

Paper Type: Original Article



Investigation on Above-Ground and Soil Carbon Sequestration in Poplar Plantations of Guilan Province

Tooba Abedi^{1,*} , Roya Abedi², Hadi Modaberi³

¹ Assistant Professor, Environmental Research Institute, Academic Center for Education, Culture and Research, I.R. Iran; t.abedi@acecr.ac.ir; modaberi8@gmail.com.

² Associate Professor, Ahar Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tabriz, I.R. Iran; roya.abedi@tabrizu.ac.ir.

³ Assistant Professor, Environmental Research Institute, Academic Center for Education, Culture and Research, I.R.; modaberi8@gmail.com

Citation:

Abedi, T., Abedi, R., & Modaberi, H. (2024). Investigation on above-ground and soil carbon sequestration in poplar plantations of Guilan province. *The quarterly scientific journal of applied biology*, 36(4), 80-89.

Received: 25/02/2022

Accepted: 28/01/2024

Abstract

Introduction: Forests are regarded as an economically viable solution to reduce greenhouse gas emissions and mitigate climate change. Carbon sequestration in forests is accomplished through surface and underground biomass as well as soil, which are interconnected and important sources of carbon storage. This study models and estimates the stand stock and soil carbon sequestration potential in *Populus deltoides* plantations in Gilan province, Iran, using direct calculations based on stem analysis and plant biomass.

Methods: Four poplar plantations were selected, and a one-hectare plot was sampled in each plantation. DBH and total height of all trees were measured in each plot, and two poplar trees were randomly selected and cut for analysis. Stem analysis, wood biomass determination, and carbon measurement were conducted. In each plot, soil profiles were dug, and samples were taken to measure the physiochemical properties.

Results: The results showed that Shaft had the highest density (N/ha) (326), followed by Siahkal (216), Langrud (129), and Talesh (190), respectively. Stand tree stem carbon content (tons per hectare) was the highest in Talesh with 52 tons per hectare, followed by Shaft (38.7), Siahkal (28.3), and Langrood (24.16). Allometric equations were established based on the highest correlation coefficient (r^2) and the lowest Standard Error (SE) value between age as the independent variable and carbon as the dependent variable.

Conclusion: Calculation of carbon sequestration in plantation stand stock and soil can provide insights into species function and their responses. Furthermore, comparing carbon sequestration in different sites can aid in the restoration of degraded lands and the conversion of such lands into high-yield plantations, which can be an effective measure in managing carbon sequestration using fast-growing species.

Keywords: Carbon sequestration, Climate change, Modeling, Stem analysis.



بررسی ترسیب کربن زیست‌توده روی زمینی و خاک در صنوبرکاری‌های استان گیلان

طوبی عابدی^{۱*}، رویا عابدی^۲، هادی مدبری^۳

^۱استادیار پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران.

^۲دانشیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی اهر، دانشگاه تبریز، ایران.

^۳استادیار پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران.

نویسنده مسئول: T.abedi@acecr.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۶

چکیده

مقدمه: ترسیب کربن در جنگل‌ها توسط زیست‌توده سطح و زیر زمین و هم‌چنین خاک انجام می‌شود که این منابع مهم ذخیره کربن به هم مرتبط هستند. جنگل‌کاری‌ها به‌عنوان منبع تامین چوب و خدمات اکوسیستم سبب کاهش فشار به جنگل‌های طبیعی تخریب یافته می‌شود. هدف این تحقیق مدل‌سازی و برآورد ذخیره کربن در موجودی سرپا و خاک در صنوبرکاری‌های استان گیلان بر اساس آنالیز تنه و تعیین زیست‌توده گیاهی بود.

روش‌ها: چهار منطقه صنوبرکاری در استان گیلان با *Populus deltoides* انتخاب و یک قطعه نمونه یک هکتاری در هر منطقه آماربرداری شد. در هر قطعه نمونه دو اصله درخت در دامنه قابل قبول قطر متوسط توده انتخاب و برای آنالیز تنه، قطع شدند. به‌منظور بررسی خاک در هر قطعه نمونه یک پروفیل خاک حفر و نمونه‌های خاک جهت انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی برداشت شد. ترسیب کربن در مقابل متغیر مستقل سن با استفاده از تحلیل رگرسیون غیرخطی مدل‌سازی شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که صنوبرکاری منطقه شفت دارای بیشترین تراکم (پایه در هکتار) بود (۳۲۶ اصله) و بعد از آن به‌ترتیب سیاهکل (۲۱۶ اصله)، لنگرود (۱۲۹ اصله) و تالش (۱۹۰ اصله) قرار داشتند. کربن موجود در تنه درختان (تن در هکتار) در منطقه تالش با بیشترین مقدار برابر با ۵۲ تن در هکتار بود و بعد از آن به ترتیب مناطق شفت (۳۸/۷)، سیاهکل (۲۸/۳) و لنگرود (۲۴/۱۶) قرار داشتند. معادلات ترسیب کربن برحسب متغیر مستقل سن در صنوبرکاری‌ها مورد مطالعه تعیین شد. این معادلات آلومتریک بر اساس بیشترین همبستگی (R^2) و کمترین مقدار خطای استاندارد (SE) بین متغیر مستقل سن و متغیر وابسته مقدار کربن به دست آمدند.

نتیجه‌گیری: میزان ترسیب کربن در سال‌های ابتدایی رویش درختان با سرعت افزایش یافته و در نهایت به نقطه اوج می‌رسد. محاسبه ترسیب کربن در تنه درختان و خاک صنوبرکاری‌ها منتج به نتیجه‌گیری درباره نحوه عمل و تاثیر گونه‌ها خواهد شد. هم‌چنین مقایسه ترسیب کربن در رویشگاه‌های مختلف می‌تواند به احیای زمین‌های تخریب شده و تبدیل آن‌ها به جنگل‌کاری‌های پربازده (زراعت چوب) منجر شود و گام موثری در مدیریت ترسیب کربن با استفاده از درخت‌کاری با گونه‌های تندرشد خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: آنالیز تنه، ترسیب کربن، تغییر اقلیم، مدل‌سازی.

۱- مقدمه

پروتکل کیوتو اولین گام به‌سوی رسیدن به اهداف کنوانسیون تغییر اقلیم سازمان ملل در راستای حفاظت و افزایش ذخایر و منابع کربن است [1]. بسیاری از توافقنامه‌های ملی و بین‌المللی از جمله توافق‌نامه پاریس و کنوانسیون تغییر اقلیم سازمان ملل بر ثبات کربن جو تاکید دارند. جذب و

ذخیره کربن فرآیندی حیاتی در مبارزه جهانی با تغییر اقلیم است. با جذب و ذخیره دی‌اکسیدکربن انتشار یافته حاصل از سوخت‌های فسیلی از صنایع و نیروگاه‌های مختلف در جو، از تشدید اثر گلخانه‌ای جلوگیری به عمل می‌آید، به این عمل ترسیب کربن گفته می‌شود. جنگل‌ها کم‌هزینه‌ترین روش ازلحاظ اقتصادی برای کاهش اثرات گلخانه‌ای و سیاست‌های اقلیمی مربوط به تعادل کربن شناخته شده‌اند. ترسیب کربن در جنگل‌ها توسط زیست‌توده سطح و زیر زمین و هم‌چنین خاک انجام می‌شود که این منابع مهم ذخیره کربن به هم مرتبط هستند؛ بنابراین، به‌منظور کاهش کربن در جو می‌توان سیاست توسعه جنگل‌ها از طریق جنگل‌کاری‌ها را به کار برد. پروتکل کیوتو و توافق‌نامه پاریس طی مکانیسم توسعه پاک بر فعالیت‌های جنگل‌کاری برای کاهش گازهای گلخانه‌ای تأکید کرده‌اند. پتانسیل ترسیب کربن برای کمک به اهداف اقلیمی نه‌تنها به‌اندازه ذخایر کربن بلکه به مقایسه هزینه‌های استفاده از سوخت‌های فسیلی نیز بستگی دارد، به‌طوری‌که مطالعات نشان داده هزینه نهایی افزایش ذخایر کربن به‌طور قابل‌توجهی کمتر از هزینه اقدامات کاهش انتشار کربن در جو است. امروزه موضوع ترسیب کربن و تولید انرژی زیستی در مقابل سوخت‌های فسیلی بسیار مورد توجه دولت‌ها قرار دارد و تلاش‌های بسیاری برای کاهش یا کنترل انتشار دی‌اکسیدکربن از این طریق انجام شده است. در این راستا لازم است مدیریت بهینه جنگل‌ها در راستای حفظ و ذخیره کربن مورد توجه قرار گیرد [2]. با توجه به اهداف و آرمان‌های تعیین شده در سند چشم‌انداز ۲۰ ساله کشور و سیاست‌های اجرایی جهت حفاظت، احیا، توسعه و بهره‌برداری پایدار از منابع طبیعی، توسعه زراعت چوب به‌عنوان یکی از سیاست‌های اجرایی راهبرد اصلاح نظام‌های بهره‌برداری از منابع طبیعی و مهار عوامل ناپایداری این منابع معرفی شده است. چوب صنوبر یک کالای راهبردی محسوب می‌شود و ماده اولیه بسیاری از صنایع است [3]. صنوبر به‌دلیل سرعت رشد، دوره بهره‌برداری کوتاه، پراکنش گسترده، تنوع ژنتیکی و قابلیت هیبرید بالا و تولید زیست‌توده چوبی بالا به‌عنوان اولویت در جنگل‌کاری‌های دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. با مدیریت صحیح می‌توان محصول بیشتری به دست آورد، ضمن این‌که ارزش‌های زیست‌محیطی حفظ می‌شوند [4].

مدل‌سازی رشدسنجی نهال‌های کلن صنوبر با هدف انتخاب نهال‌های برتر در یک مدیریت بهینه در راستای توسعه پایدار با استفاده از دو متغیر قطر یقه و ارتفاع کل انجام شد و در نهایت مدل چند متغیره مشتمل بر لگاریتم قطر، لگاریتم ارتفاع و مربع لگاریتم قطر به‌عنوان مدل بهینه تخمین ترسیب کربن انتخاب شد [5]. در تحقیقی دیگر تاثیر جنگل‌کاری پس از ۱۸ سال با گونه‌های افرا (پلت) و توسکای بیلاقی بر ترسیب کربن خاک مورد بررسی قرار گرفته است. این گونه‌ها جایگزین توده‌های تخریب یافته بلوط-آزاد در چمستان مازندران بودند. نتایج نشان داد که این جنگل‌کاری اثر افزایشی چشمگیری در حاصلخیزی خاک نسبت به توده تخریب شده داشتند. بیشترین ترسیب کربن در جنگل‌کاری پلت در مقایسه با جنگل‌کاری توسکا و جنگل طبیعی بود [6]. معادلات آلومتریکی برای برآورد اندوخته کربن رو و زیر زمین چهار گونه درختی پهن‌برگ و سوزنی‌برگ شاه‌توت، اقاچیا، کاج تهران و سرو نقره‌ای تهیه شدند. روابط آلومتریکی با استفاده از تحلیل رگرسیون غیرخطی بین متغیرهای مستقل و اندوخته کربن در قسمت‌های مختلف و کل درخت انجام شد [7]. بررسی ترسیب کربن در اندام‌های هوایی و زیرزمینی، خاک و لاشبرگ جنگل‌کاری اقاچیا و زبان گنجشک نشان داد که بیشترین سهم از ترسیب کربن کل به بیوماس تنه درختان (۶۱٪) در توده اقاچیا و (۵۱٪) در زبان گنجشک) بود. میزان ترسیب کربن سالیانه در هکتار از جنگل‌کاری اقاچیا حدود سه برابر توده زبان گنجشک بود [8]. در پارسل ۳۲۰، سری ۳ اسالم با استفاده از داده‌های رویش قطری و جدول تاريف منطقه مقدار کربن ترسیب شده در سال در بر اساس چگالی چوب و معادله آلومتریکی برآورد شد. مدل کربن برای هرگونه به دست آمد و نتایج نشان داد که رویش حجمی برابر ۶/۰۲۳ مترمکعب در سال و میزان کربن ذخیره شده ۲/۳۰۷ تن در هکتار می‌باشد [9].

هدف از این تحقیق بررسی میزان ترسیب کربن زیتوده درختان و خاک در صنوبرکاری‌های استان گیلان بود. هم‌چنین رابطه ترسیب کربن با سن صنوبرکاری از طریق بررسی داده‌ها با روش رگرسیون به دست آمده و از این مدل‌ها می‌توان برای مدیریت و تعیین سن بهره‌برداری استفاده کرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

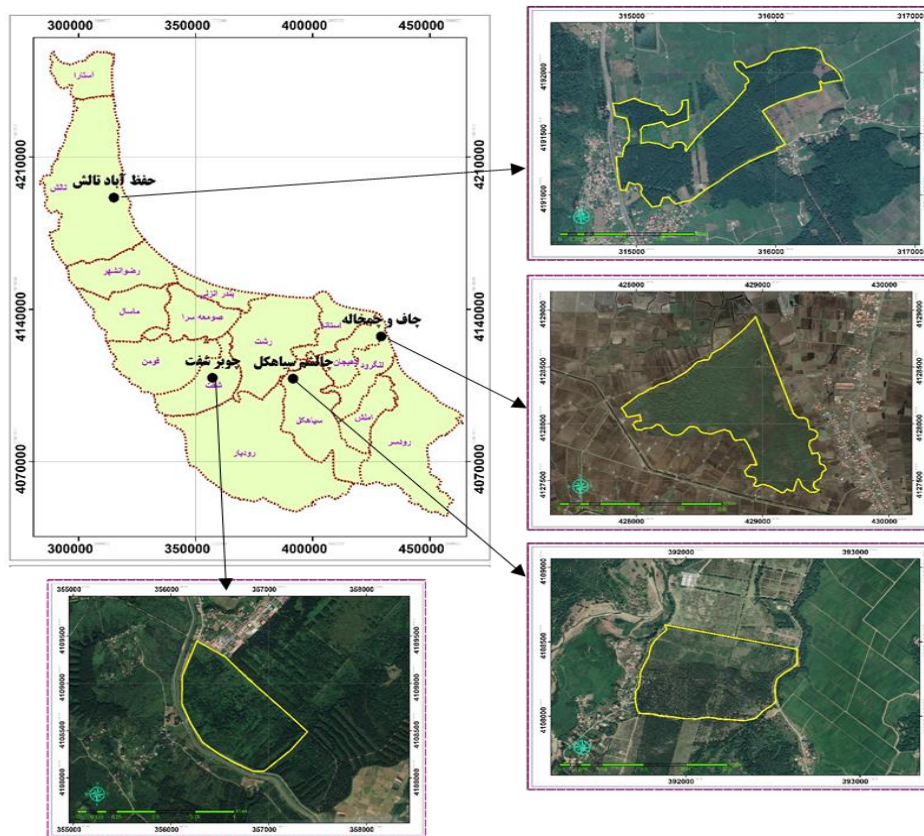
چهار منطقه صنوبرکاری در استان گیلان از غرب تا شرق و ساحل برای بررسی انتخاب شدند (شکل ۱) که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. این مناطق از صنوبرکاری‌های *Populus deltoides* سنواتی در عرصه‌های ملی متعلق به اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان هستند که هیچ‌گونه اطلاعات از نوع کلن‌های آن در کتابچه طرح مورد نظر در دسترس نیست و عملیات پرورشی یا کوددهی در آن‌ها انجام نشده، بلکه در طی سالیان متمادی برداشت‌های غیرمجاز توسط افراد محلی نیز در این مناطق صورت گرفته است. درختان سرشکسته و باد افتاده در توده‌های مورد بررسی به دلیل عدم اجرای عملیات تنک کردن و برداشت‌های غیرمجاز و لکه‌ای مشاهده می‌شوند. صنوبرکاری در این عرصه‌ها

به دلیل حفظ اراضی ملی توسط اداره کل منابع طبیعی استان گیلان انجام شده است. از سن بهره‌برداری این توده‌ها گذشته و تعداد در هکتار اولیه در منطقه موجود نیست.

جدول ۱- مشخصات صنوبرکارهای مورد مطالعه.

Table 1- The characteristics of the poplar plantation.

Location	Parcel	Plantation Date	Altitude (m)	Primary Plantation Distance (m ²)	Area (ha)
Talesh	Hefz Abad 1	1985	13	5×3.5	89
Shaft	Choozar 1	1984	70	3×3	66
Siahkal	Chalesham 723	1993	60	5×3	48
Langerood	Chafochamkaleh 1	1990	-20	5×5	38.9



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی صنوبرکاری‌های مورد مطالعه.

Figure 1- Geographic situation of study poplar plantations.

۳- روش پژوهش

در هر یک از قطعات صنوبرکاری، یک قطعه نمونه یک هکتاری آماربرداری شد [9]، [10]. در هر قطعه نمونه قطر برابر سینه تمامی درختان تا دقت سانتی‌متر و ارتفاع کل درخت تا دقت متر اندازه‌گیری شد. از هر قطعه نمونه دو اصله درخت صنوبر به صورت تصادفی انتخاب و برای آنالیز تنه، قطع شدند [7]، [11]. پس از ثبت ارتفاع کنده، تنه‌ها به گرده‌بینه‌های ۲/۳۰ متری تقسیم شد و از انتهای هر گرده‌بینه یک دیسک تهیه شد. عرض دیسک‌ها برای جلوگیری از شکستن در هنگام حمل و نقل ۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در طول گرده‌بینه تا رسیدن به قطر ۱۵ سانتی‌متر دیسک تهیه شده و ارتفاع تا نوک گرده‌بینه ثبت شد.

آنالیز تنه: سطح دیسک‌ها با سمباده صیقل داده شد. سپس به شمارش دواپر سالیانه اقدام شد تا سن درخت در ارتفاع مختلف درخت مشخص شود. برای اندازه‌گیری دقیق قطر، دو قطر کوچک و بزرگ عمود بر هم مشخص و برحسب میلی‌متر اندازه‌گیری شد. پهنای دواپر سالیانه به منظور تعیین رویش قطری و حجمی سالیانه با استفاده از کولیس تا دقت یک صدم میلی‌متر اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه در هر نوع برنامه‌ریزی برای

بهره‌برداری از جنگل و کنترل و تنظیم آن، آگاهی از میزان دقیق رویش امری بدیهی است، روش آنالیز تنه به‌عنوان روشی کارآمد در بررسی پارامترهای رویشی درختان در طول سال‌های زندگی آن‌ها از ابتدای کاشت تا زمان قطع و سیر تحول پارامترهای مورد مطالعه بوده و راهکاری علمی برای دستیابی به نتایج مطلوب در مورد داده‌های تاریخی جنگل‌کاری می‌باشد. پهنای نسبی یک حلقه سالانه، به مقدار زیادی به‌وسیله نرخ رشد درختان در طول سال رشد، تحت تاثیر قرار می‌گیرد. در نواحی معتدل، حلقه‌های رویشی مولفه قابل اعتمادی برای ارزیابی سن و نرخ رشد درختان هستند، چرا که در این مناطق با توجه به ساختار آناتومیکی درخت و شرایط آب و هوایی، هر یک از این دوایر رویشی مبین یک سال از زندگی درخت می‌باشند [12]. حجم با استفاده از فرمول اسمالیان به‌صورت رابطه (۱) تعیین شد [13]–[16].

$$V = \frac{1}{2}(S_a + S_b) \times L, \quad (1)$$

که در آن

V: حجم (مترمکعب در هکتار).

S_a: سطح مقطع ابتدای گرده‌بینه.

S_b: سطح مقطع انتهای گرده‌بینه.

L: طول گرده‌بینه.

رویش جاری (سالانه) حجم در سنین مختلف با توجه به جدول آنالیز تنه به‌صورت رابطه (۲) محاسبه شده است [15].

$$V'(t) = V(t+1) - V(t), \quad (2)$$

که در آن

V'(t): رویش جاری حجم.

V(t+1): حجم در سن (t+1).

V(t): حجم در سن t.

تعیین جرم حجمی چوب: به‌منظور بررسی جرم حجمی چوب از مرکز دیسک به سمت بیرون دیسک قطعات چوبی مکعبی با ابعاد مساوی ۴×۴×۴ سانتی‌متر جدا شد. وزن و حجم اولیه نمونه‌های تهیه شده مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و به مدت ۲۴ ساعت در درون آب قرار گرفتند تا اشباع شوند. سپس ابعاد و حجم هر یک از نمونه‌ها توسط کولیس به دقت یک‌صدم میلی‌متر اندازه‌گیری شد. پس از تعیین حجم کاملاً اشباع، نمونه‌ها در داخل آون با درجه حرارت ۵±۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند تا کاملاً خشک شوند. در پایان، نمونه‌ها پس از خنک شدن با ترازو توزین شدند و حجم آن‌ها محاسبه شد. با استفاده از رابطه (۳) جرم حجمی بحرانی محاسبه شد [17]، [18].

$$D_r = \frac{m_0}{v_w}, \quad (3)$$

که در آن

D_r: جرم حجمی بحرانی چوب صنوبر.

m₀: وزن خشک.

۷w: حجم اشباع.

اندازه‌گیری کربن: از درختان صنوبر قطع شده تعداد ۲۲ دیسک از قطورترین دیسک‌ها انتخاب و برای اندازه‌گیری کربن به آزمایشگاه انتقال داده شده و کربن اندوخته در زیتوده درختان به روش احتراق در کوره الکتریکی اندازه‌گیری شد [10]، [19]. برای تعیین میزان کربن، نمونه‌ها از مغز تا محیط از روی دیسک‌ها برداشته شده و هرچه قطر دیسک بیشتر باشد نمونه‌های بهتری به دست می‌آید. برای اندازه‌گیری درصد کربن آلی چوب در آون در دمای ۱۰۵ درجه به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. نمونه‌هایی که کاملاً خشک شدند توسط آسیاب برقی آسیاب شده و بعد از توزین نمونه‌ها با ترازوی دیجیتال، نمونه‌ها در کوره قرار داده شده و به مدت ۴ ساعت در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد سوزانده شد. سپس نمونه‌های سوخته شده در دسیکاتور وزن شدند. با تعیین وزن خاکستر، وزن اولیه و نسبت کربن آلی به مواد آلی میزان کربن آلی محاسبه شد [11]، [20]، [21].

برداشت نمونه و آزمایش‌های خاک: به منظور بررسی دقیق خاک در هر یک از قطعات نمونه یک پروفیل خاک نیز حفر شد. نمونه‌های خاک، پس از کنار زدن لایه لاشبرگ از اعماق ۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰ و ۶۰-۸۰ سانتی متری خاک برداشت شدند. در منطقه لنگرود به دلیل خاک شنی و عدم وجود لایه‌های مشخص در پروفیل خاک نمونه‌های خاک از دو عمق ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ سانتی متری برداشت شدند. آزمایش‌های خاک شامل خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک بود. بافت، وزن مخصوص ظاهری و کربن آلی در آزمایشگاه خاک مورد آزمایش قرار گرفتند [22]–[25]. بافت خاک به روش هیدرومتری بایکاس، جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه، درصد کربن آلی به روش والکی بلاک [26] اندازه‌گیری شدند. به منظور برآورد موجودی کربن در لایه‌های مختلف خاک معدنی از فرمول زیر استفاده شد:

$$CC \left(\frac{g}{m^2} \right) = 10000 \times C(\%) \times Bd \times e, \quad (4)$$

که در آن

C: درصد تراکم کربن در عمق مشخصی از خاک.

Bd: وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب).

e: ضخامت لایه خاک (سانتی‌متر).

CC: میزان ترسیب کربن (گرم بر مترمربع).

۳- نتایج

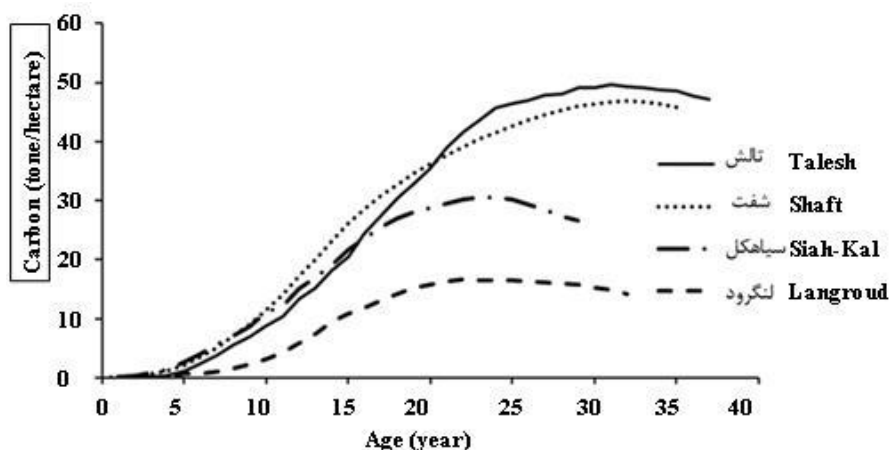
مشخصات کمی توده‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات کمی صنوبرکاری‌های مورد بررسی.

Table 2- Quantitative characteristics of studied poplar plantations.

Location	Density (n/ha)	Average DBH (cm)	Average Height (m)	Volume (m ³ /ha)	Biomass (t/ha)	Carbon (t/ha)
Talesh	190	35±7	26.7±5.8	285.3	91.3	53
Shaft	326	26.6±6.8	19±4.1	212.3	68	38.7
Siahkal	216	27.6±4.7	21.7±2	155.6	49.7	28.3
Langerood	129	30.7±7.5	22.9±4.6	132.5	42.3	24.2

منحنی ترسیب کربن نسبت به سن در شکل ۲ نشان داده شده است. برحسب این منحنی میزان ترسیب کربن در سال‌های ابتدایی رویش درختان با سرعت افزایش یافته و در نهایت به نقطه اوج رسیده است. در منطقه تالش درختان با سن کم دارای کربن کمتر بوده، اما در سنین بالاتر درختان به حداکثر میزان کربن بیشتر از سایر مناطق مورد مطالعه رسیده‌اند. بعد از آن منطقه شفت در درختان با سن کمتر دارای کربن بیشتری بوده و این موضوع تا درختان با سنین بیشتر نیز ادامه پیدا کرده به طوری که بالاتر از مناطق سیاهکل و لنگرود بوده، اما بعد از تالش در رتبه دوم از نظر افزایش میزان کربن قرار دارد. مناطق سیاهکل و لنگرود در رتبه‌ها بعدی قرار دارند.



شکل ۲- منحنی ترسیب کربن در سنین مختلف صنوبرکاری در مناطق مورد بررسی.

Figure 2- Carbon sequestration curve in different ages of the studied poplar plantations.

معادلات ترسیب کربن برحسب متغیر مستقل سن در صنوبرکاری‌های مورد مطالعه در جدول ۳ آمده است. این معادلات آلومتریک بر اساس بیشترین همبستگی (R^2) و کمترین مقدار خطای استاندارد (SE) بین متغیر مستقل سن و متغیر وابسته مقدار کربن به دست آمدند.

جدول ۳- معادله رابطه ترسیب کربن با سن صنوبر.

Table 3- Equation of the relationship between carbon sequestration and poplar age.

Location	Function	R ²	SE
Talesh	$C = 0.003 \times 0.879^A \times A^{3.96}$	0.99	0.63
Shaft	$C = 0.024 \times 0.891^A \times A^{3.17}$	0.99	0.46
Siahkal	$C = \frac{-1.16 + 0.65A}{1 - 0.07A + 0.002A^2}$	0.99	0.33
Langerood	$C = e^{\frac{78.89}{A} - 3.30 \ln(A)}$	0.99	0.33

C: Carbon (tone/ ha), A: Age (year)

جدول ۴- سهم کربن در تنه درختان صنوبر.

Table 4- The proportion of carbon in the stem of poplar trees

Tree Section	Carbon Content (%)
Stem	56.62±0.79

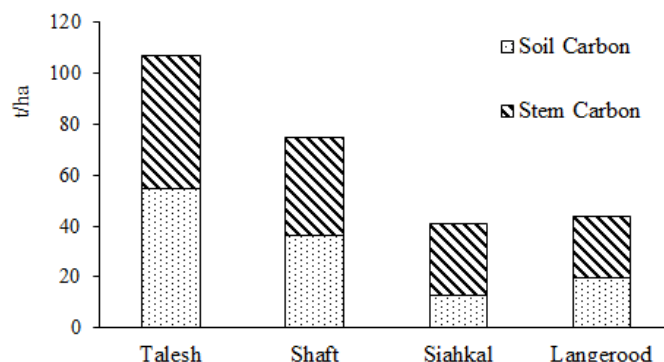
با توجه به رابطه (۴) مقدار ترسیب کربن خاک در واحد سطح (تن در هکتار) در جدول ۵ به تفکیک مناطق مورد مطالعه و عمق‌های مختلف خاک به دست آمده است که بر این اساس بیشترین ترسیب کربن در عمق ۱ تا ۲۰ سانتی متر خاک در تمام مناطق مورد مطالعه ثبت شد.

جدول ۵- ترسیب کربن در اعماق مختلف خاک صنوبرکاری‌های مورد مطالعه.

Table 5- Carbon sequestration at different soil depths of the studied poplar plantations.

Location	Soil Texture	Soil Depth (cm)	Apparent Bulk Density (g/cm ³)	Carbon (t/ha)	Average Soil Carbon (t/ha)
Talesh	Silt-Loam to Loam	0-20	1.63	119.64	54.88
		20-40	1.65	28.38	
	Clay-Loam	40-60	1.65	51.48	
		60-80	1.43	20.02	
Shaft	Silt-Loam to Loam	0-20	1.44	80.93	36.14
		20-40	1.63	25.43	
	Clay	40-60	1.65	15.51	
		60-80	1.83	22.69	
Siahkal	Clay	0-20	1.50	18.6	1.79
		20-40	1.66	10.29	
	Clay	40-60	1.75	10.85	
		60-80	1.84	11.41	
Langerood	Sand	0-20	1	20.2	19.80
		20-40	1	19.4	

محاسبه مقدار کربن موجود در تنه درختان و خاک نشان داد که منطقه تالش دارای بیشترین مقدار بوده (کربن تنه ۵۲ و کربن خاک ۵۴/۸۸ تن در هکتار) و بعد از آن به ترتیب مناطق شفت (۳۸/۷ و ۳۶/۱۴ تن در هکتار)، سیاھکل (۲۸/۳ و ۱۲/۷۹ تن در هکتار) و لنگرود (۲۴/۱۶ و ۱۹/۸ تن در هکتار) قرار داشتند (شکل ۳).



شکل ۳- توزیع کربن ترسیب شده در زیست‌توده سرپا و خاک در صنوبرکاری‌های مورد بررسی.
Figure 3- Distribution of sequestered carbon in standing biomass and soil in the studied poplar plantations.

۴- بحث

برآورد زیست‌توده مبتنی بر معادلات آلومتریک یک روش متداول غیرمخرب برای تعیین زیست‌توده و ترسیب کربن در دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگرچه که برای تعیین این مدل‌ها هنوز باید روش‌های تخریبی مانند قطع درخت و آنالیز تنه انجام شود. برآورد زیست‌توده امروزه توجه جوامع علمی را به خود جلب کرده است و محققان در تلاش برای تعیین انواع مدل‌های آلومتریک به روش‌های غیر تخریبی هستند و برای این اهداف بر روی توسعه مدل‌ها برای گونه‌های خاص یا رویشگاه‌های مشخصی تمرکز کرده‌اند و در این مسیر از انواع مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی استفاده می‌کنند [27].

نتایج مطالعات زیست‌توده و ترسیب کربن گونه کبوده در رویشگاه‌های استان چهارمحال و بختیاری نشان داد که با افزایش فاصله کاشت این گونه، میزان ترسیب کربن خاک ۵۰٪ کاهش یافت و میزان زیست‌توده و ترسیب کربن در ارتباط با فاصله کاشت و تراکم توده در نظر گرفته شدند [19]. مطالعه فانگ [28] در صنوبرکاری‌های چین نشان داده بود که با افزایش تراکم توده مقدار کربن ذخیره شده در تنه نیز بیشتر می‌شود، اما در نتایج مطالعه حاضر صنوبرکاری تالش از نظر تراکم پایه در رتبه سوم در بین چهار توده قرار داشت و به دلیل تراکم پایین توده که موجب افزایش قطر و ارتفاع شده و در نتیجه زیست‌توده بیشتر و ذخیره کربن بیشتر بود.

در تحقیق حاضر مدل‌های آلومتریک مناسب برای برآورد ترسیب کربن برحسب سن تعیین شد. چنین معادلاتی در تحقیق بختیاری وند بختیاری و سهرابی [7] و پارساپور [11] نیز به دست آمده است. بختیاری وند بختیاری و سهرابی [7] در تحقیقی همسو با اهداف تحقیق حاضر بیان کردند که استفاده از روش برآورد زیست‌توده برحسب معادلات آلومتریک نسبت به اندازه‌گیری مستقیم از نظر هزینه و زمان بسیار به صرفه‌تر خواهد بود و روابط آلومتریک را برای تخمین ذخیره کربن در بافت چوبی تنه در پیش‌بینی مقدار اندوخته کربن بسیار قوی‌تر از سایر اندام‌های غیرچوبی تعیین کردند که از دقت بالاتری برخوردار است؛ زیرا زیست‌توده تنه نسبت به تغییرات دینامیک رویشگاه پایداری بیشتری دارد. نتایج پارسا پور [11] نیز مطابق با نتایج تحقیق حاضر بود و برآورد زیست‌توده و ذخیره کربن بر اساس مدل‌های رگرسیون غیرخطی برای چهار گونه صنوبر در استان چهارمحال و بختیاری را با دقت خوبی ارایه کردند و نشان دادند که این معادلات برای گونه‌های صنوبر که چندشاخگی تنه آن‌ها کمتر باشد، قوی‌تر عمل خواهد کرد. کمیک [29] در ارزیابی پتانسیل ترسیب کربن جنگل‌کاری صنوبر با استفاده از مدل‌های رگرسیونی از مدل‌های ترسیب کربن برحسب سن در شمال صربستان این مدل‌ها را بسیار خوب ارزیابی کردند و نشان دادند که در یک چرخه سی ساله مقدار ترسیب کربن ۷۸/۵۸ تن در هکتار است که در مقایسه با مناطق مورد مطالعه ما از مجموع ترسیب کربن تنه و خاک در تالش و شفت کمتر اما از لنگرود و سیاھکل بیشتر بود.

بر اساس نتایج حاصل از پژوهش حاضر صنوبرکاری‌های مورد بررسی از ۲۴/۱۶ تا ۵۲ تن کربن در هکتار در سال در زیست‌توده تنه و به‌طور متوسط در اعماق مختلف خاک از ۱۹/۸ تا ۵۴/۸۸ تن کربن در هکتار در سال ترسیب می‌کنند. این مقادیر در مقایسه با توده افاقیا که سالانه ۹/۶۳ و توده زبان گنجشک که ۳/۵ تن در هکتار کربن ترسیب می‌کنند [8] بیشتر بوده، اما در مقایسه با ترسیب کربن در جنگل‌کاری گونه پلت (۱۵۵ تن در هکتار)، توسکا (۱۰/۸ تن در هکتار) و در جنگل طبیعی (۱۲۱/۴ تن در هکتار) کمتر است [6].

در مقایسه بین مقادیر کربن در لایه‌های مختلف خاک، ورامش و همکاران [8] میزان بالاتر ترسیب کربن در لایه‌های فوقانی خاک (۱۵-۰ سانتی‌متر) را نسبت به لایه‌های زیرین در توده‌های افاقیا و زبان گنجشک گزارش کردند که مشابه نتایج تحقیق حاضر در توده‌های صنوبر بود. آن‌ها دلیل این امر را آغاز روند تدریجی تجزیه لاشبرگ و تبدیل آن به هوموس از لایه‌های سطحی خاک تفسیر کردند. ترسیب کربن از سطح به عمق خاک کاهش می‌یابد به این دلیل که در لایه‌های فوقانی خاک لاشبرگ و بقایای گیاهی تجزیه شده و کربن بیشتری نسبت به اعماق خاک ترسیب می‌گردد. تاثیر حجم در هکتار جنگل رابطه مستقیم با میزان زیست‌توده جنگل داشته و در نتیجه به افزایش ذخیره کربن در خاک کمک می‌کند (جدول ۲).

ورامش و همکاران [30] هم‌چنین بیان کردند که با افزایش حجم در هکتار درختان در توده و آمیختگی گونه‌ها میزان ترسیب کربن خاک افزوده می‌شود که این نتیجه نیز در تحقیق حاضر مشاهده شد و در منطقه تالش بیشترین ترسیب کربن خاک به دست آمد و حجم در هکتار توده و هم‌چنین زیست‌توده و کربن تنه نیز بیشترین بودند.

زیست‌توده بخش‌های هوایی ارقام صنوبر خرم‌آباد با گونه *P. nigra* مقدار رویش ۲/۶۷ مترمکعب در سال و ترسیب سالانه کربن را ۲/۵ تن در هکتار در سال و برای *P.X. pacher* با رویش ۳/۰۶ مترمکعب و ترسیب کربن ۲ تن در هکتار در سال گزارش کردند که در مقابل اعداد حاصل از مطالعه حاضر (۲۴/۱۶ تا ۵۲ تن در هکتار) بسیار ناچیز هستند [31] که می‌تواند نشان از شرایط رویشی بسیار مطلوب گونه *P. deltooides* در استان گیلان باشد. آن‌ها تاکید کردند که عوامل محیطی و اکولوژیکی سبب می‌شود که مقدار کربن حتی در ارقام مختلف یک گونه در مناطق مختلف و رویشگاه‌های متنوع متفاوت باشد و نمی‌توان عدد مشخصی را برای مقدار ترسیب کربن یک گونه قائل شد، اما به نظر می‌رسد که مطالعاتی مانند پژوهش حاضر و ارایه مقادیر کمی از ترسیب کربن برای انواع گونه و رویشگاه‌ها زمینه‌ای برای مقایسه ارایه کند و به این ترتیب دیدگاه مناسبی را برای مدیریت بهینه ترسیب کربن در اختیار قرار دهد.

مطالعه در زمینه بررسی ترسیب کربن در تنه درختان و خاک جنگل‌کاری‌ها منتج به نتیجه‌گیری درباره نحوه عمل و میزان تاثیر گونه‌ها خواهد شد. هم‌چنین مقایسه ترسیب کربن در رویشگاه‌های مختلف می‌تواند به احیای زمین‌های تخریب شده و فرسایش یافته، تبدیل آن‌ها به جنگل‌کاری‌های پربازده و جلوگیری از هدر رفتن کربن کمک قابل ملاحظه‌ای باشد و گام موثری در مدیریت ترسیب کربن با استفاده از جنگل‌کاری با گونه‌های تندرشد خواهد بود. پیشنهاد می‌شود تا مطالعات مشابه در رویشگاه‌های طبیعی نیز انجام شود و زمینه مقایسه با گونه‌های دست‌کاشت و میزان اثربخشی آن‌ها بیش‌ازپیش مشخص و گزارش شود.

صنوبرها به‌طورکلی در فصل رشد تحت شدت نور زیاد و گرما بهتر رشد می‌کنند. بافت و زهکشی خاک از مهم‌ترین عوامل رویشگاه برای موفقیت در صنوبرکاری است. خاک‌های آبرفتی خوب هوادهی شده، دارای رطوبت، مواد مغذی و عمق کافی، بافت متوسط (شنی-لومی) و pH بین ۵ تا ۷/۵ را ترجیح می‌دهند (سفره آب زیرزمینی بیش از ۱ متر). باید از خاک‌های خشک اجتناب شود، آبیاری تکمیلی حتی در شن‌های عمیق نیز موفقیت‌آمیز بوده است. خاک‌های سنگین (بافت‌های رسی، رسی-لومی و سیلتی-رسی-لومی) برای رشد صنوبر مناسب نیستند. محتوای رس باید کم باشد. از آنجاکه خاک‌های ریزبافت به‌طورکلی هوادهی و زهکشی ضعیفی دارند، دسترسی تجهیزات را در دوره‌های مرطوب محدود و کنترل علف‌های هرز را دشوار می‌کنند. زنده‌مانی کاهش می‌یابد و رشد، طی چند سال اول ناامیدکننده است [32]. در مناطق مورد مطالعه به جز خاک سطحی مناطق تالش و شفت که میزان کربن نیز در این مناطق بیشترین مقدار است، در سایر مناطق خاک رسی و رسی-لومی بوده که برای صنوبر مناسب نیست و برای دستیابی به موفقیت در کاشت صنوبر لازم است اصلاح خاک در برنامه مدیریت این مناطق قرار گیرد.

اعلام تعارض منافع

نویسندگان بیان می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافی در این مطالعه وجود ندارد.

منابع

- [1] Robertson, K., Loza-Balbuena, I., & Ford-Robertson, J. (2004). Monitoring and economic factors affecting the economic viability of afforestation for carbon sequestration projects. *Environmental science & policy*, 7(6), 465–475.
- [2] Assmuth, A., & Tahvonen, O. (2018). Optimal carbon storage in even-and uneven-aged forestry. *Forest policy and economics*, 87, 93–100.
- [3] Hoseinzadeh, O. (2015). Analysis of poplar process value chain in Western Azerbaijan province aims to upgrading. *Iranian journal of wood and paper industries*, 6(1), 41–52. (In Persian). https://www.ijwp.ir/article_12527.html?lang=en
- [4] Guo, X., & Zhang, X. (2010). Performance of 14 hybrid poplar clones grown in Beijing, China. *Biomass and bioenergy*, 34(6), 906–911.
- [5] Vahedi, A. A., Mataji, A., & Akhavan, R. (2015). Modeling annual carbon uptake by saplings of hybrid poplar clone (populus euramericana 488) through allometric equations. *Iranian journal of applied ecology*, 4(13), 65–77. (In Persian). https://ijae.iut.ac.ir/browse.php?a_id=692&sid=1&slc_lang=en
- [6] 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://jes.ut.ac.ir/article_29155_en.html
- [7] Bakhtiarvand Bakhtiari, S., & Sohrabi, H. (2012). Allometric equations for estimating above and below-ground carbon storage of four broadleaved and coniferous trees. *Iranian journal of forest and poplar research*, 20(3), 492–981. (In Persian). https://ijfpr.areeo.ac.ir/article_107454_en.html?lang=en
- [8] Varamesh, S., Hosseini, S. M., & Abdi, N. (2011). Stimating potential of urban forests for atmospheric carbon sequestration. *Journal of environmental studies*, 37(57), 1–8. (In Persian). https://jes.ut.ac.ir/volume_1468.html/volume_1438.html/volume_1106.html/volume_1609.html/volume_1442.html/article_22554.html?lang=en
- [9] Mohammadi, Z., Mohammadi Limaiei, S., Lohmander, P., & Olsson, L. (2017). Estimating the aboveground carbon sequestration and its economic value: case study: Iranian Caspian forests. *Journal of forest research*, 63(11), 511–518.
- [10] 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.
- [11] Parsapour, M. K., Sohrabi, H., Soltani, A., & Iranmanesh, Y. (2013). Allometric equations for estimating biomass in four poplar species at Chahmahal and Bakhtiari province. *Iranian journal of forest and poplar research*, 21(3), 517–528.
- [12] Metsaranta, J. M., & Bhatti, J. S. (2016). Evaluation of whole tree growth increment derived from tree-ring series for use in assessments of changes in forest productivity across various spatial scales. *Forests*, 7(12), 303. <https://doi.org/10.3390/f7120303>
- [13] Aminu, S. A., Daniel, S., & Yakubu, I. (2019). Tree volume equation for populus deltoides (poplar) tree under agroforestry based. *International journal of current microbiology and applied sciences*, 8(2), 1470–1475.
- [14] Eslamdoust, J., Sohrabi, H., Hosseini, M., & Moradi, Z. (2015). Assessment of different methods of form factor determination for volume estimation of planted populus deltoides and taxodium distichum trees (Klodeh Region--Mazandaran Province). *Iranian journal of applied ecology*, 4(12), 67–76. (In Persian). <https://ijae.iut.ac.ir/article-1-672-en.html>
- [15] Zobeiry, M. (1994). *Forest inventory (measurement of tree and forest)*. Tehran University Press. (In Persian). <https://www.gisoom.com/book/1335127/>
- [16] Jahani, A., Kalagari, M., Modirrahmati, A. R., & Ghasemi, R. (2014). Determining the best stem form factor equation for *Populus deltoides* in poplar plantations of Alborz research station, Karaj. *Iranian journal of forest and poplar research*, 22(2), 216–223. (In Persian). <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20173186035>
- [17] Mohammadi, A., & Moaeri, M. H. (2016). Determining the harvest age (economic) of even-aged stands of paulownia plantation in Dr. Bahramnia's Forestry Plan. *Journal of wood and forest science and technology*, 23(2), 203–224.
- [18] Henry, M., Besnard, A., Asante, W. A., Eshun, J., Adu-Bredu, S., Valentini, R., ... & 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.
- [19] Heidari Safari Kouchi, A., Iranmanesh, Y., & Rostami Shahraji, T. (2016). Above-ground and soil carbon sequestration of white poplar (*Populus alba* L.) species in four different planting spaces in Chaharmahal and Bakhtiari province. *Iranian journal of forest and poplar research*, 24(2), 200–213. (In Persian). https://ijfpr.areeo.ac.ir/article_106984_en.html
- [20] Raeini, M. G. N., & Sadeghi, H. (2018). Evaluation of carbon sequestration in soil and plant organs of *Zygophyllum atriplicoides* and *Gymnocarpus decander* (case study: Saleh-Abad, Hormozgan). *Iranian journal of range and desert research*, 24(4), 699–706. (In Persian). <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20183224855>

- [21] Forouzeh, M. R., Heshmati, A., Ghanbariyan, G. A., & Mesbah, S. H. (2008). Comparison potential carbon sequestration *Helianthemum lippii* (Pers.), *Dendrostellera lessertii* (Van Tigeh.) And *Artemisia sieberi* Besser in arid rangeland of Iran (case study: Garbayegan Fasa in Fars province). *Journal of environmen science*, 46(2), 65–72.
- [22] Sohrabi, H. (2017). Comparison of stand and soil characteristics of pure and mixed plantations of *Populus deltoides* and *Alnus subcordata* (case study: Chamestan, Mazandaran province). *Forest and wood products*, 69(4), 767–776. (In Persian). https://jfwp.ut.ac.ir/article_60613_en.html?lang=fa
- [23] Ghorbanzadeh, N., Salehi, A., & Kahneh, E. (2013). Soil and litter nutrient elements comparison of different poplar species and clones (Case study: Safrabasteh poplar experimental station). *Iranian journal of forest and poplar research*, 21(2), 277–285. (In Persian). https://ijfpr.areeo.ac.ir/article_3857.html?lang=en
- [24] Fadaei, E., Mirsanjari, M. M., & Amiri, M. J. (2020). Modeling of ecosystem services based on land cover change and land use using InVEST software in Jahannama Conservation Area (case: Carbon sequestration ecosystem service). *Town and country planning*, 12(1), 153–173. (In Persian). https://jtcp.ut.ac.ir/article_75170_en.html
- [25] Salehi, A., Maleki, M., Shabanpour, M., & Basiri, R. (2012). Effect of soil physical properties and groundwater level on qualitative and quantitative characteristics of poplar plantations in west of Guilan province (Case study: Guisum region). *Iranian journal of forest and poplar research*, 20(1), 38–49. (In Persian). <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20133071185>
- [26] Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29–38.
- [27] Miah, M. D., Islam, K. N., Kabir, M. H., & Koike, M. (2020). Allometric models for estimating aboveground biomass of selected homestead tree species in the plain land Narsingdi district of Bangladesh. *Trees, forests and people*, 2, 100035. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2020.100035>
- [28] Fang, S., Xue, J., & Tang, L. (2007). Biomass production and carbon sequestration potential in poplar plantations with different management patterns. *Journal of environmental management*, 85(3), 672–679.
- [29] Čomić, D. R. (2021). Regression models of carbon and CO₂ sequestration of hybrid poplar plantations in northern Serbia. *Canadian journal of forest research*, 51(12), 1859–1874.
- [30] Varamesh, S., Hosseini, S. M., Abdi, N., Akbarinia, M., & others. (2010). Increment of soil carbon sequestration due to forestation and its relation with some physical and chemical factors of soil. *Iranian journal of forest*, 2(1), 25–35. (In Persian). <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20103207378>
- [31] Jahanpour, F., Derikvandi, A., Ramak, P., Ghasemi, R. A., Calagari, M., & Karamian, R. (2018). Investigation on adaptation and growth characteristics of different closed-crown poplar clones under climatological conditions of Khorram Abad. *Iranian journal of forest and poplar research*, 26(4), 471–482. (In Persian). https://ijfpr.areeo.ac.ir/article_118578_en.html
- [32] Isebrands, J. G., & Richardson, J. (2014). *Poplars and willows: trees for society and the environment*. CABI.