مجلهٔ جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران
سال هجدهم، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۵
ص ۱۹۹-۱۸۳
*مقاله پژوهشی*

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22034/ijf.2025.556563.2082
CC BY 4.0

# تحلیل سهم نسبی ویژگی‌های خاک در ذخیرهٔ کربن زیرزمینی توده‌های دست‌کاشت جنگل‌های شرق هیرکانی

**تینا خوش‌طینت[۱]، سید محمد حجتی[۲ و ۳*]، حامد اسدی[۴] و محیا تفضلی[۴]**

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
[۲]استاد گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
[۳]پژوهشگر مهمان، گروه جنگل‌شناسی و بوم‌شناسی جنگل‌های مناطق معتدله، دانشگاه گوتینگن، گوتینگن، آلمان
[۴]استادیار گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۲)

## چکیده

**مقدمه:** خاک جنگل مهم‌ترین مخزن کربن در اکوسیستم‌های خشکی است و پایداری کربن آن به ترکیب ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین نوع پوشش درختی وابسته است. در توده‌های دست‌کاشت که ساختار و عملکرد آنها تحت تأثیر انتخاب گونه و مداخلات انسانی قرار دارد، الگوهای ترسیب کربن ممکن است متفاوت با جنگل‌های طبیعی باشد. گونه‌های مختلف از طریق تفاوت در لاشبرگ، کیفیت ریشه، چرخهٔ عناصر غذایی و فرایندهای اکوفیزیولوژیک، سازوکارهای متفاوتی در پویایی کربن خاک ایجاد می‌کنند؛ از این‌رو شناسایی این تفاوت‌ها برای مدیریت مبتنی بر گونه و افزایش پایداری کربن اهمیت دارد. پژوهش حاضر با هدف تحلیل سهم نسبی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در ذخیرهٔ کربن خاک سه تودهٔ دست‌کاشت توسکای ییلاقی (*Alnus subcordata* C.A.Mey.)، بلندمازو (*Quercus castaneifolia* C.A.Mey.) و زربین (*Cupressus sempervirens* L.) در جنگل آموزشی- پژوهشی دارابکلا در استان مازندران انجام گرفت.

**مواد و روش‌ها:** در هر یک از توده‌ها، ۱۰ قطعه نمونه با ابعاد ۲۰×۲۰ متر به روش تصادفی–سیستماتیک پیاده شد و نمونه‌های خاک از عمق ۲۰–۰ سانتی‌متر برداشت شد. ویژگی‌های فیزیکی شامل درصد رطوبت، درصد اجزای بافت خاک و چگالی ظاهری و ویژگی‌های شیمیایی شامل pH، هدایت الکتریکی، درصد کربن آلی، درصد نیتروژن کل، فسفر قابل جذب، پتاسیم قابل جذب، کلسیم، غلظت نیترات و آمونیوم اندازه‌گیری شد. مقدار ذخیرهٔ کربن خاک بر اساس درصد کربن آلی، چگالی ظاهری و عمق نمونه‌برداری محاسبه شد. داده‌ها با استفاده از آزمون‌های آماری تجزیهٔ واریانس یکطرفه و تحلیل سهم نسبی در نرم‌افزار R تجزیه‌وتحلیل شدند.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری میان برخی ویژگی‌های خاک در توده‌های مختلف وجود دارد. رطوبت خاک در تودهٔ توسکای ییلاقی به‌طور معنی‌داری بیش از دو تودهٔ دیگر بود (میانگین ۴۲/۴۷ درصد)، درحالی که چگالی ظاهری در تودهٔ زربین بیشترین مقدار (۱/۸۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) را داشت. از نظر ویژگی‌های شیمیایی، خاک تودهٔ زربین دارای مقادیر بیشتری از فسفر (۱۰/۴۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، پتاسیم (۶۰۸/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کلسیم بود، درحالی که نیتروژن کل و آمونیوم در تودهٔ توسکای ییلاقی بیشترین مقادیر را نشان دادند. مقدار کربن آلی خاک در بین توده‌ها بین ۳/۴۷ تا ۳/۸۸ درصد متغیر بود، اما تفاوت معنی‌دار آماری میان توده‌ها مشاهده نشد. همچنین مقدار ترسیب کربن خاک نیز از ۵۷/۰۷ تا ۷۲/۲۷ تن در هکتار تغییر داشت، اما تفاوت معنی‌دار آماری میان توده‌ها مشاهده نشد. نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان داد که چهار مؤلفهٔ نخست شامل فسفر، پتاسیم، هدایت الکتریکی و کربن آلی، ۷۳/۸۸ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین کردند. مؤلفهٔ اول به‌عنوان شاخص ویژگی‌های تغذیه‌ای و پایداری کربن شناسایی شد. مؤلفهٔ دوم اغلب با رطوبت، نیتروژن و آمونیوم همبستگی مثبت داشت که بیانگر نقش فرایندهای زیستی در پویایی کربن است. بر اساس تحلیل سهم نسبی، در تودهٔ توسکای ییلاقی سهم متغیرهای شیمیایی غالب است و حدود ۹۵ درصد تغییرات ترسیب کربن را تبیین می‌کند. در تودهٔ زربین، متغیرهای شیمیایی همچنان اثرگذارترند (۸۰ درصد)، اما نقش متغیرهای فیزیکی نیز شایان توجه است. در تودهٔ بلندمازو الگوی متفاوتی مشاهده می‌شود؛ به‌طوری که متغیرهای فیزیکی سهم کمی بیشتری (۵۶ درصد) نسبت به متغیرهای شیمیایی در تبیین ترسیب کربن دارند.

**نتیجه‌گیری:** یافته‌های پژوهش حاضر مؤید آن است که ویژگی‌هایی چون آمونیوم، کربن آلی، هدایت الکتریکی و درصد شن و سیلت نقش کلیدی در افزایش پایداری و ذخیره‌سازی کربن خاک دارند. نتایج این پژوهش نشان داد که نوع گونهٔ جنگلکاری‌شده می‌تواند از طریق تغییر در ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک، مسیرهای متفاوتی را در پایداری و ذخیرهٔ کربن خاک رقم بزند. بر این اساس، گونه‌های مختلف با سازوکارهای متفاوتی بر چرخهٔ کربن تأثیر می‌گذارند. بنابراین، انتخاب ترکیب گونه‌ای مناسب و مدیریت هوشمندانه خاک در توده‌های دست‌کاشت، می‌تواند راهکاری مؤثر برای ارتقای ظرفیت ذخیرهٔ کربن و کاهش تأثیرات تغییر اقلیم در جنگل‌های هیرکانی باشد.

**واژه‌های کلیدی:** پویایی کربن خاک جنگل، تغییر اقلیم، سهم نسبی واریانس، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک.

* نویسندهٔ مسئول
شمارهٔ تماس: ۰۱۱۳۳۸۸۵۴۱۱
ایمیل: s_m_hodjati@yahoo.com

**مقدمه**

تغییرات اقلیمی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن حاضر است و افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای مانند $CO_2$، $CH_4$ و $N_2O$ موجب تشدید اثر گلخانه‌ای و افزایش دمای زمین می‌شود (Smith et al., 2016; Legg, 2021; Osabohien et al., 2019). این روند پیامدهایی همچون دگرگونی الگوهای آب‌وهوایی، بروز رویدادهای حدی اقلیمی و آسیب به زیست‌بوم‌ها دارد (Zhang et al., 2025). در این میان، جنگل‌ها با کارکرد بنیادین خود در جذب و ذخیرهٔ کربن، از مهم‌ترین مؤلفه‌های طبیعی در کاهش غلظت $CO_2$ و تعدیل تغییرات اقلیم به شمار می‌آیند.

برای کاهش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو، دو رویکرد اصلی وجود دارد: کاهش انتشار از طریق صرفه‌جویی در مصرف انرژی و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، و افزایش ظرفیت مخازن کربن با بهره‌گیری از فناوری‌ها و سازوکارهای ذخیرهٔ کربن (Sheikh et al., 2009). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تقویت مخازن کربن، به‌طور معمول نسبت به کاهش مستقیم انتشار گازها هزینهٔ کمتری دارد و می‌تواند هزینهٔ دستیابی به اهداف جهانی اقلیمی را تا حدود ۴۰ درصد کاهش دهد (Gren et al., 2016). در میان اکوسیستم‌های خشکی، جنگل‌ها نقش محوری در چرخهٔ کربن ایفا می‌کنند و خاک آنها بزرگ‌ترین مخزن کربن شناخته می‌شود. افزون‌بر ذخیره‌سازی کربن، خاک از طریق فرایند تنفس سهم مهمی در بازگشت $CO_2$ به اتمسفر دارد؛ به‌طوری‌که برآوردها نشان می‌دهد حدود ۳۰ تا ۸۰ درصد از کل تنفس اکوسیستم جنگلی ناشی از تنفس خاک است (Naderi et al., 2022). ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله رطوبت، بافت، pH، مادهٔ آلی و چگالی ظاهری نقش کلیدی در توانایی خاک برای ذخیره یا انتشار کربن دارند (Ghimirey et al., 2025; Das et al., 2025). خاک‌هایی که مقادیر بیشتری مادهٔ آلی و رطوبت دارند، محیطی پایدارتر برای حفظ کربن فراهم می‌کنند. در چنین شرایطی، فعالیت میکروبی و تجزیهٔ مواد آلی با سرعت کمتری انجام می‌گیرد و در نتیجه فرایند آزادسازی $CO_2$ از خاک کاهش و ظرفیت ذخیرهٔ کربن افزایش می‌یابد (Gerke, 2022). در مقابل، خاک‌های متراکم با تهویهٔ ضعیف، شرایطی ایجاد می‌کنند که تجزیهٔ سریع‌تر مواد آلی و در نهایت انتشار بیشتر کربن به جو را در پی دارد (Kooch et al., 2012). افزون‌بر ویژگی‌های خاک، نوع یا ترکیب گونه‌ای نیز بر چرخهٔ کربن و کیفیت خاک اثرگذار است. گونه‌های مختلف به‌دلیل تفاوت در کیفیت لاشبرگ، سرعت تجزیهٔ مواد آلی و الگوهای ریشه‌ای، شرایط متفاوتی برای ذخیرهٔ کربن فراهم می‌کنند. به‌طور کلی، توده‌های پهن‌برگ با تولید لاشبرگ غنی‌تر و تجزیهٔ سریع‌تر مواد آلی، ظرفیت بیشتری برای افزایش مادهٔ آلی و نیتروژن خاک دارند، درحالی که توده‌های سوزنی‌برگ به‌دلیل اسیدی‌تر کردن خاک و کندی تجزیهٔ لاشبرگ، تأثیر کمتری بر بهبود کیفیت خاک و ذخیرهٔ پایدار کربن نشان می‌دهند (Kooch et al., 2012; Asghari et al., 2023).

با توجه به اهمیت موضوع، پژوهش‌های متعددی در خصوص اثر ویژگی‌های خاک بر ذخیرهٔ کربن خاک جنگل در توده‌های طبیعی و دست‌کاشت انجام گرفته است. برای مثال پژوهش Patou et al. (2025) نشان داد که در توده‌های صنوبرکاری، ویژگی‌های خاک سهم مهمی در ذخیرهٔ کربن دارند؛ به‌ویژه بافت ریزدانه، pH و EC که بر سرعت معدنی شدن و پایداری مادهٔ آلی اثرگذارند. یافته‌های Yaghoubi sis et al. (2025) نشان می‌دهد که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیر چشمگیری بر میزان ذخیره و پایداری کربن در خاک دارند، به‌طوری که خاک‌های دارای بافت ریزتر مانند رس و سیلت، به‌دلیل توان بیشتر در نگهداری رطوبت و مواد آلی، ظرفیت بیشتری برای ذخیرهٔ کربن دارند. از سوی دیگر، شرایط اقلیمی مرطوب و توپوگرافی ملایم منطقه نیز با بهبود رطوبت خاک و

کاهش فرسایش سطحی، محیطی مناسب برای ذخیره و پایداری کربن فراهم کرده است. همچنین Xu et al. (2025) در پژوهش خود دربارهٔ ذخیرهٔ کربن جنگل و راهبردهای کاهش تغییر اقلیم، تأکید کرده‌اند که ویژگی‌های خاک در کنار ساختار جنگل تأثیر مهمی در کارایی ذخیرهٔ کربن دارند. در توده‌های دست‌کاشت، بافت خاک و مقدار مادهٔ آلی بیشترین اثر را بر پایداری کربن دارند و غلظت عناصری چون کلسیم و منیزیم از طریق تشکیل ترکیبات آلی– معدنی موجب افزایش ماندگاری کربن می‌شود. تغییرات pH و رطوبت خاک نیز بر سرعت معدنی شدن و توان ذخیره‌سازی تأثیر مستقیم دارند. Suwethaasri et al. (2025) دربارهٔ تأثیر تغییر اقلیم بر زی‌توده و ذخیرهٔ کربن جنگل‌های هند گزارش کردند که افزون‌بر تغییرات دما و بارش، ویژگی‌های خاک نیز اثر مهمی در پایداری کربن دارند. نتایج نشان داد که در توده‌های دست‌کاشت، بافت خاک و سطح مادهٔ آلی ظرفیت اصلی ذخیره‌سازی را شکل می‌دهند، درحالی که pH، رطوبت خاک، نرخ معدنی شدن و چرخهٔ مواد غذایی را کنترل می‌کنند. همچنین پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که ساختار پوشش گیاهی و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک (به‌ویژه بافت، pH، و حضور کاتیون‌هایی مانند کلسیم و منیزیم) اثر مهمی در پایداری مخزن جهانی کربن جنگل‌ها و تداوم ذخیرهٔ کربن دارند (Pan et al., 2024; Nobakht et al., 2011).

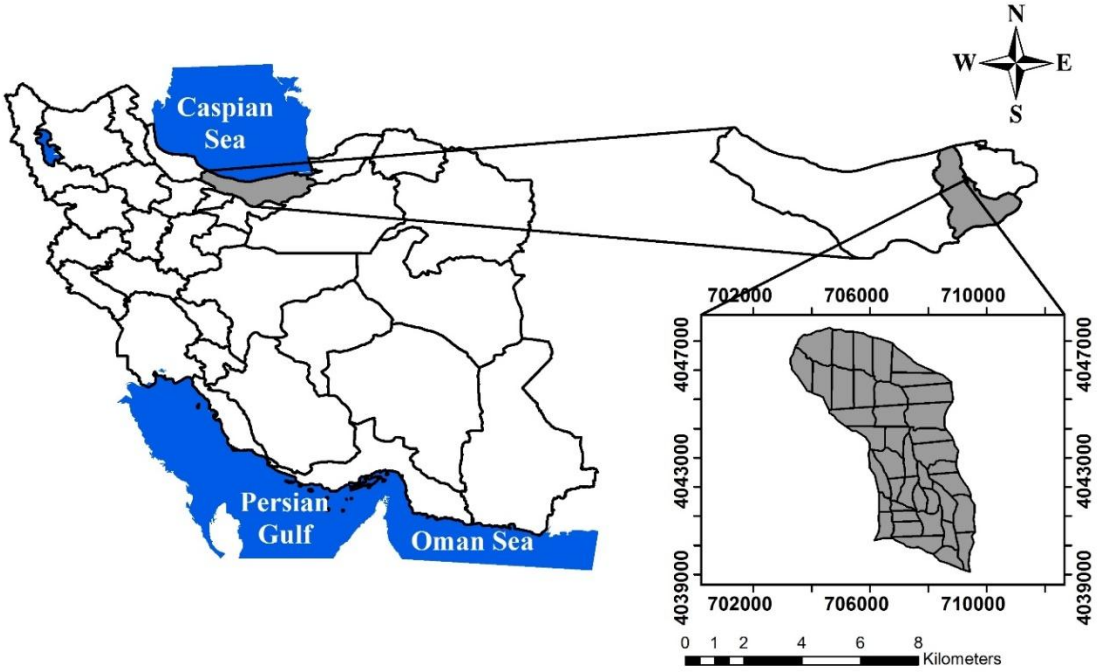
به‌طور کلی، جنگل‌ها به‌عنوان یکی از بوم‌سازگان‌های حیاتی کرهٔ زمین، با ایفای نقش در ذخیره‌سازی کربن، سهم مهمی در تعدیل تغییرات اقلیمی و پایداری محیط زیست دارند. در این میان، جنگلکاری و ایجاد توده‌های دست‌کاشت در جنگل‌های هیرکانی با اهداف اقتصادی، توسعه‌ای و احیای جنگل را می‌توان راهکاری کارآمد برای افزایش ذخیرهٔ کربن خاک نیز مدنظر قرار داد. با وجود اهمیت زیاد این موضوع، پژوهش‌های انجام‌گرفته دربارهٔ نقش و سهم ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در ظرفیت ذخیرهٔ کربن توده‌های دست‌کاشت، همچنان محدود است. کمبود اطلاعات دقیق دربارهٔ نقش نسبی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در ظرفیت ذخیرهٔ کربن، به‌منزلهٔ یک خلأ پژوهشی مهم مطرح است که می‌تواند دقت ارزیابی‌ها و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در برنامه‌های جنگلکاری را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین بررسی جامع سهم نسبی خصوصیات خاک در فرایند ذخیره‌سازی کربن، ضرورتی انکارناپذیر است که می‌تواند مبنایی برای برنامه‌ریزی و مدیریت بهینهٔ توده‌های دست‌کاشت فراهم آورد. بر همین اساس، پژوهش حاضر در پی تعیین مهم‌ترین ویژگی‌های اثرگذار فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین تحلیل سهم نسبی آنها در ذخیرهٔ کربن خاک توده‌های دست‌کاشت بلندمازو، توسکای ییلاقی و زربین در جنگل‌های هیرکانی می‌پردازد. در این راستا، دو فرضیه اصلی برای این پژوهش مطرح می‌شود؛ ۱. گونه‌های مختلف دست‌کاشت از راه تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، الگوهای متفاوتی در ذخیره‌سازی و پایداری کربن ایجاد می‌کنند ؛ ۲. ویژگی‌های شیمیایی خاک (مانند کربن آلی، نیتروژن و آمونیوم) اثر بیشتری نسبت به ویژگی‌های فیزیکی (مانند بافت و چگالی ظاهری) در تعیین ذخیرهٔ کربن خاک توده‌های دست‌کاشت دارند.

## مواد و روش‌ها

### منطقهٔ پژوهش

جنگل آموزشی- پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری- دارابکلا، واقع در شهرستان میاندورود استان مازندران، به‌عنوان منطقهٔ پژوهش انتخاب شد (شکل ۱). این جنگل با وسعت تقریبی ۲۶۷۲ هکتار در محدودهٔ طول جغرافیایی ′۱۴ °۵۲ تا ′۳۱ °۵۲ و عرض جغرافیایی ′۲۸ °۳۶ تا ′۳۳ °۳۶ قرار دارد. ارتفاع منطقه از سطح دریا بین ۱۷۸ تا ۸۷۸ متر و شیب اراضی بین ۱۲ تا ۵۰ درصد متغیر است. میانگین بارندگی سالانه ۷۰۰ تا ۷۵۰ میلی‌متر برآورد

شده و تیپ خاک غالب شامل خاک‌های قهوه‌ای شسته‌شده و پسدوگلی با بافت به‌نسبت سنگین، عمق ۱۱۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متر و نفوذپذیری کم است (Balue et al., 2023).. پوشش گیاهی متنوع منطقه شامل پنج جامعهٔ طبیعی از قبیل انجیلی– ممرزستان، آزاد– بلوطستان، تاج‌ریزی جنگلی– راشستان، افرا– انجیلیستان و فرفیون– راشستان است که بیانگر غنای زیستی و پتانسیل زیاد تحقیقاتی این جنگل است. در این پژوهش سه تودهٔ جنگلکاری دست‌کاشت (گونه‌های: بلندمازو، توسکای ییلاقی و زربین) که در مجاورت یکدیگر و تحت شرایط یکسان توپوگرافی، اقلیمی و مدیریتی قرار داشتند، واقع در پارسل‌های ۳۰ و ۴۰ انتخاب شدند. هر توده حدود ۵ هکتار و با فاصلهٔ کاشت ۲ × ۲ متر، در سال‌های ۱۳۶۶–۱۳۶۵ کاشته شده‌اند (Asadi et al., 2021).




شکل ۱- نقشهٔ منطقهٔ پژوهش
Figure 1. The map of study area

**شیوهٔ اجرای پژوهش**

در هر یک از توده‌های بررسی‌شده، ۱۰ قطعه نمونهٔ مربع‌شکل با ابعاد ۲۰×۲۰ متر و به‌روش تصادفی– سیستماتیک انتخاب شد. ابعاد ۲۰×۲۰ متر با توجه به همگنی جنگلکاری‌ها، یکنواختی ترکیب گونه‌ای و تراکم مشابه درختان انتخاب شد. در تابستان ۱۴۰۳ در مرکز هر قطعه نمونه از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متر با استفاده از بیلچهٔ فلزی با رعایت فاصلهٔ ۱ متر از تنه درختان برداشت شد (Xu et al., 2025; Kooch et al., 2012). هر نمونه پس از انتقال به آزمایشگاه در هوای آزاد خشک و خرد شده و از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد (Jafari Haghighi, 2003). چگالی ظاهری برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب با استفاده از روش کلوخه محاسبه شد (Piper, 2019). در آزمایشگاه درصد اجزای بافت خاک شامل ذرات شن، سیلت و رس با روش هیدرومتری تعیین شد (Huluka, 2014). ویژگی‌های خاک با روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد: رطوبت خاک با روش توزین و خشک کردن، بافت خاک (درصد اجزای تشکیل‌دهنده) با روش هیدرومتری، چگالی ظاهری با روش کلوخه، اسیدیتهٔ خاک (pH) با دستگاه pH متر، هدایت الکتریکی (EC) پس از تهیهٔ

عصاره با دستگاه EC متر، نیتروژن کل با روش کجلدال و دستگاه کجلتک، فسفر و پتاسیم قابل جذب با دستگاه اسپکتروفوتومتر، و کربن آلی با روش والکلی- بلک اندازه‌گیری شد (Ghazanshahi, 2006). نمونه‌های خاک (۱۰ گرم) آسیاب شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و سپس با ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول KCl با غلظت ۲ مول بر لیتر به‌مدت ۶۰ دقیقه استخراج شدند. محلول‌های خاک از فیلتر واتمن شمارهٔ ۴۲ عبور داده شدند. غلظت یون آمونیوم ($NH_4^+$) در همهٔ نمونه‌ها با استفاده از روش رنگ‌سنجی ایندوفنول اندازه‌گیری شد و غلظت نیترات ($NO_3^-$) با روش احیای کادمیوم تعیین شد (Dorich & Nelson, 1983). پس از اندازه‌گیری درصد کربن آلی و چگالی ظاهری، برای محاسبهٔ مقدار ذخیرهٔ کربن خاک برحسب گرم در هر متر مربع از رابطهٔ ۱ استفاده شد (Tadiello et al., 2022).

$$OC = 10000 \times C\,(\%) \times Bd \times E$$ رابطهٔ ۱

OC: مقدار کربن ذخیره‌شده بر حس تن در هکتار، C: درصد کربن اندازه‌گیری‌شده، Bd: چگالی ظاهری خاک برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و E: ضخامت لایه نمونه‌برداری خاک برحسب سانتی‌متر است.

## روش تحلیل

پس از جمع‌آوری داده‌ها، همهٔ داده‌ها در نرم‌افزار اکسل ذخیره شد. در ادامه نرمال بودن داده‌ها و همگنی واریانس‌ها به‌ترتیب با استفاده از آزمون‌های کولموگروف- اسمیرنوف و لون بررسی شد. به‌منظور تعیین معنی‌داری تفاوت‌ها و مقایسهٔ میانگین‌های ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به‌ترتیب از تجزیهٔ واریانس یکطرفه (One way ANOVA) و آزمون توکی در نرم‌افزار SPSS استفاده شد (Montgomery et al., 2012). برای تعیین مهم‌ترین فاکتورهای اثرگذار بر تغییرات ذخیرهٔ کربن خاک از آزمون تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) با استفاده از بستهٔ نرم‌افزاری FactomineR و تعیین سهم گروهی هر یک از گروه‌های ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک از تحلیل سهم واریانس با استفاده از بستهٔ نرم‌افزاری rdacca.hp در نرم‌افزار R نسخه ۴/۱ انجام گرفت (Lê et al., 2008; Lai et al., 2022). در ادامه به‌منظور بررسی اثر هر یک از متغیرها به‌تنهایی بر ذخیرهٔ کربن خاک، از رگرسیون حداقل مربعات جزئی (Partial Least Squares Regression: PLSR) استفاده شد (Usman & Begum, 2023). برای این منظور، بستهٔ caret در محیط نرم‌افزار R به کار گرفته شد (Kuhn, 2008).

## نتایج

### ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی توده‌های بررسی‌شده

بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در توده‌های دست‌کاشت زربین، توسکای ییلاقی و بلندمازو نشان داد که رطوبت خاک در تودهٔ توسکای ییلاقی (۲/۱ ± ۴۲/۴۷ درصد) به‌طور معنی‌داری بیشتر از توده‌های زربین (۱/۱۸± ۳۱/۴ درصد) و بلندمازو (۰/۹۶± ۳۵/۱۷ درصد) بود، درحالی که چگالی ظاهری (BD) در تودهٔ زربین (۰/۰۶±۱/۸۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بیشتر از دو تودهٔ دیگر بود. درصد اجزای بافت خاک (درصد رس، ماسه و سیلت) بین سه توده تفاوت معنی‌داری نداشت. از نظر ویژگی‌های شیمیایی، pH خاک در تودهٔ بلندمازو (۰/۰۷±۵/۷۴) اسیدی‌تر از زربین (۰/۱۰±۶/۲۷) و توسکای ییلاقی (۰/۱۳±۶/۲۱) بود و هدایت الکتریکی (EC)در زربین (۰/۰۴±۰/۵۴ دسی‌زیمنس بر متر) بیشتر از دو تودهٔ دیگر بود. همچنین مقادیر کلسیم (Ca)، فسفر (P) و پتاسیم (K) در تودهٔ زربین به‌طور معنی‌داری بیشتر از توسکای ییلاقی و بلندمازو بود، اما نیتروژن (N) و آمونیوم (Ammo) در توسکای ییلاقی بیشترین مقادیر را داشت (به‌ترتیب ۰/۰۱±۰/۳۲ درصد و ۰/۵۲±۱/۸۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و نیترات (Nit) در توسکای ییلاقی و زربین مشابه و بیشتر از بلندمازو بود. در خصوص کربن آلی (OC)و ذخیرهٔ کربن خاک (C.Seq) سه توده تفاوت

معنی‌داری نداشتند، میانگین OC حدود ۳/۵ تا ۳/۸۸ درصد و میانگین C.Seq بین ۵۷/۰۷ تا ۷۲/۲۷ تن بر هکتار بود که نشان‌دهندهٔ تأثیر مشابه گونه‌های گیاهی بر ذخیره‌سازی کربن است (جدول ۱).

**تجزیه به مؤلفه‌های اصلی**

چهار مؤلفهٔ اول تحلیل PCA در مجموع ۷۳/۸۸ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین می‌کند. مؤلفهٔ اول (PC1) با ارزش ویژهٔ ۵/۳۳، ۳۵/۵۲ درصد از واریانس را پوشش می‌دهد و مهم‌ترین مؤلفه شناخته می‌شود، درحالی که مؤلفهٔ دوم (PC2) با ارزش ویژهٔ ۲/۴۲، ۱۶/۱۶ درصد از واریانس را توضیح داد. تجزیه‌وتحلیل نشان داد که PC1 و PC2 در مجموع با هم ۵۱/۶۸ درصد از تغییرات را تبیین می‌کنند (جدول ۲). بر اساس نتایج همبستگی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (جدول ۳) و نمودار تحلیل PCA (شکل ۲)، متغیرهایی مانند فسفر، ذخیرهٔ کربن خاک، شن، هدایت الکتریکی، کربن آلی و پتاسیم با PC1 همبستگی مثبت و قوی دارند. در مقابل، PC2 به‌طور چشمگیری با رطوبت خاک، نیتروژن و آمونیوم همبستگی مثبت دارد. توزیع توده‌ها در نمودار PCA نشان می‌دهد که تودهٔ توسکای ییلاقی به‌دلیل رطوبت و نیتروژن زیاد در جهت مثبت PC2 قرار دارد، درحالی که تودهٔ زربین با ویژگی‌های مغذی مانند P و K در جهت مثبت PC1 متمایز می‌شود. تودهٔ بلندمازو نیز به‌دلیل تعادل نسبی در این ویژگی‌ها در موقعیت میانی قرار گرفته است.

جدول ۱- مقادیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در توده‌های مدنظر (حروف لاتین ناهمسان نشان‌دهندهٔ اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون توکی است)

Table 1. Values (mean ± standard error) of soil properties in the studied stands (Different lowercase letters indicate significant differences at the 5% level based on Tukey's test)

| ویژگی‌های خاک<br>Soil properties | علائم اختصاری<br>Abbreviation | توده‌های بررسی‌شده<br>Studied Stands | | |
|---|---|---|---|---|
| | | زربین<br>Italian cypress | توسکای ییلاقی<br>Caucasian alder | بلندمازو<br>Chestnut-Leaved oak |
| Moisture (%) | - | 31. 4±1.18$^{b}$ | 42.47±2.1$^{a}$ | 35.17±0.96$^{b}$ |
| Bulk density (g cm$^{-3}$) | BD | 1.87±0.06$^{a}$ | 1.64±0.04$^{b}$ | 1.66±0.07$^{b}$ |
| Clay (%) | - | 19.79±1.82$^{a}$ | 22.08±1.62$^{a}$ | 22.29±1.01$^{a}$ |
| Sand (%) | - | 41.61±3.4$^{a}$ | 32.45±3.19$^{a}$ | 32.94±2.91$^{a}$ |
| Silt (%) | - | 38.61±2.39$^{a}$ | 45.47±2.02$^{a}$ | 44.76±2.48$^{a}$ |
| Soil reaction | pH | 6.27±0.1$^{a}$ | 6.21±0.13$^{a}$ | 5.74±0.07$^{b}$ |
| Electrical conductivity (ds.m$^{-1}$) | EC | 0.54±0.04$^{a}$ | 0.41±0.01$^{b}$ | 0.36±0.02$^{b}$ |
| Ca (mg kg$^{-1}$) | Ca | 2.35±0.74$^{a}$ | 0.75±0.26$^{b}$ | 1.15±0.42$^{ab}$ |
| OC (%) | OC | 3.88±0.54$^{a}$ | 3.5±0.25$^{a}$ | 3.47±0.27$^{a}$ |
| N (%) | N | 0.26±0.01$^{b}$ | 0.32±0.01$^{a}$ | 0.24±0.01b |
| P (mg kg$^{-1}$) | P | 10.42±1.7$^{a}$ | 3.32±0.39$^{b}$ | 3.08±0.29$^{b}$ |
| K (mg kg$^{-1}$) | K | 608.7±41.02$^{a}$ | 402.18±19.94$^{b}$ | 405.7±19.65$^{b}$ |
| Nitrate (mg kg$^{-1}$) | Nit | 182.73±38.01$^{a}$ | 196.45±12.59$^{a}$ | 69.43±17.72$^{b}$ |
| Ammonium (mg kg$^{-1}$) | Ammo | 0.56±0.03$^{b}$ | 1.84±0.52$^{a}$ | 0.66±0.04$^{b}$ |
| C.Seq (t C ha$^{-1}$) | C.Seq | 72.27±10.7$^{a}$ | 57.07±3.85$^{a}$ | 57.45±4.65$^{a}$ |

جدول ۲ - مقادیر ارزش ویژه و واریانس مؤلفه‌های اصلی ویژگی‌های خاک بررسی‌شده

Table 2. The Eigenvalues and explained variance for each principal component of soil properties

| مؤلفه<br>Components | شاخص ارزش ویژه<br>Eigenvalues | درصد واریانس<br>% of Variance | درصد واریانس تجمعی<br>Cumulative % |
|---|---|---|---|
| 1 | 5.33 | 35.52 | 35.52 |
| 2 | 2.42 | 16.16 | 51.68 |
| 3 | 1.99 | 13.27 | 64.95 |
| 4 | 1.34 | 8.93 | 73.88 |

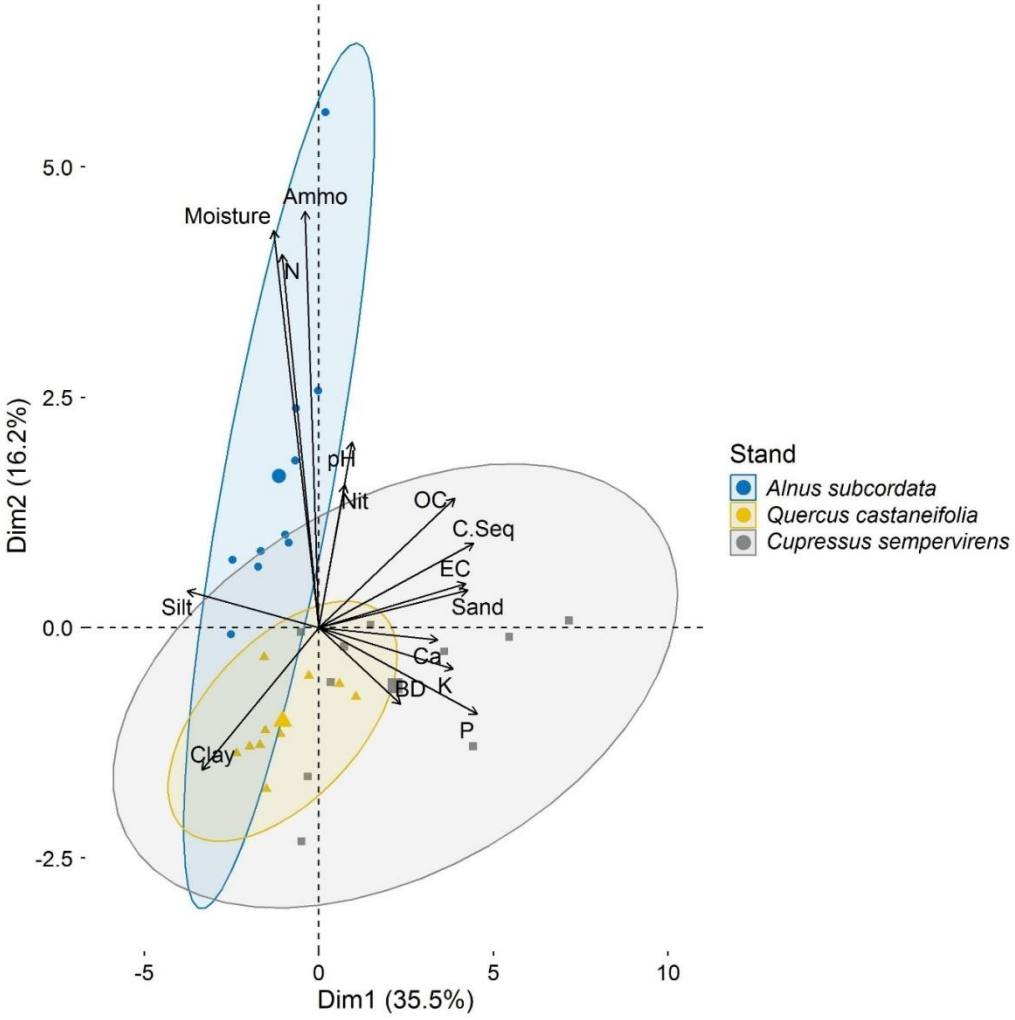
جدول ۳- مقادیر همبستگی متغیرهای بررسی‌شده با مؤلفه‌های اصلی

Table 3. Correlation coefficients of the studied variables with the principal components

| ویژگی‌های خاک<br>Soil properties | مؤلفه‌ها<br>Components | |
|---|---|---|
| | 1 | 2 |
| Moisture (%) | -0.241$^{ns}$ | 0.805** |
| BD (g cm-3) | 0.436* | -0.155$^{ns}$ |
| Clay (%) | -0.626** | -0.289$^{ns}$ |
| Sand (%) | 0.796** | 0.076$^{ns}$ |
| Silt (%) | -0.705** | 0.075 |
| pH | 0.178$^{ns}$ | 0.377* |
| EC (ds.m-1) | 0.785** | 0.089$^{ns}$ |
| Ca (mg kg$^{-1}$) | 0.635** | -0.024$^{ns}$ |
| OC (%) | 0.726** | 0.263$^{ns}$ |
| N (%) | -0.197$^{ns}$ | 0.757** |
| P (mg kg$^{-1}$) | 0.847** | -0.175$^{ns}$ |
| K (mg kg$^{-1}$) | 0.716** | -0.084 |
| Nit (mg kg$^{-1}$) | 0.138$^{ns}$ | 0.290$^{ns}$ |
| Ammo (mg kg$^{-1}$) | -0.074$^{ns}$ | 0.844** |
| C.Seq (t C ha$^{-1}$) | 0.827** | 0.171$^{ns}$ |

ns، * و ** به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ معنی‌دار نبودن و معنی‌داری در سطوح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱ هستند.

ns, * and ** indicate non-significant and significant correlations at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

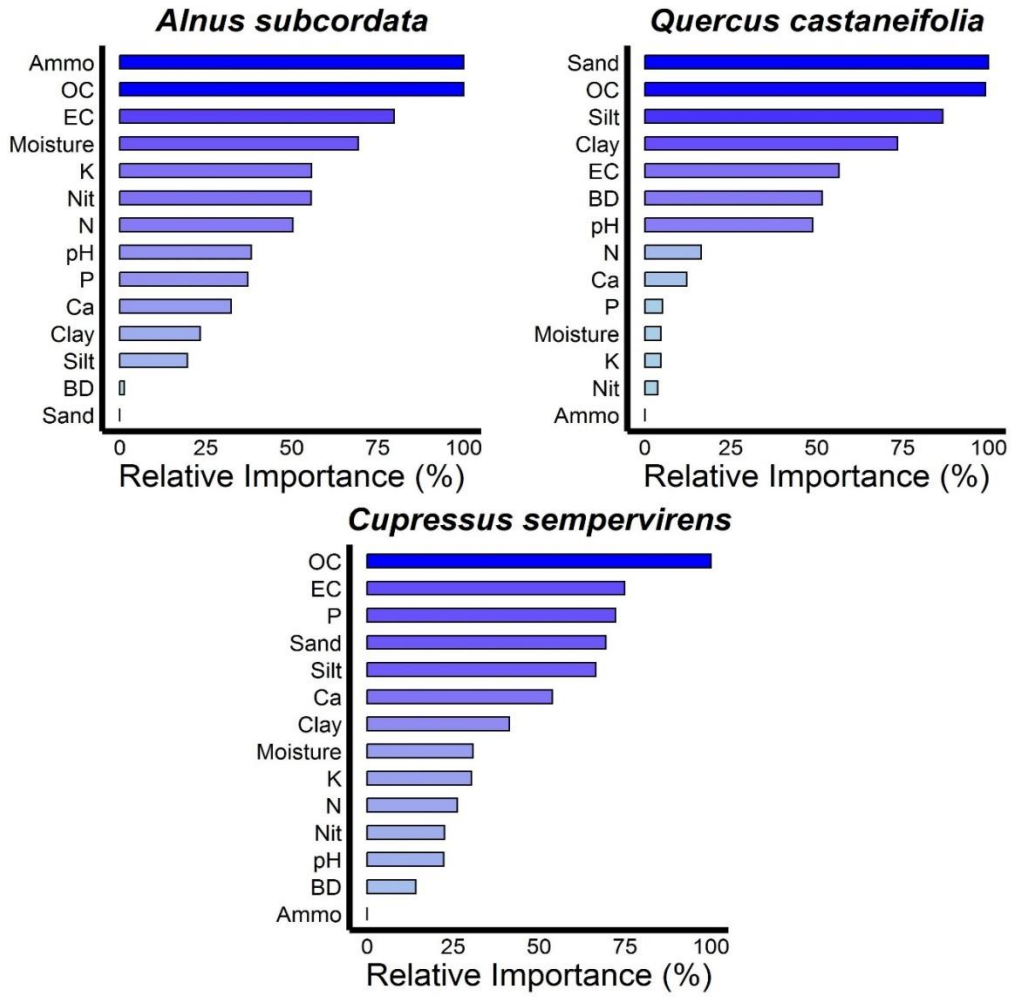



شکل ۲- نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ویژگی‌های خاک در توده‌های بررسی‌شده

Figure 2. Principal component analysis (PCA) results of soil properties in the studied stands

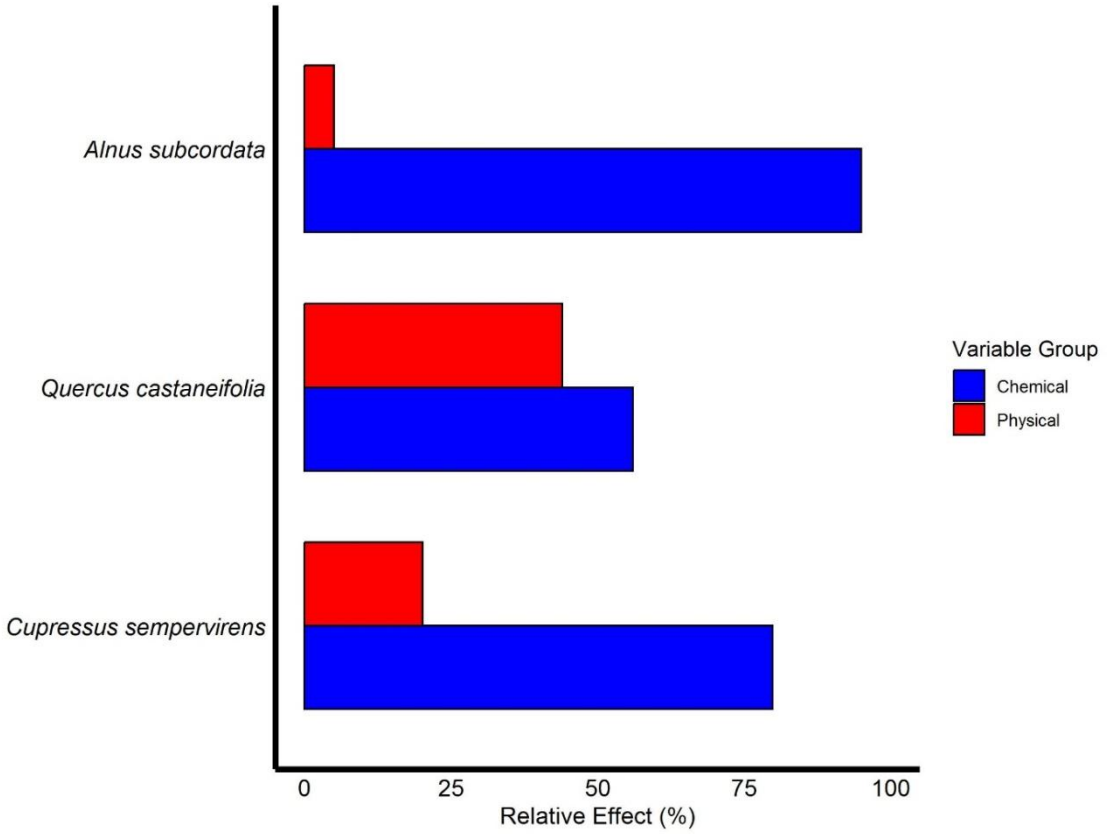
**سهم نسبی متغیرهای فیزیکی و شیمیایی خاک در تبیین تغییرات ذخیرهٔ کربن**

بر اساس تحلیل اهمیت نسبی هر یک از متغیرها با استفاده از PLSR، تفاوت مشخصی میان عوامل مؤثر بر ذخیرهٔ کربن خاک در سه تودهٔ بررسی‌شده مشاهده شد (شکل ۳). در تودهٔ توسکای ییلاقی، بیشترین اهمیت مربوط به متغیرهای آمونیوم، کربن آلی و هدایت الکتریکی بود. درحالی که در تودهٔ بلندمازو، متغیرهای شن، کربن آلی و سیلت بیشترین مقادیر اهمیت نسبی را نشان دادند. همچنین در تودهٔ زربین، متغیرهای کربن آلی، هدایت الکتریکی و فسفر به‌عنوان مهم‌ترین عوامل شناخته شدند. به‌منظور بررسی تأثیر سهم گروه متغیرهای فیزیکی و شیمیایی خاک بر ذخیرهٔ کربن از روش Variance Partitioning استفاده شد. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که هر یک از گروه متغیرها سهم متفاوتی در توضیح واریانس ذخیرهٔ کربن دارد. بر اساس نتایج (شکل ۴)، در تودهٔ توسکای ییلاقی سهم متغیرهای شیمیایی غالب است و حدود ۹۵ درصد از تغییرات ذخیرهٔ کربن را توضیح می‌دهد. در تودهٔ زربین، متغیرهای شیمیایی همچنان اثرگذارترند (۸۰ درصد)، اما نقش متغیرهای فیزیکی نیز شایان توجه است. در تودهٔ بلندمازو، الگوی متفاوتی مشاهده می‌شود؛ به‌طوری که متغیرهای شیمیایی سهم کمی بیشتری (۵۵ درصد) نسبت به متغیرهای فیزیکی (۴۵ درصد) در تبیین ذخیرهٔ کربن دارند.




شکل ۳- اهمیت نسبی متغیرها در تبیین تغییرات ذخیرهٔ کربن خاک در توده‌های بررسی‌شده

Figure 3. Relative importance of variables in explaining changes in soil carbon sequestration in the studied populations




شکل ۴- سهم نسبی متغیرهای فیزیکی و شیمیایی خاک در توضیح واریانس ذخیرهٔ کربن خاک در توده‌های بررسی‌شده

Figure 4. Relative contribution of soil physical and chemical variables in explaining soil carbon sequestration variance in the studied stands

**بحث**

در این پژوهش، پس از اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در توده‌های دست‌کاشت بلندمازو، توسکای ییلاقی و زربین، سهم نسبی تأثیر متغیرهای مدنظر بر ذخیرهٔ کربن خاک ارزیابی شد. نتایج تحلیل واریانس یکطرفهٔ ویژگی‌های فیزیکی خاک نشان داد که رطوبت خاک در تودهٔ توسکای ییلاقی به‌طور معنی‌داری بیش از دو تودهٔ دیگر بود. زیاد بودن رطوبت خاک در تودهٔ توسکای احتمالاً با الگوی توزیع بارش ورودی به خاک نیز مرتبط است. بر اساس نتایج این پژوهش، ویژگی‌های تعیین‌کنندهٔ ظرفیت نگهداری آب در خاک (مانند مادهٔ آلی و درصد رس) میان سه توده تفاوت معنی‌داری نداشت؛ از این‌رو به نظر می‌رسد که این پدیده با ویژگی‌های خاک در این توده مرتبط باشد؛ زیرا خاک زیر تاج‌پوشش توسکای ییلاقی تخلخل بیشتری دارد و چگالی ظاهری آن کمتر است و در نتیجه آب باران راحت‌تر در آن نفوذ می‌کند و در منافذ خاک نگهداری می‌شود. نتایج مربوط به چگالی ظاهری خاک نیز نشان داد که مقدار این مشخصه در تودهٔ زربین بیشتر از توده‌های دیگر است. تفاوت در چگالی ظاهری خاک را می‌توان به میزان ریشه‌زایی، خصوصیات فیزیکی خاک و درصد مادهٔ آلی نسبت داد. به‌طور کلی، خاک توده‌های سوزنی‌برگ به‌دلیل دارا بودن لاشبرگ متراکم‌تر و تجزیهٔ کندتر مواد آلی، به‌طور معمول چگالی ظاهری بیشتری از توده‌های پهن‌برگ دارند. در پژوهش Hojjati et al. (2020) در جنگل آموزشی و پژوهشی دارابکلا نیز مقدار چگالی ظاهری خاک در تودهٔ سوزنی‌برگ کاج بروسیا بیشتر از توده‌های پلت، بلندمازو و ون گزارش شد. در پژوهشی دیگر Nouraei et al. (2021) با مقایسهٔ ویژگی‌های خاک توده‌های بلندمازو و کاج رادیا (*Pinus radiata*) بیان کردند که

چگالی ظاهری در تودهٔ کاج رادیاتا به‌طور معنی‌داری بیشتر از تودهٔ بلندمازو است.

مقایسهٔ ویژگی‌های شیمیایی توده‌های بررسی‌شده نشان داد که خاک زیر تودهٔ بلندمازو اسیدی‌تر از دو تودهٔ توسکای ییلاقی و زربین است، اما ویژگی‌های هدایت الکتریکی، کلسیم، فسفر و پتاسیم در زربین بیشترین مقادیر را داشتند. به‌طورکلی، پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که تغییر ترکیب گونه‌ای در توده‌های جنگلکاری‌شده ممکن است به‌صورت معنی‌داری بر چرخهٔ عناصر غذایی، خصوصیات فیزیکی خاک و در نهایت بر ظرفیت ذخیرهٔ کربن خاک تأثیر بگذارد. Hashemi et al. (2017) در پژوهش خود به مقایسهٔ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در توده‌های دست‌کاشت جنگل آموزشی-پژوهشی دارابکلا پرداختند و بیشترین مقدار pH و کمترین مقدار هدایت الکتریکی را به ترتیب در توده‌های پلت و کاج بروسیا گزارش کردند. (2004) Lemenih et al.در اراضی متروکهٔ اتیوپی نشان دادند که گونهٔ *Cupressus lusitanica* (Mill.) Bartel نسبت به *Eucalyptus saligna* Sm. تأثیرات مثبت بر کیفیت خاک دارد؛ به‌طوری‌که پس از ۱۵ سال، خاک زیر *Cupressus* دارای چگالی ظاهری کمتر و مقادیر بیشتر کربن آلی، نیتروژن کل، کلسیم، پتاسیم، منیزیم و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) بود. در مقابل، خاک زیر *Eucalyptus* کاهش چشمگیری در این عناصر نشان داد. شاخص تخریب خاک نیز (DI=+337 برای *Cupressus* در برابر DI=−198 برای *Eucalyptus*) بیانگر این است که تأثیر گونه‌ها بر خاک نه‌تنها مثبت یا منفی است، بلکه به نوع گونه وابسته است؛ در نتیجه، انتخاب نوع گونه برای جنگلکاری اثر مهمی در بازسازی حاصلخیزی خاک دارد. همچنین، Mehrnoosh et al. (2022) در منطقهٔ بیستون کرمانشاه نشان دادند که خاک‌های زیر تاج‌پوشش درختان سوزنی‌برگ کاج (*Pinus brutia* Ten.) و سرو نقره‌ای (*Cupressus arizonica* Greene) دارای بیشترین پایداری خاکدانه‌ها و کربن آلی هستند، درحالی که خاک زیر پهن‌برگان دارای فسفر و ظرفیت تبادل کاتیونی بیشتری است. هر دو نوع پوشش جنگلی (سوزنی‌برگ و پهن‌برگ) نسبت به اراضی کشاورزی و مرتعی موجب بهبود معنی‌دار ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شدند که این امر به افزایش انباشت لاشبرگ و بهبود فعالیت زیستی خاک نسبت داده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار نیتروژن خاک در تودهٔ توسکای ییلاقی به‌طور معنی‌داری بیشتر از توده‌های زربین و بلندمازو بود. توسکای از درختانی است که با اکتینومیست‌های جنس فرانکیا همزیستی دارد و در نتیجهٔ این همزیستی، غده‌های ریشه‌ای تشکیل و در این غده‌ها نیتروژن مولکولی تثبیت می‌شود. بنابراین با گذشت زمان و وجود گونهٔ تثبیت‌کنندهٔ نیتروژن مقدار این عنصر در خاک افزایش چشمگیری خواهد یافت (Tong et al., 2025; Liu et al., 2020).

تحلیل PCA نشان داد که دو مؤلفهٔ اول در مجموع بیش از نیمی از واریانس کل را تبیین کرده و تفکیک روشنی میان قطعات نمونهٔ توده‌های توسکای ییلاقی، زربین و بلندمازو ایجاد می‌کنند. پراکنش نمونه‌ها در فضای دوبعدی مؤلفه‌ها بیانگر آن است که نقاط مربوط به تودهٔ توسکای ییلاقی اغلب در ربع بالایی سمت چپ متمرکز شده‌اند، جایی که بردارهای مربوط به متغیرهای رطوبت، نیتروژن و آمونیوم نیز قرار دارند. این هم‌جهتی نشان‌دهندهٔ همبستگی مثبت قوی میان حضور توسکای ییلاقی و افزایش رطوبت و نیتروژن خاک است. در مقابل، تودهٔ زربین بیشتر در جهت مثبت مؤلفهٔ اول واقع شد و با متغیرهایی مانند فسفر، پتاسیم، کلسیم، هدایت الکتریکی، کربن آلی و ذخیرهٔ کربن خاک همبستگی قوی نشان داد. این الگو حاکی از غنای بیشتر خاک تودهٔ زربین از نظر عناصر غذایی و ظرفیت بیشتر آن در ذخیره‌سازی کربن است. تودهٔ بلندمازو نیز به‌طور نسبی با متغیرهای بافت خاک شامل رس و سیلت همبسته است که

بیانگر بافت سنگین‌تر و نفوذپذیری کمتر خاک در این توده است.

نتایج پژوهش حاضر که نشان داد ویژگی‌هایی مانند کربن آلی، هدایت الکتریکی، فسفر، بافت خاک (شن و سیلت) و آمونیوم در توده‌های مختلف جنگلی نقش متفاوتی در ذخیرهٔ کربن خاک دارند، با یافته‌های پژوهش‌های پیشین نیز هم‌راستاست. پژوهش Juhos et al. (2021) در یک جنگل اروپای مرکزی نشان داد که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، به‌ویژه ظرفیت تبادل کاتیونی، کلسیم تبادلی و درصد رس، اثر مهمی در پایداری و نگهداشت کربن آلی دارند. این پژوهش تأکید می‌کند که تغییر در ورودی مواد آلی (مانند لاشبرگ) می‌تواند بر اسیدیته، پایداری خاکدانه‌ها و چگالی ظاهری تأثیر بگذارد و در نهایت ظرفیت خاک برای ذخیرهٔ کربن را تغییر دهد. بنابراین اهمیت متغیرهایی مانند هدایت الکتریکی و مواد آلی در پژوهش حاضر، می‌تواند بازتابی از همین فرایندهای تبادل یونی و پایداری کلوئیدی باشد. از سوی دیگر، Wiesmeier et al. (2013) با بررسی جنگل‌های جنوب شرقی آلمان گزارش کردند که اقلیم و بافت خاک از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کنندهٔ ذخیرهٔ کربن هستند. Alidoust et al. (2018) نیز در منطقه‌ای نیمه‌خشک از ایران گزارش کردند که عوامل فیزیکی خاک از جمله چگالی ظاهری، درصد رس، شن و پایداری خاکدانه‌ها و نیز ارتفاع از سطح دریا از عوامل اصلی کنترل‌کنندهٔ ذخیرهٔ کربن هستند. یافته‌های آنها نشان داد که خاک‌های دارای درصد رس بیشتر و چگالی ظاهری کمتر، ظرفیت بیشتری برای نگهداشت کربن دارند. همخوانی نتایج حاضر با این یافته‌ها، بیانگر آن است که تغییر ساختار فیزیکی خاک از طریق بافت (شن و سیلت) می‌تواند به‌طور مستقیم بر پویایی و پایداری کربن آلی اثر بگذارد.

با استفاده از روش Variance Partitioning مشخص شد که سازوکار کنترل‌کنندهٔ ذخیرهٔ کربن در هر گونه متفاوت است. این تفاوت‌ها نه‌تنها به ویژگی‌های ذاتی گونه‌های گیاهی مربوط می‌شود، بلکه تحت تأثیر تعاملات پیچیده بین ویژگی‌های خاک و فرایندهای بیولوژیکی قرار دارد. در تودهٔ توسکای ییلاقی، سهم متغیرهای شیمیایی خاک به‌طور چشمگیری غالب است و حدود ۹۵ درصد از تغییرات ذخیرهٔ کربن را توضیح می‌دهد. این الگو اغلب به‌دلیل توان زیاد توسکا در تثبیت نیتروژن اتمسفری است که موجب افزایش نیتروژن کل و آمونیوم خاک می‌شود (Perakis & Pett-Ridge, 2019) و با بهبود رشد گیاهی و فعالیت میکروبی، ورودی مواد آلی و در نتیجهٔ ذخیرهٔ کربن را افزایش می‌دهد (Heslop et al., 2021; Soronen et al., 2025). همچنین رطوبت بیشتر خاک در این توده نسبت به دو تودهٔ دیگر می‌تواند با تقویت فرایندهای شیمیایی و حفظ کربن آلی، نقش تکمیلی داشته باشد.

در تودهٔ زربین، متغیرهای شیمیایی همچنان اثرگذارترند (۸۰ درصد)، اما نقش متغیرهای فیزیکی نیز شایان توجه است. چگالی ظاهری بیشتر با فشردگی خاک و کاهش نفوذپذیری همراه است و می‌تواند با کند کردن تجزیهٔ مواد آلی به حفظ کربن کمک کند. از سوی دیگر، سطوح بالاتر کلسیم، فسفر و پتاسیم نشان‌دهندهٔ غنی‌سازی شیمیایی خاک است که با بهبود رشد ریشه و افزایش ورودی بقایای گیاهی، ذخیرهٔ کربن را تقویت می‌کند. هدایت الکتریکی بیشتر نیز می‌تواند فرایندهای شیمیایی مرتبط با پایداری کربن را تسهیل کند. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که تعادل میان ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، به‌ویژه در خاک‌های به‌نسبت فشردهٔ زربین، می‌تواند ذخیرهٔ کربن را افزایش دهد، حتی اگر تفاوت آن با بقیهٔ توده‌ها معنی‌دار نباشد (Badeiyan et al., 2016). در تودهٔ بلندمازو، سهم متغیرهای فیزیکی کمی بیشتر بود (۵۶ درصد). pH اسیدی‌تر در این توده ممکن است فعالیت میکروبی و تجزیهٔ مواد آلی را محدود کند و به همین دلیل، تأثیر عوامل شیمیایی کاهش می‌یابد و وابستگی به ویژگی‌های فیزیکی

بیشتر می‌شود. با وجود مشابهت بافت خاک بین توده‌ها، در بلندمازو ساختار فیزیکی خاک اثر جبرانی مهمی در حفظ کربن دارد. پژوهش‌ها در جنگل‌های بلوط نیز نشان می‌دهد که pH کم با کاهش دسترسی به مواد مغذی، تجزیه را کند می‌کند و پایداری کربن را افزایش می‌دهد، هرچند این اثر به وضعیت فیزیکی خاک وابسته است (Cortijos-López et al., 2023). همچنین کمتر بودن نیترات در این توده ممکن است بیانگر محدودیت نیتروژن و کاهش سهم عوامل شیمیایی باشد.

یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج پژوهش‌های پیشین همسو است. Wang et al. (2024) در پژوهشی در مقیاس ملی در چین با استفاده از مدل یادگیری ماشین TPE-XGBoost و تحلیل SHAP نشان دادند که متغیرهایی مانند دما و pH خاک از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تغییرات کربن آلی خاک در کاربری‌های مختلف هستند. همچنین سهم متغیرهای خاکی در توضیح تغییرات کربن آلی (تا عمق ۲۰۰ سانتی‌متر) زیاد بود. افزون‌بر این، با افزایش عمق خاک، شدت اثر متغیرهای محیطی بر کربن آلی کاهش یافت. همسو با این یافته، Rodríguez-Albarracín et al. (2023) تأکید کردند که نوع و ترکیب مواد معدنی خاک از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کنندهٔ ظرفیت خاک در ذخیره و تثبیت کربن است. از سوی دیگر Iranmanesh & Sadeghi (2019) در شرایط خشک ایران نشان دادند که ویژگی‌های فیزیکی خاک، به‌ویژه درصد رس، از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ذخیرهٔ کربن هستند. آنها گزارش کردند که در خاک‌های دارای درصد بیشتر رس، ذخیرهٔ کربن به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد؛ در خاک‌هایی که مقدار ذرات رس بیشتر است، به‌دلیل سطح ویژهٔ بالا و پیوندهای قوی‌تر میان این ذرات و ترکیبات آلی، پایداری مواد آلی افزایش می‌یابد و فرایند تجزیهٔ آنها کندتر می‌شود. چنین وضعیتی در نهایت موجب افزایش ذخیرهٔ کربن در خاک‌های دارای بافت سنگین‌تر می‌شود. نتایج پژوهش Nobakht et al. (2011) نیز این موضوع را تأیید کرده و نشان داده است که بر اساس تحلیل رگرسیون گام‌به‌گام، متغیرهای نیتروژن و نسبت کربن به نیتروژن از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر مقدار کربن آلی خاک در توده‌های جنگلکاری شمال ایران محسوب می‌شوند.

## نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که نوع گونهٔ جنگلکاری‌شده ممکن است از راه تغییر در ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک، مسیرهای متفاوتی را در پایداری و ذخیرهٔ کربن خاک رقم بزنند. به‌طور کلی، در توده‌های توسکای ییلاقی (۹۵ درصد) و زربین (۸۰ درصد)، عوامل شیمیایی خاک تأثیر بیشتری داشتند؛ درحالی که در تودهٔ بلندمازو اثرگذاری ویژگی‌های فیزیکی خاک (۵۶ درصد) محسوس‌تر بود. این تفاوت بیانگر آن است که فرایندهایی مانند تثبیت نیتروژن، انباشت عناصر غذایی، بافت خاک و چگالی ظاهری می‌توانند به‌صورت متمایز بر پویایی کربن تأثیر بگذارند. بر این اساس، انتخاب گونه‌های مناسب جنگلکاری، تأثیر مهمی در مدیریت کربن خاک و بهبود کارکردهای اکوسیستم خواهد داشت. با توجه به نتایج، فرضیهٔ اول که پیش‌بینی می‌کرد گونه‌های مختلف الگوهای متفاوتی از ذخیره و پایداری کربن ایجاد کنند، به‌دلیل نبود اختلاف معنی‌دار بین توده‌ها در مقدار ذخیرهٔ کربن رد شد، اما فرضیهٔ دوم مبنی بر تأثیر بیشتر ویژگی‌های شیمیایی خاک نسبت به ویژگی‌های فیزیکی، به‌ویژه در توده‌های توسکا و زربین تأیید شد. بر این اساس، انتخاب گونه‌های مناسب جنگلکاری می‌تواند اثر مهمی در مدیریت کربن خاک و بهبود کارکردهای اکوسیستم داشته باشد. با این‌حال، برای دستیابی به درک جامع‌تر از سازوکارهای ذخیرهٔ کربن پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های آینده متغیرهای زیستی خاک مانند زی‌تودهٔ میکروبی، فعالیت آنزیمی و ویژگی‌های ریشه را نیز در مدل‌ها لحاظ کنند. همچنین بررسی

لایه‌های عمیق‌تر خاک، ترکیب‌های آمیخته و پایش زمانی، می‌تواند به تبیین دقیق‌تر فرایندهای کنترل‌کنندهٔ پایداری کربن در جنگل‌های هیرکانی کمک کند.

**سپاسگزاری**

نگارندگان از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به‌دلیل حمایت مالی از اجرای این پژوهش صمیمانه قدردانی می‌کنند.

**References**

Alidoust, E., Afyuni, M., Hajabbasi, M.A., & Mosaddeghi, M.R. (2018). Soil carbon sequestration potential as affected by soil physical and climatic factors under different land uses in a semiarid region. *Catena*, *171*, 62-71. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.07.005

Asadi, H., Jalilvand, H., & Moslemi Seyed Mahalleh, S.M. (2021). Classification of plant communities and their relationship with physiographic factors in the Darabkola Forest of Mazandaran Province. *Iranian Journal of Applied Ecology, 10*(3), 17-33. http://dx.doi.org/10.47176/ijae.10.3.13521 (In Persian)

Asghari Aghozgaleh, K., Jalilvand, H., & Asadi, H. (2023). Effect of forest restoration with broad-leaved and coniferous species on soil properties and carbon storage: A case study of Kolet Forest. *Environmental Sciences, 21*(4). (In Persian)

Badeiyan, Z., Ziaoddin, M., Mansouri, F., Fosahat, S., Fakhari, M., & Hosseini, S. (2016). Investigation of soil carbon sequestration in different afforested and natural forest types (Case study: Chamestan forestry plan, Mazandaran). *Journal of Forest and Wood Products, 69*(3), 523–534. (In Persian)

Cortijos-López, M., Sanchez-Navarrete, P., Lasanta, T., & Nadal-Romero, E. (2023). How do acid or alkaline soil environments affect soil organic carbon stocks in a post-abandonment secondary succession process in Mediterranean mountain areas?. Catena, *232*, 107384. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107384

Das, S., Beegum, S., Acharya, B.S., & Panday, D. (2025). Soil Carbon Sequestration: A Mechanistic Perspective on Limitations and Future Possibilities. *Sustainability*, *17*(13), 6015. https://doi.org/10.3390/su17136015

Gerke, J. (2022). The central role of soil organic matter in soil fertility and carbon storage. *Soil Systems*, *6*(2), 33. https://doi.org/10.3390/soilsystems6020033

Ghimirey, V., Chaurasia, J., & Acharya, N. (2025). Understanding soil carbon sequestration: mechanistic insights, management approaches, and future challenges. *Discover Soil*, *2*(1), 101. https://doi.org/10.1007/s44378-025-00133-5

Gren, I.M., & Aklilu, A.Z. (2016). Policy design for forest carbon sequestration: A review of theliterature. *Forest Policy and Economics, 70,* 128–136. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2016.06.008

Hashemi, S.A., Hojjati, S.M., Hoseiny Nasr, S.M., Asadyan, M., & Tafazoli, M. (2017). Studying soil

physical, chemical and net Nitrogen mineralization in plantation and natural stands in Darabkola Forest (Sari). *Forest Research and Development*, *3*(2), 119-132. (In persian)

Heslop, C.B., Ruess, R.W., Kielland, K., & Bret-Harte, M.S. (2021). Soil enzymes illustrate the effects of alder nitrogen fixation on soil carbon processes in arctic and boreal ecosystems. *Ecosphere*, *12*(11), e03818. https://doi.org/10.1002/ecs2.3818

Hojjati, S.M., Hashemi, S.A., Hosseyni, S.M., Asadiyan, M., & Tafazoli, M. (2020). The Effect of plantation with native and exotic species on soil CO2 emissions (The case study: Darabkola forest). *Journal of Plant Ecosystem Conservation*, *8*(16), 95-110. (In Persian)

Huluka, G., & Miller, R. (2014). Particle size determination by hydrometer method. *Southern Cooperative Series Bulletin, 419*, 180-184.

Iranmanesh, M., & Sadeghi, H. (2019). Effects of soil texture and nitrogen on ability of carbon sequestration in different organs of two *Tamarix* species as a good choice for carbon stock in dry lands. *Ecological Engineering*, *139*, 105577. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.08.007

Jafari Haghighi, M. (2003). Methods of soil analysis. Nedaye Zoha Publications, 236p. (In Persian)

Juhos, K., Madarász, B., Kotroczó, Z., Béni, Á., Makádi, M., & Fekete, I. (2021). Carbon sequestration of forest soils is reflected by changes in physicochemical soil indicators─ A comprehensive discussion of a long-term experiment on a detritus manipulation. *Geoderma*, *385*, 114918. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114918

Kooch, Y., Hosseini, S.M., Zaccone, C., Jalilvand, H., & Hojjati, S.M. (2012). Soil organic carbon sequestration as affected by afforestation: the Darab Kola forest (North of Iran) case study. *Journal of Environmental Monitoring*, *14*(9), 2438-2446. https://doi.org/10.1039/c2em30410d

Kuhn, M. (2008). Building predictive models in R using the caret package. *Journal of statistical software*, *28*, 1-26. https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05

Lai, J., Zou, Y., Zhang, J., & Peres-Neto, P.R. (2022). Generalizing hierarchical and variation partitioning in multiple regression and canonical analyses using the rdacca. hp R package. *Methods in Ecology and Evolution*, *13*(4), 782-788. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13800

Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: an R package for multivariate analysis. *Journal of statistical software*, *25*, 1-18. https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01

Legg, S. (2021). IPCC, 2021: Climate change 2021—the physical science basis. *Interaction, 49*(4), 44–45.

Lemenih, M., Gidyelew, T., & Teketay, D. (2004). Effects of canopy cover and understory environment of tree plantations on richness, density and size of colonizing woody species in southern Ethiopia. *Forest Ecology and Management*, *194*(1-3), 1-10. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.050

Liu, Y., & Zhao, L. (2020). Effect of plant morphological traits on throughfall, soil moisture, and runoff. *Water, 12*(6), 1731. https://doi.org/10.3390/w12061731

Mehrnoosh, S., Beheshti Ale Agha, A., Rakhsh, F., Pourreza, M., & Safari Sinegani, A.A. (2022). Comparison of soil biological activity in forest with coniferous and broadleaf trees in Biston region of Kermanshah. *Water and Soil, 36*(5), 593-610. https://doi.org/10.22067/JSW.2022.78164.1189

Montgomery, D.C. (2012). Design and Analysis of Experiments. 8th Edition, John Wiley & Sons, New York.

Yaghoubi sis, Y., Moshki, A., Asadiyan, M., & Mollashahi, M. (2025). Soil Physico-Chemical Properties and Below-Ground Carbon Storage: Insights from Natural Versus Plantation Forests in Northern Iran. *Ecopersia*, *13*(3), 253-265. https://doi.org/10.22034/ECOPERSIA.13.3.253

Naderi, K., Moghaddasi, M., & Shokri, A. (2022). Drought occurrence probability analysis using multivariate standardized drought index and copula function under climate change. *Water Resources Management, 36*(8), 2865-2888.

Nobakht, A., Pourmajidian, M.R., Hojjati, S.M., & Fallah, A. (2011). Comparison of soil carbon sequestration in pure coniferous and broadleaf afforestation (case study: Damiyan afforestation project, Mazandaran). *Journal of Iranian Forestry, 3*(1), 13–23. (In Persian)

Nouraei, A.S., Jalilvand, H., Hojjati, S.M., & Alavi, S.J. (2021). Variability of soil quality characteristics in oak (*Quercus castaneifolia*) and Monterrey pine (Pinus radiata) plantations. *Iranian Journal of Soil Research, 35*(1), 27–40. https://doi.org/10.22092/ijsr.2021.351345.541. (In Persian)

Osabohien, R., Matthew, O.A., Aderounmu, B., & Olawande, T. (2019). Greenhouse gas emissions and crop production in West Africa: Examining the mitigating potential of social protection. *International Journal of Energy Economics and Policy, 9*(1), 57-66.

Pan, Y., Birdsey, R. A., Phillips, O. L., Houghton, R. A., Fang, J., Kauppi, P. E., Keith, H., Kurz, W. A., Ito, A., Lewis, S. L., Nabuurs, G.-J., Shvidenko, A., Hashimoto, S., Lerink, B., Schepaschenko, D., Castanho, A., & Murdiyarso, D. (2024). The enduring world forest carbon sink. *Nature, 631*, 563–569. https://doi.org/10.1038/s41586-024-07618-6

Patou, M., Hamedi Ghazi, A., Peyman, M., Moradi, S., & Sohrab, M. (2025). Evaluation of stem carbon storage and volumetric growth of *Populus nigra* L. in West Azerbaijan Province. *Iranian Journal of Forests*, e229490. (In Persian)

Perakis, S.S., & Pett-Ridge, J.C. (2019). Nitrogen-fixing red alder trees tap rock-derived nutrients. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 116*(11), 5009-5014. https://doi.org/10.1073/pnas.1814782116

Piper, C. S. (2019). *Soil and plant analysis*. Scientific Publishers, India

Rodríguez-Albarracín, H. S., Demattê, J. A. M., Rosin, N. A., Contreras, A. E. D., Silvero, N. E. Q., Cerri, C. E. P., Mendes, W. S., & Tayebi, M. (2023). Potential of soil minerals to sequester soil organic carbon. *Geoderma, 436,* 116549. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116549

Sheikh, M.A., Kumar, M., & Bussmann, R.W. (2009). Altitudinal variation in soil organic carbon stock in coniferous subtropical and broadleaf temperate forests in Garhwal Himalaya. *Carbon balance and management, 4*(1), 6. https://doi.org/10.1186/1750-0680-4-6

Smith, P., House, J. I., Bustamante, M., Sobocká, J., Harper, R., Pan, G., West, P. C., Clark, J. M., Adhya, T., Rumpel, C., Paustian, K., Kuikman, P., Cotrufo, M. F., Elliott, J. A., McDowell, R., Griffiths, R. I., Asakawa, S., Bondeau, A., Jain, A. K., Meersmans, J., & Pugh, T. A. M. (2016). Global change pressures on soils from land use and management. *Global change biology, 22*(3), 1008-1028. https://doi.org/10.1111/gcb.13068

Soronen, P., Jämtgård, S., Myllymäki, M., & Smolander, A. (2025). Soil carbon and nitrogen near alder, birch and spruce trees in four mixed Norway spruce-dominated stands. *Forest Ecology and Management, 598,* p.123224. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.123224

Suwethaasri, D., Aiswaryalakshmi, A. R., Krishnamoorthi, S., Bargavi, S., Kabinesh, V., Vijayabhama, M., Hemalatha, P., Ragunath, K. P., Kalpana, M., Tilak, M., Ravi, R., & Baranidharan, K. (2025). Assessing the impact of climate change on forest biomass and carbon sequestration in India: A systematic review. *Plant Science Today*, 12(3):1-12. https://doi.org/10.14719/pst.8115

Tadiello, T., Perego, A., Valkama, E., Schillaci, C., & Acutis, M. (2022). Computation of total soil organic carbon stock and its standard deviation from layered soils. *MethodsX, 9,* 101662. https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101662

Tong, A., Liu, W., Liu, X., Zhu, J., Zhou, Y., & Li, J. (2025). Comparative analysis of actinorhizal nodule and associated soil microorganism diversity and structure in three *Alnus* species. *Frontiers in Plant Science, 16,* 1572494. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1572494

Usman, J., & Begum, S. (2023). SOC stocks prediction on the basis of spatial and temporal variation in soil properties by using partial least square regression. *Scientific Reports*, *13*(1), p.7949. https://doi.org/10.1038/s41598-023-34607-9

Wang, Z., Zhang, H., Wang, S., Cheng, J., Wang, C., Zhou, G., Zhang, S., & Chen, L. (2024). A machine learning method based on TPE-XGBoost model for TRIP/TWIP near-β titanium alloy design. Materials Today Communications, 41, 110309. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110309

Wiesmeier, M., Prietzel, J., Barthold, F., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Reischl, A., Schilling, B., von Lützow, M., & Kögel-Knabner, I. (2013). Storage and drivers of organic carbon in forest soils of southeast Germany (Bavaria)–Implications for carbon sequestration. *Forest ecology and management*, *295*, 162-172. https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.05.012

Xu, K., Zou, G., & Hu, H. (2025). Forest carbon sequestration functions and mitigation strategies for global climate change. In *Forest Science-Advances towards Sustainable Development and Climate Resilience*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.1009089

(Zhang, J., Wang, F., Yang, J., Zhang, Y., Qiu, L., Chen, Z., Wang, X., Zhang, T., Li, S., Tong, J., Lu, S., & Zhang, Y. 2025). Effects of tree species on soil organic carbon mineralization. *Forests, 16*(7), 1145. https://doi.org/10.3390/f16071145

Iranian Journal of Forest
Vol. 18, No. 2, Summer 2026
pp. 183-199
***Research Article***

DOI: 10.22034/ijf.2025.556563.2082
CC BY 4.0

# Relative Contribution of Soil Properties to Soil Carbon Storage in Plantation Stands of Eastern Hyrcanian Forests

**T. Khoshtinat[1], S.M. Hojjati [2&3*], H. Asadi[4], and M. Tafazoli[4]**

[1]M.S. of Silviculture and Forest Ecology, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, I. R. Iran.
[2]Prof., Dept. of Forest Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, I. R. Iran.
[3]Visiting researcher, Silviculture and Forest Ecology of the Temperate Zones, University of Göttingen, Büsgenweg 1, Göttingen 37077, Germany.
[4]Assistant Prof., Dept. of Forest Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, I. R. Iran.

(Received: 3 November 2025; Accepted: 13 December 2025)

## Abstract

**Introduction:** Forest soils are among the most important carbon reservoirs in terrestrial ecosystems, and their carbon storage is influenced by soil physical and chemical properties as well as tree species composition. In planted forests, where stand structure and function are influenced by species selection and management practices, soil carbon dynamics may differ from those in natural forests. Different tree species influence soil carbon dynamics through variations in litter production, root quality, nutrient cycling, and ecophysiological processes. Understanding these differences is important for species-based management and improving soil carbon storage. This study aimed to analyze the relative contributions of physical and chemical soil properties to soil carbon sequestration in stands of Caucasian alder (*Alnus subcordata* C.A.Mey.), chestnut-leaved oak (*Quercus castaneifolia* C.A.Mey.), and Mediterranean cypress (*Cupressus sempervirens* L.) in the Darabkola educational–research forest, Mazandaran Province, northern Iran.

**Materials and Methods:** In each stand, ten 20 × 20 m plots were established using a systematic random sampling design. Soil samples were collected from a depth of 0–20 cm. Physical soil properties included moisture content, texture, and bulk density, while chemical soil properties included pH, electrical conductivity (EC), organic carbon, total nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, nitrate, and ammonium. Soil carbon sequestration was calculated based on soil organic carbon content, bulk density, and sampling depth. The data were analyzed using analysis of variance (ANOVA), principal component analysis (PCA), variance partitioning with the *rdacca.hp* package, and partial least squares regression (PLSR) in R.

**Results:** The results revealed significant differences in several soil properties among the three forest stands. Soil moisture was significantly higher in the *A. subcordata* stand (mean: 42.47%) than in the other two stands, whereas bulk density was highest in the *C. sempervirens* stand (1.87 g $cm^{-3}$). Regarding chemical properties, the soil in the cypress stand had higher phosphorus (10.42 mg $kg^{-1}$), potassium (608.7 mg $kg^{-1}$), and calcium levels, whereas total nitrogen and ammonium concentrations were highest in the Caucasian alder stand. Soil organic carbon (SOC) content ranged from 3.47% to 3.88%, with no significant differences among stands, while soil carbon sequestration estimates ranged from 57.07 to 72.27 t $ha^{-1}$. The first four principal components explained 73.88% of the total variance. The first principal component (PC1) was strongly associated with phosphorus, potassium, EC, and SOC, whereas the second component (PC2) was associated with soil moisture, nitrogen, and ammonium. Variance partitioning indicated that chemical variables accounted for approximately 95% of the explained variation in soil carbon sequestration in the *A. subcordata* stand. In the *C. sempervirens* stand, chemical variables accounted for 80% of the variation, although physical properties also contributed. In contrast, the *Q. castaneifolia* stand exhibited a different pattern, with physical variables accounting for a slightly greater proportion (56%) of the variation in soil carbon sequestration than chemical variables. PLSR identified ammonium, SOC, and EC as the most influential variables in the *A. subcordata* stand; sand, SOC, and silt in the *Q. castaneifolia* stand; and SOC, EC, and phosphorus in the *C. sempervirens* stand.

**Conclusion:** The findings highlight differences in the relative contributions of soil physical and chemical properties to soil carbon sequestration among the three planted forest stands. Soil properties, including ammonium, SOC, EC, and soil texture, were among the variables most strongly associated with variation in carbon sequestration, although their relative importance differed among stands. These findings further suggest that planted tree species may influence soil carbon storage through their associations with soil properties. Considering species-specific soil characteristics in forest management, alongside further research on biological processes, mixed-species stands, deeper soil layers, and temporal changes, may help improve understanding of soil carbon dynamics and support strategies to enhance soil carbon storage in the Hyrcanian forests.

**Keywords:** Climate change, Forest soil carbon dynamics, Soil physical and chemical properties, Variance partitioning.

*Corresponding author Tel: +98 1133885411 Email: s_m_hodjati@yahoo.com