مجلهٔ جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران
سال هفدهم، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۴
ص ۲۹۲-۲۷۷
مقاله پژوهشی

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22034/ijf.2025.498274.2031
CC BY 4.0

ذخیرهٔ کربن روی زمینی و برآورد اقتصادی آن در جنگلکاری‌های بلندمازو، توسکای ییلاقی و پلت در دارابکلای ساری

محمد یعقوبی سیس[۱]، علیرضا مشکی[۲*]، مریم اسدیان[۳] و مریم ملاشاهی[۴]

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد علوم زیستی جنگل، دانشکدهٔ کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان
[۲]دانشیار گروه جنگل‌داری مناطق خشک، دانشکدهٔ کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان
[۳]دکتری علوم جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری
[۴]استادیار گروه جنگلداری مناطق خشک، دانشکدهٔ کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۵)

چکیده

مقدمه: یکی از راهکارهای مهم کاهش اثرهای منفی تغییر اقلیم، افزایش ذخیرهٔ کربن در زی‌تودهٔ گیاهی از طریق جنگلکاری با گونه‌های مناسب است. برآورد دقیق اقتصادی ذخیرهٔ کربن در پروژه‌های جنگلکاری می‌تواند در جذب سرمایه‌گذاری‌ها و حمایت‌های مالی بخش دولتی و خصوصی برای این پروژه‌ها مفید باشد. هدف پژوهش حاضر، ارزیابی اقتصادی ذخیرهٔ کربن در زی‌تودهٔ روی زمینی (تنه، تاج و لاشریزه‌ها) در جنگلکاری‌های بیست‌وهشت‌سالهٔ بلندمازو (*Quercus castaneifolia* C.A. Mey.)، توسکای ییلاقی (*Alnus subcordata* C.A. Mey.) و پلت (*Acer velutinum* Bioss.) در جنگل آموزشی- پژوهشی دارابکلای ساری بود.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، پس از شناسایی و مکان‌یابی توده‌های مدنظر، در هر توده پنج قطعه نمونهٔ مربع‌شکل ۴۰۰ متر مربعی پیاده‌سازی شده و در هر کدام، قطر برابرسینه و ارتفاع همهٔ درختان اندازه‌گیری شد. نمونه‌های لاشریزه از بخش مرکزی هر قطعه نمونه، در قطعه نمونه‌های ۵۰×۵۰ سانتی‌متر مربعی برداشت و متوسط ضخامت لاشریزه در پنج نقطهٔ تصادفی اندازه‌گیری شد. محاسبهٔ زی‌تودهٔ هر یک از درختان با استفاده از معادلات آلومتریک انجام گرفت. در نهایت، پس از محاسبهٔ ذخیرهٔ کربن درختان (به تفکیک تنه و تاج) و لاشریزه و محاسبهٔ مقدار معادل گاز دی‌اکسید کربن جذب‌شده توسط آنها، ارزش اقتصادی جذب کربن این جنگلکاری‌ها به دلار محاسبه شد.

یافته‌ها: براساس نتایج، ضخامت لاشریزه در سه تودهٔ بلندمازو، توسکای ییلاقی و پلت به‌ترتیب ۴/۵۴، ۳/۹۸ و ۳/۵۲ سانتی‌متر و زی‌تودهٔ لاشریزه‌ها به‌ترتیب ۱۷/۰۲، ۱۵/۱۱ و ۸/۳۸ تن در هکتار بود. میانگین دی‌اکسید کربن جذب‌شدهٔ هریک از درختان در توده‌های بلندمازو، توسکا و پلت به‌ترتیب ۳۹۰، ۵۸۰ و ۵۲۰ کیلوگرم بود. حجم توده‌های بلندمازو، توسکای ییلاقی و پلت به‌ترتیب ۲۲۰/۹۴، ۳۱۲/۹۲ و ۳۱۸/۱۵ متر مکعب در هکتار بود که در مجموع و در طی ۲۸ سال به‌ترتیب ۱۰۱/۵۰، ۸۰/۷۵ و ۹۸/۰۱ تن کربن در هکتار در تنه، تاج و لاشریزه‌های خود ذخیره کرده‌اند که نشان‌دهندهٔ جذب گاز دی‌اکسید کربن معادل ۳۷۲، ۲۹۶ و ۳۶۰ تن در هر هکتار برای این سه گونه است. ارزش اقتصادی حذف این مقدار گاز دی‌اکسید کربن از جو و ذخیرهٔ آن در رویه زمینی (اندام‌های هوایی و لاشریزه‌ها) در توده‌های بلندمازو، توسکای ییلاقی و پلت به‌ترتیب ۲۷۹۳۷، ۲۲۲۲۵ و ۲۶۹۷۷ دلار در هکتار است.

نتیجه‌گیری: در مجموع، توده‌های جنگلکاری‌شدهٔ بلندمازو و پلت مقادیر بیشتری کربن روی زمینی در واحد سطح را نسبت به توسکای ییلاقی ذخیره کرده‌اند. اما با محاسبهٔ سهم تک‌درخت در هر توده در ذخیرهٔ کربن روی زمینی، درختان توسکا و پلت پتانسیل بیشتری در این زمینه نسبت به بلندمازو دارند. بنابراین با در نظر گرفتن مجموع این نتایج، گونهٔ پلت، گزینهٔ مناسب‌تری برای پروژه‌های ذخیرهٔ کربن در آینده پیشنهاد می‌شود. در آینده، پژوهش‌های بیشتری برای بررسی ذخیرهٔ کربن اندام‌های زیرزمینی و خاک تحت پوشش این گونه‌ها ضروری است.

واژه‌های کلیدی: ارزش اقتصادی کربن، تغییرات اقلیمی، توده‌های دست‌کاشت، گازهای گلخانه‌ای، معادلات آلومتریک.

* نویسنده مسئول
شماره تماس: ۰۹۱۲۸۳۱۰۳۰۱
ایمیل: alireza_moshki@semnan.ac.ir

مقدمه

تغییرات اقلیمی از بحران‌های مهم زیست‌محیطی جهانی است که نگرانی‌های جدی دربارهٔ آیندهٔ بوم‌سازگان را در پی داشته است. عامل اصلی این تغییرات، گرمایش جهانی ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو، به‌ویژه دی‌اکسید کربن است. این پدیده هم بر دمای جهانی و الگوی آب‌وهوایی تأثیر می‌گذارد و هم می‌تواند سبب تغییرات شدید در تنوع زیستی، زیستگاه‌ها و چرخه‌های اکولوژیکی شود (Nair et al., 2018; Osabohien et al., 2019). یکی از راهکارهای مهم کاهش اثرهای منفی تغییر اقلیم، کاهش مقدار دی‌اکسید کربن در جو است. یکی از مؤثرترین شیوه‌های امروزی برای این هدف، ذخیرهٔ کربن در زی‌تودهٔ گیاهی (Hojati et al., 2022; Pan et al., 2011) و خاک از طریق سیستم‌های گیاه-خاک است. جنگل‌ها به‌دلیل توانایی در جذب و ذخیرهٔ کربن در خود، مناسب‌ترین و مؤثرترین محیط برای این کار به شمار می‌روند (Baluee et al., 2023). تحقیقات نشان داده‌اند که بهبود مدیریت بوم‌سازگان‌های طبیعی می‌تواند به افزایش ظرفیت ذخیرهٔ کربن کمک کند (Asadian et al., 2023; Henareh et al., 2024; Zhu et al., 2020).

به‌منظور دستیابی به برآوردهای دقیق و معتبر از مقدار ذخیرهٔ کربن، باید نقش اکوسیستم‌های جنگلی در چرخهٔ جهانی کربن به‌صورت جامع بررسی شود. برای طراحی و اجرای سیاست‌ها و برنامه‌های مؤثر در زمینهٔ سازگاری با تغییرات اقلیمی، جمع‌آوری اطلاعات دربارهٔ ذخیرهٔ کربن جنگل‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این اطلاعات می‌توانند به تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر علم کمک کرده و بهبود مدیریت منابع طبیعی و حفاظت از تنوع زیستی را تسهیل کنند (Iranmanesh & Parsapour, 2024; Koala et al., 2017). بر همین اساس، مقادیر زی‌تودهٔ اکوسیستم‌های جنگلی در مناطق متفاوت و مقیاس‌های جغرافیایی گوناگون، در کانون توجه محققان حوزهٔ پژوهش‌های تغییر اقلیم قرار گرفته است (Wang et al., 2022; Yadav et al., 2022).

از طرف دیگر، با افزایش جمعیت و فعالیت‌های انسانی، مساحت جنگل‌ها و مراتع طبیعی به‌طور مداوم در حال کاهش است. این وضعیت سبب تخریب زیستگاه‌ها و کاهش ظرفیت ذخیرهٔ کربن می‌شود (Gao et al., 2014). مدیریت پایدار جنگل‌های موجود و اجرای پروژه‌های جنگلکاری می‌تواند روش مؤثری برای کاهش آثار تغییرات اقلیمی در مقیاس جهانی باشد (Hojjati et al., 2023; Shabani et al., 2022). برآورد کربن ذخیره‌شده در درختان و خاک در جنگلکاری‌ها معیاری مهم برای ارزیابی ارزش اقتصادی جنگل‌ها در مبارزه با کاهش گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شود (Ramstein et al., 2019). انتخاب گونه‌های درختی مناسب برای پروژه‌های جنگلکاری اهمیت زیادی دارد و می‌تواند ذخیرهٔ کربن کل در این جنگلکاری‌ها را تا ۲۵ درصد افزایش دهد (Bandh et al., 2021). با شناسایی ارزش اقتصادی کربن در این اکوسیستم‌ها، برنامه‌ریزان و سیاستگذاران می‌توانند تصمیمات آگاهانه‌تر و جامع‌تری اتخاذ کنند که اولویت‌بندی دقیق‌تر اقدامات آتی را امکان‌پذیر می‌کند.

به‌طور کلی، اندازه‌گیری زی‌تودهٔ جنگلی به دو روش تخریبی و غیرتخریبی صورت می‌گیرد (Henry et al., 2010). اجرای روش تخریبی به‌دلیل قطع و توزین درختان، افزون‌بر تخریب پوشش گیاهی، در مقیاس‌های بزرگ نیازمند صرف زمان و هزینهٔ عملیاتی فراوان است (Shrestha & Wynne, 2012). براساس شواهد علمی، اجرای روش‌های غیرمخرب و با حداکثر دقت، از طریق روابط آلومتریک، از کارامدترین و متداول‌ترین روش‌های برآورد زی‌تودهٔ اکوسیستم‌های جنگلی است که مدنظر پژوهشگران قرار گرفته است. روابط آلومتریک با ایجاد مدل‌های ریاضی میان ویژگی‌های فیزیکی درختان و مقادیر زی‌تودهٔ آنها، به برآورد غیرمخرب کمک می‌کند و

امکان پایش پایدار جنگل‌ها را فراهم می‌آورد (Rubio et al., 2011; Singh et al., 2011).

براساس نتایج پژوهش‌های گذشته، توده‌های هجده‌سالهٔ توسکای ییلاقی و پلت در لاویج مازندران به‌ترتیب ۴۲۱ و ۳۸۶ تن کربن در زی‌تودهٔ خود ذخیره کرده‌اند (Haghdoost et al., 2012). همچنین Soleimanipour et al. (2022) مقدار ذخیرهٔ کربن در جنگل‌های بلوط در پهنوس استان چهارمحال و بختیاری را ۱۴ تن و Yousefi et al. (2017) مقدار ذخیرهٔ کربن در جنگل‌های بلوط کرمانشاه را ۸ تن در هکتار برآورد کرده‌اند. براساس یافته‌های Shafiee et al. (2022) گونه‌های اقاقیا (*Robinia pesudoacacia* L.)، توت (*Morus alba* L.)، کاج تهران (*Pinus eldarica* Medw.) و زبان‌گنجشک (*Fraxinus excelsior* L.) به‌ترتیب ۵۸/۴، ۹۲/۱، ۳۱/۵۸ و ۲۰/۰۸ تن کربن در هکتار، معادل ۳۷ میلیون یورو در اندام‌های هوایی خود در پارک چیتگر تهران ذخیره کرده‌اند. Askarii et al. (2021) میانگین ذخیرهٔ کربن در درختان جنگل‌های بلوط (*Quercus brantii* Lindl.) در شهرستان‌های بویراحمد و دنا را ۲۴ تن در هکتار و ارزش اقتصادی کل کربن ذخیره‌شده در لاشریزه‌ها و زی‌تودهٔ روی زمینی را ۱۸۸ میلیون تومان به‌ازای هر هکتار محاسبه کرده‌اند. براساس پژوهش Badehian et al. (2018) در منطقهٔ لاویج مازندران، توده‌های جنگلکاری‌شدهٔ افرا (*Acer pseudoplatanus* L.)، کریپتومریا (*Cryptomeria japonica* D.Don)، زربین (*Cupressus sempervirens* L.) و تدا (*Pinus taeda* L.) به‌ترتیب ۸۹، ۷۸/۵، ۷۹ و ۷۸ تن کربن را در خاک تحت پوشش خود ذخیره کرده‌اند. در پژوهش دیگری در پارک چیتگر تهران، مقدار ذخیرهٔ کربن در تودهٔ اقاقیا، سرو نقره‌ای و زمین بایر اطراف آن به‌ترتیب ۴۹۳، ۳۲۸ و ۱۱ تن در هکتار گزارش شد (Varamesh et al., 2014). پژوهش‌های قبلی نشان داد که توده‌های راش استان‌های گیلان، مازندران و گلستان، قابلیت ذخیرهٔ کربن معادل ۲۲۷ تن در هکتار در تودهٔ روی زمینی و ۲۰۵ تن در بخش زی‌تودهٔ زیرزمینی و خاک را دارند (Ghanbari Motlagh et al., 2021). افزون‌بر این، ارزش اقتصادی ذخیرهٔ کربن در جنگل‌های زاگرس شمالی در کاربری‌های جنگل بکر، جنگل حفاظتی، جنگل بهره‌برداری‌شده و باغی به‌ترتیب ۸۹۰، ۴۶۶، ۳۸۰ و ۱۹۰ میلیون ریال (هکتار در سال) بود (Pato et al., 2017).

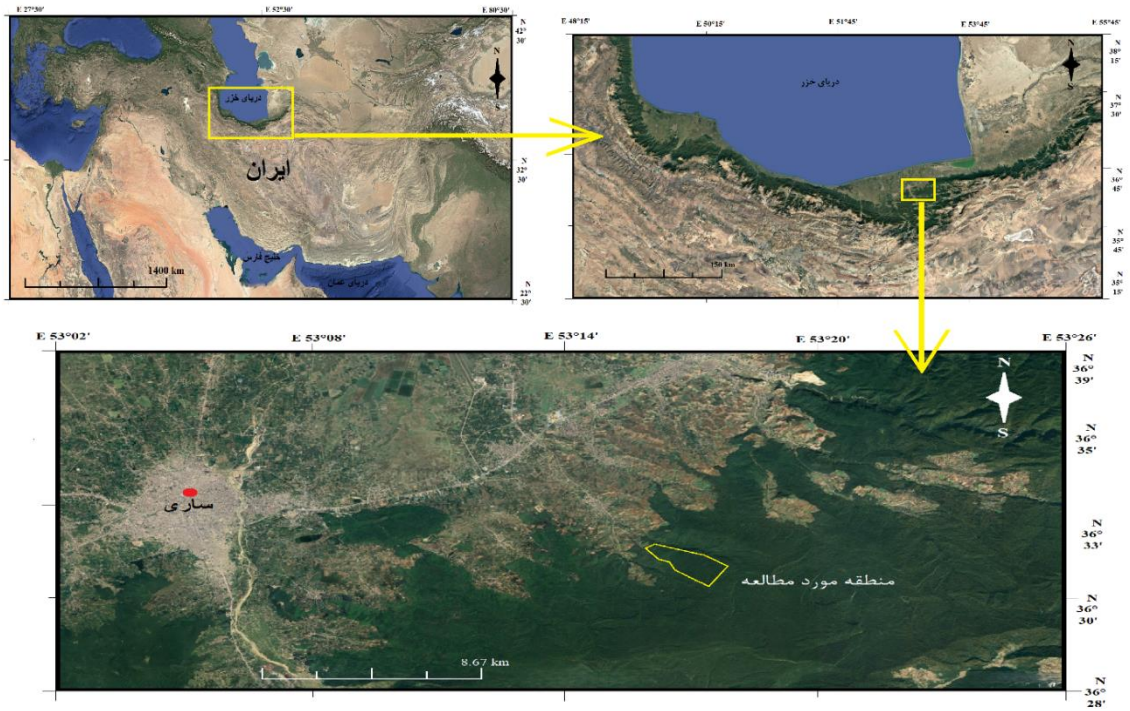
پژوهش‌های زیادی دربارهٔ ذخیرهٔ کربن جنگل‌ها و جنگلکاری‌ها انجام گرفته، اما بررسی منابع موجود نشان داد که این پژوهش‌ها در جنگل‌های هیرکانی بسیار کمتر از جنگل‌های غرب و جنگلکاری‌ها در مناطق خشک بوده و تمرکز بیشتر این پژوهش‌ها نیز بر مقدار ذخیرهٔ کربن زیرزمینی و خاک بوده است. از این‌رو در پژوهش حاضر، مقدار ذخیرهٔ کربن در اندام‌های هوایی و پوشش لاشریزه در جنگلکاری‌های بیست‌وهشت‌سالهٔ بلندمازو، توسکای ییلاقی و پلت در جنگل آموزشی- پژوهشی دارابکلای ساری بررسی و در ادامه با تبدیل مقادیر ذخیرهٔ کربن به مقدار معادل گاز دی‌اکسید کربن، ارزش اقتصادی این توده‌ها در کاهش مقدار این گاز در جو ارزیابی شد. با فرض متفاوت بودن قابلیت ذخیرهٔ کربن توده‌های جنگلکاری‌شده، هدف نهایی این تحقیق، معرفی بهترین گونهٔ جنگلکاری از نظر قابلیت ذخیرهٔ کربن روی زمینی بود. نتایج این تحقیق می‌تواند برای مدیران اجرایی، در انتخاب نوع و ترکیب گونه‌های مناسب در پروژه‌های آیندهٔ جنگلکاری با هدف ترسیب کربن به‌عنوان معیاری برای ارزیابی بازده اقتصادی این طرح‌ها مفید باشد.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ پژوهش

برای اجرای این تحقیق، توده‌های دست‌کاشت بلندمازو، توسکای ییلاقی و پلت واقع در قطعهٔ ۳۹ جنگل آموزشی- پژوهشی دانشکدهٔ منابع طبیعی ساری (واقع در سری ۱ طرح جنگلداری دارابکلا) انتخاب شدند. این گونه‌ها در سال ۱۳۷۴ و هر کدام

در سطح تقریبی پنج هکتار کاشته شده‌اند و تا کنون در هیچ یک از توده‌ها عملیات پرورشی صورت نگرفته است. نمونه‌برداری از توده‌های مدنظر در سال ۱۴۰۲ انجام گرفت. منطقهٔ پژوهش در محدودهٔ جغرافیایی ۵۲ درجه و ۱۶ دقیقهٔ طول شرقی و ۳۶ درجه و ۳۲ دقیقهٔ عرض شمالی قرار دارد. ارتفاع این منطقه از سطح دریا ۳۰۴ متر و شیب آن بین ۰ تا ۵ درصد متغیر است. حداکثر و حداقل دمای منطقه، به‌ترتیب ۲۸ و ۳- درجهٔ سانتی‌گراد است. بارش سالانه در این ناحیه بین ۷۰۰ تا ۷۵۰ میلی‌متر برآورد شده است (Asadi et al., 2021). خاک این منطقه اغلب دارای بافت لومی با اسیدیتهٔ ۶ تا ۶/۵ است. این جنگلکاری‌ها در کنار توده‌های جنگل طبیعی شامل گونه‌های درختی مانند بلندمازو، توسکای ییلاقی، پلت، ون، ممرز (*Carpinus betulus* L.)، شیردار (*Acer cappadocicum* Gled.)، گردو (*Juglans regia* L.)، انجیلی (*Parrotia persica* C.A.Mey.) و پوشش زیراشکوب شامل *Crataegus microphylla* K.Koch., *Mespilus germanica* L., *Rubus fruticosus* L., *Viola odorata* L., *Primula vulgaris* Huds., *Sorghum halepense* L. و *Urtica dioica* L. واقع شده‌اند.



شکل ۱- موقعیت منطقهٔ پژوهش
Figure 1. The location of the study area

شیوهٔ اجرای پژوهش

پس از جنگل‌گردشی و بازدید اولیه از منطقه، توده‌های مدنظر شناسایی شدند. در هر تودهٔ جنگلی، پنج قطعه نمونهٔ مربع‌شکل ۴۰۰ متر مربعی (۲۰×۲۰ متر) و در مجموع پانزده قطعه نمونه برداشت و اندازه‌گیری شد. در هر قطعه نمونه، قطر برابرسینهٔ درختان با استفاده از خط‌کش دوبازو با دقت سانتی‌متر و ارتفاع درختان با استفاده از شیب‌سنج سونتو اندازه‌گیری شد. سپس حجم درختان با استفاده از رابطهٔ ۱ محاسبه شد (Zobeiry, 1994).

رابطهٔ ۱ $$V = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times h \times f$$

V: حجم تنه (متر مکعب)، d: قطر برابرسینهٔ درخت (متر) و h: ارتفاع درخت (متر) است. f: ضریب شکل تنه است که ۰/۵ در نظر گرفته شد (Zobeiry,

1994). افزون‌بر این، نمونه‌های لاشریزه از بخش مرکزی هر قطعه نمونه، در سطح ۵۰×۵۰ سانتی‌متر مربعی برداشت و در کیسه‌های نایلونی به آزمایشگاه منتقل شد. همچنین در داخل هر قطعه نمونه، متوسط عمق لاشریزه در پنج نقطه اندازه‌گیری شد. به‌طور کلی سعی شد برای به حداقل رساندن اثرهای مرزی، حاشیهٔ توده‌ها برای نمونه‌برداری در نظر گرفته نشود و نمونه‌برداری مایل به مرکز هر توده باشد (Kooch, 2012; Mölder et al., 2008).

محاسبهٔ زی‌تودهٔ کل روی زمینی و برآورد مقدار کربن موجود در آن

تبدیل حجم تنهٔ درختان به وزن با استفاده از جرم مخصوص بحرانی جدول ۱ (Niknezhad et al., 2017)، طبق رابطهٔ ۲ انجام گرفت که در آن، B: زی‌تودهٔ تنه درخت (کیلوگرم)، V: حجم تنه (متر مکعب)، R: جرم مخصوص بحرانی است.

رابطهٔ ۲

$$B = V \times R$$

زی‌تودهٔ قسمت‌های دیگر درختان شامل شاخه و برگ یا تاج درختان با استفاده از معادلات آلومتریک محاسبه شد (جدول ۲). زی‌تودهٔ روی زمینی کل نیز از حاصل جمع زی‌تودهٔ تنه و تاج محاسبه شد. برای به دست آوردن مقدار کربن موجود از رابطهٔ ۳ استفاده شد که بیانگر مقدار کربن در زی‌توده به‌اندازهٔ نصف وزن اجزای خشک اندازه‌گیری‌شدهٔ درخت است (Riazi & Shakouri, 2008).

رابطهٔ ۳

$$C = B \times 0.5$$

جدول ۱- جرم حجمی بحرانی گونه‌های تحت بررسی

Table 1. Critical wood density of studied species

گونه species	جرم مخصوص بحرانی (کیلوگرم بر مترمکعب) Critical density(kg/m^3)
بلندمازو *Quercus castaneifolia*	640
توسکای ییلاقی *Alnus subcordata*	410
پلت *Acer velutinum*	480

جدول ۲- معادلات آلومتریک موجود برای اجزای گونه‌های مختلف (BR: شاخه، LF: برگ و CR: تاج)

Table 2. Allometric equations for components of different species (BR: Branch, LF: Leaf and CR: Crown)

منبع Reference	b	a	معادله equation	واحد قطر Diameter unit	واحد زی‌توده Biomass unit	گونه species
(Yuste et al., 2005)	3.3064	0.0021	$Y = a.DBH^b$	cm	Kg	*Quercus castaneifolia* (BR)
(Yuste et al., 2005)	2.6081	0.0024	$Y = a.DBH^b$	cm	Kg	*Quercus castaneifolia* (LF)
(Johansson, 1999)	2.880598	0.000003	$Y = a.DBH^b$	mm	Kg	*Alnus Subcordata* (BR)
(Johansson, 1999)	2.547045	0.000003	$Y = a.DBH^b$	mm	Kg	*Alnus subcordata* (LF)
(Snell, 1983)	2.1505	-2.8534	$\ln Y = a + b * (\ln DBH)$	cm	Kg	*Acer velutinum* (CR)

اندازه‌گیری کربن لاشریزه

ابتدا نمونه‌های لاشریزه برای اندازه‌گیری درصد کربن آلی در آون در دمای ۶۰ درجهٔ سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. سپس نمونه‌ها آسیاب شده و بعد از توزین، در کوره قرار داده شدند و به‌مدت ۴ ساعت در دمای ۴۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد سوزانده شده و سپس در دسیکاتور سرد و وزن شدند. با تعیین وزن خاکستر، وزن اولیه و نسبت کربن آلی به مواد آلی، مقدار کربن آلی در هر یک از نمونه‌های لاشریزه به‌طور جداگانه محاسبه شد (Forouzeh et al., 2008; Raeini & Sadeghi, 2018).

محاسبهٔ دی‌اکسید کربن جذب‌شده و ارزش اقتصادی آن

۱ تن کربن ذخیره‌شده در اندام‌های درختان، بیانگر حذف ۳/۶۷ تن دی‌اکسید کربن از اتمسفر است؛ از این‌رو با استفاده از رابطهٔ ۴ مقدار دی‌اکسید کربن جذب‌شده توسط درختان محاسبه شد (Flora et al., 2018; Vishnu & Patil, 2016).

رابطهٔ ۴ مقدار دی‌اکسید کربن جذب‌شده (تن در هکتار) = 3.67 × مقدار کربن ذخیره‌شده (تن در هکتار)

دربارهٔ ارزش اقتصادی دی‌اکسید کربن جذب‌شده از اتمسفر، توافقی بر سر مقدار عددی معینی وجود ندارد. این ناسازی ممکن است به‌دلیل تفاوت رویشگاه، روش‌های مدل‌سازی، فرضیه‌های تحقیق و شیوه‌های مختلف ارزشگذاری باشد. تفاوت در اهداف سیاستگذاری، شرایط اقتصادی و زیست‌محیطی نیز ممکن است این تنوع در قیمت‌گذاری را تشدید کنند (Ramstein et al., 2019; Thorsen et al., 2014; Wang et al., 2019). با این‌حال، گروهی از اقتصاددانان پیشنهاد کردند که ارزش کربن باید در دامنهٔ زمانی مشخصی تعیین شود، بدین صورت که قیمت کربن باید بین ۴۰ تا ۸۰ دلار به‌ازای هر تن دی‌اکسید کربن تا سال ۲۰۲۰ و بین ۵۰ تا ۱۰۰ دلار به‌ازای هر تن دی‌اکسید کربن تا سال ۲۰۳۰ قرار گیرد. در این پژوهش که در سال ۱۴۰۲ انجام گرفت، قیمت هر تن دی‌اکسید کربن ۷۵ دلار (میانگین ۵۰ و ۱۰۰ دلار) در نظر گرفته شد (Postic & Clément, 2013; Ramstein et al., 2019).

روش تحلیل

در این پژوهش، نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف- اسمیرنوف و بررسی همگنی واریانس داده‌ها با استفاده از آزمون لون بررسی شد. سپس برای تجزیه‌وتحلیل آماری متغیرهای اندازه‌گیری‌شده، آنالیز واریانس یکطرفه (ANOVA) به کار گرفته شد و در ادامه مقایسهٔ میانگین با استفاده از آزمون دانکن انجام گرفت. همهٔ آنالیزهای آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخهٔ ۲۶ انجام گرفت.

نتایج

بیشترین قطر برابرسینه در توسکای ییلاقی (۲۷/۶۷ سانتی‌متر) و کمترین آن در بلندمازو (۱۹/۱۶ سانتی‌متر) اندازه‌گیری شد (جدول ۳). دربارهٔ مقایسهٔ ارتفاع بین سه توده نیز اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ وجود داشت که بیشترین ارتفاع در پلت و کمترین ارتفاع در بلندمازو (۱۹/۱۳ متر) بود. با وجود این، در مقایسهٔ سطح مقطع بر هکتار این سه توده، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۵ مشاهده نشد. در بررسی حجم در هکتار نیز اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۵ بین دو تودهٔ توسکای ییلاقی و پلت با تودهٔ بلندمازو وجود داشت که بیشترین مقدار مربوط به تودهٔ پلت (۳۱۸ متر مکعب) و کمترین مقدار مربوط به تودهٔ بلندمازو (۲۲۱ متر مکعب) بود (جدول ۳).

مقادیر زی‌تودهٔ تنه برای بلندمازو، توسکای ییلاقی و پلت به‌ترتیب ۱۴۱۴۰۲، ۱۲۸۲۹۹ و ۱۵۲۷۱۴ کیلوگرم بر هکتار به دست آمد که حاکی از نبود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ در بین سه توده بود، اما زی‌تودهٔ تاج اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۱ بین سه تودهٔ بررسی‌شده نشان داد، به‌طوری که بیشترین زی‌تودهٔ تاج مربوط به بلندمازو

(۴۷۹۹۶ کیلوگرم در هکتار) و کمترین مربوط به توسکای ییلاقی (۲۲۲۱۰ کیلوگرم بر هکتار) بود. زی‌تودهٔ تاج پلت (۳۷۶۱۱ کیلوگرم بر هکتار) حد وسط دو تودهٔ دیگر بود (شکل ۲).

جدول ۳- مقایسهٔ میانگین (± انحراف معیار) تعداد در هکتار، قطر برابرسینه، ارتفاع، سطح مقطع، حجم در توده‌های بررسی‌شده

Table 3. Comparison of mean (± standard deviation) of number per hectare, diameter at breast height (DBH), height, basal area and volume in studied stands

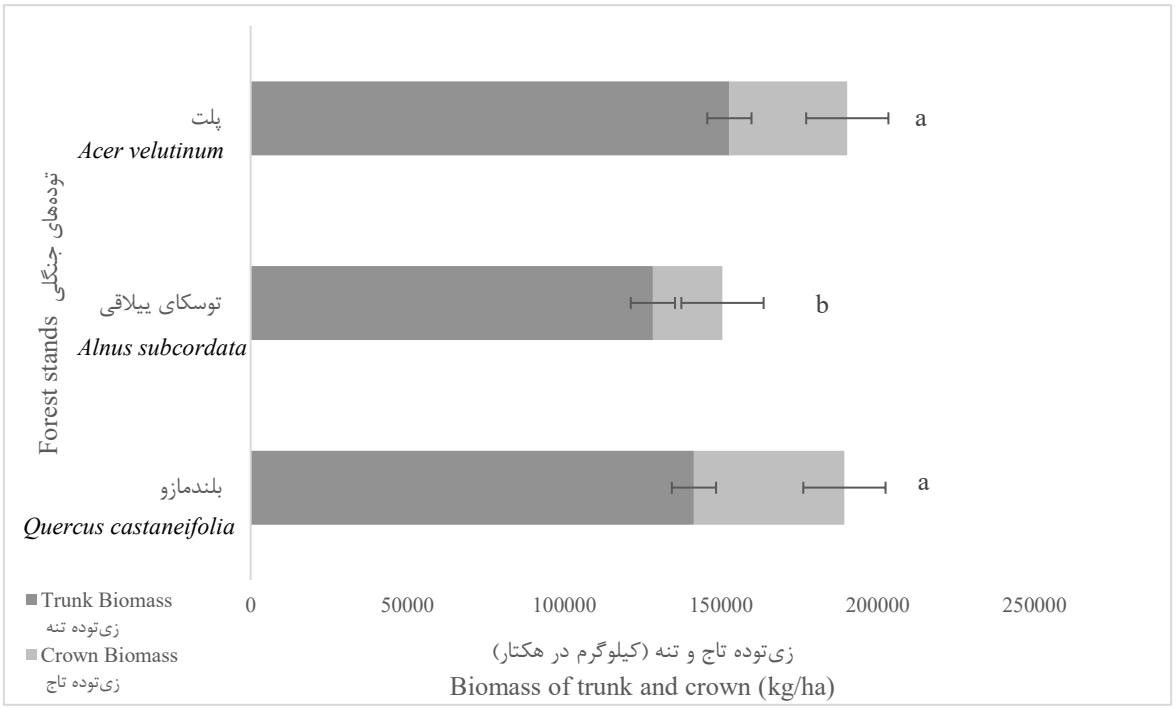
F	پلت *Acer velutinum*	توسکای ییلاقی *Alnus subcordata*	بلندمازو *Quercus castaneifolia*	
53.596^{**}	$23.51^{b}\pm0.65$	$27.67^{a}\pm0.67$	$19.16^{c}\pm0.34$	قطر برابرسینه (سانتی‌متر) DBH (cm)
76.531^{**}	$19.13^{a}\pm0.65$	$17.89^{b}\pm0.30$	$14.77^{c}\pm0.08$	ارتفاع (متر) Height (m)
0.556^{ns}	31.45 ± 2.30	32.76 ± 3.55	28.93 ± 1.59	رویهٔ زمینی (متر مربع بر هکتار) Basal area (m^2/ha)
4.874^{*}	$318.15^{a}\pm22.64$	$312.92^{a}\pm34.60$	$220.94^{b}\pm11.39$	حجم (متر مکعب بر هکتار) Volume (m^3/ha)

حروف انگلیسی متفاوت نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌های هر مشخصه است

^{ns}، *، ** به‌ترتیب بیانگر معنی‌دار نبودن و معنی‌داری در سطح ۵ و ۱ درصد است

Different English letters indicate a significant difference in the means of each characteristic

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



شکل ۲- مقایسهٔ میانگین زی‌تودهٔ تاج و تنه در توده‌های بررسی‌شده

حروف انگلیسی متفاوت نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌های هر مشخصه است.

Figure 2. Comparison of mean of trunk and crown biomass in studied stands

Different English letters indicate a significant difference between means of each characteristic

براساس نتایج به‌دست‌آمده در بررسی مقادیر عمق، وزن و کربن آلی لاشریزه، هر سه مشخصه دارای اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۰/۰۵ بودند، به‌طوری که بیشترین مقدار عمق لاشریزه برای تودهٔ بلندمازو و کمترین مقدار آن در تودهٔ پلت مشاهده شد. در بررسی زی‌تودهٔ لاشریزه، تودهٔ بلندمازو بیشترین و تودهٔ پلت کمترین مقدار را داشتند. کربن آلی لاشریزه نیز در بلندمازو بیشترین و در توسکای ییلاقی کمترین مقادیر را نشان دادند (جدول ۴).

در بررسی ذخیرهٔ کربن تنه، تاج، لاشریزه و ذخیرهٔ کربن کل برای سه توده، نتایج نشان دادند که مقادیر ذخیرهٔ کربن تاج، لاشریزه و کل دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ هستند. بیشترین مقدار ذخیرهٔ کربن تاج، لاشریزه و کل در تودهٔ بلندمازو، کمترین مقدار ذخیرهٔ کربن تاج و کل برای تودهٔ توسکای ییلاقی و کمترین مقدار ذخیرهٔ کربن لاشریزه نیز در تودهٔ پلت اندازه‌گیری شد، اما در بررسی ذخیرهٔ کربن تنه اختلاف معنی‌داری آماری مشاهده نشد (جدول ۵).

جدول ۴- مقایسهٔ میانگین (± انحراف معیار) ضخامت لاشریزه، زی‌تودهٔ لاشریزه و کربن آلی لاشریزه در توده‌های بررسی‌شده

Table 4. Comparison of mean (± standard deviation) of depth of leaf litter, weight of leaf litter and organic carbon of leaf litter in studied stands

F	پلت *Acer velutinum*	توسکای ییلاقی *Anus subcordata*	بلندمازو *Quercus castaneifolia*	
5.868*	3.52^{b}±0.12	3.98^{ab}±0.04	4.54^{a}±0.34	عمق لاشریزه (سانتی‌متر) Depth of litter (cm)
11.132*	8.38^{b}±0.80	15.11^{a}±0.88	17.02^{a}±2.03	زی‌تودهٔ لاشریزه (تن بر هکتار) Weight of litter (t/ha)
5.179*	37.77^{ab}±0.50	36.47^{b}±0.78	39.73^{a}±0.80	کربن آلی لاشریزه (٪) Organic carbon of litter (%)

حروف انگلیسی متفاوت نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌های هر مشخصه است

ns، *، به‌ترتیب بیانگر معنی‌دار نبودن و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد است.

Different English letters indicate a significant difference in the means of each characteristic

ns, *, ** indicate non-significance, significance at five and one percent level, respectively

جدول ۵- مقایسهٔ میانگین (± انحراف معیار) ذخیرهٔ کربن تنه، تاج، لاشریزه و کل در توده‌های بررسی‌شده

Table 5. Comparison of mean (± standard deviation) of trunk, crown, leaf litter and total carbon storage in studied stands

F	پلت *Acer velutinum*	توسکای ییلاقی *Anus subcordata*	بلندمازو *Quercus castaneifolia*	
1.202ns	76.35±5.43	64.14±7.09	70.70±3.64	ذخیرهٔ کربن تنه (تن بر هکتار) Trunk carbon storage (t/ha)
52.382**	18.80^{b}±2.72	11.10^{c}±1.22	23.99^{a}±1.06	ذخیرهٔ کربن تاج (تن بر هکتار) Crown carbon storage (t/ha)
10.155**	3.15^{b}±0.26	5.51^{a}±0.35	6.81^{a}±0.90	ذخیرهٔ کربن لاشریزه (تن بر هکتار) Litter carbon storage (t/ha)
2.807**	98.31^{a}±8.14	80.75^{b}±8.31	101.50^{a}±4.66	ذخیرهٔ کربن کل (تن بر هکتار) Total carbon storage (t/ha)

حروف انگلیسی متفاوت نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌های هر مشخصه است

ns، *، ** به‌ترتیب بیانگر معنی‌دار نبودن و معنی‌داری در سطح ۵ و ۱ درصد است.

Different English letters indicate a significant difference in the means of each characteristic

ns, *, ** indicate non-significance, significance at five and one percent level, respectively

در بررسی مقدار دی‌اکسید کربن جذب‌شده برای اجزای مختلف درختی سه توده، نتایج نشان دادند که مقدار دی‌اکسید کربن جذب‌شده کل، تاج و لاشریزه، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۵ دارند، به‌طوری که بیشترین مقدار جذب دی‌اکسید کربن کل، تاج و لاشریزه مربوط به تودهٔ بلندمازو و کمترین مقدار مربوط به تودهٔ توسکای ییلاقی بود. همچنین توده‌های بلندمازو و پلت به‌ترتیب با ۳۷۲ و ۳۶۰ تن دی‌اکسید کربن جذب‌شده در هکتار، مقادیر بیشتری را در سطح احتمال ۰/۰۵ نسبت به تودهٔ توسکا (۲۹۶ تن در هکتار) نشان دادند. ارزش اقتصادی ترسیب دی‌اکسید کربن به‌ازای هر هکتار از توده‌های بلندمازو، توسکای ییلاقی و پلت به‌ترتیب ۲۷۹۴۰، ۲۲۲۳۰ و ۲۶۹۷۷ دلار به دست آمد. با این‌حال، با در نظر گرفتن تعداد درختان، دی‌اکسید کربن جذب‌شدهٔ هریک از درختان در توده‌های بلندمازو، توسکا و پلت به‌ترتیب ۳۹۰، ۵۸۰ و ۵۲۰ کیلوگرم و ارزش اقتصادی آن ۲۹/۸۱، ۴۳/۵۲ و ۳۹/۶۶ دلار بود (جدول ۶).

جدول ۶- مقایسهٔ میانگین (± انحراف معیار) دی‌اکسید کربن و ارزش اقتصادی آن در توده‌های بررسی‌شده

Table 6. Comparison of mean (± standard deviation) CO_2 storage in studied stands

پلت *Acer velutinum*	توسکای ییلاقی *Alnus subcordata*	بلندمازو *Quercus castaneifolia*	
69.01^{b}±5.66	40.75^{c}±3.52	88.07^{a}±5.83	دی‌اکسید کربن جذب‌شده در تاج (تن در هکتار) Sequestrated CO_2 in crown (t/ha)
280.22^{a}±20.89	235.42^{c}±27.06	259.47^{b}±21.76	دی‌اکسید کربن جذب‌شده در تنه (تن در هکتار) Sequestrated CO_2 in trunk (t/ha)
11.56^{b}±1.97	20.22^{a}±2.60	24.99^{a}±3.64	دی‌اکسید کربن جذب‌شده در لاشریزه (تن در هکتار) Sequestrated CO_2 in Litter (t/ha)
360.80^{a}±27.53	296.40^{b}±31.04	372.53^{a}±18.94	دی‌اکسید کربن جذب‌شدهٔ کل روی زمینی (تن در هکتار) Total aboveground sequestrated CO_2 (t/ha)
12.88^{a}±0.69	10.58^{b}±1.18	13.30^{a}±1.17	میانگین جذب سالانهٔ دی‌اکسید کربن (تن در هکتار) Average annual sequestrated CO_2 (t/ha)
695^{b}	520^{b}	950^{a}	تعداد درختان در هر هکتار Number of trees per hectare
0.52^{a}±0.06	0.58^{a}±0.09	0.39^{b}±0.03	میانگین دی‌اکسید کربن جذب‌شده برای هر اصله درخت (تن) Average sequestrated CO_2 for each tree
27060^{a}±356.24	22230^{b}±457.67	27940^{a}±247.23	ارزش کل اقتصادی جذب دی‌اکسید کربن در هر هکتار (دلار) Total economic value of sequestrated CO_2 (Dollar/ha)
963.60^{a}±127.33	793.97^{b}±163.52	997.93^{a}±88.25	ارزش سالانهٔ اقتصادی جذب دی‌اکسید کربن در هر هکتار (دلار) Annual economic value of sequestrated CO_2 (Dollar/ha)
39.66^{a}±4.94	43.52^{a}±7.21	29.81^{b}±2.98	ارزش اقتصادی جذب دی‌اکسید کربن برای هر اصله درخت (دلار) Economic value of sequestrated CO_2 for each tree (Dollar)

حروف انگلیسی متفاوت نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌های هر مشخصه است.

Different letters indicate a significant difference in the means of each characteristic

بحث

افزایش گازهای گلخانه‌ای سبب تغییرات اقلیمی در جهان شده است و دی‌اکسید کربن عامل ۶۰ درصد از این تغییرات اقلیمی به شمار می‌رود (Xu et al., 2009). در این میان اکوسیستم‌های جنگلی اعم از طبیعی یا کاشته‌شده توسط انسان به‌صرفه‌ترین و کارامدترین منابع جذب کربن اضافی در جو هستند (Fu et al., 2015). مقدار کربن ذخیره‌شده در اراضی جنگلی به عواملی چون نوع و سن درخت، شرایط اقلیمی، ویژگی‌های خاک، شرایط هیدرولوژیکی و سیستم‌های مدیریتی بستگی دارد (Bai & Ding, 2024). براساس نتایج پژوهش حاضر، توده‌های

بیست‌وهشت‌سالهٔ توسکای ییلاقی و پلت به‌ترتیب ۸۰/۷۵ و ۹۸/۳۱ تن کربن را در زی‌تودهٔ روی زمینی خود ذخیره کرده‌اند. براساس نتایج پژوهش‌های قبلی، توده‌های هجده‌سالهٔ توسکای ییلاقی و پلت در لاویج مازندران به‌ترتیب ۴۲۱ و ۳۸۶ تن کربن در زی‌تودهٔ خود ذخیره کرده‌اند که بیشتر از مقادیر به‌دست‌آمده در این تحقیق است (Haghdoost et al., 2012). علت احتمالی این تفاوت، تراکم بیشتر درختان در پژوهش یادشده (۲۵۰۰ درخت در هکتار) و همچنین در نظر گرفتن زی‌تودهٔ زیرزمینی (ریشه) در محاسبات است. همچنین براساس نتایج این پژوهش، مقدار کربن ذخیره‌شده در تودهٔ بلندمازو با تراکم ۹۵۰ درخت در هکتار ۱۰۱ تن برآورد شد. بیشتر پژوهش‌ها دربارهٔ ذخیرهٔ کربن بلوط در جنگل‌های غرب ایران و روی گونهٔ بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) انجام گرفته است. برای مثال Soleimanipour et al. (2022) مقدار ذخیرهٔ کربن در جنگل‌های بلوط پهنوس استان چهارمحال و بختیاری را ۱۴ تن به‌ازای ۱۲۱ درخت در هکتار برآورد کرده‌اند. پژوهش Yousefi et al (2017) نیز نشان داد که مقدار ذخیرهٔ کربن در جنگل‌های بلوط کرمانشاه ۸ تن به‌ازای ۱۴۵ درخت در هکتار است. مقادیر گزارش‌شده بسیار کمتر از مقدار کربن ذخیره‌شده در پژوهش حاضر است که علت را افزون‌بر تراکم درختان در واحد سطح، می‌توان تفاوت گونه، تفاوت شرایط خاک و اقلیم رویشگاه‌ها دانست.

از طرف دیگر Mohammadi et al (2017)، مقدار کربن تودهٔ روی زمینی در جنگل‌های طبیعی اسالم استان گیلان شامل گونه‌های راش (*Fagus orientalis* Lipsky.)، ممرز، افرا، نمدار (*Tilia platyphyllos* Scopoli.) و زبان‌گنجشک را ۱۶۰ تن در هکتار برآورد کرده‌اند که بیشتر از میانگین ذخیرهٔ کربن در جنگلکاری‌های تحت بررسی در این پژوهش (۹۳ تن در هکتار) است. برخی از پژوهش‌های گذشته نشان دادند که ظرفیت جنگل‌های طبیعی برای ذخیرهٔ کربن بیشتر از توده‌های دست‌کاشت توسط انسان است (Badehian et al., 2018; Khademi et al., 2010). همچنین نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که هر یک از درختان توده‌های بلندمازو، توسکای ییلاقی و پلت به‌ترتیب ۳۹۰، ۵۸۰ و ۵۲۰ کیلوگرم دی‌اکسید کربن را از هوا جذب کرده‌اند و تفاوت معنی‌دار آماری بین گونه‌های توسکای ییلاقی و پلت از نظر جذب دی‌اکسید کربن مشاهده نشد. اما پژوهشی دربارهٔ اثر جنگلکاری‌های هجده‌سالهٔ توسکای ییلاقی و پلت بر ذخیرهٔ کربن زیرزمینی در چمستان استان مازندران نشان داد که گونهٔ پلت، توانایی بیشتری در ذخیرهٔ کربن زیرزمینی (۱۵۵ تن در هکتار) نسبت به گونهٔ توسکای ییلاقی (۱۰۲ تن در هکتار) دارد (Haghdoost et al., 2012).

تحقیقات قبلی نشان داده‌اند که بیش از ۵۰ درصد ذخیرهٔ کربن در درختان به تنه اختصاص دارد (Indufor, 2002). در تحقیق کنونی، نسبت کربن ذخیره‌شده در تنه نسبت به کل اندام درخت برای سه گونهٔ بلندمازو، توسکای ییلاقی و پلت به‌ترتیب ۷۴، ۸۵ و ۸۰ درصد بود که با نتایج فوق مطابقت دارد. پژوهش‌های پیشین نیز نشان می‌دهند که قطر برابرسینهٔ درختان رابطهٔ مستقیمی با مقدار ذخیرهٔ کربن آن دارد (Soleimanipour et al., 2022; Zaher et al., 2019). موافق با این محققان و براساس نتایج این پژوهش، درختان بلندمازو، توسکا و پلت به‌ترتیب قطر برابرسینهٔ ۱۴/۷۷، ۱۷/۸۹ و ۱۹/۱۳ داشته‌اند که به‌صورت میانگین ۳۹۰، ۵۸۰ و ۵۲۰ کیلوگرم دی‌اکسید کربن را در اندام خود ذخیره کرده‌اند. در نتیجه قطر برابرسینه را می‌توان یکی از شاخص‌های سادهٔ اندازه‌گیری دانست که در پیش‌بینی‌های اولیه دربارهٔ قابلیت ذخیرهٔ کربن درختان توده‌های جنگلکاری کاربرد خواهد داشت. همچنین براساس یافته‌های Binkley et al., 2003 و Shafiee et al., 2022 کشت آمیختهٔ درختان ظرفیت بیشتری از کشت خالص در مقدار ذخیرهٔ کربن دارد. براساس نتایج این پژوهش و با توجه به متفاوت بودن پتانسیل

ذخیرهٔ کربن گونه‌های بررسی‌شده، نتایج پژوهش‌های یادشده تأیید می‌شود.

همچنین با توجه به اثرپذیری مستقیم سطح مقطع و حجم درختان از رویش قطری و ارتفاع درختان، بیشتر بودن میانگین سطح مقطع تودهٔ توسکای ییلاقی در اثر رویش قطری بیشتر و بیشترین بودن حجم درختان پلت در اثر رویش ارتفاعی بیشتر این گونه حاصل شده است. در پژوهشی در جنگلکاری‌های بیست‌وپنج‌سالهٔ کاج تدا (*Pinus taeda*)، توسکای قشلاقی (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn)، پلت و بلندمازو در رادارپشتهٔ استان گیلان، قطر برابرسینه و سطح مقطع تودهٔ توسکا بیشتر از تودهٔ پلت و بلندمازو بود. همچنین حجم درختان پلت نیز بیشتر از درختان توسکا و بلندمازو گزارش شد که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد (Ebrahimi Ashbella et al., 2022).

تعیین زی‌تودهٔ گونه‌های درختی افزون‌بر اهمیت در مدیریت و ساماندهی منابع طبیعی، سهم مناطق جنگلکاری‌شدهٔ هر منطقه را در جهان از لحاظ چرخهٔ کربن تعیین می‌کند. در بررسی زی‌تودهٔ تنه و تاج سه گونهٔ بررسی‌شده، با وجود بیشتر بودن تعداد درختان موجود در هکتار برای گونه‌های بلندمازو و پلت نسبت به گونهٔ توسکای ییلاقی، در مقدار زی‌تودهٔ تنه اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد که دلیل آن، قطورتر بودن پایه‌های توسکای ییلاقی است (Motaghikhah et al., 2021). اما زی‌تودهٔ تاج در بین سه گونهٔ تحت بررسی دارای اختلاف معنی‌دار بود، به‌طوری که درختان بلندمازو و پلت به‌دلیل داشتن حداکثر تعداد در هکتار، حداکثر زی‌تودهٔ تاج را نیز به خود اختصاص دادند. نتایج پژوهش‌های دیگر در بررسی زی‌تودهٔ روی زمینی در همین منطقه نیز نشان داد که زی‌تودهٔ تاج بلندمازو، توسکای ییلاقی و پلت یکسان نبوده و به‌ترتیب زی‌تودهٔ تاج بلندمازو بیشتر از زی‌تودهٔ تاج پلت و توسکای ییلاقی است که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد (Niknezhad et al., 2017).

گونهٔ بلندمازو در بین گونه‌های بررسی‌شده دارای بیشترین مقدار کربن لاشریزه بود. این گونه تأثیر بسزایی در الگوی معدنی‌سازی کربن لاشریزه دارد که سبب تجمع زیاد لاشریزه و تشکیل لایهٔ عمیق در سطح خاک می‌شود (Gao et al., 2014). بعد از بلندمازو، توسکای ییلاقی عمق و زی‌تودهٔ لاشریزه بیشتری نسبت به پلت داشت، اما مقدار کربن لاشریزهٔ توسکای ییلاقی کمتر از پلت بود. گونهٔ توسکای ییلاقی که گونه‌ای با توانایی تثبیت نیتروژن است، لاشریزه‌هایی با مقدار نیتروژن زیاد و C/N کم دارد که سبب می‌شود تجزیهٔ لاشریزه سریع باشد (Parsapour et al., 2021). از طرف دیگر برگ‌های گونهٔ پلت مقادیر زیادی نیتروژن، فسفر، پتاسیم و منیزیم دارند که روند تجزیه و بازگشت عناصر غذایی را تسریع می‌کند (Hashemi et al., 2012).

نتیجه‌گیری

در مجموع، توده‌های جنگلکاری‌شدهٔ بلندمازو و پلت مقادیر بیشتری کربن روی‌زمینی در واحد سطح نسبت به توسکای ییلاقی ذخیره کرده‌اند؛ اما با محاسبهٔ سهم تک‌درخت در هر توده در ذخیرهٔ کربن روی زمینی، درختان توسکا و پلت توانایی بیشتری در این زمینه نسبت به بلند مازو دارند. بنابراین با در نظر گرفتن مجموع این نتایج، گونهٔ پلت، گزینهٔ مناسب‌تری برای پروژه‌های ذخیرهٔ کربن در آینده پیشنهاد می‌شود. از طرف دیگر، ارزش ذخیرهٔ کربن توده‌ها، تنها برای اندام‌های هوایی و لاشریزه‌ها به‌صورت میانگین در هر هکتار حدود ۲۵۷۰۰ دلار است. اگر این مقدار برای مجموع سطح ۱۵ هکتاری این سه جنگلکاری محاسبه شود، عدد ۳۸۵۵۰۰ دلار به دست خواهد آمد که فقط ارزش کاربری جذب دی‌اکسید کربن روی زمینی آنها از جو است. در آینده، پژوهش‌های بیشتری برای بررسی ذخیرهٔ کربن اندام‌های زیرزمینی و خاک تحت پوشش این گونه‌ها نیز ضرورت دارد. بررسی نسبت ترکیب بهینهٔ این سه

گونه، برای حداکثرسازی مقدار ذخیرهٔ کربن این گونه‌ها نیز جای بحث و بررسی دارد.

سپاسگزاری

نگارندگان مقاله نهایت تشکر خود را از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به‌دلیل فراهم کردن شرایط حضور در جنگل آموزشی و پژوهشی دارابکلای ساری (نمونه‌برداری در عرصه) و همچنین آنالیزهای خاک در آزمایشگاه آب، خاک و گیاه گروه علوم و مهندسی جنگل دانشکدهٔ منابع طبیعی ساری ابراز می‌دارند.

References

Asadi, H., Jalilvand, H., & Moslemi, S. (2021). Vegetation classification of darabkola forest and their relation to physiographic factors. *Iranian Journal of Applied Ecology*, *10*(3), 17-33. (In persian) https://doi.org/10.47176/ijae.10.3.13521

Asadian, M., Hojjati, S.M., Mohammadzadeh, M., & Nadi, N. (2023). Evaluating the response of ecosystems to land-use change using soil quality index-Alandan forest Sari, Iran. *Iranian Journal of Forest*, *15*(1), 17-24. (In persian) https://doi.org/10.22034/ijf.2022.341214.1868

Askarii, 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. (in persian) https://doi.org/10.22034/IJF.2021.276293.1767

Badehian, Z., Mansoouri, M., & Fakhari, M.A. (2018). Determining the Economic Value of Soil Carbon Sequestration in the Planted Afforested Different Species. *Environmental Researches*, *9*(17), 111-120. (In persian) 20.1001.1.20089597.1397.9.17.15.2

Bai, Y., & Ding, G. (2024). Estimation of changes in carbon sequestration and its economic value with various stand density and rotation age of *Pinus massoniana* plantations in China. *Scientific Reports*, *14*, 16852. (In english) https://doi.org/10.1038/s41598-024-67307-z

Baluee, A., Hojati, S.M., Asadi, H., & Asadian, M. (2023). Effect of plant communities of the Darabkola research and educational forest on Carbon stored in soil and above ground biomass. *Forest Research and Development*, *9*(2), 189-204. (In persian) 20.1001.1.20089597.1397.9.17.15.2

Bandh, S.A., Shafi, S., Peerzada, M., Rehman, T., Bashir, S., Wani, S.A., & Dar, R. (2021). Multidimensional analysis of global climate change: a review. *Environmental Science and Pollution Research, 28*(20), 24872-24888. https://doi.org/10.1007/s11356-021-13139-7

Binkley, D., Senock, R., Bird, S., & Cole, T.G. (2003). Twenty years of stand development in pure and mixed stands of Eucalyptus saligna and nitrogen-fixing Facaltaria moluccana. *Forest Ecology and Management*, *182*(1), 93-102. (In english) https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00028-8

Ebrahimi Ashbella, A., Fallahchai, M.M., Salehi, A., & Soltani Tolarood, A.A. (2022). Evaluation of 25-year-old afforestation's of loblolly pine, black alder, velvet maple and chestnut leaved oak in Radar Poshteh area of Guilan province. *Iranian Journal of Forest*, *14*(1), 15-26. (In persian) https://doi.org/10.22034/ijf.2021.281776.1776

Flora, G., Athista, G., Derisha, L., Devi, D., Initha, M., & Shibani, W. (2018). Estimation of Carbon Storage in the Tree Growth of St. Mary's College (Autonomous) Campus, Thoothukudi, Tamilnadu, India. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, *5*, 260-266.

Forouzeh, M., Heshmati, G.A., Ghanbarian, G.A., & Mesbah, S. (2008). Comparing carbon sequestration potential of three shrub species *Heliantemum lippii*, *Dendrostellera lessertii* and *Artemisia sieberi* (case study: Gareh Bygone, Fasa). *Journal of Enviromental Studies*, *34*(46). (In persian) 20.1001.1.10258620.1387.34.46.7.2

Fu, L., Zhao, Y., Xu, Z., & Wu, B. (2015). Spatial and temporal dynamics of forest aboveground carbonstocks in response to climate and environmental changes. *Journal of Soils and Sediments*, *15*(2). 249-259. (In english) https://doi.org/10.1007/s11368-014-1050-x

Gao, Y., Cheng, J., Ma, Z., Zhao, Y., & Su, J. (2014). Carbon storage in biomass, litter, and soil of different plantations in a semiarid temperate region of northwest China. *Annals of Forest Science*, *71*, 427-435. https://doi.org/10.1007/s13595-013-0355-z

Ghanbari Motlagh, M., Babaie Kafaky, S., Mataji, A., & Akhavan, R. (2021). Prelude on estimation of carbon reserves in beech forests of northern Iran. *Human & Environment*, *19*(2), 59-73. (In persian) https://magiran.com/p2338913

Haghdoost, N., Akbarinia, M., & Hosseini, S.M. (2012). Growth and biomass production of lowland forest plantations in north of Iran. *Archives of Applied Science Research*, *4*(1), 595-604. (In english)

Haghdoost, N., Akbarinia, M., Hoseini, S.M., & Varamesh, S. (2012). Effects of Substitution of Degraded Natural forests with Plantations on Soil Carbon Sequestration and Fertility in North of Iran. *Journal of Environmental Studies*, *38*(3), 135-146. (In persian) https://doi.org/10.22059/jes.2012.29155

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), 655-645. (In persian) https://doi.org/10.22092/IJFPR.2012.107481

Henareh, J., Iranmanesh, Y., Pourhashemi, M., & Ghasempour, S. (2024). Comparison of the effect of two different oak (*Quercus infectoria* Oliv.) stands on carbon stocks of above ground, soil and litter in the forests of West Azerbaijan (case study: Piranshahr and Sardasht). *Iranian Journal of Forest*, *16*(3), 371-385. (In persian) http://doi.org/10.22034/ijf.2024.426432.1955

Henry, M., Besnard, A., Asante, W., Eshun, J., Adu-Bredu, S., Valentini, R., Bernoux, M., & Saint-André, L. (2010). Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa. *Forest Ecology and Management*, *260*(8), 1375-1388. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.040

Hojati, S.M., Tafazoli, M., Asadian, M., & Baluee, A. (2022). Estimation of carbon sequestration and forest soil respiration using machine learning models in Eastern Forests of Mazandaran Province. *Forest Research and Development*, *8*(4), 371-388. (In persian) https://doi.org/10.30466/JFRD.2022.54304.1613

Indufor. (2002). Assessing Forest Based carbon sivks in the Kyoto protocol Forest Management and Carbon sequestration. Discussion paper 2.115p

Iranmanesh, Y., & Parsapour, M.K. (2024). Biomass and carbon stock in deadwood, litter, and soil of Persian oak (*Quercus brantii* Lindl.) stands in Lordegan County, Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar research*, *32*(4), 373-389. (In persian)

Johansson, T. (1999). Dry matter amounts and increment in 21-to 91-year-old common alder and grey alder and some practical implications. *Canadian Journal of Forest Research*, *29*(11), 1679-1690. https://doi.org/10.1139/x99-126

Khademi, A., Kafaki, S., & Mataji, A. (2010). The role of coppice oak stand in carbon storage and CO2 uptake (Case study: Khalkhal, Iran). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 18*(2), 252-242. (In persian)

Koala, J., Sawadogo, L., Savadogo, P., Aynekulu, E., Heiskanen, J., & Saïd, M. (2017). Allometric equations for below-ground biomass of four key woody species in West African savanna-woodlands. *Silva Fennica*, *51*(3). https://doi.org/10.14214/sf.1631

Kooch, Y. (2012). Soil variability related to pit and mound, canopy cover and individual trees in a Hyrcanian Oriental Beech stand. *Iran: Tarbiat Modares University Tehran*. (In persian)

Mohammadi, Z., Mohammadi Limaei, S., Lohmander, P., & Olsson, L. (2017). Estimating the aboveground carbon sequestration and its economic value (case study: Iranian Caspian forests). *Journal of Forest science*, *63*(11), 511-518. (In english) https://doi.org/10.17221/88/2017-JFS

Mölder, A., Bernhardt-Römermann, M., & Schmidt, W. (2008). Herb-layer diversity in deciduous forests: raised by tree richness or beaten by beech?. *Forest Ecology and Management*, *256*(3), 272-281. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.04.012

Motaghikhah, K., Salehi, A., Kahneh, E., & Heidari Safari Kouchi, A. (2021). Comparing the effect of Frankia nodules and urea fertilizer on biomass and amount of nutrients of alder saplings. *Forest and Wood Products*, *73*(4), 417-425. (In persian) https://doi.org/10.22059/jfwp.2021.298682.1084

Nair, P.R., Mohan Kumar, B., & Naresh Kumar, S. (2018). Climate change, carbon sequestration, and coconut-based ecosystems. *The Coconut Palm (Cocos nucifera L.)-Research and Development Perspectives*, 779-799. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2754-4_16

Niknezhad, M., Fallah, A., & Mohammadi Limaei, S. (2017). Assessment of Ecological capability and estimation of aboveground biomass in plantations Darabkola forest. *Ecology of Iranian Forest, 5*(10), 11-21. (In persian) https://doi.org/10.29252/ifej.5.10.11

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. https://doi.org/10.32479/ijeep.7056.

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. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *science*, *333*(6045), 988-993. https://doi.org/10.1126/science.1201609

Parsapour, M.K., Kooch, Y., Hosseini, S.M., & Alavi, S.J. (2021). Quantitative evaluation of soil carbon and nitrogen dynamics under oak and alder afforestations. *Forest Research and Development*, *7*(2), 235-248. (In persian) https://doi.org/10.30466/jfrd.2021.121025

Pato, M., Salehi, A., Zahedi Amiri, G., & Banj Shafiei, A. (2017). The economic value of carbon storage functions in different land uses of northern Zagros forests. *Forest Research and Development*, *2*(4), 367-377. (In persian)

Postic, S., & Fetet, M. (2013). Global Carbon Accounts 2020. *Guangdong, 2,* 60.

Raeini, M., & Sadeghi, H. (2018). Evaluation of carbon sequestration in soil and plant organs of *Zygophyllum atriplicoides* and *Gymnocarpus decander* (case study: Saleh-Abad, Hormozgan). (In persian) https://doi.org/10.22092/ijrdr.2017.114053

Ramstein, C., Dominioni, G., Ettehad, S., Lam, L., Quant, M., Zhang, J., Mark, L., Nierop, S., Berg, T., & Leuschner, P. (2019). *State and trends of carbon pricing 2019*. The World Bank. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1435-8

Riazi, S., & Shakouri, H. (2008). Evaluation of yearly forest plantation succession with conifer species. *Forest and rangeland Magazine*, *12*, 90-96. (In persian)

Rubio, A., Gavilán, R.G., Montes, F., Gutiérrez-Girón, A., Díaz-Pines, E., & Mezquida, E.T. (2011). Biodiversity measures applied to stand-level management: Can they really be useful? *Ecological indicators*, *11*(2), 545-556. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.07.011

Shabani, S., Vahedi, A.A., Ahmadi, A., & Faramarzi, H. (2022). Modeling changes in soil carbon stock concerning the soil beneath dead tree. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, *31*(1), 41-56. http://doi.org/10.22092/ijfpr.2023.361666.2094

Shafiee, H., Mohammadi, L.S., & Bonyad, A. (2022). Estimation of monetary value of aboveground carbon sequestration of tree species in Chitgar forest park. *Renewable natural resources research* (In persian)

Shrestha, R., & Wynne, R.H. (2012). Estimating biophysical parameters of individual trees in an urban environment using small footprint discrete-return imaging lidar. *Remote Sensing*, *4*(2), 484-508. https://doi.org/10.3390/rs4020484

Singh, V., Tewari, A., Kushwaha, S.P., & Dadhwal, V.K. (2011). Formulating allometric equations for estimating biomass and carbon stock in small diameter trees. *Forest Ecology and Management*, *261*(11), 1945-1949. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.02.019

Snell, J.K. (1983). Predicting crown weight and bole volume of five western hardwoods (Vol. 151). *US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment station*.

Soleimanipour S.S., Adeli, K., Mafi-Gholami, D., & Naghavi, H. (2022). Economic Evaluation of Carbon Sequestration in Zagros Oak Forests (Case Study: The Pahnus Forest habitat, Chaharmahal and Bakhtiari Province). *Journal of Plant Ecosystem conservation*, *10*(20), 185-206. (In persian) http://pec.gonbad.ac.ir/article-1-837-fa.html

Thorsen, B.J., Mavsar, R., Tyrväinen, L., Prokofieva, I., & Stenger, A. (2014). The Provision of Forest Ecosystem Services. Volume 1: Quantifying and valuing non-marketed ecosystem services. What Science Can Tell Us 5. *European Forest Institute*.

Varamesh, S., Hosseini, S., & Sefidi, K. (2014). Assessment of carbon sequestration content in biomass, *Robinia pseudoacacia* and *Cupressus arizonica* stands around Tehran. *Journal of Environmental Science and Technology*, *16*(1), 396-404. (In persian)

Vishnu, P., & Patil, S.S. (2016). Carbon storage and sequestration by trees in and around University Campus of Aurangabad City, Maharashtra. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, *5*(4), 5459-5468. https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2016.0504179

Wang, B., Waters, C., Anwar, M.R., Cowie, A., Li Liu, D., Summers, D., Paul, K., & Feng, P. (2022). Future climate impacts on forest growth and implications for carbon sequestration through reforestation in southeast Australia. *Journal of environmental management*, *302*, 113964. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113964

Wang, P., Deng, X., Zhou, H., & Yu, S. (2019). Estimates of the social cost of carbon: A review based on meta-analysis. *Journal of cleaner production*, *209*, 1494-1507. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.058

Xu, Z., Chen, C., He, J., & Lin, J. (2009). Trends and challenges in soil research 2009: linking global climate change to local long-term forest productivity. *Journal of Soils and Sediments*, *9*, 83–88. (In english) https://doi.org/10.1007/s11368-009-0060-6

Yadav, V.S., Yadav, S.S., Gupta, S.R., Meena, R.S., Lal, R., Sheoran, N.S., & Jhariya, M.K. (2022). Carbon sequestration potential and CO2 fluxes in a tropical forest ecosystem. *Ecological Engineering*, *176*, 106541. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106541

Yousefi, M., khoramivafa, M., Mahdavi Damghani, A., Mohammadi, G., & Beheshti Alagha, A. (2017). Assessment of carbon sequestration and its economic value in Iranian oak forests: case study Bisetoon protected area. *Environmental Sciences*, *15*(3), 123-134. (In persian)

Yuste, J.C., Konôpka, B., Janssens, I., Coenen, K., Xiao, C., & Ceulemans, R. (2005). Contrasting net primary productivity and carbon distribution between neighboring stands of *Quercus robur* and Pinus sylvestris. *Tree Physiology*, *25*(6), 701-712. https://doi.org/10.1093/treephys/25.6.701

Zaher, H., Benjelloun, H., & Mahamane, I. (2019). Effect of Oak Ecosystems Degradation on the Carbon Storage in the Southern Mediterranean Forests. *Open Access Journal of Environmental and Soil Sciences*, *4*(2), 485-493. (In english) https://doi.org/10.32474/OAJESS.2019.04.000185

Zhu, X., Jackson, R. D., DeLucia, E. H., Tiedje, J. M., & Liang, C. (2020). The soil microbial carbon pump: From conceptual insights to empirical assessments. *Global Change Biology*, *26*(11), 6032-6039. https://doi.org/10.1111/gcb.15319

Zobeiry, M. (1994). Forest inventory (measurement of tree and forest). *Tehran: University of Tehran*, 305. (In persian)

Iranian Journal of Forest
Vol. 17, No. 2, Summer 2025
pp. 277-292
Research Article

DOI: 10.22034/ijf.2025.498274.2031
CC BY 4.0

Aboveground carbon storage and its economic evaluation in plantations of *Quercus castaneifolia* C.A. Mey., *Alnus subcordata* C.A. Mey. and *Acer velutinum* Bioss. in Darabkola, Sari

M. Yaghoubi Sis[1], A.R. Moshki[2*], M. Asadian[3], and M. Mollashahi[4]

[1]M.Sc. Student, Faculty of Desert studies, Semnan University, Iran.
[2]Associate Prof., Dept. of Forestry in Arid regions, Faculty of Desert studies, Semnan University, Iran.
[3]Ph.D. of Forest Science, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran.
[4]Assistant Prof., Dept. of Forestry in Arid regions, Faculty of Desert studies, Semnan University, Iran.

Abstract

Introduction: One of the key strategies for reducing the negative effects of climate change is to increase carbon storage in plant biomass through afforestation with suitable species. An accurate economic estimate of carbon sequestration in afforestation projects can be useful for attracting investments and financial support from both the public and private sectors for these projects. The aim of the present study is to economically evaluate carbon storage in the aboveground biomass (trunk, crown, and litter) of 28-year-old plantations of *Quercus castaneifolia* CA Mey., *Alnus subcordata* CA Mey. and *Acer velutinum* Bioss. in the Darabkola educational-research forest in Sari.

Material and Methods: In this study, after identifying and locating the desired stands, five square sample plots of 400 square meters were established, and the diameter at breast height (DBH) and height of all trees were measured. Additionally, litter samples were collected from the central part of each sample plot, and the average depth of litter was measured at five random points. The biomass calculation for each tree was performed using allometric equations. Finally, after calculating the carbon storage of the trees (differentiated by trunk and crown) and the carbon storage of the litter, the amount of carbon dioxide (CO_2) equivalent absorbed by them was determined, and the economic value of carbon sequestration for these plantations was calculated in dollars.

Results: Based on the results, the depth of litter in the three stands of *Quercus castaneifolia*, *Alnus subcordata*, and *Acer velutinum* was 4.54, 3.98, and 3.52 cm, respectively, while the weight of the litter was 17.02, 15.11, and 8.38 t/ha, respectively. The average CO_2 storage of each tree in *Quercus castaneifolia*, *Alnus subcordata*, and *Acer velutinum* was 390, 580 and 520 kg, respectively. Additionally, the three studied stands had a volume of 220.94, 312.92, and 318.15 m^3/ha, respectively, which over a period of 28 years stored 101.50, 80.75, and 98.01 t/ha of carbon in their trunks, crowns, and litter. This indicates the absorption of CO_2 equivalent to 372, 296, and 360 t/ha for these three species. The economic value of removing this amount of $CO_2$from the atmosphere and storing it in aboveground biomass (aerial parts and litter) is estimated to be $27,937, $22,225, and $26,977 per hectare for the *Quercus castaneifolia*, *Alnus subcordata*, and *Acer velutinum* stands, respectively.

Conclusion: In general, *Quercus castaneifolia and Acer velutinum* have stored higher amounts of aboveground carbon per unit area compared to *Alnus subcordata*. However, when calculating the individual tree's contribution to carbon storage in each stand, *Alnus subcordata, and Acer velutinum* trees show greater potential in this regard compared to *Quercus castaneifolia*. Therefore, considering these results, *Acer velutinum* is recommended as a more suitable option for future carbon storage projects. In the future, further studies are needed to investigate the carbon storage in the underground organs and soil under the coverage of these species.

Keywords: Allometric equations, Carbon economic value, Climate change, Greenhouse gases, Plantations.

[*]Corresponding author Tell: +98 9128310301 Email: Alireza_moshki@semnan.ac.ir