^{d-h}	8.89 ^{c-f}	9.54 ^{a-c}	کربنات کلسیم CaCO ₃ (%)	40-60
10.20 ^{b-d}	10.15 ^{b-d}	9.35 ^{de}	10.46 ^{a-c}	فسفر قابل جذب Available P (mg kg ⁻¹)	
134.02 ^{ij}	148.56 ^{e-g}	154.96 ^{b-e}	153.07 ^{c-f}	پتاسیم قابل جذب Available K (mg kg ⁻¹)	
0.23 ^{c-e}	0.24 ^{b-d}	0.23 ^{c-e}	0.22 ^{d-f}	کربوهیدرات‌های قابل عصاره‌گیری با اسید Dilute-acid-soluble carbohydrates (g kg ⁻¹)	
0.1 ^{b-e}	0.11 ^{a-d}	0.12 ^{a-d}	0.08 ^{ef}	کربوهیدرات‌های قابل عصاره‌گیری با آب داغ Hot-water-soluble carbohydrates (g kg ⁻¹)	
22.84 ⁱ	20.97 ⁱ	19.51 ^{ij}	19.07 ^{ij}	کربن آلی Organic carbon (g kg ⁻¹)	
21.13 ^{ij}	20.03 ^{i-k}	18.7 ^{k-m}	17.46 ^{lm}	ظرفیت تبادل کاتیونی Cation exchange capacity (cmol ⁺ kg ⁻¹)	
7.23 ^{f-h}	7.31 ^{c-e}	7.36 ^{bc}	7.37 ^{bc}	اسیدیته pH	
8.53 ^{d-h}	8.67 ^{d-g}	9.16 ^{b-d}	9.80 ^{ab}	کربنات کلسیم CaCO ₃ (%)	60-80
10.55 ^{a-c}	10.61 ^{ab}	10.24 ^{b-d}	10.89 ^{ab}	فسفر قابل جذب Available P (mg kg ⁻¹)	
134.177 ^{ij}	151.55 ^{c-f}	158.28 ^{b-d}	160.70 ^{a-c}	پتاسیم قابل جذب Available K (mg kg ⁻¹)	
0.21 ^{e-g}	0.20 ^{fg}	0.20 ^{fg}	0.18 ^{gh}	کربوهیدرات‌های قابل عصاره‌گیری با اسید Dilute-acid-soluble carbohydrates (g kg ⁻¹)	
0.12 ^{a-c}	0.10 ^{a-e}	0.12 ^{a-d}	0.13 ^a	کربوهیدرات‌های قابل عصاره‌گیری با آب داغ Hot-water-soluble carbohydrates (g kg ⁻¹)	

ادامه جدول ۳-

Continue Table 3.

ارتفاع Altitude (m)				ویژگی های خاک Soil properties	عمق خاک Soil depth (cm)
1800-2400	1200-1800	600-1200	0-600		
17.02 ^{jk}	15.18 ^{kl}	12.29 ^{lm}	11.11 ^m	کربن آلی Organic carbon (g kg ⁻¹)	
18.41 ^{k-m}	17.43 ^{lm}	16.55 ^m	16.49 ^m	ظرفیت تبادل کاتیونی Cation exchange capacity (cmol ⁺ kg ⁻¹)	
7.32 ^{c-e}	7.38 ^{bc}	7.42 ^b	7.49 ^a	اسیدیته pH	
8.80 ^{c-f}	9.17 ^{b-d}	9.58 ^{a-c}	10.10 ^a	کربنات کلسیم CaCO ₃ (%)	80-100
10.89 ^{ab}	11.30 ^a	11.25 ^a	10.88 ^{ab}	فسفر قابل جذب Available P (mg kg ⁻¹)	
141.72 ^{g-i}	155.39 ^{b-e}	162.63 ^{ab}	168.78 ^a	پتاسیم قابل جذب Available K (mg kg ⁻¹)	
0.16 ^{hi}	0.16 ^{hi}	0.15 ^{hi}	0.15 ⁱ	کربوهیدرات های قابل عصاره گیری با اسید Dilute-acid-soluble carbohydrates (g kg ⁻¹)	
0.11 ^{a-e}	0.12 ^{a-d}	0.12 ^{ab}	0.10 ^{a-e}	کربوهیدرات های قابل عصاره گیری با آب داغ Hot-water-soluble carbohydrates (g kg ⁻¹)	

حروف متفاوت نشان دهنده اختلاف معنی دار در سطح احتمال پنج درصد در آزمون دانکن است

Different letters indicate a significant difference at 5% probability level using the Duncan test

جدول ۴- ضرایب همبستگی پیرسون (r) بین عوامل ارتفاع، عمق خاک و متوسط بارندگی و برخی ویژگی های شیمیایی خاک در منطقه مورد مطالعه.

Table 4. Pearson correlation coefficients (r) between altitude, soil depth and average rainfall factors and some soil chemical properties at the study area.

پتاسیم قابل جذب Available K	فسفر قابل جذب Available P	کربنات کلسیم CaCO ₃	اسیدیته pH	کربوهیدرات های قابل عصاره گیری با اسید Dilute-acid-soluble carbohydrates	ظرفیت تبادل کاتیونی Cation exchange capacity	کربن آلی Organic carbon	
-0.94 ^{ns}	0.29	-0.99 [*]	-0.97 [*]	0.98 [*]	0.99 ^{**}	0.99 ^{**}	ارتفاع Altitude
-0.91 ^{ns}	0.33 ^{ns}	-0.98 [*]	-0.92 ^{ns}	0.95 ^{ns}	0.98 [*]	0.98 ^{**}	بارندگی Rainfall
0.99 ^{**}	0.97 ^{**}	0.99 ^{**}	0.99 ^{**}	-0.99 ^{**}	-0.93 [*]	-0.98 ^{**}	عمق خاک Soil depth

**، * و ^{ns} به ترتیب معنی دار در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و غیرمعنی دار

**، * and ^{ns} significant at the level of 1%, 5%, and non-significant, respectively

جدول ۵- ضرایب همبستگی پیرسون (r) بین ویژگی‌های شیمیایی اندازه‌گیری شده در عمق‌های ۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰، ۶۰-۸۰ و ۸۰-۱۰۰ سانتی‌متری خاک در چهار ارتفاع مورد بررسی از منطقه مورد مطالعه.

Table 5. Pearson correlation coefficients (r) between chemical properties measured at soil depths of 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, and 80-100 cm at four study altitudes of the study area.

کربوهیدرات‌های قابل‌عصاره‌گیری با اسید Dilute-acid-soluble carbohydrates	فسفر قابل‌جذب Available P	پتاسیم قابل‌جذب Available K	کربنات کلسیم CaCO ₃	اسیدیته pH	ظرفیت تبادل کاتیونی Cation exchange capacity	کربن آلی Organic carbon
						1
					1	0.97**
				1	-0.83**	-0.87**
			1	0.75**	-0.62**	-0.66**
		1	0.74**	0.77**	-0.72**	-0.74**
	1	0.52**	0.45**	0.74**	-0.86**	-0.86**
1	-0.88**	-0.68**	-0.59**	-0.85**	0.92**	0.94**

**، * و ^{ns} به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و غیرمعنی‌دار

**، * and ^{ns} significant at the level of 1%, 5%, and non-significant, respectively

(۴۱). هم‌راستا با این نتایج، رابطه عکس و معنی‌دار بین pH و هر دو عامل ارتفاع ($r = -0.97^{**}$) و میزان کربن آلی خاک ($r = -0.87^{**}$) در منطقه مورد مطالعه به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود. بررسی‌های بیشتر هم‌چنین نشان داد هر چند که افزایش ۶۰۰ متری ارتفاع در بین دامنه‌های ارتفاعی مورد مطالعه سبب افزایش میزان کربن آلی در خاک شد، میزان این افزایش بین دو دامنه ۶۰۰-۱۲۰۰ و ۱۲۰۰-۱۸۰۰ متری بیش‌ترین مقدار بود. در واقع، با افزایش ارتفاع از ۶۰۰-۱۲۰۰ تا ۱۲۰۰-۱۸۰۰ متری منطقه میزان کربن آلی خاک در عمق‌های مورد مطالعه شامل ۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰، ۶۰-۸۰ و ۸۰-۱۰۰

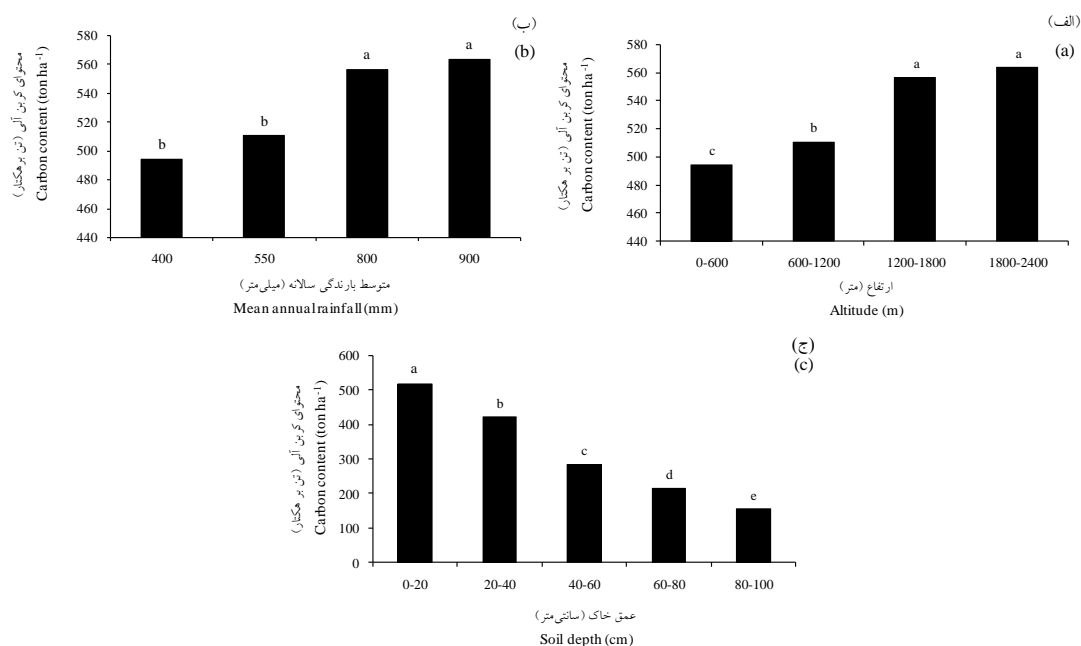
همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، متوسط دمای هوای منطقه مورد مطالعه با افزایش ارتفاع کاهش یافته است. در واقع، در ارتفاعات زیاد جنگل‌های ارسباران (۱۸۰۰-۲۴۰۰ متر از سطح دریا) متوسط درجه حرارت سالیانه ۵ درجه سانتی‌گراد، متوسط دمای گرم‌ترین ماه سال ۱۱ درجه و متوسط دمای سردترین ماه سال ۲- درجه سانتی‌گراد است که با کاهش ارتفاع منطقه دماهای ذکر شده افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، برخی پژوهش‌گران نیز شرایط نامساعد خاکی هم‌چون pH اسیدی خاک که مانع فعالیت میکروبی می‌شود را عامل اصلی سرعت پایین تجزیه کربن آلی خاک در ارتفاعات زیاد بیان می‌کنند

می‌شود، با افزایش مقدار بارندگی منطقه، محتوای کربن آلی خاک افزایش یافته است که ناشی از افزایش میزان رطوبت خاک می‌باشد. در این زمینه، نتایج کین و همکاران (۲۰۱۶) بیانگر همبستگی مثبت و معنی‌دار بین میزان رطوبت و کربن آلی خاک بود. بنابراین، تغییرات شرایط اقلیمی منطقه می‌تواند میزان تغییرات کربن آلی در خاک را تحت تأثیر قرار دهد (۴۳).

بر اساس آنچه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، از میان پنج عمق مورد بررسی در این پژوهش، عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری خاک‌های جنگلی منطقه ارسباران در هر چهار ارتفاع مورد بررسی به‌طور متوسط بیش از ۵۰ درصد کربن آلی را به خود اختصاص داده است که به ترتیب میزان آن در لایه‌های عمیق‌تر خاک به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است. در واقع، میزان کربن آلی خاک با افزایش عمق از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری تا ۸۰-۱۰۰ سانتی‌متری به‌طور میانگین با کاهش ۷۹ درصدی روبه‌رو شد. از سوی دیگر، محتوای کربن آلی خاک‌های منطقه مورد مطالعه نیز با افزایش عمق به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد (شکل ۲، ج). مطابق با این نتایج، دیناکاران و همکاران (۲۰۱۸) و سینگ و همکاران (۲۰۲۲) در بررسی‌های خود در خاک‌های جنگلی نشان دادند که بیش‌ترین ذخیره کربن آلی خاک به عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر سطحی خاک مربوط بود که با افزایش عمق از مقدار آن کاسته شد (۱۰ و ۱۴). در حقیقت، دلیل بالاتر بودن میزان کربن آلی در لایه‌های سطحی نسبت به لایه‌های عمیق‌تر خاک، تجمع مدام لاشبرگ‌ها و میزان بیش‌تر تجزیه آن‌ها در سطح خاک بیان شده است (۱۴). در این راستا، دیناکاران و کریشناپا (۲۰۱۰) در نتایج‌شان سرعت بیش‌تر تجزیه لاشبرگ‌ها در لایه سطحی خاک و ارتباط آن با افزایش کربن آلی خاک سطحی را گزارش کردند (۴۴).

سانتی‌متری به‌ترتیب ۱/۱۵، ۱/۱۳، ۱/۱۲، ۱/۰۷ و ۱/۲۴ برابر افزایش یافت که نسبت به افزایش کربن در دو تغییر ارتفاعی دیگر بیش‌ترین مقدار بود. این افزایش بیش‌تر می‌تواند ناشی از اختلاف بیش‌تر بارندگی بین این دو دامنه ارتفاعی و در نتیجه رطوبت بیش‌تر خاک باشد. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع از ۱۲۰۰-۶۰۰ تا ۱۸۰۰-۱۲۰۰ متری میزان بارندگی به میزان ۲۵۰ میلی‌متر (حدود ۱/۵ برابر) افزایش یافته است که نسبت به افزایش بارندگی بین دو دامنه دیگر یعنی از ۶۰۰-۰ تا ۱۲۰۰-۶۰۰ متری (۱/۴ برابر) و از ۱۸۰۰-۱۲۰۰ تا ۲۴۰۰-۱۸۰۰ متری (۱/۱ برابر) بیش‌تر می‌باشد.

تغییرات محتوای کربن آلی در عمق یک متری خاک با ارتفاع در شکل ۲ (الف) نشان داده شده است. ذخیره کربن آلی خاک نیز با ارتفاع روند افزایشی داشت به نحوی که کم‌ترین و بیش‌ترین محتوای کربن آلی تا عمق یک متری خاک به‌ترتیب در ارتفاع‌های ۶۰۰-۰ و ۱۸۰۰-۲۴۰۰ متری منطقه مورد مطالعه مشاهده شد. در واقع، با افزایش ارتفاع از ۶۰۰-۰ تا ۱۸۰۰-۲۴۰۰ متری محتوای کربن آلی خاک از ۴۹۴/۳۶ به ۵۶۳/۴۸ تن بر هکتار رسید که حدود ۱/۱۴ برابر افزایش داشت. هم‌چنین به‌طور جالب توجهی، بیش‌ترین افزایش محتوای کربن آلی خاک نیز مربوط به افزایش ارتفاع در بین دو دامنه ۱۲۰۰-۶۰۰ و ۱۸۰۰-۱۲۰۰ متری بود که به میزان ۱/۱ برابر افزایش نشان داد که با تغییرات حداکثری میزان بارندگی در بین این دو ارتفاع متناسب است. به‌طور کلی، رطوبت بیش‌تر در خاک فعالیت میکروبی را محدود کرده و به‌دلیل کاهش میزان اکسیژن و توسعه شرایط بی‌هوایی ناشی از غرقاب شدن خاک سبب کاهش میزان تجزیه مواد آلی و تجمع آن‌ها در خاک می‌شود (۴۲). همان‌طور که در شکل ۲ (ب) مشاهده



شکل ۲- تغییرات محتوای کربن آلی خاک با عوامل (الف) ارتفاع منطقه، (ب) متوسط بارندگی سالانه و (ج) عمق خاک در منطقه مورد مطالعه.

Figure 2. Changes in soil organic carbon content with the factors of (a) altitude, (b) mean annual rainfall, and (c) soil depth in the study area.

مورد مطالعه خود گزارش کردند که با افزایش ارتفاع منطقه، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک از ۱۱ به ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک افزایش یافت (۲۰). هم‌چنین، سیمون و همکاران (۲۰۱۸) بیشترین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌های مورد مطالعه‌شان را در لایه ۲۰ سانتی‌متر بالایی خاک مشاهده کردند که با افزایش عمق از میزان آن کاسته شد (۲۱). هم‌چنین بر اساس نتایج جدول ۴، بین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و هر دو عامل ارتفاع ($r=0.99^{**}$) و بارندگی ($r=0.98^{*}$) همبستگی بسیار قوی و مثبتی وجود داشت، هر چند که این ویژگی با عمق خاک ($r=-0.93^{**}$) رابطه عکس و معنی‌داری را نشان داد. مواد آلی یکی از عوامل اصلی در افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک محسوب می‌شوند (۴۵). در این راستا مطالعات زیادی افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با افزایش مواد آلی در خاک را گزارش کرده‌اند (۴۵ و ۴۶). این روند

از طرف دیگر، عوامل ارتفاع منطقه، عمق خاک و اثرات توأم‌شان بر میزان ظرفیت تبادل کاتیونی خاک اثر معنی‌داری ($P \leq 0.001$) نشان دادند (جدول ۲). هم‌چنین، با افزایش ارتفاع منطقه و کاهش عمق خاک میزان ظرفیت تبادل کاتیونی خاک افزایش پیدا کرد؛ هر چند که در برخی ارتفاعات و عمق‌های خاک این افزایش معنی‌دار نبود (جدول ۳). بدین ترتیب، بیش‌ترین مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌های مورد مطالعه در عمق ۰-۲۰ سانتی‌متر سطحی خاک مشاهده شد که با افزایش ارتفاع بر میزان آن افزوده شد. به عبارت دیگر، با افزایش ارتفاع منطقه از ارتفاع ۶۰۰-۱۸۰۰ تا ۱۸۰۰-۲۴۰۰ متری، میزان ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در لایه ۰-۲۰ سانتی‌متری خاک از ۳۸/۶۳ به ۵۰/۰۶ سانتی مول بر کیلوگرم خاک رسید و حدود ۱/۳ برابر افزایش یافت (جدول ۳). به‌طور مشابهی، ویلدونگ و گارلند (۱۹۸۸) در منطقه

در اثر تجزیه مواد آلی باشد (۱۵). از طرف دیگر، مطالعات زیادی هم‌چون کین و همکاران (۲۰۱۶) و ژانگ و همکاران (۲۰۲۱) نیز روند افزایشی pH خاک با افزایش عمق خاک را در نتایج‌شان گزارش کردند (۱۶ و ۴۳). در واقع، افزایش pH با افزایش عمق خاک می‌تواند ناشی از افزایش مقادیر کربنات کلسیم با عمق باشد. در این زمینه، نتایج این پژوهش نشان داد که بین ویژگی‌های pH و کربنات کلسیم همبستگی مثبت و معنی‌داری ($r=0/75^{**}$) وجود دارد (جدول ۵). همان‌طور که جدول ۲ نشان می‌دهد، عوامل تکرار ($P \leq 0/05$) ارتفاع منطقه ($P \leq 0/001$) و عمق خاک ($P \leq 0/001$) تأثیر معنی‌داری بر میزان کربنات کلسیم خاک در منطقه مورد مطالعه داشتند. هم‌چنین، هم‌راستا با تغییرات pH، میزان کربنات کلسیم خاک با افزایش عمق خاک و کاهش ارتفاع منطقه افزایش یافت. به‌عبارت دیگر، بیش‌ترین میزان کربنات کلسیم خاک‌های مورد مطالعه در عمق ۸۰-۱۰۰ سانتی‌متری خاک و در کم‌ترین ارتفاع مورد بررسی (۶۰۰-۰ متری) به میزان ۱۰/۱۰ درصد مشاهده شد (جدول ۳). مشابه با این نتایج، هتار و همکاران (۲۰۱۰) نیز افزایش میزان کربنات‌های خاک با افزایش عمق را گزارش کرده و دلیل آن را آبخوبی کربنات‌ها از سطح به عمق خاک بیان کردند (۲۴). بر این اساس، کاهش غلظت کربنات کلسیم با افزایش ارتفاع را می‌توان به آبخوبی ناشی از بارش‌های بیش‌تر موجود در ارتفاعات نسبت داد. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع میزان بارندگی در منطقه مورد مطالعه افزایش یافته است که می‌تواند سبب آبخوبی و کاهش میزان کربنات‌های کلسیم در خاک مناطق موجود در ارتفاعات بیش‌تر و هم‌چنین کاهش pH خاک شود. در این راستا، نتایج جدول ۴ همبستگی بسیار قوی و منفی بین کربنات کلسیم خاک و هر دو عامل ارتفاع منطقه ($r = -0/99^*$) و بارندگی

می‌تواند ناشی از تجزیه و پروتون‌گیری گروه‌های عاملی قطبی سطوح مواد آلی باشد که نه‌تنها سبب ایجاد بارهای منفی می‌شود، بلکه سایت‌های تبدالی مختلفی نیز فراهم می‌کند (۴۷). در حقیقت، افزایش مواد آلی خاک با افزایش ارتفاع و کاهش عمق سبب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌های مورد مطالعه شده است. این نتیجه با همبستگی مثبت و بسیار قوی ($r=0/97^{**}$) بین کربن آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌های منطقه تأیید می‌شود (جدول ۵).

به‌طورکلی، pH خاک‌های مورد مطالعه در محدوده قلیایی قرار داشت، به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار pH خاک در ارتفاع صفر تا ۶۰۰ متری و عمق ۸۰-۱۰۰ سانتی‌متری به میزان ۷/۴۹ و کم‌ترین میزان آن در ارتفاع ۲۴۰۰-۱۸۰۰ متری و عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری خاک به میزان ۷/۱ مشاهده شد (جدول ۳). به‌طور مشابهی، علیجانپور و همکاران (۲۰۱۸) نیز در پژوهش‌شان pH قلیایی خاک‌های دامنه شمالی جنگل‌های ارسباران در تمام طبقات ارتفاعی مورد مطالعه‌شان از ۷۰۰ تا ۲۰۰۰ متری را گزارش کردند (۴۸). نتایج هم‌چنین نشان داد که اثر دو عامل ارتفاع و عمق بر میزان pH خاک معنی‌دار ($P \leq 0/001$) بود (جدول ۲). در واقع، میزان pH خاک با افزایش ارتفاع و عمق به‌ترتیب روند کاهشی و افزایشی نشان داد و با هر دو عامل ارتفاع ($r = -0/97^*$) و عمق خاک ($r = 0/99^{**}$) همبستگی بسیار قوی داشت (جدول ۴). مشابه با این نتایج، اسمیت و همکاران (۲۰۰۲)، دیلمن و همکاران (۲۰۱۳) و پراگ و همکاران (۲۰۲۰) روند کاهشی pH خاک با افزایش ارتفاع را گزارش کردند (۱۳، ۱۹ و ۳۶). در واقع، کم‌تر بودن pH خاک‌های موجود در ارتفاعات بالاتر می‌تواند ناشی از شستشوی کاتیون‌های بازی از سطح خاک در اثر بارش‌های زیاد در ارتفاعات و هم‌چنین وجود مقادیر بالای یون H^+

($r=0/99^{**}$) مشاهده شد (جدول ۴). این روند تغییرات نشان‌دهنده شستشوی پتاسیم از سطح به عمق‌های پایین‌تر خاک می‌باشد. به‌طورکلی، میزان پتاسیم قابل‌استفاده در خاک تابعی از درجه هوادیدگی کانی‌ها و میزان آبشویی آن از خاک است (۴۹). در واقع، آبشویی یکی از عوامل مؤثر و تعیین‌کننده در میزان پتاسیم محلول و تبادل‌لی خاک می‌باشد. میرزائی‌ورویی و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهش خود نشان دادند که در اثر آبشویی، میزان پتاسیم قابل‌جذب با افزایش عمق خاک افزایش یافت (۵۰). از سوی دیگر، به دلیل بارش‌های زیاد در نقاط با ارتفاع بیشتر، میزان پتاسیم خاک با افزایش ارتفاع منطقه کاهش یافت (جدول ۳). در این راستا، ارتباطی منفی بین میزان پتاسیم خاک و هر دو عامل ارتفاع ($r=-0/94^{ns}$) و میزان بارندگی منطقه ($r=-0/91^{ns}$) به‌دست آمد، هر چند که این روابط معنی‌دار نبود (جدول ۴). کریمان و حسینی (۲۰۱۶) نیز در خاک‌های جنگلی منطقه تنگ دالان استان ایلام نشان دادند که با افزایش ارتفاع منطقه از سطح دریا، میزان پتاسیم قابل‌جذب خاک کاهش پیدا کرد که دلیل آن را آبشویی ناشی از بارش‌های زیاد در ارتفاعات گزارش کردند (۱).

از سوی دیگر، درحالی‌که عمق خاک بر هر دو ویژگی کربوهیدرات‌های عصاره‌گیری‌شده با اسید ($P\leq 0/001$) و کربوهیدرات‌های عصاره‌گیری‌شده با آب داغ ($P\leq 0/01$) اثر معنی‌داری را نشان داد، ارتفاع منطقه بر هر دو ویژگی تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۲). به‌علاوه، اثر متقابل عمق و ارتفاع منطقه تنها بر کربوهیدرات‌های عصاره‌گیری‌شده با آب داغ معنی‌دار بود ($P\leq 0/01$). همچنین، هر چند که مقادیر کربوهیدرات‌های عصاره‌گیری‌شده با آب داغ با هر دو عامل عمق و ارتفاع روند مشخصی نداشت، میزان کربوهیدرات‌های عصاره‌گیری‌شده با اسید با افزایش

($r=-0/98^{*}$) و همچنین همبستگی بسیار قوی و مثبت بین این ویژگی و عمق خاک ($r=0/99^{**}$) را نشان می‌دهد.

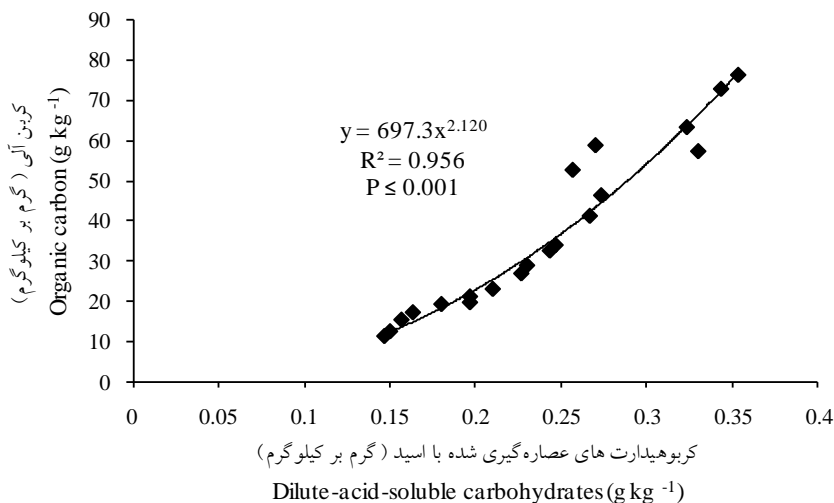
نتایج حاصل از تجزیه واریانس این پژوهش نشان داد که اثر عمق خاک بر میزان فسفر قابل‌جذب معنی‌دار بود ($P\leq 0/001$)، اما ارتفاع منطقه بر این ویژگی تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۲). از طرفی، با افزایش عمق خاک میزان فسفر قابل‌جذب خاک افزایش یافت به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار فسفر خاک‌های منطقه مورد مطالعه در هر چهار ارتفاع مورد بررسی به عمق ۸۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری خاک مربوط بود. در واقع، بین میزان فسفر قابل‌جذب و عمق خاک همبستگی بسیار قوی، مثبت و معنی‌داری ($r=0/97^{**}$) وجود داشت (جدول ۴). در این راستا، امسی‌داول و همکاران (۲۰۲۱) نیز در مطالعه‌شان نشان دادند که در مناطق پرباران، ترکیبات آلی فسفره محلول از لایه سطحی شسته شده و در عمق تجمع می‌یابد و در اثر معدنی‌شدن به فرم قابل‌جذب تبدیل می‌شود، ضمن این‌که عواملی همچون بافت سبک خاک هم می‌تواند این جریان را بهبود ببخشد (۲۳). بنابراین، یکی از دلایل افزایش فسفر در خاک‌های ارسباران احتمالاً شستشوی ترکیبات آلی فسفره محلول از سطح به عمق می‌باشد.

بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲)، عوامل تکرار ($P\leq 0/05$)، ارتفاع منطقه ($P\leq 0/001$) و عمق خاک ($P\leq 0/001$) بر ویژگی پتاسیم قابل‌جذب خاک اثر معنی‌داری داشتند. در حقیقت، با افزایش عمق خاک میزان پتاسیم قابل‌جذب خاک افزایش پیدا کرد به‌طوری‌که کم‌ترین و بیش‌ترین میزان پتاسیم خاک به‌ترتیب در عمق‌های ۲۰-۰ و ۸۰-۱۰۰ سانتی‌متری خاک در هر چهار ارتفاع مورد بررسی به‌دست آمد. از طرفی، بین میزان پتاسیم قابل‌جذب خاک و عمق خاک همبستگی بسیار قوی، مثبت و معنی‌داری

برخی مطالعات قبلی، به دلیل اثرات مثبت کربوهیدرات‌های عصاره‌گیری شده با اسید بر خاکدانه‌سازی، آن را به‌عنوان شاخصی از کیفیت خاک گزارش کردند (۵۱). از سوی دیگر، همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، بین ویژگی کربوهیدرات‌های قابل‌عصاره‌گیری با اسید و عامل ارتفاع منطقه ارتباط بسیار قوی، مستقیم و معنی‌داری ($r=0/98^*$) وجود دارد. به بیان دیگر، با افزایش ارتفاع و در نتیجه میزان بارندگی منطقه، مقدار ماده آلی و در نتیجه کربوهیدرات‌های عصاره‌گیری شده با اسید خاک افزایش پیدا کرد. در مقابل، به دلیل کاهش میزان کربن آلی با عمق خاک، همبستگی بسیار قوی، منفی و معنی‌داری ($r=-0/99^{**}$) بین ویژگی کربوهیدرات‌های قابل‌عصاره‌گیری با اسید و عمق خاک مشاهده شد (جدول ۴).

عمق و ارتفاع به‌ترتیب روند کاهشی و افزایشی نشان داد (جدول ۳). در واقع، این روند تغییرات هم‌راستا با تغییرات کربن آلی خاک با عمق و ارتفاع می‌باشد. در این راستا، نتایج نشان داد که بین ویژگی‌های کربن آلی و کربوهیدرات‌های قابل‌عصاره‌گیری با اسید همبستگی بسیار قوی، مثبت و معنی‌داری ($r=0/94^{**}$) وجود دارد (جدول ۵).

شکل ۳ رابطه بین مقادیر متوسط کربن آلی و کربوهیدرات‌های عصاره‌گیری شده با اسید در خاک‌های منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. براساس نتایج شکل ۳، بین میزان کربن آلی خاک و کربوهیدرات‌های عصاره‌گیری شده با اسید رابطه مثبت، توانی و معنی‌داری ($R^2=0/96$; $P\leq 0/001$) وجود دارد. در واقع، با افزایش میزان ماده آلی خاک، بخش کربوهیدرات‌های آن نیز افزایش می‌یابد. در این زمینه



شکل ۳- رابطه بین مقادیر متوسط کربن آلی و کربوهیدرات‌های عصاره‌گیری شده با اسید در خاک‌های منطقه مورد مطالعه.

Figure 3. Relationship between the average values of organic carbon and dilute-acid-soluble carbohydrates in the soils of the study area.

ارتفاعات مورد بررسی، کربوهیدرات‌های عصاره‌گیری شده با اسید از مقادیر بالاتری برخوردار می‌باشد. بر اساس بیانات بونجیوانی و لوبارتینی (۲۰۰۶) مقادیر کم‌تر

از طرف دیگر، مقایسه مقادیر مربوط به دو ویژگی کربوهیدرات‌های عصاره‌گیری شده با اسید و با آب داغ در جدول ۳ نشان می‌دهد که در تمام عمق‌ها و

ذخیره کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و کربوهیدرات‌های عصاره‌گیری‌شده با اسید شد. به‌علاوه، تغییرات محتوای کربن آلی خاک با ارتفاع بیش‌تر تحت‌تأثیر تغییرات بارش و رطوبت منطقه بود به‌طوری‌که بیش‌ترین میزان افزایش کربن آلی خاک در بین دامنه‌های ارتفاعی مورد بررسی با اختلاف ۶۰۰ متری، بین دو دامنه ۱۲۰۰-۱۸۰۰ و ۶۰۰-۱۲۰۰ متری مشاهده شد که بیش‌ترین اختلاف بارندگی را داشتند. یافته‌های این پژوهش بر اهمیت حفظ، نگهداری و مدیریت خاک‌های سطحی به‌ویژه در مناطق با ارتفاع بیش‌تر جنگل‌های ارسباران در راستای حفظ ذخیره کربن آلی خاک‌های منطقه تأکید می‌کند. در واقع، با توجه به نقش مهم خاک‌های سطحی نقاط بالادست منطقه مورد مطالعه در ذخیره و ترسیب کربن، اجرای عملیات حفاظتی جهت حفظ این مناطق به‌صورت بکر و دست‌نخورده ضروری می‌باشد.

کربوهیدرات‌های عصاره‌گیری‌شده با روش آب داغ به این دلیل است که در روش عصاره‌گیری با اسید علاوه بر کربوهیدرات‌های محلول، کربوهیدرات‌های همی‌سلولز نیز استخراج می‌شود، درحالی‌که روش استخراج با آب داغ قادر به هیدرولیز همی‌سلولزها نمی‌باشد (۵۲).

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که عوامل ارتفاع منطقه و عمق خاک بر کیفیت خاک‌های جنگلی منطقه مورد مطالعه بویژه محتوای کربن آلی و برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک اثر معنی‌داری داشتند. به‌طورکلی، خاک‌های سطحی نقاط بالادست در منطقه مورد بررسی از کیفیت بالاتری به لحاظ ذخیره کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و کربوهیدرات‌های عصاره‌گیری‌شده با اسید برخوردار بودند. به عبارت دیگر، افزایش ارتفاع منطقه و کاهش عمق خاک سبب افزایش معنی‌دار

منابع

1. Karamian, M., and Hosseini, V. 2016. Effect of trees canopy and topography on some chemical properties of forest soil (Case Study: The forest of Ilam province, Dalab). *Journal of Natural Ecosystems of Iran*. 7: 1. 81-97. (In Persian)
2. Notaro, K.A., Medeiros, E.V.D., Duda, G.P., Moreira, K.A., Barros, J.A.D., Santos, U.J.D., Lima, J.R.D.S., and Moraes, W.D.S. 2018. Enzymatic activity, microbial biomass, and organic carbon of Entisols from Brazilian tropical dry forest and annual and perennial crops. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 78: 1. 68-77.
3. Beheshti, A., Raiesi, F., and Golchin, A. 2012. Soil properties, C fractions and their dynamics inland use conversion from native forests to croplands in northern Iran. *Agric Ecosyst Environ*. 148: 121-133.
4. Karmakar, R., Das, I., Dutta, D., and Rakshit, A. 2016. Potential effects of climate change on soil properties, a review. *Science International*. 4: 51-73.
5. Shekofteh, H., Masoudi, A., and Shafiei, S. 2018. The effect of different land uses on some indicators of physical, chemical and biological quality of soil. *Journal of Soil and Water Sciences*. 22: 3. 425-436. (In Persian)
6. Weil, R.R., Islam, K.R., Stine, M.A., Gruver, J.B., and Samson-Liebig, S.E. 2003. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*. 18: 1. 3-17.
7. Blanco, J.A. 2018. Managing Forest soils for carbon sequestration: insights from modeling forests around the globe. P 237-252. In: Muñoz, M.Á., Zornoza, R. (ed), *Soil Management and Climate Change*. Elsevier Inc, New York. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812128-3.00016-1>.

8. Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J.W., and Brussaard, L. 2018. Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*. 120: 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.
9. Dai, L., Ge, J., Wang, L., Zhang, Q., Liang, T., Bolan, N., Lischeid, G., and Rinklebe, J. 2022. Influence of soil properties, topography, and land cover on soil organic carbon and total nitrogen concentration: A case study in Qinghai-Tibet plateau based on random forest regression and structural equation modeling. *Science of the Total Environment*, 821: 153440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153440>.
10. Singh, G., Mishra, D., Singh, K., Shukla, S., and Choudhary, G.R. 2022. Geographical settings and tree diversity influenced soil carbon storage in different forest types in Rajasthan, India. *Catena* 209: 105856. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105856>.
11. Gebeyehu, G., Soromessa, T., Bekele, T., and Teketay, D. 2019. Carbon stocks and factors affecting their storage in dry Afromontane forests of Awi Zone, northwestern Ethiopia. *Journal of Ecology and Environment*. 43: 1. 1-18.
12. Vieira, S.A., Alves, L.F., Duarte-Neto, P.J., Martins, S.C., Veiga, L.G., Scaranello, M.A., Picollo, M.C., Camargo, P.B., do Carmo, J.B., Neto, E.S., and Santos, F.A. 2011. Stocks of carbon and nitrogen and partitioning between above-and belowground pools in the Brazilian coastal Atlantic Forest elevation range. *Ecology and Evolution*. 1: 3. 421-434.
13. Dieleman, W.I., Venter, M., Ramachandra, A., Krockenberger, A.K., and 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>.
14. Dinakaran, J., Chandra, A., Chamoli, K.P., Deka, J., and Rao, K.S. 2018. Soil organic carbon stabilization changes with an altitude gradient of land cover types in central Himalaya, India. *Catena*. 170: 374-385. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.039>.
15. Banday, M., Bhardwaj, D.R., and 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.
16. Zhang, Y., Ai, J., Sun, Q., Li, Z., Hou, L., Song, L., Tang, G., Li, L., and 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>.
17. Gessler, P.E., Chadwick, O.A., Chamran, F., Althouse, L., and Holmes, K. 2000. Modelisoil-landscape and ecosystem properties using terrain attributes. *Soil Science Society America Journal*. 64: 2046-2056.
18. Pachepsky, Y.A., Timlin, D.J., and Rawls, W.J. 2001. Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Science Society America Journal*. 65: 1787-1795.
19. Praeg, N., Seeber, J., Leitinger, G., Tasser, E., Newesely, C., Tappeiner, U., and Illmer, P. 2020. The role of land management and elevation in shaping soil microbial communities: Insights from the Central European Alps. *Soil Biology and Biochemistry*. 150: 107951. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107951>.
20. Wildung, R.E., and Garland, T.R. 1988. Soils/carbon and mineral cycling processes. P 23-59, In: Rickard, W.H., Rogers, L.E., Vaughan, B.E., Liebetrau, S.F. (ed.). *Shrub-Steppe Balance and Change in a Semi-Arid Terrestrial Ecosystem, Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology*. Elsevier, New York.

21. Simon, A., Dhendup, K., Rai, P.B., and Gratzner, G. 2018. Soil carbon stocks along elevational gradients in Eastern Himalayan mountain forests. *Geoderma Regional*. 12: 28-38.
22. Song, X.D., Liu, F., Wu, H.Y., Cao, Q., Zhong, C., Yang, J.L., Li, D.C., Zhao, Y.G., and Zhang, G.L. 2020. Effects of long-term K fertilization on soil available potassium in East China. *Catena*. 188: 104412. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104412>.
23. McDowell, R.W., Worth, W., and Carrick, S. 2021. Evidence for the leaching of dissolved organic phosphorus to depth. *Science of the Total Environment*, 755: 142392. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142392>.
24. Hattar, B.I., Taimeh, A.Y., and Ziadat, F.M. 2010. Variation in soil chemical properties along toposequences in an arid region of the Levant. *Catena*, 83: 1. 34-45.
25. Rezaei, H., Jafarzadeh, A., Alijanpour, A., Shahbazi, F., and Valizadeh Kamran, K. 2020. Soil Organic Matter Condition in Forest Stands of Arasbaran. *Water and Soil*. 34: 1. 115-127. (In Persian)
26. Ebrahimi, T., Kasebi, N., Ghahramani, M.A., and Imani, Y. 2006. The determination of phytoclimates based on biodiversity and biological forms in arasbaran. *Plant and Ecosystem*. 2: 7. 105-118. (In Persian)
27. Walkley, A., and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*. 37: 1. 29-38.
28. Carter, M.R., and Gregorich, E.G. 2008. Soil Sampling and Methods of Analysis. P 823-1224, In: Carter, M.R., Gregorich, E.G., (ed.). CRC Press: Boca Raton, Florida, USA.
29. Goh, T.B., Arnaud, R.J., and Mermut, A.R. 1993. Aggregate stability to water. P 177-180, In: Carter, M.R. (ed.). *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton.
30. Bower, C.A., Reitemeier, F., and Fireman, M. 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali. *Soil Science*. 73: 4. 251-262.
31. Olsen, S.R., and Sommers, L.E. 1982. Phosphorus. P 403-430, In: Miller, A.L. (ed.). *Methods of soil analysis, part 2. Chemical and mineralogical properties*. Agronomy series, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
32. Philip, A.H., and Sparks, D.L. 1996. Lithium, Sodium, Potassium, Rubidium and Cesium. P 551-574, In: Sparks, D.L. (ed.). *Methods of soil analysis. part 3, chemical methods*, Madison, Wisconsin, USA.
33. Adesodun, J.K., Mbagwu, J.S.C., and Oti, N. 2001. Structural stability and carbohydrate contents of an ultisol under different management systems. *Soil and Tillage Research*. 60: 135-142.
34. Gee, G.W., and Or, D. 2002. Particle size analysis. P 255-293, In: Dane, J.H. and G.C. Topp. (ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
35. Blake, G.R., and Hartge, K.H. 1986. Bulk density. P 363-375, In: Klute, A. (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1, Physical and mineralogical methods*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
36. Smith, J.L., Halvorson, J.J., and Bolton Jr, H. 2002. Soil properties and microbial activity across a 500 m elevation gradient in a semi-arid environment. *Soil Biology and Biochemistry*. 34: 11. 1749-1757.
37. Yang, Y., Mohammad, A., Feng, J., Zhou, R., and Fang, J. 2007. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. *Biogeochemistry*. 84: 2. 131-141.
38. Deng, L., Liu, G.B., and 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.

39. Li, P., Wang, Q., Endo, T., Zhao, X., and 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.
40. Njeru, C.M., Ekese, S., Mohamed, S.A., Kinyamario, J.I., Kiboi, S., and 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.
41. Heckman, K., Welty-Bernard, A., Rasmussen, C., and Schwartz, E. 2009. Geologic controls of soil carbon cycling and microbial dynamics in temperate conifer forests. *Chemical Geology*. 267: 1-2. 12-23.
42. Rowlings, D.W., Grace, P.R., Kiese, R., and Weier, K.L. 2012. Environmental factors controlling temporal and spatial variability in the soil-atmosphere exchange of CO₂, CH₄ and N₂O from an Australian subtropical rainforest. *Global Change Biology*. 18: 2. 726-738.
43. Qin, Y., Feng, Q., Holden, N.M., and Cao, J. 2016. Variation in soil organic carbon by slope aspect in the middle of the Qilian Mountains in the upper Heihe River Basin, China. *Catena*. 147: 308-314.
44. Dinakaran, J., and Krishnayya, N.S.R. 2010. Variations in soil organic carbon and litter decomposition across different tropical vegetal covers. *Current Science*. 99: 8. 1051-1060.
45. Liu, J., Wang, Z., Hu, F., Xu, C., Ma, R., and Zhao, S. 2020. Soil organic matter and silt contents determine soil particle surface electrochemical properties across a long-term natural restoration grassland. *Catena*. 190: 104526. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104526>.
46. Zhao, Z., Chang, E., Lai, P., Dong, Y., Xu, R., Fang, D., and Jiang, J. 2019. Evolution of soil surface charge in a chronosequence of paddy soil derived from Alfisol. *Soil and Tillage Research*. 192: 144-150.
47. Bolan, N.S., Naidu, R., Syers, J.K., and Tillman, R.W. 1999. Surface charge and solute interactions in soils. *Advances in agronomy* 67: 87-140.
48. Alijanpour, A., Fatollahi, A., Eshaghi Rad, J., and Mohamed, A.R. 2018. Effect of aspect and soil on quantitative and qualitative characteristic of hornbeam (*Carpinus betulus* L.) in Arasbaran forest (case study: Ilginehchay and Kaleibarchay Watersheds). *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*. 30: 4. 887-898. (In Persian)
49. Sharma, V., and Sharma, K.N. 2013. Influence of accompanying anions on potassium retention and leaching in potato growing alluvial soils. *Pedosphere*, 23: 4. 464-471.
50. Mirzaei Varoei, M., Fekri, M., and Mahmoudabadi, M. 2016. Effects of moisture regime, sodium and calcium on the deep distribution of potassium in a gypsum soil. *Journal of Soil and Water Conservation Research*. 23: 4. 81-65. (In Persian)
51. Spohn, M., and Giani, L. 2010. Water-stable aggregates, glomalin-related soil protein, and carbohydrates in a chronosequence of sandy hydromorphic soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 42: 9. 1505-1511.
52. Bongiovanni, M.D., and Lobartini, J.C. 2006. Particulate organic matter, carbohydrate, humic acid contents in soil macro-and microaggregates as affected by cultivation. *Geoderma*. 136: 3-4. 660-665.