



تغییرات ذخیره کربن خاک برحسب سن در توده‌های جنگلکاری شده افرا پلت (*Acer velutinum*) (Boiss.) (مطالعه موردی: جنگل‌های نکا- ظالمرود)

مهدی سعیدی^۱، سیدمحمد حجتی^{۲*} و اصغر فلاح^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.

^۲ استاد، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.

^۳ استاد، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۳)

چکیده

تغییرپذیری خصوصیات خاک با گذشت زمان در توده‌های جنگلکاری به‌منظور تعیین محدوده سنی بهینه برای اهداف مختلف مدیریتی از جمله موضوعات پژوهشی است که در ایران کمتر به آن توجه شده است. در این پژوهش تغییرات ذخیره کربن خاک برحسب سن در توده‌های جنگلکاری شده افرا پلت در جنگل‌های نکا-ظالمرود بررسی شد. سه سن توده ۲۰-۱۰، ۳۰-۲۰ و ۴۰-۳۰ سال در منطقه انتخاب و برای آماربرداری از قطعات نمونه ۲۰×۲۰ متر با استفاده از روش منظم-تصادفی با ابعاد شبکه ۵۰×۵۰ متر استفاده شد. سپس پنج نمونه خاک (در مرکز و چهار گوش قطعه نمونه) از خاک سطحی (۱۵-۰ سانتی‌متری) با استفاده از استوانه فلزی در سه قطعه نمونه در هر طبقه سنی برداشت شد. نتایج نشان داد که از بین مشخصه‌های فیزیکی بیشترین مقدار رطوبت خاک (۳۷/۳۳ درصد) متعلق به سن توده ۴۰-۳۰ ساله و بیشترین مقدار جرم مخصوص ظاهری (۲/۱۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) متعلق به سن توده ۲۰-۱۰ ساله است. بررسی ویژگی‌های شیمیایی خاک نشان داد که به‌جز واکنش خاک و هدایت الکتریکی، بقیه مشخصه‌ها تحت تأثیر سن توده‌ها اختلاف معنی‌داری دارند. بیشترین فسفر قابل جذب، نیتروژن کل و کربن آلی به‌ترتیب با ۷/۸۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم، ۰/۳۵ و ۶/۱ درصد در توده ۳۰-۴۰ ساله و بیشترین پتاسیم قابل جذب با ۶۳۸/۹۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم در توده ۲۰-۱۰ ساله مشاهده شد. نتایج بررسی ترسیب کربن نشان داد که توده ۳۰-۴۰ ساله با ۳۰۵/۸۹ تن در هکتار کربن ترسیب‌شده بیشترین توانایی را دارد. بنابراین می‌توان نتایج این پژوهش مبنی بر سن بهینه ذخیره کربن (۳۰-۴۰ سال) برای جنگلکاری افراپلت را برای اهداف مدیریتی مختلف معرفی کرد.

واژه‌های کلیدی: جنگلکاری، خاک جنگل، سن خاک، فیزیک و شیمیایی خاک.

مقدمه

آب‌وهوا، کاهش غلظت دی‌اکسید کربن جو و چرخه جهانی کربن دارند (Schimel et al., 2001; Tei & Sugimoto, 2018; Askari et al., 2021). جنگل‌ها ۳۰/۶ درصد از مساحت زمین را پوشش می‌دهند و نرخ خالص ترسیب کربن سالانه آنها از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۷ معادل یک‌سوم انتشار کربن سوخت‌های فسیلی گزارش شده است (Pan et al., 2011). با گرم شدن

با افزایش جمعیت، سطح جنگل‌ها و مراتع طبیعی روزبه‌روز در حال کاهش و نگرانی در زمینه انتشار گازهای گلخانه‌ای و دی‌اکسید کربن در حال افزایش است (Gao et al., 2022). جنگل‌ها بزرگ‌ترین مخزن کربن بوم‌سازگان‌های زمینی هستند که حدود دوسوم کربن آلی را تثبیت می‌کنند و از این‌رو تأثیر مهمی در

بیشتر و جرم مخصوص ظاهری و pH کمتر در خاک تحت پوشش خود باشند (Turvey, 1996). با گسترش مناطق جنگلکاری شده و افزایش سن توده، ارزیابی ذخایر کربن در رابطه با زمان کاشت به منظور حمایت از اجرای سیاست‌های حفاظت از جنگل‌های طبیعی و جنگلکاری ضرورت دارد (Zeng et al., 2014; Dang et al., 2014; Liang et al., 2022). از طرفی استفاده از شاخص‌های زیست‌محیطی برای تخمین ذخیره کربن در منطقه و زمان خاص در مدیریت محیط زیست بسیار مهم است (Lin et al., 2022). بسیاری از ویژگی‌های خاک مثل pH خاک، جرم مخصوص ظاهری، غلظت کربن و نیتروژن که تغییرات آنها ممکن است تأثیر زیادی بر رشد درخت داشته باشد، شاخص‌های مهم حاصلخیزی خاک محسوب می‌شوند (Liao et al., 2012).

در پژوهش‌های فراوانی گزارش شده است که مقدار کربن آلی خاک در توده‌های مسن بیشتر از توده‌های جوان است و با افزایش سن نرخ ذخیره موجودی کربن نیز افزایش می‌یابد (Puttaso et al., 2016; Zhang et al., 2019; Alazmani et al., 2021). در پژوهشی اثر سن توده بر ترسیب کربن خاک در دو توده جنگلکاری ۲۵ و ۳۵ ساله افرا پلت در جنگل دارابکلا بررسی شد و نتایج نشان داد که سن جنگلکاری اثر معنی‌داری بر ویژگی فیزیکی خاک شامل درصد رطوبت، جرم مخصوص ظاهری و بافت خاک ندارد (Hojjati et al., 2023). در پژوهشی گزارش شد که ۸۰ درصد تجمع کربن در جنگلکاری کاج رادیاتا (*Pinus radiata* D. Don) در زیتوده و مقادیر جزئی در لایه بستر جنگل و کمتر از آن در افق معدنی سطحی خاک به وقوع پیوسته است، به طوری که با گذشت زمان نرخ تجمع کربن در خاک کمتر از نرخ تجمع آن در زیتوده روی زمینی است (Richter et al., 1995). در پژوهشی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در توده‌های دست‌کاشت آکاسیا (*Acacia Mangium* Willd.) با سنین مختلف بررسی

زمین به منزله نوعی چالش بزرگ زیست‌محیطی، جنگلکاری گسترده راهبرد کارآمدی برای جذب دی‌اکسید کربن از جو زمین در نظر گرفته شده است (Krause et al., 2018; Naghdi et al., 2021). در مقیاس جهانی، مساحت جنگلکاری به میزان چهار میلیون هکتار در سال طی دهه‌های اخیر افزایش یافته است، به طوری که تا سال ۲۰۱۵، مساحت جنگلکاری جهانی به ۲۹۳ میلیون هکتار رسید (FAO, 2017). جنگلکاری با تغییر پوشش زمین، ورودی کربن و انتقال آن و در نتیجه ترسیب کربن بر پویایی بوم‌سازگان تأثیر می‌گذارد (Laganier et al., 2010; Li et al., 2012). گزارش شده که جنگلکاری ترسیب کربن را بهبود می‌بخشد (Han et al., 2017)، اما شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد ترسیب کربن خاک در بین گونه‌های درختی مختلف و سنین مختلف جنگلکاری متفاوت است (Zeng et al., 2014). گونه‌های درختی مختلف احتمالاً با ویژگی‌های مختلف برگ، ظرفیت‌های فتوسنتزی و کیفیت لاشبرگ بر مقدار کربن تأثیر می‌گذارند (Laganier et al., 2010; Li et al., 2012). بر اساس گزارش‌ها، درختان پهن‌برگ به افزایش ترسیب کربن خاک تمایل دارند (Laganier et al., 2010). کنوانسیون چارچوب سازمان ملل متحد در مورد تغییر آب‌وهوا، جنگلکاری را گزینه‌ای مهم در کاهش گازهای گلخانه‌ای و همچنین حفظ و افزایش ذخایر کربن زمینی بیان کرده است (Updegraff et al., 2004). درختان با توجه به رشد سریع و سازگاری زیاد، توانایی زیادی در ترسیب کربن و کاهش دی‌اکسید کربن اتمسفر دارند (Chauhan et al., 2010; Gera, 2012). سن توده عاملی حیاتی در بررسی ذخایر کربن در جنگلکاری‌ها در نظر گرفته می‌شود. سن همچنین تأثیر مهمی در توزیع زیتوده و کربن بوم‌سازگان دارد. برای مثال، نسبت زیتوده تنه به زیتوده روی زمینی یا کل درخت با افزایش سن توده افزایش می‌یابد (Zhang et al., 2019). انتظار می‌رود که توده‌های جنگلی قدیمی‌تر در مقایسه با توده‌های جوان، دارای کربن

مستقیم دارد. از یافته‌های این پژوهش می‌توان برای تشخیص مقدار تجمع کربن خاک با هدف حفاظت خاک و محیط زیست استفاده کرد.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

منطقه پژوهش عرصه جنگل‌های طرح جنگلداری نکا- ظالمروود است. این منطقه در محدوده $19^{\circ}06'$ تا 53° تا $53^{\circ}42'59''$ طول شرقی و $36^{\circ}21'55''$ تا $36^{\circ}37'38''$ عرض شمالی و در حوضه رودخانه نکا- ظالمروود قرار دارد. محدوده ارتفاعی منطقه ۵۰ تا ۱۸۰۰ متر از سطح دریاست. براساس اطلاعات ایستگاه سینوپتیک شهرستان نکا- مازندران میانگین بارندگی سالیانه $661/3$ میلی‌متر و کمینه و بیشینه دمای منطقه به ترتیب ۷ و 39 درجه سانتی‌گراد است (سازمان هواشناسی کشور). حداقل و حداکثر ارتفاع از سطح دریا به ترتیب ۸۶۰ تا ۱۷۸۵ متر است. شیب عمومی منطقه بین ۰ تا ۳۰ درصد و جهت جغرافیایی عمومی منطقه دامنه شمال و شمال غربی است. تیپ خاک منطقه شامل قهوه‌ای جنگل، قهوه‌ای شسته شده و قهوه‌ای پسدوگلی و سنگ شکل (۱) موقعیت منطقه پژوهش را نشان می‌دهد.

شیوه اجرای پژوهش

ورودی منطقه طرح در فاصله ۱۷ کیلومتری شهرستان نکا در استان مازندران واقع شده است. برای بررسی وضعیت درختان در منطقه از روش آماربرداری صددرصدی استفاده شد و پارامترهای کمی قطر تنه با استفاده از کالیبر برحسب میلی‌متر، قطر بزرگ و کوچک تاج با استفاده از متر نواری برحسب متر و درصد شاخه‌دوانی و ارتفاع تاج با استفاده از شیب‌سنج سونتو و متر نواری برحسب متر اندازه‌گیری شد. برای بررسی تأثیر سن بر مقدار ترسیب کربن، گونه افرا که دارای سطوح جنگلکاری شده در همه طبقات سنی طرح جنگلداری نکا- ظالمروود بود بررسی شد. پس از پیمایش جنگل، سه توده یک هکتاری برای این

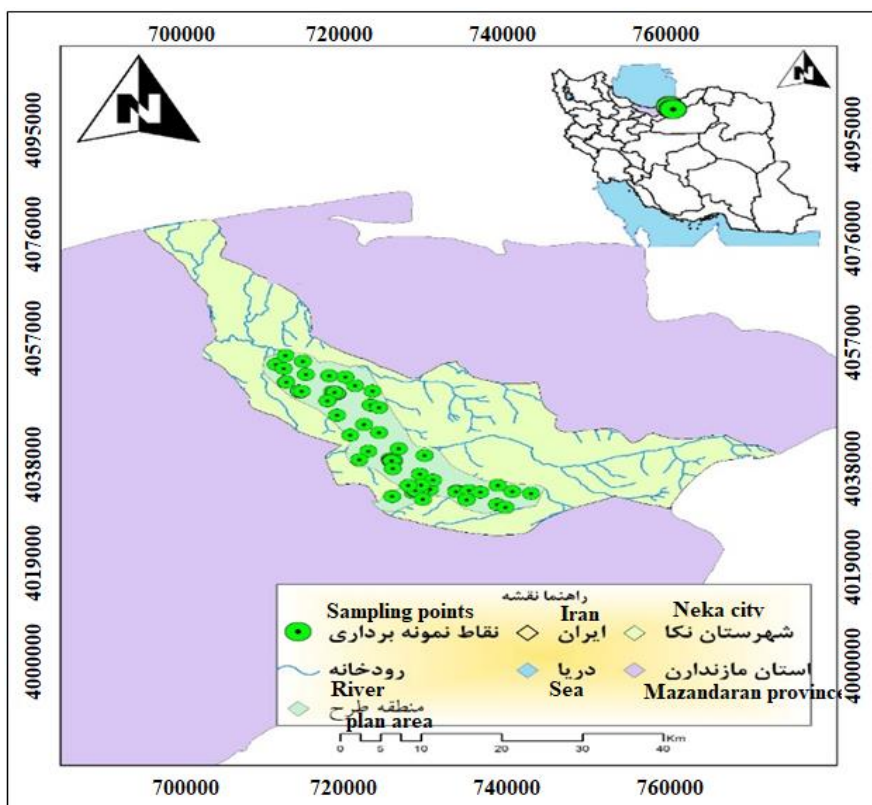
شد (Nazeri et al., 2022) و نتایج نشان داد که ماده آلی خاک و کربن کل با افزایش سن توده افزایش یافت. ارزیابی تغییر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و ذخایر کربن خاک در توده‌های دست‌کاشت درخت کاکائو (*Theobroma cacao* L.) با سنین مختلف (۵، ۱۰، ۱۴، ۱۸ و ۲۳ سال) نشان داد که خاک توده ۲۳ ساله دارای ذخیره کربن بیشتر و جرم مخصوص ظاهری کمتری در مقایسه با سنین دیگر بود (Arthur et al., 2022). در پژوهشی تجمع زیتوده و ترسیب کربن را طی توالی سنی در توده‌های دست‌کاشت کاج جنگلی (*Pinus sylvestris* Thunb.) (۱۲، ۱۹، ۳۴، ۴۸ و ۵۸ سال) در اراضی هورکین چین بررسی کردند (Zhang et al., 2019) و نتیجه گرفتند که با افزایش سن توده، نسبت زیتوده تنه به کل زیتوده درخت از $22/2$ درصد در توده ۱۲ ساله به $54/2$ درصد در توده ۵۸ ساله افزایش و نسبت زیتوده زیراشکوب به زیتوده کل بوم‌سازگان در توده‌های ۱۲، ۱۹، ۳۴، ۴۸ و ۵۸ سال به ترتیب با مقادیر $7/5$ ، $4/6$ ، $4/4$ ، $4/1$ و ۳ درصد کاهش یافت. ترسیب کربن توده‌های ۱۲، ۱۹، ۳۴، ۴۸ و ۵۸ سال به ترتیب $40/2$ ، $73/4$ ، $92/9$ ، $89/9$ و $87/3$ تن در هکتار بود.

افراپلت از درختان مهم از نظر بوم‌شناختی و اقتصادی در جنگل‌های شمال ایران است که از لحاظ سازگاری بوم‌شناسی از جلگه تا ارتفاعات بالا پراکنش دارد. اگرچه این گونه در جنگل‌های شمال ایران پراکنش زیادی دارد، به جز جنگل‌های قفقاز در جنگل‌های نقاط دیگر جهان کمتر دیده می‌شود (Sabeti, 1994). پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات ترسیب کربن خاک با افزایش سن توده دست‌کاشت افراپلت انجام گرفت. از این‌رو برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و مقادیر کربن ترسیب‌شده در بین توده‌ها مقایسه شد. همچنین فرض بر این بود که مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در سنین مختلف توده‌ها تفاوت معنی‌دار نشان می‌دهد و روند ذخیره کربن با افزایش سن رابطه

پلاستیکی در بسته به محل آزمایشگاه منتقل شدند. همچنین به مقدار لازم از لاشبرگ از مرکز هر قطعه نمونه برای اندازه گیری ترسیب کربن برداشت شد. برای اندازه گیری ویژگی های فیزیکی خاک مانند درصد رطوبت نسبی خاک از روش وزنی و برای جرم مخصوص ظاهری از روش کلوخه (Jafarihaghghi, 2003; Alazmani et al., 2021) استفاده شد. واکنش خاک (pH) با روش پتانسیومتری (Jafarihaghghi, 2003)، هدایت الکتریکی با روش هدایت سنجی (نسبت خاک به آب با یک به دو نیم) (Jafarihaghghi, 2003)، کربن آلی با روش والکی-بلاک (Ali-Ehyaee & Behbahanizadeh, 1994)، نیتروژن به روش کج‌جدال (Jafarihaghghi, 2003)، پتاسیم با روش عصاره گیری با استتات آمونیوم (Ali-Ehyaee & Behbahanizadeh, 1994) و فسفر به روش اولسن (Ali-Ehyaee & Behbahanizadeh, 1994) اندازه گیری شد.

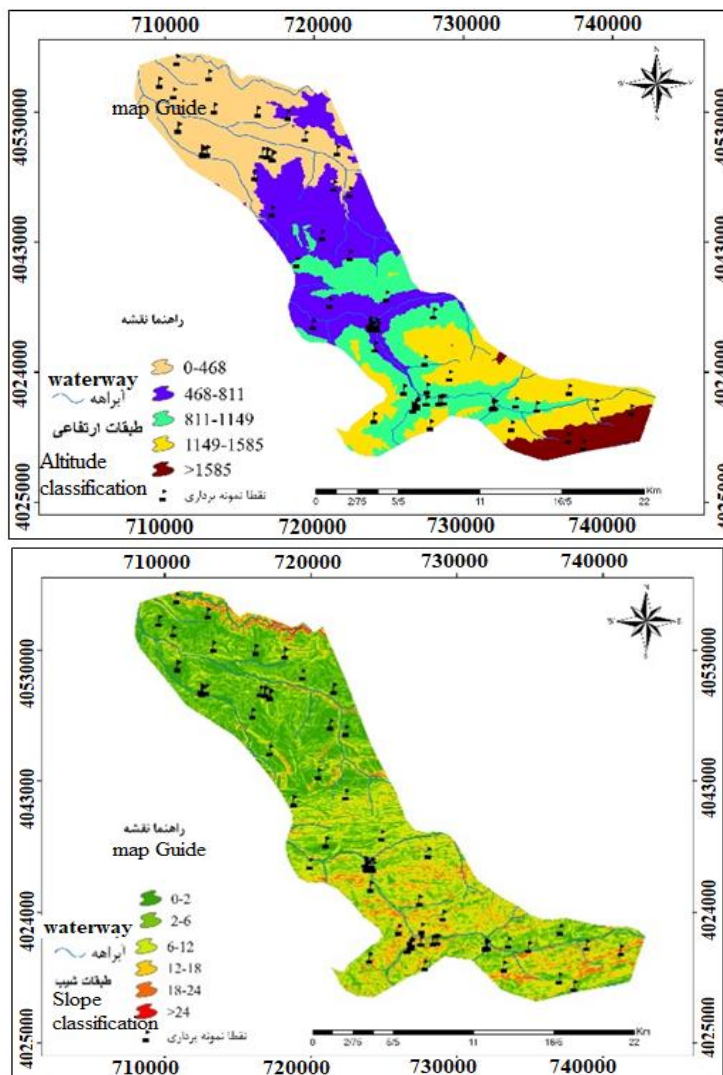
منظور انتخاب شد. این گونه کاشته شده در طبقه سنی ۰ تا ۱۰ سال به صورت آمیخته با گونه های دیگر است، اما در سنین ۱۰ تا ۲۰ سال، ۲۰ تا ۳۰ سال و ۳۰ تا ۴۰ سال به صورت خالص کاشته شده است. برای بررسی اثر سن بر ترسیب و ذخیره کربن، توده های خالص با یکدیگر مقایسه شدند تا نتایج دقیق تری حاصل شود. برای هر یک از طبقات سنی سه منطقه و در هر کدام سه قطعه نمونه مربع شکل ۲۰×۲۰ متر انتخاب شد و مختصات مکانی، ارتفاع از سطح دریا بررسی شد. شکل ۲ وضعیت شیب و ارتفاع منطقه طرح را نشان می دهد.

برای اندازه گیری و نمونه برداری خاک پس از جنگل گردشی در مناطق دارای پراکنش مناسب گونه افرا پس از کنار زدن لاشبرگ از عمق های مختلف صفر تا ۱۵ سانتی متر با استفاده از روش استوانه فلزی (با قطر دهانه ۸ سانتی متری) نمونه های لازم تهیه شد. سپس نمونه با نگهداری آنها درون کیسه های



شکل ۱- موقعیت منطقه پژوهش در استان و کشور

Figure 1. The location of the studied area at the level of the province and the country



شکل ۲- وضعیت شیب و ارتفاع منطقه طرح

Figure 2. The slope and height of the design area

(بردبار، ۱۳۸۵). مقدار ماده آلی گیاه (برحسب گرم) از تفاضل وزن اولیه نمونه و وزن خاکستر محاسبه شد و کربن آلی گیاه ۵۴ درصد ماده آلی گیاه در نظر گرفته شد (Alazmani et al., 2021).

$$\text{رابطه ۱} \quad Cs = 10000 \times OC (\%) \times Bd \times E$$

در رابطه بالا Cs: مقدار ترسیب کربن (Kg/ha)، OC: درصد کربن آلی، Bd: جرم مخصوص ظاهری خاک (g/cm^3) و E: عمق لایه به سانتی‌متر است.

پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. نرمال بودن اطلاعات به دست آمده از ویژگی‌های خاک با استفاده از آزمون آماری کولموگروف-اسمیرنوف بررسی

با مشخص شدن ویژگی‌های درصد کربن و وزن ظاهری، مقدار ترسیب کربن خاک در طبقه‌های مختلف سنی درختان افرا برحسب تن در هکتار با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Alazmani et al., 2021). برای اندازه‌گیری کربن لاشبرگ، نمونه‌های گیاهی ابتدا در آون در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شده و بعد از آن به صورت پودر آماده شدند. از نمونه‌های پودر شده، ۲ تا ۱۰ گرم به عنوان وزن اولیه نمونه با ترازوی سهرقمی توزین شد و سپس این نمونه‌ها در کوره در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان چهار ساعت قرار گرفتند و بعد از اتمام مدت زمان تعیین شده خاکستر گیاه توزین شد

نتایج

با آماربرداری از منطقه مطالعاتی مشخصات کمی گونه افراپلت در سه رده سنی ۲۰-۳۰ سال، ۳۰-۴۰ سال و ۴۰-۳۰ سال اندازه‌گیری شد و در جدول (۱) نشان داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده با افزایش سن توده هریک از ویژگی‌های درخت نیز روند افزایشی داشته است.

شد. تجزیه واریانس داده‌ها به کمک آنالیز واریانس یکطرفه (ANOVA) صورت گرفت و برای آزمون مقایسه میانگین از روش SNK در نرم‌افزار SAS استفاده شد. رسم نمودارها، تنظیم و دسته‌بندی همه داده‌ها در نرم‌افزار اکسل انجام گرفت. نقشه‌های موقعیت، شیب و ارتفاع منطقه نیز با استفاده از نرم‌افزار GIS و توسط گروه پژوهشی این مقاله استخراج شد.

جدول ۱- مشخصات کمی گونه افراپلت در برخی از نقاط نمونه‌برداری شده منطقه طرح

سالیان ۳۰-۴۵ 30-45 years old	سالیان ۲۰-۳۰ 20-30 years old	سالیان ۱۰-۲۰ 10-20 years old	مشخصات کمی Quantitative specifications
9	7.5	7	کمینه Minimum
30	27	23	بیشینه Maximum
20 ^a	17.26 ^b	15.53 ^b	میانگین Mean

2	2	2	کمینه Minimum
7	6	6	بیشینه Maximum
5.41 ^a	4.78 ^a	4.68 ^a	میانگین Mean

2	2	2	کمینه Minimum
5	5	5	بیشینه Maximum
۴/۳۶ ^a	۳/۷۹ ^b	۳/۷۸ ^b	میانگین Mean

10	8	7	کمینه Minimum
18	15	14	بیشینه Maximum
۱۴/۲۶ ^a	۱۲/۱۶ ^b	۱۱/۱۴ ^c	میانگین Mean

8	8	7	کمینه Minimum
24	22	20	بیشینه Maximum
19.84 ^a	17.21 ^b	15.41 ^c	میانگین Mean

3	3	3	کمینه Minimum
8	7	7	بیشینه Maximum
5.89 ^a	5.25 ^b	5.05 ^b	میانگین Mean

حروف یکسان نشان‌دهنده نبود تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌های هر مشخصه است

The same letters indicate no significant difference between the means of each characteristic

نیترژن کل، فسفر و پتاسیم قابل جذب ($P < 0.01$) و بر مشخصه‌های درصد سیلت، درصد شن و کربن آلی خاک ($P < 0.05$) اثر معنی‌دار داشت. همچنین تفاوت معنی‌داری در مشخصه‌های درصد رس، واکنش خاک و هدایت الکتریکی بین توده‌ها مشاهده نشد.

نتایج تجزیه واریانس مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در سه توده دست‌کاشت افراپلت در طبقات سنی ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰ و ۳۰-۴۰ در جدول ۲ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تفاوت سن توده‌های افراپلت بر مشخصه‌های درصد رطوبت، جرم مخصوص ظاهری،

جدول ۲- تجزیه واریانس مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در توده‌های دارای تفاوت سنی

Table 2. Variance analysis of soil physical and chemical characteristics in masses with different ages

F آماره F	میانگین مربعات Mean of squares	مجموع مربعات Sum of squares	درجه آزادی df	منبع تغییرات S.O. V	مشخصه‌های بررسی شده Study characteristics
31.08**	135.69	271.38	2	مدل (سن توده) Model (mass age)	رطوبت (درصد) Humidity (percent)
	4.36	26.19	26	خطا Error	
		297.57	28	کل Total	
3.86*	12.78	25.57	2	مدل (سن توده) Model (mass age)	رس (درصد) Clay (percentage)
	3.31	19.86	26	خطا Error	
		45.43	28	کل Total	
8.11*	75.53	151.05	2	مدل (سن توده) Model (mass age)	سیلت (درصد) Silt (percent)
	9.32	55.91	26	خطا Error	
		206.96	28	کل Total	
10.61*	130.01	260.03	2	مدل (سن توده) Model (mass age)	شن (درصد) Sand (percent)
	12.25	73.51	26	خطا Error	
		333.54	28	کل Total	
0.9 ^{ns}	0.03	0.56	2	مدل (سن توده) Model (mass age)	واکنش خاک pH
	0.03	0.19	26	خطا Error	
		0.24	28	کل Total	
0.84 ^{ns}	0.004	0.007	2	مدل (سن توده) Model (mass age)	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) Electrical conductivity (decsiemens/meter)
	0.004	0.03	26	خطا Error	
		0.027	28	کل Total	
113.1**	1.14	2.28	2	مدل (سن توده) Model (mass age)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) Apparent specific gravity (gr. Cm ⁻³)
	0.01	0.06	26	خطا Error	
		2.34	28	کل Total	
6.61*	2.86	5.72	2	مدل (سن توده) Model (mass age)	کربن آلی (درصد) Organic carbon (percent)
	0.43	2.59	26	خطا Error	
		8.31	28	کل Total	
15.98**	0.011	0.023	2	مدل (سن توده) Model (mass age)	نیترژن (درصد) Nitrogen (percentage)
	0.0007	0.004	26	خطا Error	
		0.03	28	کل Total	
18.07**	10.44	20.88	2	مدل (سن توده) Model (mass age)	فسفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) Phosphorus (mg/kg soil)
	0.58	3.47	26	خطا Error	
		24.35	28	کل Total	
18.15**	72207.8	144415.6	2	مدل (سن توده) Model (mass age)	پتاسیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) Potassium (mg/kg soil)
	3977.7	23866.3	26	خطا Error	
		168231.9	28	کل Total	

^{ns}, * و ** به ترتیب بیانگر عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح پنج و یک درصد است.

^{ns}, * and ** indicate non-significance, significance at five and one percent level, respectively.

دیگر با افزایش سن توده، درصد کربن آلی روند صعودی داشت.

مقایسه میانگین درصد نیتروژن کل نشان داد که بیشترین مقدار در سن ۳۰-۴۰ سال با ۰/۳۵ درصد بود که با سن ۲۰-۳۰ سال اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۳ ب). کمترین نیتروژن کل مربوط به سن ۱۰-۲۰ سال با ۰/۲۳ درصد بود.

نتایج مقایسه میانگین فسفر قابل جذب در توده‌های سنی مختلف نشان داد که با افزایش سن توده مقدار آن افزایش یافت، به طوری که بیشترین و کمترین مقدار فسفر قابل جذب به ترتیب در سن ۴۰-۳۰ (۷/۸۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) و ۱۰-۲۰ سال (۴/۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) مشاهده شد (شکل ۳ ج). نتایج مرتبط با بررسی پتاسیم قابل جذب بین توده‌ها با سن مختلف برعکس بود، به طوری که با افزایش سن توده مقدار پتاسیم قابل جذب گیاه کاهش یافت (شکل ۳ د). نتایج نشان داد بیشترین و کمترین مقدار پتاسیم قابل جذب به ترتیب در سن ۱۰-۲۰ سال و ۳۰-۴۰ سال به مقدار ۶۳۸/۹۱ و ۵۴۹/۵۶ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک وجود دارد.

نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکی خاک نشان داد که بیشترین و کمترین درصد رطوبت به ترتیب متعلق به توده سنی ۳۰-۴۰ ساله (۳۷/۳۳ درصد) و ۱۰-۲۰ ساله (۲۳/۸۸ درصد) است (جدول ۲). جرم مخصوص ظاهری اندازه‌گیری شده نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار آن به ترتیب متعلق به دوره سنی ۲۰-۱۰ ساله (۲/۱۷ گرم بر مترمکعب) و ۳۰-۴۰ ساله (۱/۵۸ گرم بر مترمکعب) است (جدول ۳).

بررسی بافت خاک توده‌های تحت بررسی نشان داد که بیشترین درصد سیلت و رس به ترتیب با ۳۰/۴۱ و ۱۷/۵۸ درصد در توده سنی ۳۰-۴۰ سال وجود دارد (جدول ۲)؛ اما نتایج درصد شن نشان داد که بیشترین مقدار آن (۶۴/۷۵ درصد) در توده سنی ۱۰-۲۰ ساله است (جدول ۳).

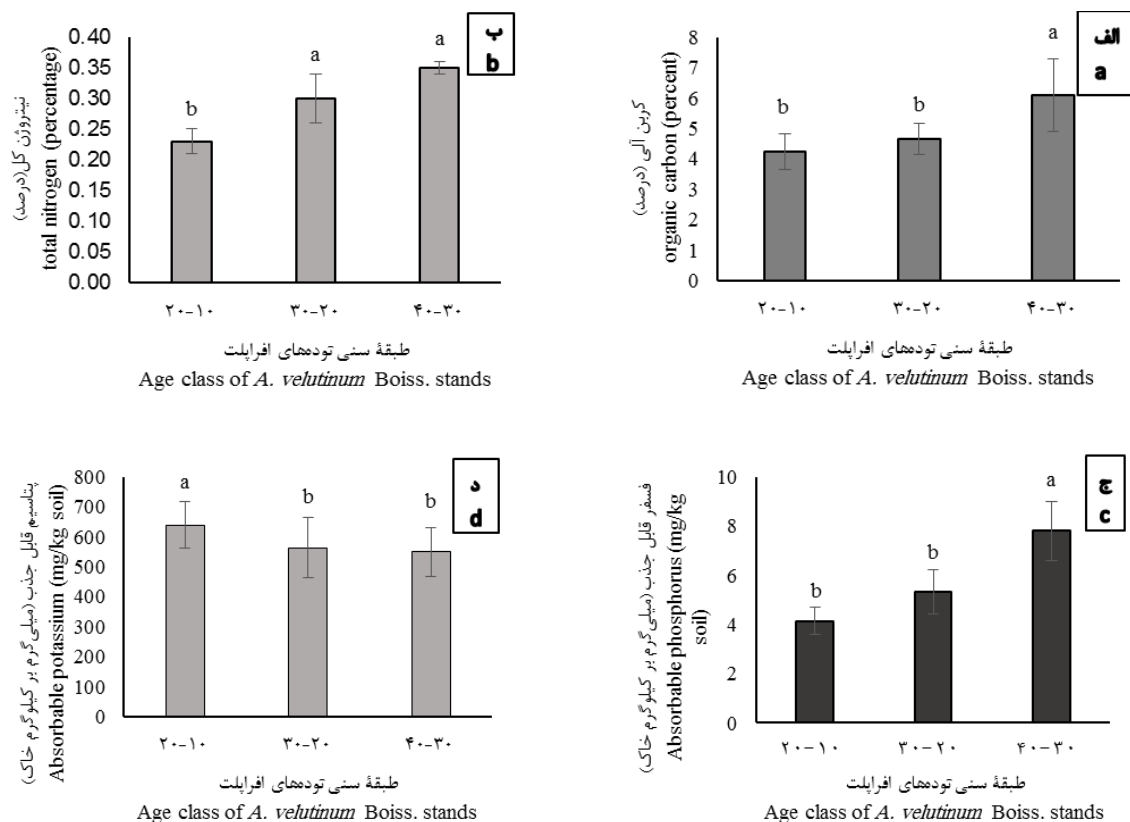
مقایسه میانگین ویژگی‌های شیمیایی خاک در توده‌های افراپلت با طبقه سنی مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. براساس نتایج به دست آمده بیشترین و کمترین درصد کربن آلی به ترتیب در توده سنی ۳۰-۴۰ ساله (۶/۱ درصد) و ۱۰-۲۰ ساله (۴/۲۴ درصد) مشاهده شد (شکل ۳ الف). به عبارت

جدول ۳- مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکی خاک (میانگین \pm اشتباه معیار) در توده‌های افرا پلت با تفاوت سنی مختلف
Table 3- Comparison of average soil physical characteristics (mean \pm standard error) in *A. velutinum* Boiss. stands with different age differences

۳۰-۴۵ ساله 30-45 years old	۲۰-۳۰ ساله years old 20-30	۱۰-۲۰ ساله years old 10-20	مشخصه‌های فیزیکی خاک Physical characteristics of the soil
37.33 \pm 7.71 ^a	30.93 \pm 7.34 ^b	23.88 \pm 5.8 ^c	رطوبت (درصد) Humidity (percent)
1.58 \pm 0.4 ^c	1.91 \pm 0.2 ^b	2.17 \pm 0.2 ^a	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) Apparent specific gravity (gr. Cm ⁻³)
52.01 \pm 8.21 ^b	61.28 \pm 13.3 ^a	64.75 \pm ۱۰/۲۶ ^a	شن (درصد) Sand (percent)
30.41 \pm 5.41 ^a	24.32 \pm 4.24 ^{ab}	20.45 \pm ۴/۶۵ ^b	سیلت (درصد) Silt (percent)
17.58 \pm 2.35 ^a	14.40 \pm 4.51 ^{ab}	14.25 \pm ۲/۵ ^b	رس (درصد) Clay (percentage)
لوم شنی sandy loam	لوم شنی sandy loam	لوم شنی sandy loam	نوع بافت Texture type

حروف یکسان نشان‌دهنده نبود تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌های هر مشخصه است

The same letters indicate no significant difference between the means of each characteristic



شکل ۳- مقایسه میانگین ویژگی‌های شیمیایی خاک (میانگین ± اشتباه معیار) در توده‌های افراپلت با طبقات سنی مختلف
 Figure 3. Comparison of average soil chemical properties (mean ± standard error) in *A. velutinum* Boiss. stands with different age classes

تن در هکتار مشاهده شد (شکل ۵).
 نتایج آزمون تجزیه و تحلیل واریانس در ارتباط با ترسیب کربن لاشبرگ در توده‌های تحت بررسی در جدول ۵ آمده است. نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد بین موجودی کربن لاشبرگ در بین سه توده ۲۰-۱۰ سال، ۳۰-۲۰ سال و ۴۰-۳۰ سال افرا پلت مشاهده نشد.

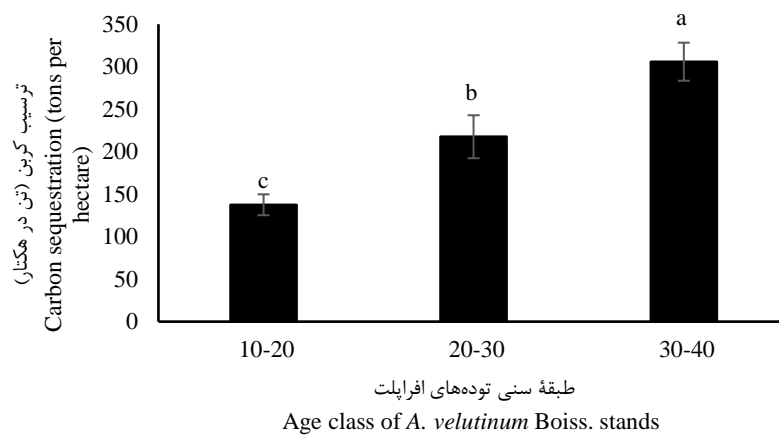
نتایج آنالیز واریانس ترسیب کربن در توده‌های سنی مختلف نشان داد که این اثر سن توده بر این مشخصه دارای تفاوت معنی‌دار است ($p < 0.05$) (جدول ۴).
 نتایج مقایسه میانگین ترسیب کربن در توده‌های بررسی شده نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار ترسیب کربن خاک به ترتیب در توده ۳۰-۴۰ سال با ۱۳۷/۵۰ تن در هکتار و توده ۱۰-۲۰ سال ۳۰۵/۸۹ تن در هکتار مشاهده شد.

جدول ۴- تجزیه واریانس ترسیب کربن خاک در توده‌های سنی بررسی شده
 Table 4. Variance analysis of soil carbon deposition in the studied age masses

F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییرات
آماره F	Mean of squares	Sum of squares	df	S.O. V
24.70**	361850.895	723701.790	2	مدل (سن توده) Model (mass age)
	14642.690	2196403.506	150	خطا Error
		2920105.296	152	کل Total

** معنی‌داری در سطح ۱ درصد ($P < 0.01$)

** Significance at one percent level ($P < 0.01$)



شکل ۴- مقایسه میانگین ترسیب کربن خاک (میانگین \pm اشتباه معیار) در توده‌های افراپلت با طبقات سنی مختلف
Figure 4. Comparison of average soil carbon deposition (mean \pm standard error) in *A. velutinum* Boiss. with different age classes

جدول ۵- تجزیه واریانس ترسیب کربن لاشبرگ در توده‌های سنی بررسی شده

Table 5. Variance analysis of leaf litter carbon deposition in the studied age populations

آماره F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییرات
F	Mean of squares	Sum of squares	df	S.O. V
2.57 ^{ns}	141.800	283.601	2	مدل (سن توده) Model (mass age)
	55.245	4309.111	78	خطا Error
		4592.712	80	کل Total

^{ns} معنی‌دار نبودن در سطح ۵ درصد ($P < 0.05$)

^{ns} lack of significance at the five percent level ($P < 0.05$)

افزایش سن توده می‌تواند عاملی مؤثر بر نگهداشت رطوبت باشد. وجود لاشبرگ باقی‌مانده از سال‌های قبل در توده مسن‌تر هم موجب حفظ رطوبت می‌شود. یک پژوهش نشان داد که با افزایش سن جنگل، ظرفیت نگهداری آب به دلیل افزایش نفوذپذیری خاک و آب به تدریج افزایش می‌یابد (Breda et al., 2006). براساس نتایج، کمترین مقدار جرم مخصوص ظاهری مربوط به مسن‌ترین توده بود. نتایج این تحقیق با یافته‌های دیگر محققان مطابقت دارد (Yin et al., 2021; Arthur et al., 2022; Nazeri et al., 2022). پژوهش‌ها نشان داد که افزایش سن توده می‌تواند جرم مخصوص ظاهری را در خاک کاهش دهد و تخلخل خاک را بهبود بخشد (Yesilonis et al., 2016). از طرفی محتوای زیاد ماده آلی خاک

بحث

ویژگی‌های فیزیکی خاک برای حرکت هوا و آب در خاک حیاتی هستند و متعاقب آن بر توانایی خاک در تأمین رطوبت و مواد غذایی برای رشد درختان تأثیر می‌گذارند. نتایج نشان داد که با افزایش سن توده‌های افراپلت درصد رطوبت افزایش یافت. مشابه با این نتایج، Arthur et al. (2022) با وجود ثبت کمترین مقدار رطوبت در جوان‌ترین توده را گزارش کردند. تراکم زیاد درختچه‌ها و لایه‌های زیراشکوب سایه‌اندازی بیشتری را در توده‌های مسن‌تر ایجاد کرده که به شرایط رطوبتی مطلوب‌تر و افزایش سرعت تجزیه لاشبرگ منجر می‌شود (Bot & Benites, 2005). از طرفی افزایش درصد ماده آلی خاک با

داشت. گزارش‌های متفاوتی درباره‌ی تأثیر سن جنگل بر pH خاک وجود دارد. برخی پژوهش‌ها اشاره کرده‌اند که مقدار pH با افزایش سن جنگل افزایش چشمگیری می‌یابد (Malchair & Carnol, 2009). پژوهش‌های دیگر گزارش کرده‌اند که با افزایش سن جنگل، pH خاک به تدریج کاهش می‌یابد و احتمال اسیدی شدن خاک وجود دارد. کاهش pH با افزایش سن توده ممکن است مربوط به جذب یون توسط سیستم ریشه باشد که از طریق انتشار H^+ رخ می‌دهد (Hinsinger & Jaillard, 1993). همچنین آبشویی بازها با آب، رسوب اسید اتمسفری، تجمع مواد آلی و تنفس میکروارگانیسم‌های خاک ممکن است سبب کاهش مقدار pH شود (Hinsinger & Jaillard, 1993; Wong et al., 2008). تفاوت معنی‌داری در مقدار pH خاک بین توده‌ها وجود نداشت که نشان می‌دهد در روند رشد جنگل در منطقه پژوهش، سن توده موجب اسیدی شدن خاک نمی‌شود (Jobbagy & Jackson, 2001).

پتاسیم کل کمتر در خاک توده مسن‌تر ممکن است به دلیل افزایش ماده اسیدی در خاک و کاهش فعالیت ریشه باشد که به کاهش جذب پتاسیم گیاه می‌انجامد. با افزایش سن توده، اگرچه سرعت تجزیه لاشبرگ افزایش می‌یابد، محتوای مواد غذایی خاک می‌تواند کنترل شود (Yang et al., 2010; Yin et al., 2021).

کربن خاک با افزایش سن توده افزایش یافت و بیشترین مقدار کربن در مسن‌ترین توده مشاهده شد. همسو با این نتایج، در پژوهشی افزایش ذخایر کربن (روی زمینی و خاک) از ۶۴/۴ تن در هکتار در توده یکساله *Populus deltoids* را به ۱۷۳/۹ تن در هکتار در توده ۱۱ ساله (Arora et al., 2014) و در پژوهش دیگری افزایش کربن آلی خاک را با سن درخت در توده‌های سه‌ساله ۱۸ درصد بیشتر از توده‌های یکساله (Gupta et al., 2009) ذکر کرده و مقادیر بیشتر کربن آلی را با سن گزارش کردند (Arthur et al., 2022). در پژوهش Yin et al. (2021) در توده‌های ۱۰، ۲۰،

جرم مخصوص ظاهری را کاهش می‌دهد (Arora et al., 2014). به‌تازگی در پژوهشی در توده دست‌کاشت کاج چینی کاهش جرم مخصوص ظاهری با سن توده گزارش شده که علت آن را تخلخل و محتوای بیشتر ماده آلی در توده مسن‌تر ذکر کردند (Dang et al., 2017). Yin et al. (2021) بیان کردند که در کاهش تدریجی جرم مخصوص ظاهری با افزایش سن دو دلیل وجود دارد: از یک طرف، با گذشت زمان، رشد متناوب ریشه و پیری سبب سست و نرم شدن خاک می‌شود و نفوذپذیری آب‌وهوا بهبود می‌یابد. از سوی دیگر، با توجه به افزایش لایه خاک در نتیجه افزایش تدریجی تجمع لاشبرگ در کف جنگل جرم مخصوص ظاهری با گذر زمان کاهش می‌یابد (Sutinen et al., 2006). نبود تفاوت معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری بین توده‌های با سنین مختلف ممکن است به واسطه اختلاف کم فشردگی خاک در اثر اقدامات حفاظتی صورت‌گرفته در طول دوره رشد باشد که بر توسعه ساختار خاک تأثیر می‌گذارد (Sutinen et al., 2006). اگرچه ذرات خاک بین توده‌های افراپلت دارای اختلاف بودند، Hojjati et al. (2023) نشان دادند که سن جنگلکاری اثر معنی‌داری بر ویژگی فیزیکی خاک شامل درصد رطوبت، جرم مخصوص ظاهری و بافت خاک در توده افراپلت نداشت. در پژوهش Arthur et al. (2022) نبود اختلاف معنی‌دار ذرات خاک بین توده‌های با سن مختلف گزارش شده است. با گذشت زمان، تجمع و تجزیه لاشبرگ و بقایای گیاهی در توده دست‌کاشت سبب تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک می‌شود. افزایش مواد آلی وضعیت مواد مغذی خاک را بهبود می‌بخشد و فرض بر این است که فعالیت زیستی و ساختار خاک را نیز تقویت می‌کند (USDA, 2001). مقادیر pH خاک از ۷/۷-۱۹/۳۷ متغیر بود و با وجود مقدار pH کمتر در سن ۳۰-۴۰ سال، تأثیر سن توده بر آن معنی‌دار نبود که با نتایج دیگر پژوهش‌ها (Cao et al., 2019; Arthur et al., 2022; Nazeri et al., 2022) مطابقت

کربن داشته باشند. (Cao et al., 2018). با افزایش لاشبرگ تنفس ریشه نیز محدود می‌شود که افزایش ذخیره کربن خاک را در پی دارد (Cao et al., 2018; Zeng et al., 2014). توده‌های جوان در نتیجه پوشش لاشبرگ و پوشش تاجی کمتر که به تابش مستقیم آفتاب و تأثیر قطرات باران منجر می‌شود، مواد آلی را در معرض افزایش تجزیه میکروبی قرار می‌دهد و موجب افزایش از دست رفتن آنها توسط رواناب یا انتشار می‌شود (Ahenkorah, 1981; Chen & Li, 2003). برخی پژوهش‌ها تغییر چشمگیر کربن خاک را با افزایش سن توده گزارش نکردند (Peichl & Arain, 2006; Cheng et al., 2014). برخی تحقیقات در ابتدا روند کاهشی مقدار کربن خاک پس از جنگلکاری و در پی آن افزایش تدریجی را نشان دادند (Li et al., 2011; Chen et al., 2013). این نتایج به این دلیل بوده که افزون‌بر سن، بسیاری از عوامل مهم دیگر مانند آب‌وهوا، ویژگی‌های خاک، نوع جنگل و کاربری قبلی بر مقدار کربن خاک تأثیرگذارند (Peichl & Arain, 2006). Leuschner et al. (2014) دریافتند که سن توده‌های راش در شمال آلمان عاملی اساسی در توانایی ذخیره کربن خاک و مواد غذایی بوده و تداوم و توسعه پوشش با سن درختان مرتبط است.

با افزایش سن، فسفر قابل جذب افزایش یافت که همسو با یافته‌های دیگر محققان است (Yin et al., 2021; Nazeri et al., 2022; Arthur et al., 2022). تجمع لاشبرگ با گذشت زمان بر قابلیت دسترسی فسفر اثرگذار است (El Tahir et al., 2009). محتوای زیاد فسفر قابل جذب در مسن‌ترین توده را می‌توان به جذب فسفات و تجمع مواد آلی وابسته دانست. Dossa et al. (2018) بیان کردند که بخش عمده‌ای از فسفر خاک در نتیجه تثبیت از طریق زیتوده میکروبی و جذب روی کلئیدهای آلی و معدنی خاک باقی می‌ماند. غلظت کمتر فسفر قابل جذب خاک در توده جوان‌تر ممکن است با توجه به جذب فعال فسفر

۴۰ و ۶۰ ساله مقدار کربن به ترتیب ۲۳/۹۸، ۲۵/۷۳، ۲۷/۱۳ و ۴۷/۱۳ گرم در کیلوگرم ثبت شد. مطابق با نتایج این پژوهش، پتانسیل افزایش ذخیره کربن در توده دست‌کاشت افراپلت در مقایسه با توده‌های توسکای ییلاقی و زربین گزارش شد (Haghdooost et al., 2011). Pilehvar et al. (2016) اظهار داشتند زمانی که سن جنگلکاری کمتر از ۲۰ سال باشد، الگوی کاهش کربن آلی موجود در خاک آن مشهود است و با افزایش سن جنگلکاری، ترسیب کربن در خاک افزایش خواهد یافت. لاشه‌ریزی از مواردی است که از ورودی عناصر غذایی مثل کربن به بوم‌سازگان‌های جنگل در درازمدت حفاظت می‌کند. (Noraiey et al., 2021) اظهار داشتند که نوع گونه درختی و تغییرات تاج‌پوشش، ترکیب شیمیایی و مقدار ورودی عناصر را از طریق لاشه‌ریزی در توده‌های جنگلی تغییر می‌دهد. در همین زمینه Hashemi et al. (2012) در بین سه توده آزاد، افراپلت و ون بیشترین مقدار لاشه‌ریزی (حدود ۱۴ تن در هکتار) و بیشترین مقدار عناصر غذایی را در توده افراپلت گزارش کرده و بیان کردند که تأثیر لاشه‌ریزی با افزایش سن پررنگ‌تر می‌شود. براساس نتایج (Arevalo et al., 2009) محتوای کمتر کربن آلی خاک در توده جوان به دلیل ورودی کمتر کربن آلی نسبت به خروجی آن است. از این‌رو افزایش ذخایر کربن آلی خاک در لایه سطحی بیشتر در ارتباط با ورودی کربن لاشبرگ، ریشه‌های مرده و ترشحات ریشه است (Chauhan et al., 2009; Kaushal et al., 2012).

افزایش کربن آلی با سن توده را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که توده‌های مسن‌تر لاشبرگ تجزیه‌شده را انباشته و ترکیبات کربنی را برای خاک فراهم می‌کنند (Perumal et al., 2015). سرعت تجزیه لاشبرگ نیز بسته به کیفیت لاشبرگ و شرایط محیطی متفاوت است (Yang et al., 2012). لاشبرگ به‌مرور سبب افزایش هوموس خاک و ماده آلی می‌شوند و در نهایت می‌توانند نقش مؤثری در ترسیب

پس از تجزیه لاشبرگ ابتدا در لایه سطحی خاک تجمع یافته و سپس از طریق آبشویی به سمت پایین انتشار می‌یابند. یافته‌های Yin et al. (2021) نیز افزایش کربن آلی و نیتروژن را با افزایش سن نشان داد. طبق گفته آنها در توده‌های جوان، تاج جنگل در حال توسعه و ایجاد است و تولید خالص کم، بازگشت زیاد، جذب زیاد و کوتاه‌ترین زمان گردش مواد غذایی خاک با توجه به تراکم زیاد توده وجود دارد. در توده‌های با سن متوسط، تولید خالص به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد، تجمع زیتوده زیاد است، بازگشت از طریق لاشبرگ کاهش می‌یابد، مقادیر زیادی از مواد مغذی خاک با بازگشت کم مواد غذایی به خاک جذب می‌شود و در نتیجه محتوای کربن و نیتروژن خاک کاهش می‌یابد. در توده‌های مسن‌تر (بالغ)، مقادیر کربن و نیتروژن خاک با توجه به کاهش سرعت (میزان) رشد درختان، تراکم کم درخت، بازگشت محدود لاشبرگ و جذب و بازگشت به نسبت کم مواد غذایی خاک که سبب تجمع مواد غذایی خاک در جنگل می‌شود افزایش می‌یابد (Montfort et al., 2021; Zhang et al., 2020).

نتیجه گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که از نظر مقیاس زمانی، افزایش سن جنگلکاری اثرهای چشمگیری بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارد. با افزایش سن توده، جرم مخصوص ظاهری و محتوای پتاسیم قابل جذب کاهش یافت، اما درصد رطوبت، محتوای کربن آلی، نیتروژن کل و فسفر قابل جذب افزایش پیدا کرد. نیتروژن کل به‌طور معنی‌داری با سن توده افزایش یافت. به‌طور کلی نتایج در ارتباط با ترسیب کربن نشان داد که کربن خاک با افزایش سن توده افزایش یافت و بیشترین مقدار کربن در مسن‌ترین توده مشاهده شد. استقرار توده‌های دست‌کاشت در جنگل‌های تخریب‌یافته، با افزایش ذخایر کربن خاک نقش مهمی در بهبود مواد مغذی دارد و می‌تواند به کاهش تغییرات اقلیمی کمک کند و در

در طی دوره رشد سریع باشد. از آنجا که کربن آلی خاک به‌طور معمول با ازت و فسفر رابطه تنگاتنگی دارد، افزایش پتانسیل نیتروژن و فسفر قابل جذب به تجزیه ماده آلی خاک بستگی دارد (Goransson et al., 2016). فسفر می‌تواند به‌آرامی توسط مواد معدنی رسی، کربنات‌ها و ماده آلی خاک تثبیت شود که بخشی از چرخه‌های بیوشیمیایی است و فسفر بیشتر می‌تواند تجمع بیشتر مواد آلی را تقویت کند (Cao et al., 2019). نیاز درختان برای مواد مغذی خاک در بین درختان با سنین مختلف متفاوت است. برای مثال در جنگل‌های ۲۰ و ۳۷ ساله *Larix decidua* به ترتیب نیتروژن و فسفر عوامل محدودکننده رشد گزارش شدند، در حالی که رشد جنگل‌های جوان (۱۴ ساله) *Larix decidua* با کمبود مواد غذایی مواجه نبود (Yang et al., 2018).

نیتروژن کل خاک به‌طور معنی‌داری با سن توده افزایش یافت که با نتایج دیگر محققان مطابقت دارد (Puttaso et al., 2016; Arthur et al., 2022). نیتروژن کل خاک در بیشترین سن توده به دلیل تراکم بیشتر برگ‌های مرده در سطح خاک بیشتر از بقیه بود. افزون بر این، تشکیل ریشه‌های متراکم‌تر در توده با سن بیشتر، فعالیت تجزیه‌ای میکروبی‌های تثبیت‌کننده نیتروژن را تقویت می‌کند (Matali & Matali, 2015). محتوای بیشتر نیتروژن کل در توده با سن بیشتر ممکن است با مقدار بیشتر لاشبرگ کف زمین مرتبط باشد که در مقایسه با دیگر توده‌ها مواد مغذی را از طریق بازیافت تجزیه و آزاد می‌کند (Arthur et al., 2022). تراکم بیشتر لاشبرگ غنی از نیتروژن در توده با سن بیشتر سبب سرعت بیشتر نیتریفیکاسیون، آزاد شدن پروتون‌ها و کاهش pH می‌شود (Li et al., 2018). مقدار کمتر نیتروژن کل در توده جوان‌تر احتمالاً به دلیل جذب بیشتر نیتروژن کل توسط درختان با سرعت تجزیه آلی کمتر است (Yamashita et al., 2008). کربن و نیتروژن خاک اغلب ناشی از بازگشت لاشبرگ هستند. این عناصر

سیاسگزاری

بهره‌وری بوسازگان و حفاظت از محیط زیست مؤثر باشد. از طرفی شناخت روابط موجود و آگاهی از میزان اثرگذاری گونه‌های مختلف بر خصوصیات خاک می‌تواند اطلاعات مناسبی را در اختیار مدیران به‌منظور ارائه مبنایی برای حفاظت و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی قرار دهد.

نویسندگان از مجموعه اداره کل منابع طبیعی استان مازندران به پاس همکاری و از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به پاس پشتیبانی مالی از این پژوهش قدردانی به عمل می‌آورند.

Reference

- Ahenkorah, Y. (1981). The influence of environment of growth and production of the cacao tree: soils and nutrition. *In Proceedings of the 7th International Cocoa Research Conference, 4-12*, 167-176.
- Alazmani, M., Hojati, S.M., Waez-Mousavi, S.M., & Tafazoli, M. (2021). Effect of alder plantation age on soil carbon sequestration. *Forest Research and Development*, 7(2), 279-291. DOI: 10.30466/jfrd.2021.121058 (In Persian)
- Ali-Ehyae, M., & Behbahanizadeh, A.A. (1994). Description of soil chemical decomposition methods. *Soil and Water Research Institutes*, 893, pp.14-6.
- Arevalo, C.B., Bhatti, J.S., Chang, S.X., & Sidders, D. (2009). Ecosystem carbon stocks and distribution under different land-uses in north central Alberta, Canada. *Forest Ecology and Management*, 257(8), 1776-1785. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.01.034
- Arora, G., Chaturvedi, S., Kaushal, R., Nain, A., Tewari, S., Alam, N.M. & Chaturvedi, O.P. (2014). Growth, biomass, carbon stocks, and sequestration in an age series of *Populus deltoides* plantations in Tarai region of central Himalaya. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 38(4), 550-560. DOI:10.3906/tar-1307-94
- Arthur, A., Acquaye, S., Cheng, W., Dogbatse, J.A., Konlan, S., Domfeh, O., & Quaye, A.K. (2022). Soil carbon stocks and main nutrients under cocoa plantations of different ages. *Soil Science and Plant Nutrition*, 68(1), 99-103. DOI: 10.1080/00380768.2022.2029219
- Askari, Y., Iranmanesh, Y., & Pourhashemi, M. (2021). The economic value and comparison of carbon storage in different forest areas in Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad province. *Iranian Journal of Forest*, 13(2), 169-182. DOI: 10.22034/IJF.2021.276293.1767 . (In Persian)
- Bot, A., & Benites, J. (2005). *The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil and sustained food production* (No. 80). Food & Agriculture Org.
- Breda, N., Huc, R., Granier, A., & Dreyer, E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 63(6), 625-644. DOI: 10.1051/forest:2006042
- Cao, J., Gong, Y., Adamowski, J.F., Deo, R.C., Zhu, G., Dong, X., Zhang, X., Liu, H., & Xin, C. (2019). Effects of stand age on carbon storage in dragon spruce forest ecosystems in the upper reaches of the Bailongjiang River basin, China. *Scientific Reports*, 9(1), 1-11. DOI: 10.1051/forest:2006042
- Cao, J., Zhang, X., Deo, R., Gong, Y., & Feng, Q. (2018). Influence of stand type and stand age on soil carbon storage in China's arid and semi-arid regions. *Land Use Policy*, 78, 258-265. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.07.002
- Chauhan, S.K., Naveen, G., Sudhir, Y., & Rajni, C. (2009). Biomass and carbon allocation in different parts of agroforestry tree species. *Indian Forester*, 135(7), 981-993.
- Chauhan, S.K., Sharma, S.C., Chauhan, R., & Naveen, G. (2010). Accounting poplar and wheat productivity for carbon sequestration in agri-silvicultural system. *Indian Forester*, 136(9), 1174-1182.
- Chen, G.S., Yang, Z.J., Gao, R., Xie, J.S., Guo, J.F., Huang, Z.Q., & Yang, Y.S. (2013). Carbon storage in a chronosequence of Chinese fir plantations in southern China. *Forest Ecology and Management*, 300, 68-76. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.07.046

- Chen, X., & Li, B.L. (2003). Change in Soil Carbon and Nutrient Storage after Human Disturbance of a Primary Korean Pine Forest in Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 186, 197-206.
- Cheng, X., Han, H., Kang, F., Song, Y., & Liu, K. (2014). Variation in biomass and carbon storage by stand age in pine (*Pinus tabulaeformis*) planted ecosystem in Mt. Taiyue, Shanxi, China. *Journal of Plant Interactions*, 9(1), 521-528. DOI: 10.1080/17429145.2013.862360
- Dang, P., Yu, X., Le, H., Liu, J., Shen, Z., & Zhao, Z. (2017). Effects of stand age and soil properties on soil bacterial and fungal community composition in Chinese pine plantations on the Loess Plateau. *PLoS One*, 12(10), e0186501. DOI: 10.1371/journal.pone.0186501
- Dossa, E.L., Arthur, A., Dogbe, W., Mando, A., Afrifa, A.A., & Acquaye, S. (2018). An assessment of inherent chemical properties of soils for balanced fertilizer recommendations for cocoa in Ghana. In *Improving the Profitability, Sustainability and Efficiency of Nutrients Through Site Specific Fertilizer Recommendations in West Africa Agro-Ecosystems*, 1, 325-336. DOI: 10.1007/978-3-319-58789-9_18
- El Tahir, B.A., Ahmed, D.M., Ardo, J., Gaafar, A.M., & Salih, A.A. (2009). Changes in soil properties following conversion of Acacia senegal plantation to other land management systems in North Kordofan State, Sudan. *Journal of Arid Environments*, 73(4-5), 499-505. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2008.11.007
- Fao. (2017). Faostat. [Http://www.fao.org/faostat/en/#data/rl](http://www.fao.org/faostat/en/#data/rl).
- Gao, R., Chuai, X., Ge, J., Wen, J., Zhao, R., & Zu, T. (2022). An integrated tele-coupling analysis for requisition-compensation balance and its influence on carbon storage in China. *Land Use Policy*, 116, 106057. DOI: 10.1016/j.landusepol.2022.106057
- Gera, M. (2012). Popular culture for speedy carbon sequestration in India: a case study from Terai region of Uttarakhand. *Envis Forestry Bulletin*, 12, 75-83.
- Göransson, H., Welc, M., Bünemann, E.K., Christl, I., & Venterink, H. O. (2016). Nitrogen and phosphorus availability at early stages of soil development in the Damma glacier forefield, Switzerland; implications for establishment of N₂-fixing plants. *Plant and soil*, 404(1), 251-261. DOI: 10.1007/s11104-016-2821-5
- Gupta, N., Kukal, S.S., Bawa, S.S., & Dhaliwal, G.S. (2009). Soil organic carbon and aggregation under poplar based agroforestry system in relation to tree age and soil type. *Agroforestry Systems*, 76(1), 27-35. DOI: 10.1007/s10457-009-9219-9
- Haghdoust, N., Akbarinia, M., Hosseini, S.M., & Kooch, Y. (2011). Conversion of Hyrcanian degraded forests to plantations: Effects on soil C and N stocks. *Annals of Biological Research*, 2, 385-399.
- Han, X., Zhao, F., Tong, X., Deng, J., Yang, G., Chen, L., & Kang, D. (2017). Understanding soil carbon sequestration following the afforestation of former arable land by physical fractionation. *Catena*, 150, 317-327. DOI: 10.1016/j.catena.2016.11.027
- Hashemi, S.F., Hojati, S.M., & Nasr, S.M.H. (2012). Soil chemical properties, amount of litterfall and nutrients recycling into Caucasian elm, maple and ash plantation stands at Darabkola Experimental Forest Station. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 20(4), 645-655. DOI: 10.22092/IJFPR.2012.107481. (In Persian)
- Hinsinger, P., & Jaillard, B. (1993). Root-induced release of interlayer potassium and vermiculitization of phlogopite as related to potassium depletion in the rhizosphere of ryegrass. *Journal of Soil Science*, 44(3), 525-534.
- Hojjati, S.M., Tafazoli, M., Imani, M., Alazmani, M., Fallah, A., & Pourmajidian, M.R. (2023). Variation in carbon sequestration and soil properties in relation to stand age in maple and alder plantations. *Journal of Sustainable Forestry*, 42(6), 640-654. DOI: 10.1080/10549811.2022.2059516.

- Jafarihaghighi, M. (2003). Soil analysis methods: sampling and important physical and chemical analyzes "with emphasis on theoretical and practical principles". Nedaye Zoha Press, Tehran, 240p. (In Persian).
- Jobby, E.G., & Jackson, R.B. (2001). The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry*, 53(1), 51-77.
- Kaushal, R., Verma, K.S., Chaturvedi, O.P., & Alam, N.M. (2012). Leaf litter decomposition and nutrient dynamics in four multipurpose tree species. *Range Management and Agroforestry*, 33(1), 20-27.
- Krause, A., Pugh, T.A., Bayer, A.D., Li, W., Leung, F., Bondeau, A., Doelman, J.C., Humpenöder, F., Anthoni, P., Bodirsky, B.L., & Ciais, P. (2018). Large uncertainty in carbon uptake potential of land-based climate-change mitigation efforts. *Global Change Biology*, 24(7), 3025-3038. DOI: 10.1111/gcb.14144
- Laganier, J., Angers, D.A., & Pare, D. (2010). Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis. *Global change biology*, 16(1), 439-453.
- Leuschner, C., Wulf, M., Bäuchler, P., & Hertel, D. (2014). Forest continuity as a key determinant of soil carbon and nutrient storage in beech forests on sandy soils in Northern Germany. *Ecosystems*, 17(3), 497-511. DOI: 10.1007/s10021-013-9738-0
- Li, D., Niu, S., & Luo, Y. (2012). Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: a meta-analysis. *New Phytologist*, 195(1), 172-181. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2012.04150.x
- Li, T., Gao, J., Hong, J., Xie, Y., Gao, Z., Meng, H., ... & Meng, L. (2018). Variation of nutrients and selected soil properties in reclaimed soil of different ages at a coal-mining subsidence area on the Loess Plateau, China. *Ekoloji*, 27(106), 547-554.
- Li, X., Yi, M.J., Son, Y., Park, P.S., Lee, K.H., Son, Y.M., ... & Jeong, M.J. (2011). Biomass and carbon storage in an age-sequence of Korean pine (*Pinus koraiensis*) plantation forests in central Korea. *Journal of Plant Biology*, 54(1), 33-42. DOI: 10.1007/s12374-010-9140-9
- Liang, B., Wang, J., Zhang, Z., Zhang, J., Zhang, J., Cressey, E.L., & Wang, Z. (2022). Planted forest is catching up with natural forest in China in terms of carbon density and carbon storage. *Fundamental Research*. 2(5), 688-696. DOI: 10.1016/j.fmre.2022.04.008
- Liao, C., Luo, Y., Fang, C., Chen, J., & Li, B. (2012). The effects of plantation practice on soil properties based on the comparison between natural and planted forests: a meta-analysis. *Global ecology and biogeography*, 21(3), 318-327. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2011.00690.x
- Lin, C.Y., Wang, S.M., Wu, S.W., Tseng, C.W., & Chen, T.Y. (2022). Environmental indicators combined with conceptual models to assess the spatial distribution of carbon storages in the Liukui Experimental Forest in southern Taiwan. *Ecological Indicators*, 137, 108724. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108724
- Malchair, S., & Carnol, M. (2009). Microbial biomass and C and N transformations in forest floors under European beech, sessile oak, Norway spruce and Douglas-fir at four temperate forest sites. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(4), 831-839. DOI: 10.1016/j.soilbio.2009.02.004
- Matali, S., & Metali, F. (2015). Selected soil physico-chemical properties in the Acacia mangium plantation and the adjacent heath forest at Andulau Forest Reserve. *Malaysian Journal of Soil Science*, 19, 45-48.
- Montfort, F., Nourtier, M., Grinand, C., Maneau, S., Mercier, C., Roelens, J.B., & Blanc, L. (2021). Regeneration capacities of woody species biodiversity and soil properties in Miombo woodland after slash-and-burn agriculture in Mozambique. *Forest Ecology and Management*, 488, 119039. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119039

- Naghdi, R., Mirzaei, M., Maghajani, A.H., & Torkaman, J. (2021). Estimation stock and economic value of carbon storage of root and stump of *Populus deltoids* in poplar plantation of Guilan province. *Iranian Journal of Forest*, 13(2), 197-208. DOI: 10.22034/IJF.2021.274498.1765. (In Persian)
- Nazeri, A., Jusoh, I., & Wasli, M. E. (2022). Soil Physicochemical Properties in Different Stand Ages And. *Journal of Sustainability Science and Management*, 17(3), 173-187. DOI: 10.46754/jssm2022.03.01
- Noraiy, A., Jalilvand, H., Hojjati, S.M., & Alavi, S.J. (2021). Comparison Changes of Chemical Elements of Throughfall and Litterfall In Oak (*Quercus Castaneifolia* Ca Mey) And Pine (*Pinus Radiata* D. Don) Plantations. *Forest And Wood Products*, 74(1), 1-14. DOI: 10.22059/JFWP.2021.300521.1094 (In Persian)
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., & Ciais, P. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *science*, 333(6045), 988-993. DOI: 10.1126/science.1201609
- Peichl, M., & Arain, M.A. (2006). Above-and belowground ecosystem biomass and carbon pools in an age-sequence of temperate pine plantation forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 140(1-4), 51-63.
- Perumal, M., Wasli, M. E., Ying, H. S., Lat, J., & Sani, H. (2015). Soil morphological and physicochemical properties at reforestation sites after enrichment planting of *Shorea macrophylla* in Sampadi Forest Reserve, Sarawak, Malaysia. *Borneo Journal of Resource Science and Technology*, 5(2), 28-43. DOI: <https://doi.org/10.33736/bjrst.220.2015>
- Pilehvar, B., Jafari, S.H., & Mirazadi, Z. (2016). Soil Carbon Sequestration Compression in Plantations with Different Species in Makhmalkooh Forest Park. *Journal of Plant research*. 29(4), 717-727. (In Persian)
- Puttaso, P., Kaewjampa, N., & Lawongsa, P. (2016). Carbon stock assessment under different ages of rubber tree plantation. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, 21(4), 1-7. DOI: 10.14456/apst.2016.12
- Richter, D.D., Markewitz, D., Wells, C.G., Allen, H.L., Dunscomb, J., Harrison, K., Heine, P.R., Stuanes, A., Urrego, B., & Bonani, G. (1995). Carbon cycling in an old-field pine forest: implications for the missing carbon sink and for the fundamental concept of soil. *Carbon Forms and Functions in Forest Soils*. SSSA Publishers, Madison, WI, 233-253.
- Sabeti, H. (1994). Trees and shrubs of Iran. *Yazd University Publication, Yazd, Iran*, 876p. (In Persian)
- Schimel, D.S., House, J.I., Hibbard, K.A., Bousquet, P., Ciais, P., Peylin, P., Braswell, B.H., Apps, M.J., Baker, D., Bondeau, A., & Canadell, J. (2001). Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 414(6860), 169-172.
- Sutinen, R., Panttaja, M., Teirila, A., & Sutinen, M. L. (2006). Effect of mechanical site preparation on soil quality in former Norway spruce sites. *Geoderma*, 136(1-2), 411-422. DOI: 10.1016/j.geoderma.2006.04.018
- Tei, S., & Sugimoto, A. (2018). Time lag and negative responses of forest greenness and tree growth to warming over circumboreal forests. *Global change biology*, 24(9), 4225-4237. DOI: 10.1111/gcb.14135
- Turvey, N.D. (1996). Growth at age 30 months of *Acacia* and *Eucalyptus* species planted in Imperata grasslands in Kalimantan Selatan, Indonesia. *Forest ecology and management*, 82(1-3), 185-195.
- Updegraff, K., Baughman, M.J., & Taff, S.J. (2004). Environmental benefits of cropland conversion to hybrid poplar: economic and policy considerations. *Biomass and bioenergy*, 27(5), 411-428.
- USDA. (2001). Soil quality test kit guide. Washington, D.C: USDA Soil Quality Institute, p. 79.

- Wong, V.N., Dalal, R.C., & Greene, R.S. (2008). Salinity and sodicity effects on respiration and microbial biomass of soil. *Biology and fertility of soils*, 44(7), 943-953. DOI: 10.1007/s00374-008-0279-1
- Yamashita, N., Ohta, S., & Hardjono, A. (2008). Soil changes induced by *Acacia mangium* plantation establishment: comparison with secondary forest and *Imperata cylindrica* grassland soils in South Sumatra, Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 254(2), 362-370. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.08.012
- Yang, H.X., Wang, S.L., Fan, B., Zhang, W.D., & Wei, C. E. (2010). Dynamics of nutrients in an age sequence of *Pinus massoniana* plantation. *Yingyong Shengtai Xuebao*, 21(8), 1907-1914.
- Yang, X. M., Xie, H. T., Drury, C.F., Reynolds, W.D., Yang, J.Y., & Zhang, X.D. (2012). Determination of organic carbon and nitrogen in particulate organic matter and particle size fractions of Brookston clay loam soil using infrared spectroscopy. *European Journal of Soil Science*, 63(2), 177-188. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2011.01421.x
- Yang, Y., Liu, B.R., & An, S.S. (2018). Ecological stoichiometry in leaves, roots, litters and soil among different plant communities in a desertified region of Northern China. *Catena*, 166, 328-338. DOI: 10.1016/j.catena.2018.04.018
- Yesilonis, I., Szlavecz, K., Pouyat, R., Whigham, D., & Xia, L. (2016). Historical land use and stand age effects on forest soil properties in the Mid-Atlantic US. *Forest Ecology and Management*, 370, 83-92. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.03.046
- Yin, X., Zhao, L., Fang, Q., & Ding, G. (2021). Differences in soil physicochemical properties in different-aged *pinus massoniana* plantations in Southwest China. *Forests*, 12(8), 987. DOI: 10.3390/f12080987
- Zeng, X., Zhang, W., Cao, J., Liu, X., Shen, H., & Zhao, X. (2014). Changes in soil organic carbon, nitrogen, phosphorus, and bulk density after afforestation of the “Beijing–Tianjin Sandstorm Source Control” program in China. *Catena*, 118, 186-194. DOI: 10.1007/s11707-016-0589-9
- Zhang, X., Zhang, X., Han, H., Shi, Z., & Yang, X. (2019). Biomass accumulation and carbon sequestration in an age-sequence of Mongolian pine plantations in Horqin sandy land, China. *Forests*, 10(2), 197. DOI: 10.3390/f10020197
- Zhang, Z., Huang, X., & Zhou, Y. (2020). Spatial heterogeneity of soil organic carbon in a karst region under different land use patterns. *Ecosphere*, 11(3), e03077. DOI: 10.1002/ecs2.3077



Research Article

Variations of soil carbon storage according to age in reforested stands of *Acer velutinum* Boiss. (case study: Neka-Zhalmroud forests)

M. Saeidi¹, S.M. Hojjati^{2*}, and A. Fallah³

¹Ph.D. Student, Dept. of Forest Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, I. R. Iran

²Prof., Dept. of Forest Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, I. R. Iran.

³ Prof., Dept. of Forest Science and Engineering Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, I. R. Iran

Abstract

The study of soil property variability over time in forest stands to determine the optimal age range for various management purposes is a research topic that has received limited attention in Iran. This research aimed to investigate the changes in soil carbon storage according to age in reforested stands of *Acer velutinum* in the Neka-Zalemroud forests. Three age groups were selected: 10-20, 20-30, and 30-40 years. Statistical analysis was conducted using 20 × 20 m sample plots and a systematic-random method with 50 × 50 m grid dimensions. Five soil samples (in the center and square of the sample plot) were taken from the surface soil (0-15 cm) in each age class studied. The results showed that among the physical characteristics, the highest soil moisture (37.33%) was found in the 30-40 year age group, and the highest bulk density (2.17 grams per cubic centimeter) was found in the 10-20 year age group. Upon examining the chemical characteristics of the soil, it was found that apart from acidity and electrical conductivity, the rest of the characteristics had significant differences influenced by the age of the stand. The highest amounts of absorbable phosphorus (7.81 mg/kg), total nitrogen (0.35%), and organic carbon (6.1%) were found in the 30-40 year old stand, and the highest amount of absorbable potassium (638.91 mg/kg) was found in the 10-20 year old stand. The carbon sequestration study showed that the 30-40-year-old stand had the greatest ability among the stands, with 305.89 tons of carbon sequestered per hectare. Therefore, based on the optimal age of carbon storage (30-40 years) for reforested *Acer velutinum*, the results of this research can be prescribed for different management purposes.

Keywords: reforested, forest soil, soil age, soil physiochemistry.