

نشریه علمی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران  
 جلد ۳۰ شماره ۴، صفحه ۳۶۴-۳۴۷، (۱۴۰۱)  
 شناسه دیجیتال (DOI): 10.22092/ijfpr.2023.360649.2078  
 شناسه دیجیتال (DOR): 20.1001.1.17350883.1401.30.4.4.4

## تغییرات کربن آلی خاک توده‌های اوری (*Quercus macranthera* C. A. Mey.) در جنگل‌های هیرکانی

علی اصغر واحدی<sup>۱\*</sup>، علی چراتی آرائی<sup>۲</sup>، ملیحه طالبی اتویی<sup>۳</sup> و محمد متینی زاده<sup>۴</sup>

\*۱- نویسنده مسئول، استادیار، بخش تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران. پست الکترونیک: as.vahedi@areeo.ac.ir  
 ۲- استادیار، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران  
 ۳- دکتری شیمی خاک، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران  
 ۴- دانشیار، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۵

### چکیده

شناسایی تغییرات کربن آلی جنگل‌های اوری (*Quercus macranthera* C. A. Mey.) واقع در ارتفاعات بالابند جنگل‌های هیرکانی می‌تواند اطلاعات مناسبی برای مدیریت بهینه و حفاظت جنگل‌های مذکور در اختیار قرار دهد. در پژوهش پیش‌رو، به‌طور تصادفی چهار قطعه نمونه با ابعاد ۲۰ × ۲۰ متر مربع در هر یک از توده‌های اوری رویشگاه‌های پانومه‌سر لایویج، کلنگای نکاء و توسکستان گرگان پیاده شد. در مرکز و چهار گوشه هر یک از قطعات نمونه، به‌طور جداگانه نمونه‌های خاک از دو عمق ۱۵ - ۰ سانتی‌متر (لایه فوقانی خاک) و ۳۰-۱۵ سانتی‌متر (لایه زیرین خاک) به‌شکل ترکیبی جمع‌آوری و در آزمایشگاهی ویژگی‌های آن‌ها اندازه‌گیری شد. در هر قطعه نمونه، ویژگی‌های زیستی درختان شامل قطر برابر سینه، ارتفاع کل، تراکم و قطر متوسط تاج درختان و نیز ویژگی‌های فیزیوگرافی زمین اندازه‌گیری و ثبت شد. نتایج آزمون چندمتغیره مانوآ نشان داد که مقادیر کربن آلی و نیتروژن کل در لایه فوقانی و زیرین خاک در بین رویشگاه‌های مختلف اختلاف معنی‌داری نداشتند. بر خلاف آن، نتایج آزمون مذکور نشان داد که مقدار فسفر و پتاسیم قابل جذب در عمق‌های مختلف خاک بین رویشگاه‌های مورد پژوهش تغییرات معنی‌دار داشت. بر مبنای نتایج آزمون همبستگی پیرسون، مقدار کربن آلی و نیتروژن کل در لایه‌های مختلف خاک با متغیرهای کمی درختان توده‌های اوری در رویشگاه‌های مورد پژوهش ارتباط معنی‌داری نداشت. از سویی، نتایج نشان دادند که تغییرات عناصر غذایی (NPK) و کربن آلی به‌شکل متقابل چه در داخل هر یک از لایه‌های خاک و چه در بین لایه‌های مذکور خاک مستقل از یکدیگر بودند و همبستگی معنی‌داری نداشتند. نتایج آزمون t جفتی نیز نشان داد که فقط مقادیر نیتروژن کل بین عمق‌های مختلف خاک دارای اختلاف معنی‌داری بود ( $p < 0.05$ ;  $t = 2.59$ ). در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان عنوان کرد که تغییرات کربن آلی خاک توده‌های اوری موجب شده است که اثرات گونه‌های توده‌های مذکور در رابطه با تغییرات مورد اشاره معنی‌دار نباشد.

واژه‌های کلیدی: ارتفاعات بالابند، جنگل‌های اوری، عناصر غذایی خاک، کربن آلی خاک.

## مقدمه

باتوجه به چالش گرمایش زمین و به تبع آن بحران تغییرات اقلیم در چند دهه گذشته، در بسیاری از کنوانسیون‌ها، معاهدات بین‌المللی و نشست‌های سران ملل از جمله اجلاس اخیر پاریس و لندن به‌طور مشترک در رابطه با افزایش ترسیب کربن اتمسفری و حفظ ذخایر کربن در بوم‌سازگان‌های مختلف از جمله جنگل‌ها تأکید زیادی شده است. از این رو یکی از شاخص‌های مدیریت بهینه در جنگل‌ها افزایش هرچه بیشتر جذب کربن اتمسفری و جلوگیری از هدررفت کربن در حوضچه‌های مختلف کربن است (IPCC, 2022). در این رابطه لایه‌های مختلف خاک در بوم‌سازگان‌های جنگلی نسبت به دیگر حوضچه‌های کربن از جمله انواع مختلف پوشش‌های گیاهی و لایه‌های بستر جنگل سهم بیشتری از ذخایر کربن آلی را دارند و ظرفیت زیادتری برای اندوخته مستمر کربن اتمسفری را به خود اختصاص می‌دهد (Jafari, Sarabi et al., 2021; Blaško et al., 2022; Wu et al., 2022). از طرفی ارتباط متقابل کربن آلی با ویژگی‌های دیگر خاک از جمله مقادیر عناصر غذایی و انواع زی‌توده روی زمینی مستقر بر آن هنوز مبهم و پیچیده است و هنوز اطلاعات دقیقی در این زمینه در دسترس نیست. مقادیر کربن آلی خاک در جنگل‌های طبیعی با افزایش غنای گونه‌ای درختان و دیگر شاخص‌های تنوع زیستی گیاهان به‌طور جامع ارتباط معنی‌داری ندارند و در این رابطه مقدار درصد کربن آلی خاک همبستگی معنی‌داری با حضور درختان قطور و توده‌هایی با تراکم زیادتر دارد (Caparros and Jacquemont, 2003). از این رو آن‌ها به‌جای تمرکز مدیریتی در جنگل‌های طبیعی برای افزایش مقادیر کربن آلی توصیه برای توسعه زراعت چوب داشته‌اند. در همین خصوص، Vahedi و همکاران (۲۰۱۴) نیز با پژوهش موردی در جنگل‌های هیرکانی گزارش کردند که بین تغییرات ذخایر کربن آلی خاک و غنای گونه‌ای پوشش درختان ارتباط معنی‌داری وجود نداشت. از آنجایی که به‌طور بدیهی رژیم غذایی خاک در بوم‌سازگان‌های جنگلی مبتنی بر تنوع زیستی گیاهان و یا به‌عبارت ساده‌تر وابسته به

اثرات گونه‌ای درختان است و نیز حفظ و پایداری بوم‌سازگان‌های جنگلی برآیند برهم‌کنش همه عناصر غذایی و کربن آلی بر حسب روند زیستی - فیزیکی - شیمیایی (Biogeochemical Processes) در خاک می‌باشد (Kooch et al., 2020; Wu et al., 2022; Dai et al., 2022) می‌توان گفت که توسعه ابعاد مدیریتی فقط برای افزایش و توسعه ذخایر کربن آلی در جنگل‌های طبیعی بدون در نظر گرفتن اثرات گونه‌ای توده‌های درختان و مقادیر عناصر غذایی دیگر ممکن است موجب مخاطره پایداری جنگل‌ها و سبب رخداد آشفته‌گی‌های غیرمترقبه و زیان‌بار در این جنگل‌ها شود. بنابراین دستیابی به یافته‌های متقن در خصوص برهم‌کنش و تغییرات مقادیر کربن آلی در ارتباط با تغییرات عناصر غذایی خاک در انواع توده‌های درختان بوم‌سازگان‌های جنگل می‌تواند اطلاعات مناسبی برای زمینه‌های مختلف مدیریتی در اختیار قرار دهد.

پژوهش‌های بسیاری به‌این نتیجه دست‌یافتند که کربن آلی و نیتروژن کل در لایه‌های مختلف خاک ارتباط مستقیم با یکدیگر دارند و از جمله شاخص‌های کلیدی کیفیت خاک و مقدار حاصل‌خیزی در بوم‌سازگان جنگلی محسوب می‌شوند (Ramesh et al., 2019; Wang et al., 2021; Dai et al., 2022). علاوه بر نیتروژن، فسفر و پتاسیم قابل جذب (NPK) نیز با قابلیت تحرک‌پذیری زیاد در لایه‌های خاک و جذب توسط گیاهان در قالب مهم‌ترین عناصر پرمصرف و ضروری در رژیم غذایی خاک معرفی می‌شود (Taiz and Zeiger, 2013). صرف‌نظر از همه ویژگی‌های اکوفیزیولوژی توده‌های درختان در بوم‌سازگان‌های جنگلی و نحوه جذب عناصر غذایی لایه‌های مختلف خاک توسط درختان و پوشش‌های گیاهی دیگر، تغییرات در عناصر غذایی خاک به نوع خاصی منجر به تغییرات در جریان‌ات کربن خاک می‌شود (Kumar et al., 2021). در واقع آنچه که سبب محدودیت و یا انبساط ظرفیت ذخیره کربن در لایه‌های خاک می‌شود روند تغییرات عناصر غذایی در ترکیبات آلی و معدنی خاک تحت تأثیر اثرات گونه‌ای درختان و پوشش‌های گیاهی دیگر می‌باشد

حاوی کربن آلی در لایه‌های مختلف خاک کند باشد و به تبع آن مقدار هدررفت کربن آلی نیز از خاک کمتر است که می‌تواند مقدار عناصر غذایی خاک را دچار تغییر کند. با توجه به همه این تفاسیر پژوهش پیش‌رو درصدد پاسخ به چندین پرسش اصلی است که عبارتند از الف: مقادیر کربن آلی خاک با کدام یک از مقادیر عناصر غذایی خاک، عوامل فیزیکی زمین و ویژگی‌های کمی درختان در توده‌های مورد پژوهش دارای ارتباط معنی‌داری است؟ ب: تغییرات کدام یک از عناصر مورد اشاره بین لایه‌های زیرسطحی و معدنی خاک به‌طور معنی‌داری بیشتر است؟ ج: با احتساب ویژگی‌های زیست‌فیزیکی توده‌های درختان مورد پژوهش، در کدام یک از رویشگاه‌های هیرکانی مقادیر کربن آلی در ارتباط با مقادیر عناصر غذایی دیگر در لایه‌های مختلف خاک دارای تغییرات بیشتری است؟

### مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

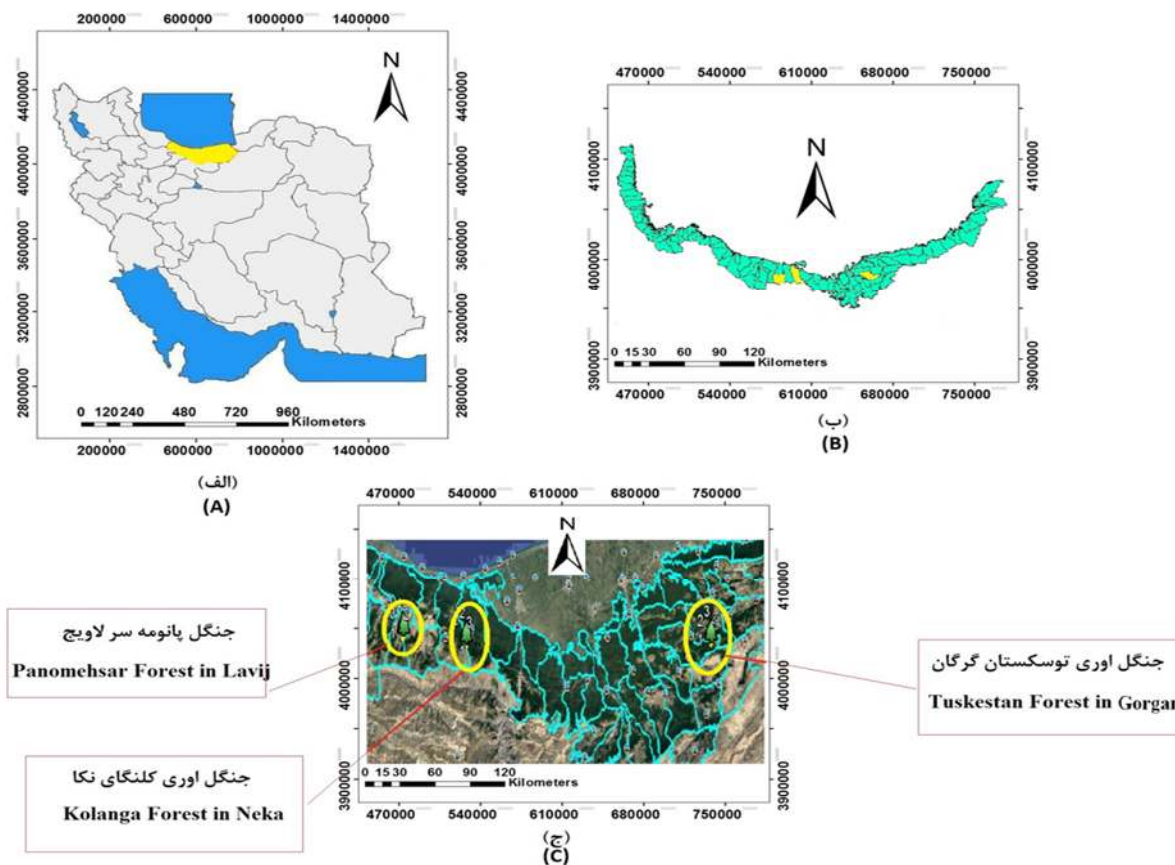
برای اجرای پژوهش پیش‌رو، سه رویشگاه از توده‌های اوری جنگل‌های هیرکانی شامل جنگل پانومه‌سر لاریج نور، جنگل کلنگای نكاء و جنگل توسکستان گرگان در ارتفاعات بیش از ۲۰۰۰ متر از سطح دریا مدنظر قرار گرفت. غربی‌ترین رویشگاه در این پژوهش جنگل پانومه‌سر لاریج بود. مطالعه در جنگل مورد اشاره در قطعه ۱۰۸ سری یک طرح جنگلداری لاریج حوزه آبخیز ۴۹ انجام شد. مساحت کل پارسل منتخب ۹۰ هکتار، جهت‌های عمومی شمالی و شمال شرقی و همچنین شیب دامنه در آن اغلب تا ۴۰ درصد و میانگین ارتفاع از سطح دریا نیز در آن نزدیک به ۲۲۰۰ متر می‌باشد. درختان گونه غالب در پارسل مذکور بیشتر راش است که گونه‌های همراه آن مرمرز (*Carpinus betulus* L.)، افراپلت (*Acer velutinum* Bioss)، افراشیردار (*Acer*)، *(Sorbus torminalis* L.)، بارانک (*cappadocicum* Gled.) و در برخی از مناطق آن درختان اوری به همراه لور دارای تراکم قابل ملاحظه‌ای است. اجرای پژوهشی در جنگل نکا

(Taiz and Zeiger, 2013). ناگفته نماند که در این زمینه واحدهای فیزیوگرافی زمین و ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک از قبیل جرم مخصوص، بافت، مقدار رطوبت و واکنش خاک به نوعی در روند تغییرات عناصر غذایی و مقادیر کربن آلی خاک تأثیرگذار هستند (Jia et al., 2020; Dai et al., 2022). در این رابطه عوامل مختلف از جمله ویژگی‌های فیزیوگرافی، ماهیت خاک و تغییرات عناصر غذایی در آن به-انضمام اثرات گونه‌ای در ترکیب مختلف توده‌های درختان که بر روی مقادیر کربن آلی خاک دارای تأثیرات بارزی هستند باید به‌طور هم‌زمان بررسی شده و اثرات متقابل آن‌ها در مدل‌های آماری - ریاضی ارزیابی شود (Dai et al., 2022). بنابراین مبتنی بر این موضوع که تغییرات رژیم غذایی خاک به‌طور مستقیم برآیندی از برهم‌کنش همه عوامل مختلف محیطی و زیستی توده‌های جنگل است، از این‌رو با احتساب همبستگی تغییرات کربن آلی خاک با عناصر غذایی دیگر و ارزیابی تغییرات آن با اختلاف مقادیر NPK در توده‌های مختلف جنگل می‌توان اثر عوامل دیگر را نیز در روند تغییرات درصد کربن آلی خاک به‌شکل ضمنی مدنظر قرار داد (Taiz and Zeiger, 2013).

پژوهش پیش‌رو در چندین رویشگاه طبیعی اوری واقع در ارتفاعات بالابند جنگل‌های شمال کشور انجام شد. جنگل‌های مذکور نقش حیاتی، حمایتی و زیست‌محیطی در حفاظت خاک و منابع آب دارند و به نوعی پایداری این جنگل‌ها ضامن زنده‌مانی و بقای جنگل‌های پایین‌دست شمال کشور محسوب می‌شود (Mahdiani et al., 2012). مبتنی بر این تفاسیر و با توجه به شرایط سخت آب و هوایی و برودت هوا و به تبع آن کوتاه بودن دوره رویش نسبت به دیگر جوامع جنگلی هیرکانی در ارتفاعات پایین‌تر و همچنین حساسیت خاک این جنگل‌ها در مقابل فرسایش و آبشویی فراوان، روند بررسی مقادیر کربن آلی هم‌زمان با تغییرات عناصر غذایی خاک در توده‌های طبیعی گونه مذکور در رویشگاه‌های مختلف هیرکانی می‌تواند الگوی مناسبی برای مدیریت بهینه و حفاظت جنگل‌های مذکور محسوب شود. با توجه به ویژگی‌های مورد اشاره انتظار می‌رود که روند تجزیه ترکیب‌های

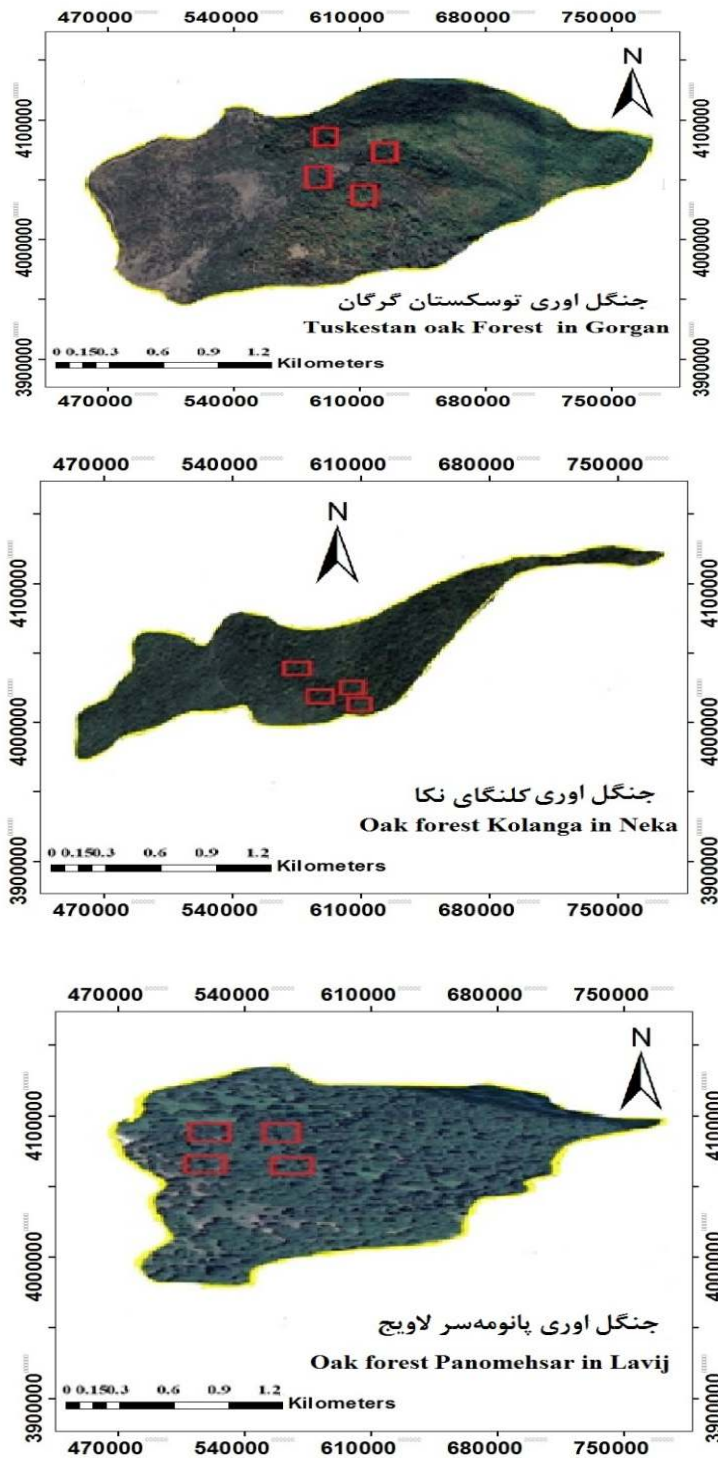
هکتار و پارسل حفاظتی آن ۲۸۳۰ هکتار می‌باشد. ترکیب گونه‌ای توده‌های درختان اغلب شامل گونه اوری همراه با درختان گونه لور است و میانگین ارتفاع از سطح دریا در آن ۲۳۰۰ متر می‌باشد. پارسل مذکور شیب‌های مختلف دارد که حداکثر سهم شیب‌های دامنه مربوط به شیب‌های تا ۴۰ درصد و همچنین جهت‌های دامنه نیز در آن اغلب شمال‌غربی می‌باشد. شکل ۱ و ۲ موقعیت رویشگاه‌ها و توده‌های اوری مورد پژوهش را نشان می‌دهد.

در پارسل ۲۸ سری ۲ بخش ۲ هفت‌خال انجام شده است. ترکیب گونه‌ای در پارسل مورد نظر اغلب شامل درختان گونه اوری بیشتر به همراه لور و با پراکنش راش، افراپلت، گیلان و وحشی (*Prunus avium L.*) و گونه‌های درختان دیگر می‌باشد. شیب‌های دامنه بیشتر در بسیاری از مناطق تا ۴۰ درصد، جهت‌های دامنه در پارسل مذکور بیشتر شرقی و جنوبی و میانگین ارتفاع از سطح دریا نیز در آن نزدیک به ۲۱۰۰ متر است. اجرای پژوهش در جنگل توسکستان در پارسل حفاظتی سری نومل انجام شده است. کل سری ۹۰۴۳



شکل ۱- موقعیت مناطق مورد پژوهش: الف) روی نقشه ایران، ب) استان‌ها و ج) حوزه‌های مورد مطالعه

Figure 1. Location of study sites: A) on Iran's map, B) Provinces, C) study Basins



شکل ۲- موقعیت توده‌های اوری در سه منطقه الف) توسکستان گرگان، ب) کلنگای نکا و ج) پانومهسر لاریج  
 Figure 2. Location of Caucasian oak stands in the three sites of A) Tuskestan in Gorgan, B) Kolanga in Neka, and C) Panomehsar in Lavij

## جمع‌آوری داده‌ها

به‌منظور اجرای پژوهش پیش‌رو بر مبنای طرح کامل تصادفی به تعداد ۴ قطعه نمونه با سطح ۴۰۰ مترمربع (۲۰×۲۰ مترمربع) در هر یک از توده‌های اوری جنگل‌های توسکستان، کلنگای نکاء و پانومه‌سر لایوچ جانمایی شد. در هر یک از قطعات نمونه، قطربرابرسینه، ارتفاع کل، قطر بزرگ و قطر کوچک تاج درختان به ترتیب اندازه‌گیری شد. سپس ویژگی‌های فیزیوگرافی زمین اعم از شیب، جهت‌های و ارتفاع از سطح دریا نیز در مرکز هر قطعه نمونه ثبت شد. پس از کنار زدن تجمعات لاشیرگی بستر خاک نمونه‌های خاک در عمق ۰-۱۵ و ۳۰-۱۵ در مرکز و چهار گوشه هر قطعه نمونه جداگانه به شکل ترکیبی برداشت شدند. در واقع برای به حداقل رساندن خطا، نمونه‌های جمع‌آوری شده مربوط به هر عمق از قسمت‌های مذکور در هر قطعه نمونه با یکدیگر مخلوط شده و به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌های خاک قبل از انتقال به داخل محیط آزمایشگاه در هوای آزاد کاملاً خشک و پس از خاک‌کوبی از الک‌های ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. سپس همه ناخالصی‌های خاک اعم از سنگ‌ریزه‌ها، خرده‌چوبها و ریشه‌های بزرگتر از ۲ میلی‌متر جدا شده و همه مواد از جمله ریشه‌ها و همه مواد ریز به‌جز سنگ‌ریزه‌ها کمتر از ۲ میلی‌متر جزء پردازش آزمایشگاهی خاک قرار گرفتند.

## تحلیل داده‌ها

تراکم هر یک از گونه‌های درختان در هر یک از توده‌های مورد پژوهش بر مبنای درصد فراوانی نسبی (Relative abundance) محاسبه شد. برای مقایسه کربن آلی و عناصر غذایی خاک (NPK) بین دو عمق نمونه‌برداری شده از آزمون t جفتی استفاده شد. به‌منظور تبیین معنی‌داری ارتباط بین کربن آلی خاک با مقادیر NPK در هر دو عمق خاک و ویژگی‌های کمی دیگر اندازه‌گیری و ثبت شده از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شد. سپس برای بررسی همبستگی کربن آلی

و عناصر غذایی در لایه‌های مختلف خاک با جهت‌های دامنه از آزمون فی و ضریب اتا استفاده شد. همچنین برای بررسی اختلاف معنی‌داری همه متغیرهای کربن آلی و مقادیر NPK به‌طور هم‌زمان در تیپ‌های مختلف توده‌های اوری رویشگاه‌های مورد پژوهش از آزمون تحلیل واریانس چندمتغیره یک‌طرفه (One-way MANOVA) استفاده شد. به‌منظور بررسی و مقایسه چندگانه میانگین، آزمون توکی مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به کاربرد تحلیل‌های مورد اشاره مبتنی بر حجم کلی نمونه‌ها برای حذف اثرات خطای نوع اول (I) و خطای نوع دوم (II) از آزمون مقاوم‌سازی (Bootstrap) با تکرار متفاوت استفاده شد.

در رابطه با تحلیل‌های آزمایشگاهی مقادیر کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل جذب در لایه‌های مختلف خاک به ترتیب با استفاده از روش‌های والکلی بلاک، کج‌دال، اولسن و عصاره‌گیری با استات آمونیوم نرمال و قرائت با فلیم فتومتر اندازه‌گیری شدند.

## نتایج

## ویژگی توده‌های مورد بررسی

همه ویژگی‌های کمی درختان توده‌های اوری در هر یک از رویشگاه‌های مورد پژوهش در جدول ۱ نشان داده شده است. همه ویژگی‌های اندازه‌گیری درختان توده‌های مذکور در رویشگاه‌های مختلف متفاوت بود در این رابطه تراکم درختان توده‌های اوری در رویشگاه‌های توسکستان و کلنگا به ترتیب با مقادیر میانگین ۲۰۸ و ۱۹۸ اصله در هکتار نزدیک به نزدیک به هم بودند، اما تراکم درختان در توده‌های اوری پانومه‌سر لایوچ با میانگین ۱۵۰ اصله در هکتار نسبت به رویشگاه‌های مذکور کمتر بود. جالب توجه است که ویژگی‌های کمی دیگر درختان از جمله میانگین قطر برابر سینه با مقدار عددی ۶۸/۲۷ سانتی‌متر و ارتفاع کل درختان با مقدار عددی ۲۳/۵ متر در توده اوری پانومه‌سر به مراتب مقادیر بیشتری را نشان داده است.

جدول ۱- میانگین  $\pm$  اشتباه معیار ویژگی‌های کمی و توصیفی توده‌های اوری - لور در رویشگاه‌های مختلف جنگل‌های مورد پژوهش

**Table 1. Mean  $\pm$  standard error of quantitative and descriptive characteristics of Caucasian oak -Oriental hornbeam stands in different habitats of the study forests**

	قطر برابر سینه (سانتی‌متر) Diameter at breast height (cm)	ارتفاع کل (متر) Total height (m)	قطر بزرگ تاج (متر) Large canopy diameter (m)	قطر کوچک تاج (متر) Small canopy diameter (m)	تراکم (تعداد در هکتار) Density (Number per hectare)	ارتفاع از سطح دریا (متر) Altitude (m.a.s.l.)	شیب (درصد) Slope (%)	جهت جغرافیایی Slope aspect
توسکستان Tuskestan	5.93 $\pm$ 23.14	0.73 $\pm$ 8.62	0.56 $\pm$ 2.82	0.6 $\pm$ 2.38	82.3 $\pm$ 208.04	8.3 $\pm$ 2297.63	9.33 $\pm$ 32.42	شمال غربی NW
لاویج Lavij	4.3 $\pm$ 68.27	1.85 $\pm$ 23.54	0.73 $\pm$ 8.81	0.66 $\pm$ 6.1	38.2 $\pm$ 150.04	8.7 $\pm$ 2132.41	3.23 $\pm$ 35.22	شمال شرقی NE
نکاء Neka	5.61 $\pm$ 37.17	1.32 $\pm$ 14.62	0.64 $\pm$ 6.85	0.5 $\pm$ 5.02	32.6 $\pm$ 198.02	6.4 $\pm$ 2221.43	6.33 $\pm$ 23.12	شرقی E

نیز وجود دارد.

بر مبنای نتایج به‌دست آمده ترکیب گونه‌ای درختان توده‌های اوری در هر یک از جنگل‌های مورد پژوهش تغییرات مختلفی داشت (جدول ۲). نتایج نشان داد که در رویشگاه توسکستان درختان گونه اوری با بیش از ۹۰ درصد تراکم به‌عنوان توده خالص اوری محسوب می‌شود. با استناد به مشاهدات، ترکیب گونه‌ای توده‌های اوری در لاویج و نکاء به‌شکل آمیخته بودند که درصد آمیختگی هر یک از گونه‌های درختان در جدول ۲ آمده است.

نتایج نشان داد که میانگین ارتفاع از سطح دریا در هر یک از توده‌ها متفاوت بود که از این نظر میانگین ارتفاع از سطح دریا در توده اوری توسکستان با ارتفاع نزدیک به ۲۳۰۰ متر از سطح دریا دامنه عددی بیشتری را نشان داد (جدل ۱). با توجه به نتایج حاصله جهت‌های عمومی توده‌های اوری مورد پژوهش در رویشگاه‌های توسکستان، پانومه‌سر لاویج و کلنگا اغلب به‌ترتیب شمال‌غربی، شمال شرقی و شرقی بود. علاوه بر این موضوع، مشاهدات نشان دادند که در پاره‌ای از موارد جهت‌های شمالی و جنوبی نیز به‌ترتیب در توده‌های اوری رویشگاه‌های پانومه‌سر و کلنگا

جدول ۲- درصد ترکیب گونه‌ای توده‌های اوری جنگل‌های مورد پژوهش

**Table 2. The percentage of species composition of trees of Caucasian oak -Oriental hornbeam stands of the study forests**

	اوری <i>Caucasian oak</i>	لور <i>Oriental hornbeam</i>	راش <i>Fagus orientalis</i>	گیلاس وحشی <i>Prunus avium L.</i>	بارانک <i>Sorbus torminalis L.</i>
توسکستان Tuskestan	94	6	-	-	-
لاویج Lavij	63	20	9	-	8
نکاء Neka	29	41	26	4	-

جدول ۳- نتایج آزمون همبستگی بین مقادیر عناصر غذایی، عوامل فیزیوگرافی و ویژگی‌های کمی توده‌های مورد پژوهش در هر یک از لایه‌های مختلف خاک

**Table 3. The results of the correlation test between the amounts of nutrients, physiographic factors, and quantitative characteristics of the study stands in each different soil layers**

	عمق زیرسطحی خاک				عمق معدنی خاک			
	Subsurface depth of soil				Mineral depth of the soil			
	کربن آلی Organic carbon	نیتروژن Nitrogen	فسفر Phosphor	پتاسیم Pottasium	کربن آلی Organic carbon	نیتروژن Nitrogen	فسفر Phosphor	پتاسیم Pottasium
کربن آلی Organic carbon	-	0.254 <sup>ns</sup>	0.523 <sup>ns</sup>	0.268 <sup>ns</sup>	-	-0.594 <sup>ns</sup>	-0.02 <sup>ns</sup>	0.316 <sup>ns</sup>
نیتروژن Nitrogen	0.254 <sup>ns</sup>	-	0.092 <sup>ns</sup>	0.096 <sup>ns</sup>	0.594 <sup>ns</sup>	-	-0.25 <sup>ns</sup>	0.149 <sup>ns</sup>
فسفر Phosphorus	0.523 <sup>ns</sup>	0.092 <sup>ns</sup>	-	0.541 <sup>ns</sup>	-0.02 <sup>ns</sup>	-0.25 <sup>ns</sup>	-	-0.32 <sup>ns</sup>
پتاسیم Potassium	0.268 <sup>ns</sup>	0.096 <sup>ns</sup>	0.541 <sup>ns</sup>	-	0.316 <sup>ns</sup>	0.149 <sup>ns</sup>	-0.32 <sup>ns</sup>	-
قطر برابر سینه Diameter at breast height	-0.09 <sup>ns</sup>	0.16 <sup>ns</sup>	-0.43 <sup>ns</sup>	-0.19 <sup>ns</sup>	0.093 <sup>ns</sup>	-0.19 <sup>ns</sup>	0.66 <sup>*</sup>	0.32 <sup>ns</sup>
ارتفاع کل Total height	-0.19 <sup>ns</sup>	0.19 <sup>ns</sup>	-0.64 <sup>*</sup>	-0.76 <sup>*</sup>	-0.17 <sup>ns</sup>	-0.31 <sup>ns</sup>	0.87 <sup>**</sup>	-0.62 <sup>ns</sup>
قطر متوسط Average canopy diameter	-0.49 <sup>ns</sup>	0.47 <sup>ns</sup>	-0.69 <sup>ns</sup>	-0.47 <sup>ns</sup>	-0.62 <sup>ns</sup>	-0.49 <sup>ns</sup>	0.73 <sup>*</sup>	-0.63 <sup>*</sup>
تراکم Density	0.34 <sup>ns</sup>	-0.21 <sup>ns</sup>	0.61 <sup>ns</sup>	-0.23 <sup>ns</sup>	0.21 <sup>ns</sup>	0.28 <sup>ns</sup>	-0.33 <sup>ns</sup>	-0.31 <sup>ns</sup>
شیب Slope	-0.04 <sup>ns</sup>	0.17 <sup>ns</sup>	-0.31 <sup>ns</sup>	-0.29 <sup>ns</sup>	-0.56 <sup>ns</sup>	-0.53 <sup>ns</sup>	0.02 <sup>ns</sup>	-0.56 <sup>ns</sup>
ارتفاع از سطح دریا Altitude	0.16 <sup>ns</sup>	0.41 <sup>ns</sup>	0.72 <sup>*</sup>	0.45 <sup>ns</sup>	0.17 <sup>ns</sup>	0.39 <sup>ns</sup>	-0.46 <sup>ns</sup>	-0.23 <sup>ns</sup>
ضریب اتا Eta coefficient	جهت‌های دامنه Slope aspect		-		-0.36 <sup>ns</sup>	0.43 <sup>ns</sup>	0.82 <sup>ns</sup>	-0.77 <sup>ns</sup>

ns: غیر معنی‌دار، \* و \*\*: به ترتیب معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ و ۹۵ درصد  
ns: non-significant, \*\*: Significant at p<0.01; \*: Significant at p<0.05



مذکور در لایه زیرسطحی و معدنی خاک ارتباط معنی‌داری وجود نداشته است. همچنین، نتایج آزمون همبستگی اتا نیز نشان داد که جهت‌های دامنه در هیچ‌یک از موارد با مقادیر کربن آلی و عناصر غذایی خاک دارای ارتباط معنی‌داری نبود. جدول ۴ نتایج همبستگی بین هر یک از عناصر مورد نظر را بین لایه‌های مختلف خاک نشان می‌دهد. بر اساس بین مقادیر کربن آلی عمق زیرسطحی خاک و مقادیر کربن آلی عمق معدنی خاک ارتباط معنی‌داری وجود نداشت. همچنین، بین تغییرات نیتروژن کل لایه زیرسطحی و معدنی خاک نیز ارتباط معنی‌داری وجود نداشت. در بین همه موارد بررسی‌ها شده، تنها بین مقادیر فسفر قابل جذب و نیز بین مقادیر پتاسیم قابل جذب در بین لایه‌های مختلف خاک همبستگی معنی‌داری وجود داشت.

همبستگی متقابل کربن آلی و عناصر غذایی لایه‌های مختلف خاک با ویژگی‌های توده‌های اوری مطابق با جدول ۳، نتایج آزمون همبستگی پیرسون بر مبنای آزمون مقاوم‌سازی نشان داد که مقادیر کربن آلی در عمق زیرسطحی و لایه معدنی خاک با مقادیر نیتروژن کل و پتاسیم قابل جذب دارای ارتباط معنی‌دار نبود. از سوی دیگر، نتایج آزمون همبستگی پیرسون با احتساب آزمون مقاوم‌سازی نشان داد که مقادیر کربن آلی و نیتروژن کل در لایه‌های مختلف خاک با همه ویژگی‌های کمی درختان و ویژگی‌های فیزیوگرافی توده‌های مورد پژوهش ارتباط معنی‌داری نداشتند (جدول ۳). نتایج نشان داد که مقادیر فسفر و پتاسیم قابل جذب در لایه‌های مختلف خاک اغلب با برخی از ویژگی‌های زیستی و فیزیکی توده‌های مورد پژوهش ارتباط معنی‌دار داشته است. در این رابطه بین همه عناصر

جدول ۴- نتایج آزمون همبستگی کربن آلی و مقادیر عناصر غذایی بین لایه‌های مختلف خاک توده‌های مورد پژوهش

Table 4. The results of the correlation test of organic carbon and amounts of nutrients between different soil layers of the study stands

	عمق معدنی خاک			
	Mineral depth of the soil			
	کربن آلی Organic carbon	نیتروژن Nitrogen	فسفر Phosphor	پتاسیم Pottasium
کربن آلی Organic carbon	0.41 <sup>ns</sup>	-0.12 <sup>ns</sup>	-0.11 <sup>ns</sup>	0.31 <sup>ns</sup>
عمق زیرسطحی خاک Subsurface depth of soil				
نیتروژن Nitrogen	-0.24 <sup>ns</sup>	-0.16 <sup>ns</sup>	0.23 <sup>ns</sup>	-0.13 <sup>ns</sup>
فسفر Phosphor	-0.44 <sup>ns</sup>	0.58 <sup>ns</sup>	0.63 <sup>*</sup>	0.29 <sup>ns</sup>
پتاسیم Pottasium	0.40 <sup>ns</sup>	0.31 <sup>ns</sup>	-0.61 <sup>ns</sup>	0.75 <sup>*</sup>

ns: غیر معنی‌دار، \* و \*\*: به ترتیب معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ و ۹۵ درصد

ns: non-significant, \*\*: Significant at  $p < 0.01$ ; \*: Significant at  $p < 0.05$

نتایج آزمون t جفتی و احتساب آزمون مقاوم‌سازی برای حذف خطاهای نوع اول و دوم، فقط نیتروژن کل در بین لایه‌های مختلف خاک در توده‌های اوری رویشگاه مورد

تغییرات کربن آلی و عناصر غذایی لایه‌های مختلف خاک در توده‌های اوری مورد مطالعه بر حسب اطلاعات قابل مشاهده در جدول ۵، با توجه به

پژوهش دارای اختلاف معنی‌داری بود، اما تغییرات مقادیر کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل جذب در بین لایه‌های مختلف خاک اختلاف معنی‌داری نداشتند. با توجه به اختلاف میانگین مقادیر نیتروژن نتایج نشان داد که مقدار نیتروژن در لایه زیرسطحی خاک به شکل معنی‌داری بیشتر از مقدار مذکور در لایه معدنی خاک بود.

جدول ۵- نتایج آزمون t جفتی عناصر غذایی بین عمق زیرسطحی و عمق معدنی خاک توده‌های مورد پژوهش

**Table 5. The results of the paired t-test of nutritional elements between the subsurface depth and the mineral soil depth of the study stands**

	اختلاف میانگین $\pm$ اشتباه معیار Mean difference $\pm$ standard error	اریبی Bias	حدود اطمینان (سطح ۹۵٪) Confidence limits (level 95%)	t
کربن آلی Organic carbon	0.15 $\pm$ 0.39	0.0002	0.07-0.72	2.41 <sup>ns</sup>
نیتروژن Nitrogen	0.01 $\pm$ 0.03	0.0003	0.008-0.05	2.59 <sup>*</sup>
فسفر Phosphorus	2.7 $\pm$ 5.32	-0.025	0.92-10.68	1.85 <sup>ns</sup>
پتاسیم Potassium	38.67 $\pm$ 102.3	-0.41	43.01-163.58	2.46 <sup>ns</sup>

ns: غیر معنی‌دار، \* و \*\*: به ترتیب معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ و ۹۵ درصد  
ns: non-significant, \*\*: Significant at p<0.01; \*: Significant at p<0.05

جدول ۶- نتایج تحلیل واریانس چندمتغیره یک طرفه در ارتباط با تغییرات عناصر غذایی خاک در توده‌های مورد پژوهش

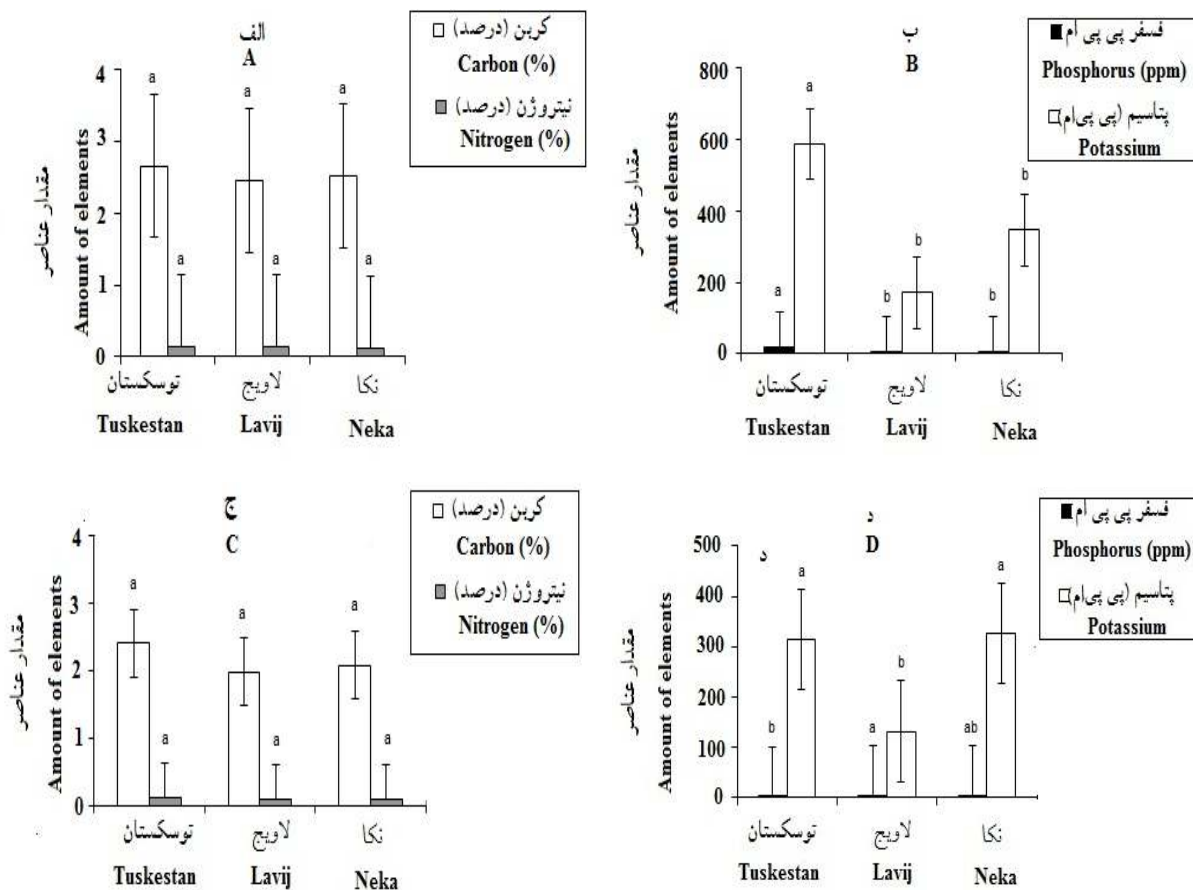
**Table 6. The results of one-way multivariate analysis of variance in relation to the changes of soil nutrients within the study stands**

	عمق زیرسطحی خاک Subsurface depth of soil			عمق معدنی خاک Mineral depth of soil		
	مجموع مربعات خطای نوع III Sum of square error (III)	میانگین مربعات Mean square	F	مجموع مربعات خطای نوع III Sum of square error (III)	میانگین مربعات Mean square	F
	کربن آلی Organic carbon	0.066	0.033	0.41 <sup>ns</sup>	0.31	0.155
نیتروژن Nitrogen	0.001	0.00	0.89 <sup>ns</sup>	0.018	0.001	1.03 <sup>ns</sup>
فسفر Phosphorus	417.26	208.63	7.21 <sup>*</sup>	6.41	3.21	5.51 <sup>*</sup>
پتاسیم Potassium	262093.06	131046.53	15.34 <sup>**</sup>	76950.81	38475.41	18.67 <sup>**</sup>

ns: غیر معنی‌دار، \* و \*\*: به ترتیب معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ و ۹۵ درصد  
ns: non-significant, \*\*: Significant at p<0.01; \*: Significant at p<0.05

معنی داری نداشتند. اما نتایج به دست آمده نشان داد که فسفر و پتاسیم قابل جذب در لایه زیرسطحی و نیز در لایه معدنی خاک در بین رویشگاه‌های مختلف به ترتیب در سطح اطمینان ۹۵ درصد و در سطح اطمینان یک درصد اختلاف معنی داری داشتند (جدول ۶).

نتایج تحلیل واریانس MANOVA یک طرفه در رابطه با تغییرات هم‌زمان مقادیر کربن آلی با عناصر غذایی NPK در لایه‌های مختلف خاک توده‌های اوری مورد پژوهش در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که کربن آلی و نیتروژن کل چه در عمق زیرسطحی خاک و چه در عمق معدنی خاک در بین رویشگاه‌های مورد پژوهش اختلاف



شکل ۳- نتایج آزمون توکی برای مقایسه چندگانه میانگین عناصر خاک در توده‌های مورد پژوهش (حروف لاتین: معنی داری مقادیر میانگین بین توده‌های درختان در رویشگاه‌های مختلف؛ الف و ب: نتایج مربوط به عمق زیرسطحی خاک؛ ج و د: نتایج مربوط به خاک معدنی)

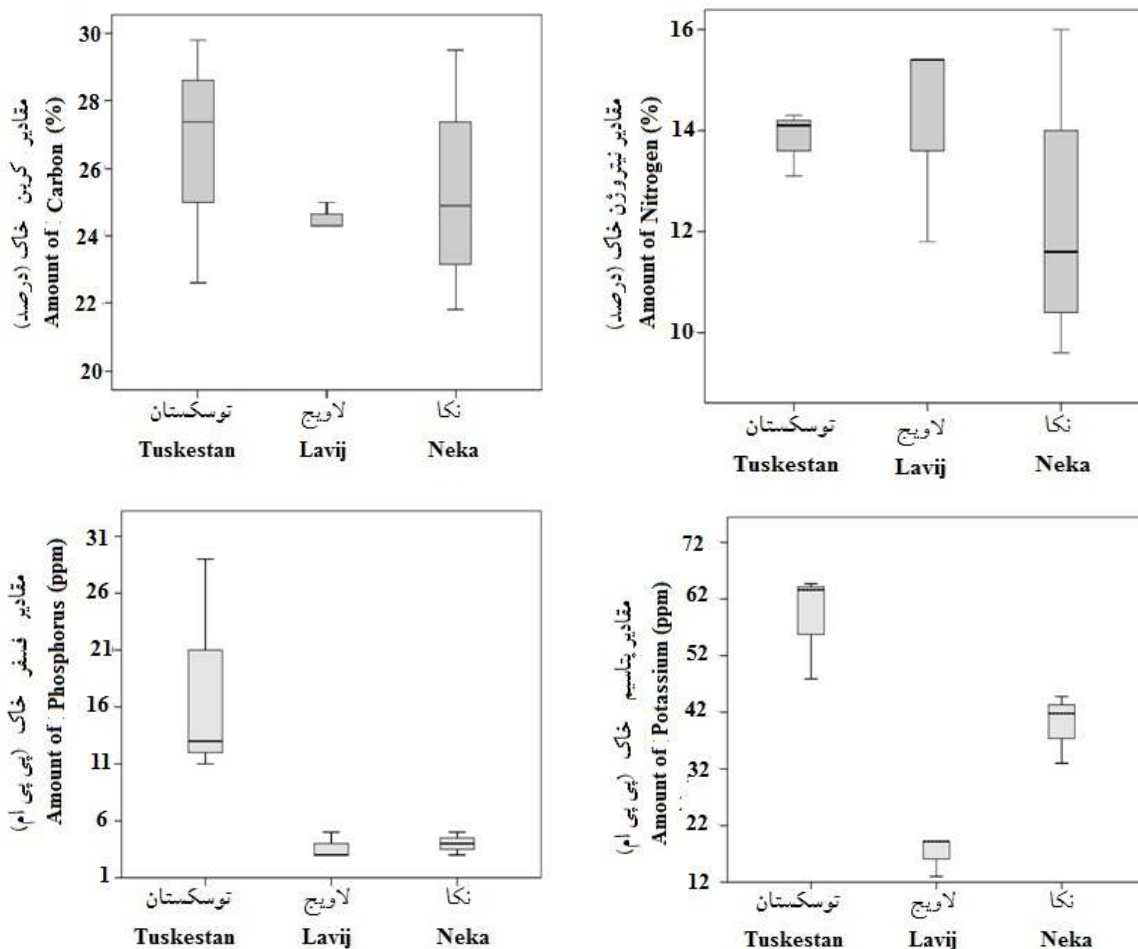
Figure 3. The results of Tukey test for the multiple comparison of average soil elements in the study stands (Latin letters: the significance of the average values between the stands of trees in different habitats; A and B: the results related to the soil subsurface depth; C and D: the related results to mineral soil)

میانگین ۱۷/۶۶ و ۵۸۷/۳۳ پی‌ام نسبت به توده‌های اوری کلنگا و پانومه سر به‌طور معنی داری بیشتر بودند و مقادیر عناصر مذکور

نتایج آزمون توکی نشان داد که مقادیر فسفر و پتاسیم قابل جذب در لایه زیرسطحی خاک رویشگاه توسکستان به ترتیب با

شکل ۴ نمودار جعبه‌ای داده‌های مربوط به کربن آلی خاک و نیز عناصر غذایی دیگر را در عمق تحتانی خاک بین تیپ‌های مختلف توده‌های اوری در جنگل‌های مورد پژوهش نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که درصد کربن آلی و نیتروژن کل خاک به ترتیب در توده اوری رویشگاه پانومه‌سر لاریج و رویشگاه توسکستان بیشتر بود. همچنین، مقادیر پتاسیم قابل جذب عمق معدنی خاک در توده اوری رویشگاه نکا و توسکستان و نسبت به توده اوری توسکستان و کنگای نکا به ترتیب با میانگین‌های ۳۱۴/۳۳ و ۳۲۶/۷۵ پی‌پی‌ام اختلاف معنی‌داری نداشتند، اما مقادیر پتاسیم قابل جذب توده اوری پانومه‌سر لاریج با میانگین ۱۳۱/۳۳ پی‌پی‌ام نسبت به موارد دیگر به‌طور معنی‌داری کمتر بود (شکل ۳).

در لایه زیرسطحی خاک توده‌های اوری کنگا و پانومه‌سر تفاوت معنی‌داری نداشتند (شکل ۳). بر اساس شکل ۳، مقادیر میانگین فسفر قابل جذب لایه معدنی خاک در توده اوری پانومه‌سر با مقدار عددی میانگین ۳/۳۳ پی‌پی‌ام به مراتب مشابه عمق معدنی خاک کنگا بود، اما نسبت به مقدار فسفر عمق معدنی خاک در توده اوری توسکستان بیشتر بود. همچنین، مقادیر پتاسیم قابل جذب عمق معدنی خاک در توده اوری توسکستان و کنگای نکا به ترتیب با میانگین‌های ۳۱۴/۳۳ و ۳۲۶/۷۵ پی‌پی‌ام اختلاف معنی‌داری نداشتند، اما مقادیر پتاسیم قابل جذب توده اوری پانومه‌سر لاریج با میانگین ۱۳۱/۳۳ پی‌پی‌ام نسبت به موارد دیگر به‌طور معنی‌داری کمتر بود (شکل ۳).

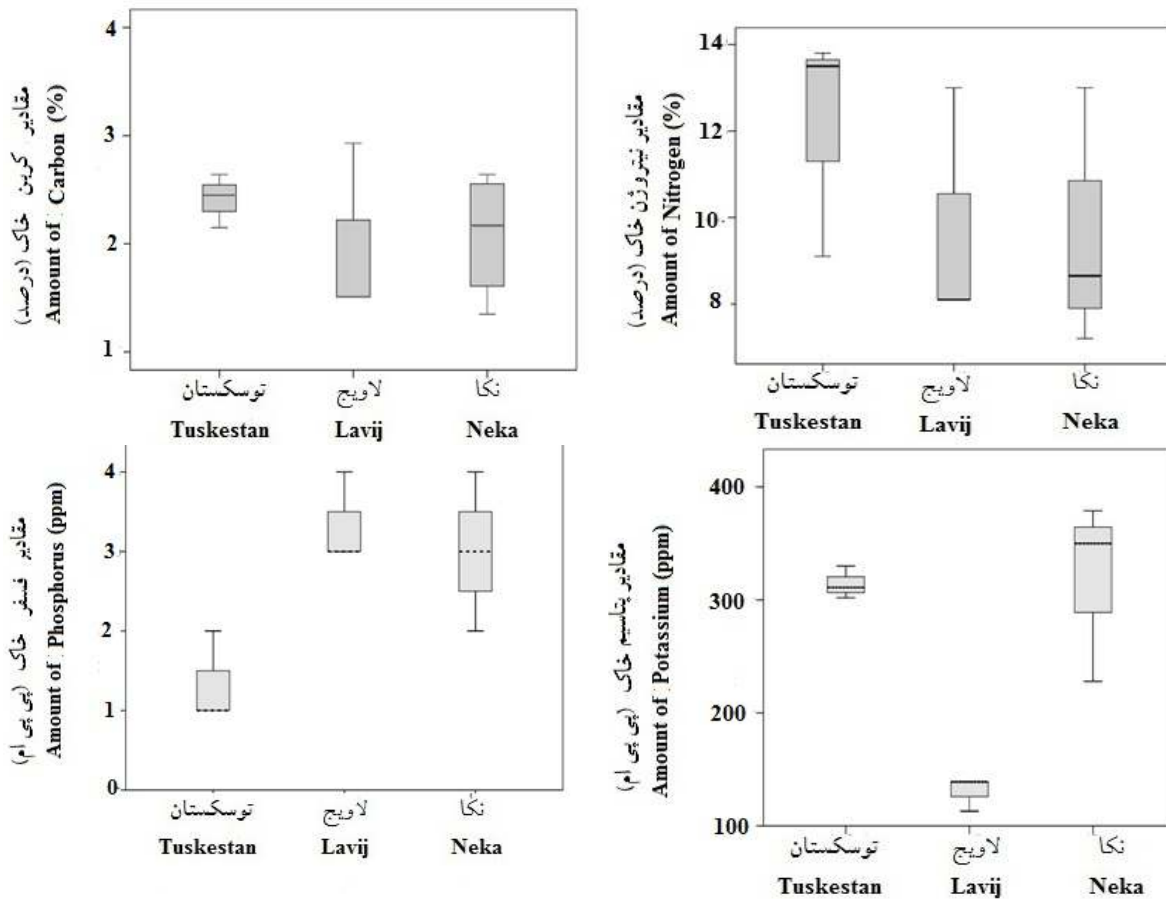


شکل ۴- تغییرات فاکتور کربن به‌همراه عناصر غذایی عمق زیر سطحی خاک (۰-۱۵ سانتی‌متر) در توده‌های جنگل‌های مورد پژوهش

Figure 4. Changes in the carbon factor along with nutrients in the soil subsurface depth (0-15 cm) within the study forest stands

رویشگاه کلنگا در نسبت به رویشگاه‌های بیشتر بود و از این نظر مقدار پتاسیم لایه مورد اشاره خاک در توده اوری کلنگا در چارک اول سهم بیشتری را به خود اختصاص دادند (شکل ۳). نتایج بیانگر عدم حضور و پراکنش داده‌های پرت و غیرمتعلق به توزیع داده‌ها در این نمودار بود.

نتایج نشان داد که تغییرات کربن آلی در عمق معدنی خاک در رویشگاه توسکستان نسبت به رویشگاه‌های دیگر نوسانات کمتر و نزدیک به همگن داشت (شکل ۳). همچنین، نتایج نشان داد که نیتروژن کل نوسان مشابهی داشتند. با توجه به نتایج، دامنه تغییرات فسفر و پتاسیم در عمق معدنی توده اوری



شکل ۳- تغییرات فاکتور کربن به همراه عناصر غذایی عمق معدنی خاک (۱۵-۳۰ سانتی‌متر) در توده‌های جنگل‌های مورد پژوهش

Figure 3. Changes in the carbon factor along with nutrient elements of the mineral soil depth (15-30 cm) within the study forest stands

داد که تغییرات مقادیر کربن آلی در لایه‌های فوقانی و تحتانی معدنی خاک مستقل از اثرات گونه‌ای درختان بود. از طرفی نتایج نشان داد که در رویشگاه‌های مختلف مورد پژوهش، مقادیر کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل جذب بین لایه‌های مختلف خاک تغییرات معنی‌داری نداشتند و در این بین فقط

## بحث

نتایج نشان داد که تغییرات مقادیر کربن آلی و نیتروژن کل در لایه‌های مختلف خاک بین رویشگاه‌های مختلف مورد پژوهش تغییرات معنی‌داری نداشتند. با توجه به ترکیب گونه‌ای مختلف در توده‌های اوری رویشگاه‌های مختلف نتایج نشان

فعالیت میکروبی و تنفس خاک و در نهایت موجب انتشار هر چه بیشتر کربن از خاک می‌شود. اگر چه مبتنی بر برخی دیگر از مستندات افزایش هم‌زمان نیتروژن و فسفر در خاک سبب محدودیت فعالیت ریزموجودات و کاهش انتشار کربن از خاک خواهد شد (Chen *et al.*, 2016; Nottingham *et al.*, 2018)، اما آنچه که در این پژوهش مشهود است ازدیاد مقدار نیتروژن در لایه زیرسطحی خاک صرفنظر از عدم تغییرات معنی‌دار مقادیر فسفر بین لایه‌های مختلف خاک می‌تواند کلید اصلی پاسخ به پرسش مذکور باشد.

بر مبنای برون‌داد حاصل از پژوهش پیش‌رو، جالب توجه بود که بین مقادیر NPK و کربن آلی به‌شکل متقابل و با یکدیگر در داخل هر یک از لایه‌های مورد مطالعه خاک ارتباط معنی‌داری مشاهده نشد. از آنجایی‌که در بسیاری از مستندات علمی عنوان شده است که بین کربن آلی و نیتروژن کل در لایه‌های مختلف خاک ارتباط معنی‌داری وجود دارد (Ramesh *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2021; Dai *et al.*, 2022)، با استناد به یافته‌های پژوهش پیش‌رو در توده‌های اوری مورد پژوهش در رویشگاه‌های مختلف هیرکانی نه تنها بین مقادیر نیتروژن و کربن آلی در داخل هر یک از لایه‌های زیرسطحی و معدنی خاک ارتباط معنی‌داری مشاهده نشد بلکه در بین لایه‌های مذکور خاک نیز تغییرات نیتروژن و کربن آلی مستقل از یکدیگر بودند. در این راستا نتایج نشان داد که انباشت هر چه بیشتر پتاسیم در لایه فوقانی خاک با ازدیاد آن در اعماق معدنی خاک همبستگی معنی‌داری داشتند اما در رابطه با مقادیر فسفر نتایج تحلیلی نشان داد که مقادیر فسفر قابل جذب هر چقدر دارای انباشتگی بیشتری در لایه زیرسطحی خاک باشند به‌همان ترتیب مقادیر کمتری را در لایه معدنی خاک خواهند داشت. همچنین، باتوجه‌به ویژگی‌های تبیین شده توده‌های اوری در نتایج پژوهش پیش‌رو، تغییرات مقادیر کربن آلی لایه‌های زیرسطحی و معدنی خاک توده‌های اوری در رویشگاه‌های مختلف با هیچ یک از مؤلفه‌های زیستی- فیزیکی توده‌های مذکور ارتباط معنی‌داری نداشته است. در واقع تغییرات مقادیر کربن آلی خاک‌های توده‌های مورد اشاره مبتنی بر عدم همبستگی

نیتروژن کل بین لایه‌های مختلف خاک به‌طور معنی‌داری متغیر بود. Pastore و همکاران (۲۰۱۹) در رابطه با تغییرات و الگوی مکانی مقادیر کربن آلی خاک نشان دادند که تغییرات کربن آلی خاک تحت تأثیر بافت خاک، تراکم ریشه درختان، محتوای مواد آلی خاک، پدیده آبشویی و ماهیت جابه‌جایی کربن بین ترکیبات آلی و معدنی خاک بود. از طرفی مقادیر انتشار کربن خاک بر حسب شدت فعالیت‌های مربوط به تنفس در لایه‌های مختلف خاک وابستگی زیادی به درجه حرارت و مقدار رطوبت خاک داشت (Pastore *et al.*, 2019). بنابراین از آنجایی‌که توده‌های مورد پژوهش در رویشگاه‌های مختلف در ارتفاعات بیش از ۲۰۰۰ متر از سطح دریا پراکنش دارند، انتظار این است که به‌دلیل درجه حرارت پایین و مقدار کم رطوبت خاک به‌دلیل برودت و خشکی هوا در ارتفاعات فوقانی، انتشار کربن از لایه‌های خاک کمتر باشد و به‌دلیل پدیده جابه‌جایی کربن (Carbon translocation) در لایه‌های زیرین خاک، مقادیر کربن آلی بین لایه زیرسطحی تا عمق ۱۵ سانتی‌متری و لایه معدنی تا عمق ۳۰ متری خاک دارای تفاوت معنی‌داری نباشد. مورد قابل پیش‌بینی در بوم‌سازگان‌های جنگلی این است که لایه زیرسطحی خاک اغلب تحت تأثیر تجزیه چوب‌های افتاده و یا حتی ریزچوب‌ها (Fine woody debris) و لاشبرگ‌های موجود در بستر رویی خاک دارای مواد آلی بیشتری است و از نظر ساختار فیزیکی و شیمیایی ترکیبات بیشتری از کربن آلی دارند. با استناد به نتایج به‌دست آمده از آنجایی‌که مقادیر نیتروژن لایه فوقانی خاک به‌طور معنی‌داری بیش از مقادیر نیتروژن در لایه تحتانی خاک بود، از این‌رو مقادیر کربن آلی لایه فوقانی خاک تفاوت معنی‌داری با مقادیر کربن آلی در لایه تحتانی خاک معدنی نداشتند. در این راستا Wu و همکاران (۲۰۲۰) بیان نمودند که ازدیاد مقادیر نیتروژن در خاک منجر به افزایش فعالیت ریزموجودات (میکروارگانسیم‌ها) و به تبع آن سبب افزایش تنفس و هدررفت (انتشار) کربن از خاک شده که در این راستا ازدیاد مقدار نیتروژن به همراه مقادیر فسفر سبب افزایش شدت و حدت روند وارونه معدنی شدن یا ایموبیلیزه شده و تسریع در

معنی دار به نوعی مستقل از اثرات گونه‌ای درختان و ویژگی‌های فیزیوگرافی زمین بود. برخی از مستندات مرتبط در این زمینه گزارش دادند که در نزدیکی درختان و در حیطه‌ی با افزایش تراکم توده‌های درختان نرخ خروج دی‌اکسیدکربن و روند کاهش مقدایر کربن آلی به‌خصوص در لایه‌های زیرین خاک بیشتر بود که این روند در مراحل مختلف تحولی توده‌های درختان دستخوش تغییرات عدیده‌ای می‌شود (Darenova et al., 2015; Pastore et al., 2019). مبتنی بر نتایج به‌دست آمده می‌توان متصور شد که توده اوری توسکستان در مرحله صعودی هستند و توده‌های اوری پانوم‌سر لایوچ و کلنگای نکاء در مرحله اوج قرار دارند. اما با این وضعیت مقادیر کربن آلی در بین رویشگاه‌های مذکور تغییرات معنی‌داری نداشتند. اگرچه وضعیت جمع‌آوری داده‌های هدف مبتنی بر طرح تصادفی بود و فقط در نزدیکی درختان نمونه‌برداری خاک انجام نشده است اما نتایج نشان داد که مقادیر کربن آلی در توده‌های مورد پژوهش مستقل از مقدار تراکم و گستردگی تاج درختان بود که به‌نوعی بیان‌گر این موضوع است که گزارش مستندات فوق‌الذکر به‌شکل جامع نمی‌تواند دارای سندیت متقن باشد.

گفتنی است که Soleimani Rahim Abadi و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهش خود در ارتباط با اثرات جنگل‌کاری بر مقدار عناصر غذایی خاک بیان داشتند که اثرات گونه‌ای توده‌های جنگل‌کاری شده بر حسب درصد آمیختگی، ساختار مختلف ترکیب گونه‌ای سبب تغییرات اساسی بر مقدار کربن آلی و عناصر غذایی خاک (NPK) می‌شود. جدا از آن‌که تغییرات مذکور مربوط به حیطه‌های مختلف جنگل‌کاری است و شرایطی متفاوت از جنگل‌های طبیعی دارند، اما آن‌چه به‌طور بارز مشهود بود اثرات گونه‌ای بر روند تغییرات عناصر غذایی خاک بود. در حالی‌که در پژوهش پیش‌رو فقط مقادیر فسفر و پتاسیم در لایه‌های مختلف خاک تنها با ارتفاع درختان به‌طور متناوب دارای همبستگی‌های معنی‌دار متفاوتی بود. علاوه بر آن، در این خصوص Dai و همکاران (۲۰۲۲) نیز عنوان کردند که مقادیر عناصر غذایی و تغییرات کربن آلی خاک بوم‌سازگان‌های جنگلی در اکثر موارد دارای ارتباط

معنی‌داری با شرایط محیطی و فیزیکی زمین از جمله، شیب، جهت‌های دامنه و ارتفاع از سطح دریا می‌باشد. در صورتی‌که در پژوهش پیش‌رو فقط مقادیر فسفر قابل جذب لایه زیرسطحی خاک دارای ارتباط معنی‌داری با تغییرات جزئی ارتفاع از سطح دریا در رویشگاه‌های مختلف بود. با همه این تفاسیر همان‌طوری که پیش‌تر ذکر شد مقدار کربن آلی و نیتروژن کل خاک در اعماق مورد بررسی هیچ ارتباط معنی‌داری با ویژگی‌های زیستی و فیزیکی توده‌های اوری رویشگاه‌های مختلف نداشته است. صرف‌نظر از استقرار، پراکنش و ترکیب گونه‌ای درختان توده‌های اوری آن‌چه که در خصوص ویژگی رویشگاه‌های مذکور بارز است، شرایط اقلیمی و برودت هوا، دوره رویش کوتاه‌تر در این رویشگاه‌ها، حساسیت خاک‌های این توده‌ها به فرسایش، یخ‌زدگی خاک‌ها بلافاصله پس از پایان دوره رویش و مهم‌تر از همه کندی روند تجزیه و پوسیدگی تجمعات آلی، نحوه انتشار و جابه‌جایی کربن در این رویشگاه‌ها می‌تواند یکی از دلایل اصلی عدم ارتباط تغییرات مقادیر کربن آلی و نیتروژن کل لایه‌های خاک با اثرات گونه‌ای و شرایط فیزیوگرافی زمین باشد. البته قابل بیان است که حداکثر شیب در رویشگاه‌های مورد پژوهش ۴۵ درصد و تغییرات دامنه ارتفاع از سطح دریا در بین رویشگاه‌های مختلف نیز نزدیک به بین ۲۱۰۰ تا ۲۳۵۰ متر و همچنین اختلاف جهت‌های دامنه نیز در بین رویشگاه‌ها اغلب شمال شرقی، شرقی و جنوبی بود. به‌همین دلیل می‌توان عدم ارتباط مقادیر کربن آلی و عناصر غذایی دیگر را با ویژگی‌های مختلف محیطی را به‌دلیل تغییرات جزئی ویژگی‌های فیزیکی زمین در مناطق مورد بررسی دانست. چه بسا در صورت تغییرات فاحش شرایط فیزیکی زمین و احتساب مؤلفه‌های گسترده توپوگرافی انتظار تغییرات زیادی از عناصر غذایی را می‌توان داشت.

در یک جمع‌بندی کلی می‌توان بیان نمود که روند تغییرات کربن آلی لایه‌های مختلف خاک در توده‌های اوری رویشگاه‌های مورد پژوهش بسیار کند است. البته Wu و همکاران (۲۰۲۲) نیز گزارش دادند که روند تغییرات کربن آلی خاک در بوم‌سازگان‌های جنگلی ذاتاً کند می‌باشد.

- Dai, L., Ge, J., Wang, L., Zhang, Q., Liang, T., Bolan, N., Lischeid, G. and Linklebe, 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.
- Darenova, E., Cater, M. and Pavelka, M., 2015. Different harvest intensity and soil CO<sub>2</sub> efflux in sessile oak coppice forests. *iForest*, 9: 546–552.
- IPCC, 2022. Special Report on Climate Change and Land-IPCC Site, Retrieved 11 December 2022.
- Jafari Sarabi, H., Pilehvar, B., Abrari, K. and Waez-Mousavi, S.M., 2021. Changes in carbon sequestration and some edaphic traits in forest types of central Zagros (Case Study: The forests of Lorestan Province). *Ecology of Iranian Forests*, 17: 142–151 (In Persian with English summary).
- Jia, X., O'Connor, D., Shi, Z. and Hou, D., 2020. VIRS based detection in combination with machine learning for mapping soil pollution. *Environal Pollution*, 11:5845.
- Kooch, Y., Parsapour, M.K., Egli, M. and Moghimian, N., 2020. Forest floor and soil properties in different development stages of Oriental beech forests. *Applied Soil Ecology*, 161: 103823.
- Kumar, A., Kumar, M., Pandey, R., Zhiguo, Y. and Cabral-Pinto, M., 2021. Forest soil nutrient stocks along altitudinal range of Uttarakhand Himalayas: An aid to Nature Based Climate Solutions. *Catena*, 207:105667.
- Mahdiani, A.R., Heydari, H., Rahmani, R. and Azadfar, D., 2012. Structure of oak (*Quercus macranthera*) forest stands in the Golestan Province. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 2: 23-42 (In Persian with English summary).
- Nottingham, A.T., Hicks, L.C., Ccahuana, A.J., Salinas, N., Baath, E. and Meir, P., 2018. Nutrient limitations to bacterial and fungal growth during cellulose decomposition in tropical forest soils. *Biology and Fertility of Soils*, 54: 219–228.
- Pastore, G., Tobin, B. and Nieuwenhuis, M., 2019. Quantifying carbon and nitrogen losses by respiration and leaching from decomposing woody debris in reforested coniferous stands in Ireland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265:195–207.
- Rafeie jahed, R., Hosseini, S.M. and Kooch, Y., 2014. The effect of natural and planted forest stands on soil fertility in the Hyrcanian region, Iran. *Biodiversitas*, 2: 206–214.
- Ramesh, T., Bolan, N.S., Kirkham, M.B., Wijesekara, H., Kanchikerimath, M., Rao, C.S., Sandeep, S., Rinklebe, J., Ok, Y.S., Choudhury, B.U. and Wang,

صرفنظر از ماهیت اصلی تغییرات کربن آلی خاک، عدم تغییرات کربن آلی خاک در رویشگاه‌های مورد پژوهش می‌تواند به دلیل شرایط منحصر این رویشگاه‌های مستقر در ارتفاعات بالابند، روند کند تجزیه و فرآیند تنفس و مقدار جابه‌جایی کربن در لایه‌های پایین‌تر به دلیل حساسیت خاک توده‌های اوری به پدیده آبشویی دانست. البته نتایج نشان داد که بین عناصر مورد بررسی نیز ارتباط معنی‌داری وجود نداشته و این امر یعنی چرخه شیمیایی این عناصر در لایه‌های خاک توده‌های اوری رویشگاه‌های مورد پژوهش مستقل از هم می‌باشد. در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان بیان نمود که تغییر در رژیم غذایی خاک نمی‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روند حبس و انتشار کربن خاک توده‌های اوری داشته و از این رو هدررفت کربن در توده‌های اوری به‌سختی انجام شده و وضعیت ترسیب کربن در خاک توده‌های اوری پایدار است.

### سپاسگزاری

این پژوهش بخشی از دستاوردهای پروژه ملی "سنجش و پایش ذخایر کربن جنگل‌های هیرکانی و ارسباران (فاز اول)" به شماره ۰۰۰۵۳۳-۰۴۱-۰۹-۰۶۰-۰۰ است که با حمایت مالی مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور انجام شد.

### منابع مورد استفاده

- Blaško, R., Forsmark, B., Gundale, M.J., Lim, H., Lundmark, T. and Nordin, A., 2022. The carbon sequestration response of aboveground biomass and soils to nutrient enrichment in boreal forests depends on baseline site productivity. *Science of the Total Environment*, 838:156327.
- Caparros, A. and Jacquemont, F., 2003. Conflicts between biodiversity and carbon sequestration programs: economic and legal implications. *Ecological Economics*, 46:143–157.
- Chen, Y., Sayer, E.J., Li, Z.A., Mo, Q.F., Li, Y.W., Ding, Y.Z., Wang, J., Lu, X.K., Tang, J.W. and Wang, F.M., 2016. Nutrient limitation of woody debris decomposition in a tropical forest: contrasting effects of N and P addition. *Functional Ecology*, 30: 295–30.



- Wang, B., Liu, D., Yang, J., Zhu, Z., Darboux, F., Jiao, J. and An, S., 2021. Effects of forest floor characteristics on soil labile carbon as varied by topography and vegetation type in the chinese loess plateau. *Catena*, 196:104825.
- Wu, G., Zhang, Z., Shu, C., Mo, Q., Wang, H., Kong, F., Zhang, Y., Wang, GG. and Liu, Y. 2020. The response of coarse woody debris decomposition and microbial community to nutrient additions in a subtropical forest. *Forest Ecology and Management*, 460: 1–10.
- Wu, X., Fu, D., Duan, C., Huang, G. and Shang, H., 2022. Distributions and influencing factors of soil organic carbon fractions under different vegetation restoration conditions in a subtropical mountainous area, SW China. *Forests*, 13: 1–15.
- H., 2019. Soil organic carbon dynamics: impact of land use changes and management practices: a review. *Advances in Agronomy*, 156: 1–107.
- Soleimani Rahim Abadi, M., Akbarinia, M. and Kooch, Y., 2015. Comparison of Soil Macroelements in the Plantiation of Forest Stand in Khazar Forest Seed Center, Amol. *Ecology of Iranian Forests*, 6: 46-54 (In Persian with English summary).
- Taiz, L. and Zeiger, E., 2013. *Plant Physiology*. 4<sup>th</sup> edition, P. 731 (In Persian with English summary).
- Vahedi, A.A., Motaji, A. and Eshaghi Rad, J., 2014. Variation of Soil Organic Carbon Pool Weight Associated with Plant Biodiversity (Case Study: Mixed-Beech Forests of Glandrood in Nour). *Iranian Journal of Applied Ecology*, 7 :1-12 (In Persian with English summary).

## Variations of organic carbon within the natural Hyrcanian Caucasian oak (*Quercus macranthera* C. A. Mey.) forests of Iran

A.A. Vahedi<sup>1\*</sup>, A. Cherati-Arayi<sup>2</sup>, M. Talebi-Attoyi<sup>3</sup>, M. Matinizadeh<sup>4</sup>

1\*- Corresponding author, Assistant Prof., Forests and Rangelands Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran. E-mail: as.vahedi@areeo.ac.ir

2- Assistant Prof., Soil and Water Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran

3- Phd, Soil and Water Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran

4- Associate Prof. Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization, AREEO, Tehran, Iran

Received: 16.12.2022

Accepted: 07.04.2023

### Abstract

The unique characteristics of Caucasian oak (CO) stands, located at high altitudes in the Hyrcanian forests, provide valuable insights into the variations of organic carbon (OC) and soil nutrients (NPK), as well as biological and physical changes within these habitats. Understanding these variations is crucial for effective forest management and conservation efforts. To this end, the current study established four 20 × 20 m<sup>2</sup> sample plots in each of the CO habitats of Panomehsar in Lavij, Kolanga in Neka, and Tuskestan in Gorgan. Soil samples were collected from two depths (0-15 cm and 15-30 cm) in each plot and analyzed in the laboratory. Biophysical characteristics of trees, such as breast height diameter, total height, average crown diameter, density, and physiographical units, were also recorded. The results showed that OC and nitrogen (N) levels in both soil layers were not significantly different across the study forests ( $p > 0.05$ ), while available phosphorus (P) and potassium (K) levels varied significantly among them ( $p < 0.05$ ). There were no significant correlations between OC and N levels in the soil layers, or with the biophysical attributes of the trees based on Pearson tests. The findings indicated that OC and NPK variations were independent of each other, with no significant relationship between them observed in the study sites. Moreover, the nature of OC variations was found to be slow, making it challenging to discern the impact of tree species on these variations within the stands. In conclusion, the study sheds light on the slow nature of OC variations in CO stands and highlights the need for careful consideration of their effects on management and conservation efforts.

**Keywords:** Caucasian oak forests, Climate change, High altitude, Multivariate analysis, Soil nutrient.