



## The effect of planting intervals on the growth and wood production of white poplar (*Populus alba* L.) in the Mahabad nursery

Majid Pato<sup>1\*</sup> | Mohsen Calagari<sup>2</sup> | Khaled Khezri<sup>3</sup>

1. Corresponding Author, Department of Forest and Rangeland Research, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Urmia, Iran. Email: [m.pato@areeo.ac.ir](mailto:m.pato@areeo.ac.ir)
2. Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: [calagari@rifr-ac.ir](mailto:calagari@rifr-ac.ir)
3. Department of Forest Biological Sciences, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran. Email: [kezzire@yahoo.ir](mailto:kezzire@yahoo.ir)

### ARTICLE INFO

#### Article type:

Research Article

#### Article History:

Received: 26 December 2025

Revised: 12 April 2026

Accepted: 18 May 2026

Published online: 10 June 2026

#### Keywords:

*Broad-sense heritability,*  
*Clonal breeding programs,*  
*Genetic selection,*  
*Industrial silviculture,*  
*Phenotypic stability.*

### ABSTRACT

**Introduction:** This study was designed to precisely evaluate the impact of three planting spacing patterns (1×2, 2×2, and 3×2 meters) on vegetative growth indicators and wood volume production in six selected white poplar clones, including improved cultivars 45.20, 44.9, 45.67, 45/77, and 44.13, as well as one local native clone, under semi-arid climatic conditions in western Iran. The ultimate goal was to identify the optimal clone and planting density combination to maximize yield per hectare, assess phenotypic stability, and determine the level of genetic control over volume traits.

**Method:** This field experiment was conducted at Dr. Javanshir Nursery in Mahabad, West Azerbaijan Province, using a split-plot arrangement based on a randomized complete block design with three replications over a four-year period. The main factor consisted of three planting spacing patterns: 1×2 meters (a density of five thousand trees per hectare), 2×2 meters, and 3×2 meters. The sub-factor included six white poplar clones. At the end of each growing season, collar diameter was measured using a digital caliper and total height using a height pole, while wood volume per tree was calculated using a cylindrical geometric model. Data analysis was performed using mixed linear models, Tukey's mean comparison test, best linear unbiased prediction methods, and biplot stability analysis. Furthermore, the broad-sense heritability coefficient for the wood volume trait was calculated.

**Results:** Analysis of variance demonstrated that the main effect of clone had a highly significant impact on all measured vegetative traits at the one percent probability level. Conversely, the main effect of planting spacing and the clone × spacing interaction were not statistically significant, indicating high phenotypic stability of the clones across different planting densities. Clones 45.20, 44.9, and particularly 44.13 recorded the highest single-tree wood volume production. Clone 13/44 achieved the maximum yield per hectare at the densest spacing (1×2 meters), with a planting density of five thousand trees per hectare, and, based on biplot analysis, exhibited the most consistent performance among all treatments. The broad-sense heritability coefficient for the wood volume trait was 0.78, highlighting the dominance of genetic factors over environmental variation and the excellent potential for selection based on phenotypic traits.

**Conclusion:** Based on the findings of this study, selecting appropriate clones plays a more decisive role than managing planting spacing in the success of white poplar timber cultivation projects under semi-arid conditions in western Iran. To achieve maximum economic efficiency and industrial wood production, planting clone 13/44 at the densest spacing pattern (1×2 meters) is recommended. This strategy maintains performance stability while maximizing yield per unit area, and the implementation of breeding programs focused on these cultivars is essential for the sustainable development of forestry agriculture in this climate.

**Cite this article:** Pato, M., Calagari, M., Khezri, K. (2026). The effect of planting intervals on the growth and wood production of white poplar (*Populus alba* L.) in the Mahabad nursery. *Journal of Forest and Wood Products*, 79 (1), 67-80. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwpp.2026.408900.1387>





## تأثیر فواصل کاشت بر رشد و تولید چوب کلن‌های کبوده (*Populus alba L.*) در نهالستان مهاباد

مجید پاتو<sup>۱\*</sup> | محسن کلاگری<sup>۲</sup> | خالد خضری<sup>۳</sup>

۱. نویسنده مسئول، بخش تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران. رایانامه: [m.pato@areeo.ac.ir](mailto:m.pato@areeo.ac.ir)
۲. مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: [calagari@rifr-ac.ir](mailto:calagari@rifr-ac.ir)
۳. گروه علوم زیستی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: [kezzire@yahoo.ir](mailto:kezzire@yahoo.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

**مقدمه:** این پژوهش با هدف ارزیابی دقیق تأثیر سه الگوی فاصله کاشت (۱×۲، ۲×۲ و ۲×۳ متر) بر شاخص‌های رشد رویشی و تولید حجم چوب در شش کلن منتخب صنوبر کبوده شامل ارقام اصلاح‌شده ۲۰/۴۵، ۴۴/۹، ۴۵/۶۷، ۴۵/۷۷، ۴۴/۱۳ و یک کلن شاهد بومی در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک غرب ایران طراحی گردید. هدف نهایی، شناسایی ترکیب بهینه کلن و تراکم کشت برای بیشینه‌سازی عملکرد هکتاری، بررسی پایداری فنوتیپی و تعیین سطح کنترل ژنتیکی صفات حجمی است.

### نوع مقاله:

پژوهشی

**روش پژوهش:** این مطالعه میدانی در نهالستان دکتر جوانشیر مهاباد، استان آذربایجان غربی، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی به صورت کرت‌های خردشده و در سه تکرار طی یک دوره چهار ساله اجرا شد. عامل اصلی شامل سه الگوی فاصله کاشت ۲×۱ متر (تراکم پنج‌هزار اصله در هکتار)، ۲×۲ متر و ۲×۳ متر بود و عامل فرعی شش کلن صنوبر کبوده را در بر می‌گرفت. در پایان هر فصل رویش، قطر یقه با کولیس دیجیتال و ارتفاع کل با ارتفاع‌سنج اندازه‌گیری شد و حجم چوب هر درخت با مدل استوانه‌ای محاسبه گردید. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از مدل‌های خطی مختلط، آزمون مقایسه میانگین توکی، روش پیش‌بینی خطی بدون اریب و تحلیل پایداری بای‌پلات انجام پذیرفت. همچنین ضریب وراثت‌پذیری گسترده برای صفت حجم چوب محاسبه شد.

### تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

**یافته‌ها:** نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی کلن بر تمامی صفات رویشی (قطر یقه، ارتفاع و حجم چوب) در سطح احتمال یک درصد بسیار معنی‌دار است، درحالی‌که اثر مستقل فاصله کاشت و اثر متقابل کلن × فاصله کاشت معنی‌دار نبود که بیانگر پایداری فنوتیپی بالای کلن‌ها در تراکم‌های مختلف است. کلن‌های ۴۵/۲۰، ۴۴/۹ و به‌ویژه ۴۴/۱۳ بیشترین تولید حجم چوب تک‌درخت را ثبت کردند. کلن ۴۴/۱۳ در فاصله کاشت متراکم ۲×۱ متر با تراکم پنج‌هزار اصله در هکتار، بالاترین عملکرد هکتاری را ارائه داد و بر پایه تحلیل بای‌پلات، پایدارترین عملکرد را در میان تیمارها از خود نشان داد. ضریب وراثت‌پذیری گسترده برای صفت حجم چوب برابر با ۰/۷۸ برآورد شد که حاکی از غلبه عوامل ژنتیکی بر تغییرات محیطی و پتانسیل بالای گزینش بر پایه فنوتیپ است.

### کلیدواژه:

برنامه‌های اصلاحی،

پایداری فنوتیپی،

زراعت صنعتی،

گزینش ژنتیکی،

وراثت‌پذیری گسترده.

**نتیجه‌گیری:** براساس یافته‌های این مطالعه، انتخاب کلن مناسب نقش تعیین‌کننده‌تری نسبت به مدیریت فاصله کاشت در موفقیت طرح‌های زراعت چوب صنوبر کبوده در اقلیم نیمه‌خشک غرب ایران ایفا می‌کند. برای دستیابی به حداکثر بهره‌وری اقتصادی و تولید چوب صنعتی، کاشت کلن ۴۴/۱۳ در متراکم‌ترین الگوی فاصله کاشت ۲×۱ متر پیشنهاد می‌شود. این راهکار ضمن حفظ پایداری عملکرد، امکان بیشینه‌سازی تولید در واحد سطح را فراهم می‌سازد و اجرای برنامه‌های اصلاحی متمرکز بر این ارقام برای توسعه پایدار زراعت چوب در این اقلیم ضروری است.

**استناد:** پاتو؛ مجید، کلاگری؛ محسن، خضری؛ خالد (۱۴۰۵). تأثیر فواصل کاشت بر رشد و تولید چوب کلن‌های کبوده (*Populus alba L.*) در نهالستان مهاباد. نشریه جنگل و فرآورده‌های

چوب، ۷۹ (۱)، ۸۰-۶۷. DOI: <https://10.22059/jfwf.2026.408900.1387>



## ۱. مقدمه

طی سال‌های اخیر، تغییرات سریع در الگوی مصرف چوب و افزایش فشار بر جنگل‌های طبیعی موجب شده است تا زراعت درختان تندرشد به راهکاری استراتژیک برای تأمین پایدار منابع چوبی مبدل گردد [۱]. براساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO, 2023)، سهم زراعت چوب در تولید چوب صنعتی جهان از ۲۶ درصد در سال ۲۰۱۰ به بیش از ۳۴ درصد در سال ۲۰۲۲ رسیده است. این ارقام نشان‌دهنده رویکرد جهانی به سوی جایگزینی چوب جنگلی با تولیدات حاصل از کشت گونه‌های تندرشد است [۱]. در این راستا، گونه‌های جنس صنوبر (*Populus spp.*) به دلیل دوره کوتاه بهره‌برداری (۸ الی ۱۲ سال)، قابلیت تکثیر آسان، سازگاری بالا و عملکرد مطلوب در ترسیب کربن ( $CO_2$ )، به عنوان موتور محرک این تحول شناخته می‌شوند [۲].

صنوبر کبوده (*Populus alba L.*)، با پراکنش گسترده در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک ایران، یکی از گونه‌های مناسب در زمینه توسعه زراعت چوب است. این گونه نه تنها در محدوده‌های با بارش ۳۰۰-۵۰۰ میلی‌متر در سال رشد مطلوبی دارد [۳]، بلکه به دلیل ریشه‌زایی سریع و تحمل نسبی به شوری خاک، در طرح احیای اراضی تخریب شده نیز کاربرد مؤثری دارد [۴]. امروزه، بیش از ۱۲۰ هزار هکتار صنوبرکاری در ایران وجود دارد که بیش از ۴۰ درصد آن مربوط به استان‌های غربی (آذربایجان‌های غربی و شرقی و گیلان) است [۵]. با این حال، بهره‌وری این سطوح، عمدتاً به دلیل عدم به‌کارگیری کلن‌های اصلاح‌شده و فواصل کشت نامناسب، تنها ۳۰ تا ۵۰ درصد پتانسیل واقعی تولید چوب صنعتی را دارند [۶].

موفقیت در زراعت چوب، همواره به دو عامل ژنتیکی و عملیات زراعی مناسب بستگی دارد [۷]. از دیدگاه ژنتیکی، اختلاف ۲ تا ۳ برابری در تولید چوب بین کلن‌های مختلف گزارش شده است [۸]. این تفاوت، حتی در شرایط محیطی یکسان، به عنوان بازتابی از تغییرپذیری ژنتیکی قابل توجه در کلن‌های اصلاح‌شده مطرح است [۹]. کلن *P. alba cv. AF2* در ایتالیا، با بهره‌گیری از برنامه‌های اصلاح نژاد طولانی‌مدت، به میانگین حجم سالانه ۱۲ مترمکعب در هکتار دست‌یافته است [۱۰]، در حالی که میانگین عملکرد در ایران کمتر از ۴ مترمکعب در هکتار است [۱۱]. این خلاء، یادآور نیاز فوری به برنامه‌های ارزیابی و انتخاب کلن‌های سازگار با شرایط محلی است.

در تحقیقات داخلی، ارزیابی تنوع ژنتیکی در گونه‌های صنوبر عمدتاً بر پایه (*P. euphratica*) متمرکز بوده است [۱۲] و کمتر به *P. alba* توجه شده است. با وجود پراکنش گسترده این گونه در ایران، تنها تعداد محدودی از کلن‌های بومی (cv. ۴۴/۹) و (*P. alba cv. ۴۴/۱۳*) در چند پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۳]. براساس یافته‌های تحقیقاتی، صنوبر کبوده (*Populus alba*) در غرب ایران دارای تنوع ژنتیکی بالایی با  $He=0.62$  است که نشان‌دهنده ذخیره ژنتیکی غنی و پتانسیل مناسبی برای اصلاح این گونه به جهت مقاومت در برابر تنش‌های محیطی (خشکی، شوری) است [۱۴]. از سوی دیگر، فاصله کاشت به عنوان مهم‌ترین متغیر مدیریتی، بر توزیع منابع فتوسنتزی و در نتیجه بر کارایی سیستم رشد تأثیر مستقیم دارد [۱۵]. افزایش تراکم کاشت تا حد بهینه، با افزایش تعداد درخت در واحد سطح، می‌تواند تولید در هکتار را به‌طور چشمگیری افزایش دهد [۱۶]. با این حال، فراتر رفتن از حد فاصله کاشت بهینه، به دلیل رقابت شدید برای نور و مواد مغذی، منجر به کاهش رشد فردی درختان و افزایش خشک‌شدگی تاج آنها می‌شود [۱۷]. مطالعات نشان می‌دهند که تراکم کاشت مطلوب برای گونه‌های *Populu sp.* بسیار وابسته به جنسیت، فرم تاج و هدف نهایی از تولید چوب است [۱۸]. به طوری که در تحقیقات کلن‌های نر صنوبر کبوده با تاج باز (*cv. ۴۴/۱۳*) در تراکم‌های بالا ( $\geq 4000$  اصله/هکتار) پایداری عملکرد بیشتری نسبت به کلن‌های ماده با تاج بسته صنوبر کبوده از خود نشان داده است [۱۹].

نکته مهم در کاشت صنوبر این است که عملکرد یک کلن نه تنها به خود کلن یا فاصله کاشت به تنهایی، بلکه به تعامل ژنوتیپ  $\times$  محیط (G $\times$ E) وابسته است [۲۰]. در این زمینه، فاصله کاشت به عنوان یک عامل محیطی قابل کنترل، نقشی تعیین‌کننده در پایداری فنوتیپی ژنوتیپ‌ها دارد [۲۱]. اگرچه مطالعاتی مانند Ghasemi و همکاران (۲۰۱۱) [۲۲] و همتی و مدیر رحمتی (۲۰۰۵) [۲۳] به بررسی فواصل کاشت پرداخته‌اند، اما اکثر آنها تنها یک یا دو کلن از گونه صنوبر تبریزی را در چند فاصله کاشت ارزیابی کرده‌اند و کمتر از تحلیل‌های پیشرفته پایداری استفاده شده است. به‌ویژه، شواهدی از اجرای آزمایش‌های بلندمدت ( $\geq 4$  سال) در اقلیم نیمه‌خشک غرب ایران که به دلیل تغییرپذیری بالای بارش، محیطی پرچالش برای ارزیابی پایداری کلن‌های صنوبر کبوده

<sup>1</sup> Genotype main effects and Genotype  $\times$  Environment interaction (GGE) biplot or Best Linear Unbiased Prediction (BLUP)

محسوب می‌شود، وجود ندارد [۲۴].

این پژوهش با هدف اصلی شناسایی و انتخاب کلن‌های بهینه با بالاترین پتانسیل تولید چوب و پایداری فنوتیپی در مناطق خشک و نیمه خشک غرب ایران انجام شده است. فرضیه اساسی این پژوهش بر این مبنا استوار است که تأثیر متقابل کلن‌ها و تراکم‌های کشت متفاوت (۱×۲، ۲×۲ و ۲×۳ متر) بر عملکرد چوب، معنی‌دار خواهد بود. بنابراین، انتظار می‌رود که بهترین ترکیب (کلن × فاصله کاشت) که به بالاترین عملکرد چوب منجر شود، شناسایی و برای زراعت تجاری در منطقه مذکور توصیه گردد.

## ۲. روش‌شناسی پژوهش

### ۲-۱. منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در نهالستان دکتر جوانشیر، اداره کل منابع طبیعی استان آذربایجان غربی واقع در روستای قزلقویی، بخش مرکزی شهرستان مهاباد اجرا شد. موقعیت جغرافیایی این نهالستان در عرض جغرافیایی  $37^{\circ}14'6''$  شمالی و طول جغرافیایی  $45^{\circ}19'50''$  شرقی قرار دارد و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۲۸۵ متر است. اقلیم منطقه نیمه‌خشک سرد و با میانگین دمای سالانه حدود ۱۲ تا ۱۳ درجه سانتی‌گراد (زمستان‌های سرد همراه با یخبندان مکرر و تابستان‌های گرم و خشک) و میانگین بارش سالانه حدود ۳۳۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر (عمدتاً متمرکز در فصول پاییز و زمستان) است. خاک محل آزمایش عمدتاً از نوع خاک‌های نیمه‌خشک با بافت لومی تا لومی-رسی است که در مناطق دشت و روستایی مانند قزلقویی، حاصلخیزی مناسبی دارد.

### ۲-۲. مواد گیاهی

در این تحقیق از شش کلن صنوبر کبوده (*Populus alba*) استفاده شد که شامل چهار کلن بومی اصلاح‌شده، یک کلن با مبدأ ایتالیا و یک کلن بومی منطقه به‌عنوان شاهد کشت شد. مشخصات این کلن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات کلن‌های کبوده مورد مطالعه

ردیف	نام کلن	مبدأ	جنسیت	نوع تاج
۱	<i>P. alba</i> cv. ۴۵/۲۰	ایتالیا	ماده	-
۲	<i>P. alba</i> cv. ۴۴/۹	ایران-اصفهان	نر	-
۳	<i>P. alba</i> cv. ۴۵/۶۷	ایران	نر	تاج باز
۴	<i>P. alba</i> cv. ۴۵/۷۷	ایران	نر	تاج بسته
۵	<i>P. alba</i> cv. ۴۴/۱۳	ایران	نر	تاج باز
۶	<i>P. alba</i>	شاهد محلی	-	-

### ۲-۳. روش مطالعه

#### ۲-۳-۱. طرح آزمایشی و عملیات کاشت

این مطالعه بر پایه طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی به‌صورت کرت‌های خرد شده<sup>۱</sup> در سه تکرار (بلوک) اجرا شد. عامل اصلی<sup>۲</sup> در سه فاصله کاشت (۱×۲، ۲×۲ و ۲×۳ متر) و عامل فرعی<sup>۳</sup> شامل شش کلن صنوبر کبوده مطابق جدول ۱ کشت شد. برای اجرای طرح، ابتدا تعداد ۸۱ قلمه از کلن‌های مادری تهیه و در خزانه همان نهالستان (دکتر جوانشیر مهاباد) کشت شد تا نهال‌های یک‌ساله ریشه‌دار تولید شوند. سپس در اسفندماه سال ۱۴۰۰، نهال‌های یکنواخت و سالم در عرصه اصلی براساس نقشه اجرای طرح کشت شدند. هر واحد آزمایشی (کرت فرعی) شامل ۱۸ (تعداد کل نهال‌ها در هر کرت) اصله نهال بود که این تعداد اصله به‌عنوان نمونه‌های اصلی برای اندازه‌گیری و تعدادی درخت حاشیه‌ای به‌عنوان حاشیه یا بافر طرح در نظر گرفته شدند. عملیات داشت شامل

<sup>1</sup> Split-plot in RCBD

<sup>2</sup> Main Plot

<sup>3</sup> Sub-plot

آبیاری منظم، واپایش مکانیکی علف‌های هرز و پایش آفات و بیماری‌ها در طول دوره چهارساله تحقیق به صورت یکسان برای تمام تیمارها انجام شد.



تصویر بهار ۱۴۰۳

تصویر تابستان ۱۴۰۳



تصویر اسفند ۱۴۰۳

تصویر اسفند ۱۴۰۲

شکل ۱. تصاویر سال‌های مختلف اجرای طرح

### ۲-۲-۳. اندازه‌گیری متغیرها

آماربرداری و جمع‌آوری داده‌ها در پایان هر فصل رویش به مدت چهار سال (از سال ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۴) به شرح زیر انجام گرفت:

#### ۲-۲-۳-۱. صفات رویشی

قطر یقه (DC): به عنوان عامل اصلی قطری، در تمام چهار سال تحقیق، قطر ساقه در سطح خاک (یقه) با استفاده از کولیس دیجیتالی (دقت ۰/۰۱ میلی‌متر) اندازه‌گیری شد. ارتفاع کل (H): ارتفاع کل هر درخت با استفاده از شاخص (Clinometer) با دقت ۰/۰۱ سانتی‌متر ثبت شد.

#### ۲-۲-۳-۲. محاسبه حجم

حجم چوب هر تک‌درخت (V) (مترمکعب) با بهره‌گیری از مدل تقریبی استوانه‌ای براساس اندازه‌گیری قطر یقه (D\_c) محاسبه شد. فرمول مورد استفاده به صورت زیر است:

$$v = \pi \times (D_c \div 2)^2 \times H$$

در این رابطه، D\_c: قطر یقه درخت (در سطح زمین یا نزدیک به یقه، بر حسب سانتی‌متر) و H: ارتفاع کل درخت از سطح زمین تا نوک (بر حسب متر) است. این روش تقریبی، با فرض استوانه‌ای بودن تنه درختان، برای تخمین حجم چوب در درختان جوان که شکل تنه آنها نسبتاً منظم است، دقت قابل‌قبولی دارد و در پژوهش‌های بخش جنگل به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۵]. رویش جاری و متوسط سالیانه برای صفات قطر، ارتفاع و حجم نیز براساس داده‌های متوالی سالانه محاسبه و استخراج شد.

## ۲-۳-۳. صفات کیفی و سلامت درختان

وضعیت سلامت و خسارت ناشی از آفات و بیماری‌های احتمالی به صورت بصری ارزیابی و براساس یک مقیاس رتبه‌ای پنج‌درجه‌ای (از ۱ = کاملاً سالم و بدون خسارت تا ۵ = خسارت بسیار شدید) برای هر درخت ثبت شد.

## ۲-۴. تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای تحلیل داده‌های کمی این پژوهش، از مدل خطی مختلط با بهره‌گیری از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۴) استفاده شد. در این مدل، کلن، فاصله کشت و اثر متقابل آنها به عنوان اثرات ثابت و بلوک (تکرار) به عنوان اثر تصادفی در نظر گرفته شدند. پس از تأیید معنی‌داری اثرات در جدول تحلیل واریانس، مقایسه میانگین‌ها برای تیمارهای مورد مطالعه با استفاده از آزمون توکی<sup>۱</sup> در سطح احتمال ۵ درصد ( $\alpha=0/05$ ) انجام گرفت. همچنین، تحلیل داده‌های کیفی (رتبه‌ای) مربوط به خسارت آفات و بیماری‌ها با استفاده از آزمون ناپارامتری کروسکال-والیس<sup>۲</sup> انجام شد.

## ۳. یافته‌های پژوهش و بحث

### ۳-۱. تحلیل واریانس و اثرات اصلی

نتایج حاصل از تحلیل واریانس (ANOVA) نشان داد که اثر اصلی کلن بر تمامی صفات رویشی مورد مطالعه (قطر یقه، ارتفاع و حجم چوب تک‌درخت) در سال چهارم ارزیابی، در سطح احتمال ۱ درصد ( $P<0/01$ ) بسیار معنی‌دار است. اندازه اثر<sup>۳</sup> برای عامل کلن در صفت حجم چوب، مقداری بالا برآورد شد که بیانگر آن است که بخش عمده‌ای از واریانس فنوتیپی مشاهده شده، ناشی از تفاوت‌های ژنتیکی بین کلن‌ها بوده است. این یافته با نتایج سایر مطالعات بر روی صنوبرهای سپیدار (*Populus alba*) همخوانی دارد و نشان‌دهنده پتانسیل بالای گزینش در جمعیت مورد مطالعه است [۸]. در مقابل، اثر اصلی فاصله کاشت و اثر متقابل کلن × فاصله کاشت بر هیچ یک از صفات رویشی (حجم، قطر و ارتفاع) معنی‌دار نبود ( $P>0/05$ ). عدم معنی‌داری اثر فاصله کاشت در سال چهارم را می‌توان به عدم استقرار کامل تاج‌پوشش و عدم شروع رقابت شدید نوری بین درختان نسبت داد؛ چرا که در این سن، منابع محیطی (نور، آب و مواد غذایی) حتی در تراکم‌های بالا (فاصله ۱×۲ متر) هنوز به عامل محدودکننده رشد تبدیل نشده‌اند [۲۱]. همچنین، عدم معنی‌داری اثر متقابل، حاکی از پایداری فنوتیپی بالای کلن‌ها در تراکم‌های مختلف کاشت است. به عبارت دیگر، کلن‌های برتر عملکرد مطلوب خود را در تمامی فواصل کاشت حفظ کرده و رتبه‌بندی آنها تحت تأثیر تغییر تراکم قرار نگرفته است. این ثبات عملکرد، یک شاخص مطلوب در برنامه‌های اصلاح نژاد محسوب می‌شود، زیرا نشان می‌دهد که می‌توان کلن‌های پربازده را بدون نگرانی از افت عملکرد، در الگوهای کاشت فشرده‌تر نیز کشت نمود. این پایداری فنوتیپی، به‌ویژه در کلن‌های بومی، احتمالاً ناشی از سازگاری طولانی‌مدت با شرایط اقلیمی نیمه‌خشک غرب ایران است [۳].

جدول ۲. نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) برای صفات رویشی در سال ۱۴۰۴

منبع تغییرات	درجه آزادی (df)	حجم چوب (مترمکعب) (F / Sig)	قطر یقه (سانتی‌متر) (F / Sig)	ارتفاع (متر) (F / Sig)
فاصله کاشت	۲	۰/۵۳ns	۰/۴۸ns	۰/۶۲ns
کلن	۵	۱۴/۴۰**	۱۳/۸۵**	۱۲/۶۷**
کلن × فاصله کاشت	۱۰	۰/۵۸ns	۰/۶۴ns	۰/۷۱ns
ضریب تغییرات (CV)	—	۲۲/۴ درصد	۱۸/۲ درصد	۱۵/۶ درصد

(اعلان: ns غیر معنی‌دار معنی‌دار در سطح ۱ درصد)

<sup>۱</sup>Tukey's HSD

<sup>۲</sup>Kruskal-Wallis test

<sup>۳</sup>Partial Eta-Squared

ضریب تغییرات (CV) کلی برای حجم چوب در سال چهارم ۲۲/۴ درصد بود که نشان‌دهنده پراکندگی متوسط و واپایش مناسب عوامل محیطی در پژوهش حاضر است. عدم معنی‌داری اثر متقابل (کلن×سال×فاصله) حاکی از آن است که کلن‌های برتر، برتری عملکرد خود را در تمامی فواصل کاشت حفظ کرده‌اند. افزون بر این، عدم تأثیر فاصله کاشت در این مرحله از پژوهش نشان می‌دهد که رقابت بین‌درختی هنوز به آستانه‌ای نرسیده است که موجب تفاوت‌های معنی‌دار در میانگین رشد شود. از این‌رو، در شرایط کنونی، عوامل اصلی تعیین‌کننده رشد عمدتاً نوع کلن (ژنتیک) و سن درخت (اثر سال) هستند.

### ۳-۲. مدل مختلط خطی پیش‌رفته و اندازه‌گیری‌های تکراری

باتوجه به ساختار طولی داده‌ها که شامل اندازه‌گیری‌های تکراری طی چهار سال متوالی (۱۴۰۱ تا ۱۴۰۴) بود، از مدل خطی مختلط با ساختار کوواریانس خودهمبسته مرتبه اول AR (۱) برای تحلیل روند رشد صفات روشی استفاده شد. این ساختار کوواریانس به دلیل توانایی در مدل‌سازی همبستگی‌های زمانی کاهش یابنده بین مشاهدات متوالی (همبستگی بیشتر بین اندازه‌گیری‌های نزدیک به هم در زمان)، برای داده‌های تکراری طولی مناسب است [۱۵]. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که اثر سال بسیار معنی‌دار است ( $P < 0.001$ ,  $F = 489/3$ ) که بیانگر تغییرات قابل‌توجه در شاخص‌های رشد طی دوره چهارساله است. همچنین رابطه کلن × سال ضعیف اما معنی‌دار ( $P = 0.012$ ,  $F = 3/21$ ) است. این یافته حاکی از تفاوت در نرخ رشد سالانه بین کلن‌های مختلف است؛ به طوری که برخی کلن‌ها نرخ رشد سریع‌تری نسبت به بقیه دارند. در این پژوهش کلن‌های cv. ۴۵/۲۰، cv. ۴۴/۹، و cv. ۴۴/۱۳ در تمام سال‌های ارزیابی، نرخ رشد بالاتری را نسبت به سایر کلن‌ها از خود نشان دادند [۱۵]. معنی‌داری این اثر متقابل حاکی از وجود تفاوت در نرخ رشد سالانه (شیب منحنی رشد) میان کلن‌های مختلف است؛ به گونه‌ای که الگوی رشد و شتاب انباشت زیست‌توده در برخی کلن‌ها با سرعت بیشتری نسبت به سایرین رخ داده است. یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج مطالعات دیگران بر روی برخی کلن‌های صنوبر همخوانی دارد که گزارش کرده‌اند کلن‌های برتر این پژوهش معمولاً نرخ رشد سالانه بالاتری را در طول دوره ارزیابی داشته‌اند و این ویژگی به عنوان شاخص اصلی در انتخاب کلن برتر در برنامه توسعه زراعت چوب مورد توجه قرار می‌دهد [۸، ۱۵]. پایداری نرخ رشد بالا در کلن‌های cv. ۴۵/۲۰، cv. ۴۴/۹، و به ویژه cv. ۴۴/۱۳، این کلن‌ها را به عنوان گزینه‌های اولویت‌دار برای انتخاب در برنامه‌های اصلاح نژاد و توسعه زراعت چوب در مناطق با شرایط اقلیمی مشابه معرفی می‌نماید.

### ۳-۳. رتبه‌بندی کلن‌ها با BLUP و وراثت‌پذیری

رتبه‌بندی کلن‌ها براساس مقادیر پیش‌بینی‌شده بدون اریب بهترین خطی<sup>۱</sup> برای حجم چوب تک‌درخت در سال چهارم به صورت جدول ۳ ارائه شده است. کلن cv. ۴۵/۲۰ بالاترین مقدار BLUP (+۱۰۷۰۱) بهترین عملکرد میانگین را از خود نشان داد، در حالی که کلن cv. ۴۴/۱۳ با مقدار BLUP (+۱۰۱۴۷) و رتبه پایداری اول، پایدارترین عملکرد را در شرایط مختلف فاصله کاشت ارائه کرد [۲۱]. این نتایج بیانگر آن است که کلن cv. ۴۵/۲۰ پتانسیل تولید چوب بالاتری دارد، اما کلن cv. ۴۴/۱۳ در محیط‌های مختلف (فواصل کاشت متفاوت) عملکرد ثابت‌تری از خود نشان می‌دهد و بنابراین برای زراعت چوب در شرایط متنوع اقلیمی مناسب‌تر است.

جدول ۳. رتبه‌بندی کلن‌ها براساس BLUP حجم چوب تک‌درخت در سال چهارم و رتبه پایداری

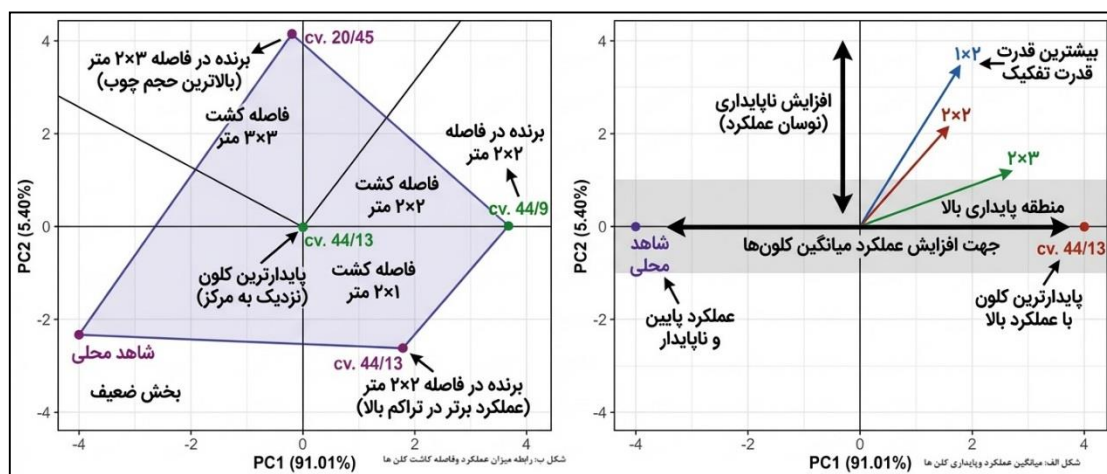
رتبه	کلن	حجم BLUP (دسی مترمکعب)	رتبه پایداری	وضعیت پایداری	تفسیر عملکردی و سازگاری
۱	cv. ۴۵/۲۰	+۱/۱۰۷	۲	متوسط	بالاترین پتانسیل تولید حجم چوب، بهینه در فاصله ۲×۳ متر
۲	cv. ۴۴/۱۳	+۱/۱۴۷	۱	رتبه اول	پایدارترین کلن در تراکم‌های مختلف کاشت
۳	cv. ۴۴/۹	+۱/۲۶۲	۳	خوب	عملکرد خوب و رشد سریع، بهترین پاسخ در فاصله ۲×۲ متر
۴	cv. ۴۵/۶۷	-۰/۸۵۸	۴	متوسط	عملکرد متوسط و حساسیت کم به تراکم
۵	cv. ۴۵/۷۷	-۱/۱۷۲	۵	ضعیف	عملکرد پایین‌تر از میانگین و پایداری نامطلوب
۶	شاهد محلی	-۲/۰۸۰	۶	پایین‌ترین سطح	ضعیف‌ترین عملکرد و پایداری بسیار پایین

<sup>1</sup>Best Linear Unbiased Prediction; BLUP

وراثت‌پذیری گسترده<sup>۱</sup> برای صفت حجم چوب در سال چهارم ۰/۷۸ برآورد شد. این مقدار بالا نشان‌دهنده کنترل قوی ژنتیکی بر صفت حجم چوب است و بیانگر آن است که بخش عمده تغییرات مشاهده‌شده در این صفت ناشی از تفاوت‌های ژنتیکی بین کلن‌ها بوده و تأثیر عوامل محیطی نسبتاً محدود است [۸]. سطح بالای وراثت‌پذیری، موفقیت بالای برنامه‌های اصلاحی مبتنی بر انتخاب کلن‌های برتر را پیش‌بینی می‌کند و تأکید دارد که گزینش فنوتیپی می‌تواند به بهبود قابل توجه تولید چوب در نسل‌های بعدی منجر شود [۲، ۸]. این یافته با نتایج مطالعات پیشین بر روی گونه‌های جنس *Populus* همخوانی دارد که وراثت‌پذیری گسترده بالایی (۰/۶۰ تا ۰/۸۵) برای صفات حجمی گزارش کرده‌اند [۸، ۱۱].

### ۳-۴. تحلیل پایداری با GGE Biplot

نمودار بای پلات حاصل از اثر ژنوتیپ و بر همکنش ژنوتیپ × محیط که برای بررسی پایداری ژنوتیپ‌ها استفاده می‌شود، GGE biplot نامیده می‌شود. برای ارزیابی دقیق‌تر بر همکنش کلن × فاصله کاشت و پایداری عملکرد کلن‌ها، تحلیل GGE Biplot براساس حجم چوب تک‌درخت در سال چهارم انجام شد. محور اول (PC1) و محور دوم (PC2) به ترتیب ۹۱/۰۱ و ۵/۴۰ درصد از واریانس کل را تبیین می‌کند که مجموع آنها ۹۶/۴۱ درصد است و اعتبار بالای مدل را تأیید می‌کند [۲۱]. در این تحلیل، کلن cv. ۴۴/۱۳ نزدیک‌ترین موقعیت را به مرکز بی پلات دارد و به‌عنوان پایدارترین کلن شناخته می‌شود. کلن cv. ۴۵/۲۰ در بخش مربوط به فاصله کاشت ۲×۳ متر قرار گرفت و بالاترین حجم چوب را در این محیط کم‌تراکم تولید کرد. کلن cv. ۴۴/۹ در فاصله ۲×۲ متر و کلن cv. ۴۴/۱۳ در فاصله متراکم ۲×۱ متر به‌عنوان کلن برتر شناخته شدند. در مقابل، شاهد محلی دورترین فاصله را از مرکز داشت و ضعیف‌ترین عملکرد و پایداری را از خود نشان داد.



شکل ۲. نمودار GGE Biplot برای برهم‌کنش کلن × فاصله کاشت براساس حجم چوب کلن‌ها

مطابق شکل ۱، داده‌های حجم چوب تک‌درخت در سال چهارم دو مؤلفه اصلی اول (PC1) و دوم (PC2) به ترتیب ۹۱/۰۱ و ۵/۴۰ درصد از واریانس کل را تبیین کردند که مجموع ۹۶/۴۱ درصدی آن، اعتبار بالای مدل را تأیید می‌کند. نتایج شکل (ب-۱) نشان می‌دهد که کلن‌ها دارای سازگاری خصوصی برای فواصل کاشت متفاوت هستند. کلن cv. ۴۵/۲۰ در فاصله کاشت ۲×۳ متر و کلن cv. ۴۴/۹ در فاصله ۲×۲ متر به‌عنوان کلن برتر معرفی شدند. کلن cv. ۴۴/۱۳ نیز در فاصله کاشت متراکم ۱×۲ متر، عملکرد بهتری از خود نشان دادند. براساس یافته‌های شکل (۱-الف)، کلن cv. ۴۴/۱۳ به‌عنوان ژنوتیپ ایده‌آل معرفی شد. نتایج GGE Biplot نشان می‌دهد که کلن‌ها دارای سازگاری خصوصی<sup>۲</sup> برای فواصل کاشت متفاوت هستند. کلن cv. ۴۵/۲۰ در فاصله ۲×۳ متر، کلن cv. ۴۴/۹ در فاصله متوسط ۲×۲ متر و کلن cv. ۴۴/۱۳ در فاصله متراکم ۲×۱ متر عملکرد بهتری از خود نشان دادند.

<sup>1</sup> Broad-sense heritability

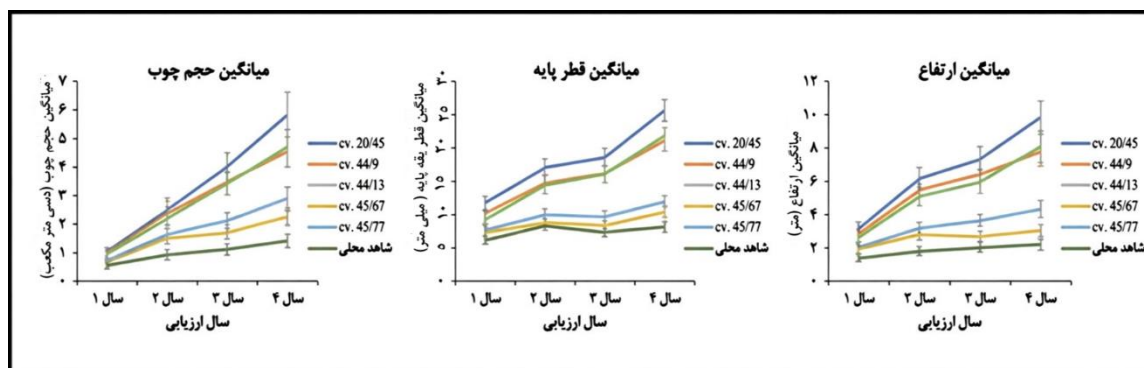
<sup>2</sup> Specific adaptability

براساس شکل ۱ (ب) ژنوتیپ ایده‌آل بی پلات، کلن ۴۴/۱۳ cv. به‌عنوان ژنوتیپ ایده‌آل معرفی شد؛ این کلن همزمان بالاترین عملکرد میانگین و بیشترین پایداری (کمترین بر همکنش با محیط) را دارا است [۲۱]. همچنین، فاصله کاشت ۲×۱ متر به‌دلیل داشتن طولانی‌ترین بردار، بیشترین قدرت تفکیک ژنوتیپ‌ها را دارد. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که کلن ۴۴/۱۳ cv. نه‌تنها از نظر سازگاری عمومی برتر است، بلکه برای کشت متراکم (تراکم بالا) نیز گزینه‌ای مطلوب است و بالاترین پتانسیل را برای بیشینه‌سازی تولید هکتاری چوب در زراعت صنعتی در استان‌های غرب و شمال غربی ایران دارد [۱، ۱۵]. این نتیجه با اصول زراعت چوب با دوره بهره‌برداری کوتاه‌مدت همخوانی دارد که در آن، ترکیب کلن‌های پایدار با تراکم بهینه، کلید دستیابی به بهره‌وری اقتصادی بالاست [۱۶].

### ۳-۵. روند رشد رویشی و حجمی کلن‌ها در طول زمان ارزیابی

روند رشد رویشی و حجمی شش کلن صنوبر مورد مطالعه طی یک دوره چهارساله (۱۴۰۱ تا ۱۴۰۴)، حاکی از یک الگوی رشد نمایی و چشمگیر است (شکل ۲). بررسی داده‌های جدول ۴ نشان می‌دهد که میانگین حجم چوب تک‌درخت در کلن برتر (cv. ۴۵/۲۰) از ۰/۰۵۹ دسی متر مکعب (دسی مترمکعب ۳ معادل  $10^{-3}m^3$ ) در سال پایه (۱۴۰۱) به ۵/۲۷۰ دسی متر مکعب در سال پایانی (۱۴۰۴) ارتقا یافته است که نشان‌دهنده نرخ رشد مرکب سالانه بسیار بالایی است. این افزایش قابل توجه، مؤید استقرار موفقیت‌آمیز نهال‌ها و پتانسیل بالای تولید گونه صنوبر کبوده (*Populus alba*) در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک منطقه مورد مطالعه می‌باشد [۳].

در شاخص‌های رویشی نیز پیشرفت قابل ملاحظه‌ای ثبت شد؛ به‌طوری‌که میانگین قطر یقه در کلن پیشتاز (cv. ۴۵/۲۰) از ۱۶/۴ میلی‌متر در سال پایه به ۷۴/۳ میلی‌متر در سال چهارم رسید و به موازات آن، میانگین ارتفاع این درختان از ۳/۲۲ متر به ۸/۹۵ متر افزایش یافت. این داده‌های میدانی ثابت می‌کند که کلن‌های صنوبر، تحت تأثیر عملیات داشت منظم و یکسان و همچنین حاصلخیزی مطلوب خاک عرصه کاشت، از سرعت رشد بسیار بالایی برخوردار بوده‌اند (جزئیات کامل روند رشد هر کلن در جدول ۴ ارائه شده است). در پایان سال چهارم، تفاوت آماری معنی‌داری در میانگین عملکرد کلن‌ها به ثبت رسید. براساس نتایج آزمون مقایسه میانگین توکی (در سطح احتمال ۵ درصد)، کلن‌های cv. ۴۵/۲۰ با تولید ۵/۲۷۰ دسی متر مکعب، cv. ۴۴/۹ با ۴/۸۳ دسی متر مکعب و cv. ۴۴/۱۳ با ۴/۷۱۶ دسی متر مکعب، بالاترین میزان تولید چوب را به‌خود اختصاص داده و در گروه آماری برتر (گروه a) جای گرفتند. کلن‌های cv. ۴۵/۶۷ (با متوسط ۳/۴۵۲ دسی متر مکعب) و cv. ۴۵/۷۷ (با متوسط ۳/۱۸۷ دسی متر مکعب) در گروه عملکردی متوسط (گروه b) و توده شاهد محلی با تولید تنها ۱/۷۳۰ دسی متر مکعب در پایین‌ترین گروه آماری (گروه c) طبقه‌بندی شدند. اختلاف بیش از ۲۰۰ درصدی در تولید حجم چوب میان گروه کلن‌های برتر و توده شاهد محلی (۵/۲۷۰ در برابر ۱/۷۰۳)، به‌وضوح نشان‌دهنده برتری ژنتیکی و پتانسیل تولیدی بالای کلن‌های اصلاح‌شده است [۶]. این تفاوت چشمگیر عملکردی، بار دیگر بر ضرورت و اهمیت اجرای برنامه‌های ارزیابی و انتخاب کلن‌های سازگار (اعم از بومی و خارجی) به‌منظور بیشینه‌سازی بهره‌وری در طرح‌های زراعت چوب تأکید دارد.



شکل ۲. روند تغییرات میانگین حجم چوب تک‌درخت (دسی مترمکعب)، قطر یقه (میلی‌متر) و ارتفاع (متر)

روند تغییرات مجموع میانگین حجم چوب تک‌درخت، قطر یقه و ارتفاع برای شش کلن طی چهار سال در سه نمودار مجزا نشان داده شده است (شکل ۲). در نمودار حجم چوب، تمام کلن‌ها افزایش نسبی نشان دادند؛ کلن cv. ۴۵/۲۰ بیشترین حجم نهایی و شیب رشد تندتری داشت، به دنبال آن cv. ۴۴/۹ و cv. ۴۴/۱۳ قرار گرفتند. کلن‌های cv. ۴۵/۶۷ و cv. ۴۵/۷۷ رشد متوسط و شاهد محلی کمترین حجم را داشتند. نوارهای خطا (انحراف معیار) پایداری نسبی عملکرد کلن‌های برتر را تأیید می‌کنند. در نمودار قطر یقه، روند افزایشی مشابهی مشاهده شد؛ کلن cv. ۴۵/۲۰ بیشترین قطر نهایی را دارد و رشد سریع‌تری از سال اول داشت. کلن‌های cv. ۴۴/۹ و cv. ۴۴/۱۳ در رتبه‌های بعدی قرار دارند در حالی که شاهد محلی کمترین قطر یقه را نشان داد که با حجم چوب پایین‌تر آن همخوانی دارد. در نمودار ارتفاع نیز کلن cv. ۴۵/۲۰ بالاترین مقدار نهایی را داشت، به دنبال آن cv. ۴۴/۱۳ و cv. ۴۴/۹ قرار گرفتند. کلن‌های cv. ۴۵/۶۷، cv. ۴۵/۷۷ و cv. ۴۵/۷۷ شاهد محلی رشد ارتفاعی کمتری نشان دادند. مطابق جدول ۴ کلن‌های cv. ۴۵/۲۰، cv. ۴۴/۹ و cv. ۴۴/۱۳ از نظر حجم چوب، قطر یقه و ارتفاع عملکرد برتری دارند و نرخ رشد بالاتری نسبت به سایر کلن‌ها از خود نشان دادند؛ این برتری آنها را به‌عنوان گزینه‌های مناسب برای زراعت چوب در استان آذربایجان غربی و مناطق با اقلیم مشابه معرفی می‌کند [۱۱]. نکته قابل توجه، بیشترین افزایش نسبی حجم در شاهد محلی (۹۱۷۰ درصد) بود، اما حجم مطلق نهایی آن (۱/۷ دسی مترمکعب) به‌طور معنی‌داری کمتر از کلن‌های اصلاح‌شده است. این پدیده نشان‌دهنده پتانسیل رشد نسبی بالا در کلن‌های محلی اما حجم مطلق پایین‌تر نسبت به کلن‌های انتخابی است که اهمیت برتری ژنتیکی را برجسته می‌سازد [۶].

جدول ۴. میانگین (± انحراف معیار) حجم چوب تک‌درخت (دسی مترمکعب)، قطر یقه (میلی متر) و ارتفاع (m) برای شش کلن طی چهار سال ارزیابی (میانگین سه فاصله کشت)

کلن	صفت	سال ۱۴۰۱	سال ۱۴۰۲	سال ۱۴۰۳	سال ۱۴۰۴	افزایش نسبی حجم درصد از ۱۴۰۱
cv. ۴۵/۲۰	حجم	۰/۰۰۰۵ ± ۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱۷ ± ۰/۰۰۰۲	۰/۰۱۱۶ ± ۰/۰۰۱۶	۰/۰۲۷۴ ± ۰/۰۰۵۱	
	قطر یقه	۱/۹۸ ± ۰/۰۸	۳/۳۰ ± ۰/۱۵	۶/۳۷ ± ۰/۲۱	۸/۳۹ ± ۰/۲۹	۵۳۸۰
	ارتفاع	۳/۱۹ ± ۰/۲۱	۳/۷۰ ± ۰/۲۸	۶/۱۹ ± ۰/۴۲	۹/۴۲ ± ۰/۶۱	
cv. ۴۴/۹	حجم	۰/۰۰۰۴ ± ۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۱۶ ± ۰/۰۰۰۴	۰/۰۱۰۸ ± ۰/۰۰۲۱	۰/۰۲۵۱ ± ۰/۰۰۱۳	
	قطر یقه	۱/۹۰ ± ۰/۲۶	۳/۴۴ ± ۰/۳۱	۶/۵۷ ± ۰/۳۵	۸/۶۷ ± ۰/۴۱	۶۱۷۵
	ارتفاع	۲/۳۷ ± ۰/۳۲	۳/۲۸ ± ۰/۳۸	۶/۰۶ ± ۰/۴۱	۸/۱۰ ± ۰/۵۲	
cv. ۴۵/۶۷	حجم	۰/۰۰۰۲ ± ۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۸ ± ۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۶۰ ± ۰/۰۰۱۷	۰/۰۱۴۱ ± ۰/۰۰۲۱	
	قطر یقه	۱/۵۸ ± ۰/۱۸	۲/۴۷ ± ۰/۲	۵/۱۳ ± ۰/۳۹	۶/۸۳ ± ۰/۴۶	۷۰۵۰
	ارتفاع	۲/۳۰ ± ۰/۲۹	۲/۹۰ ± ۰/۳۳	۵/۳۴ ± ۰/۴۸	۷/۰۹ ± ۰/۶۳	
cv. ۴۵/۷۷	حجم	۰/۰۰۰۳ ± ۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۸ ± ۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۵۵ ± ۰/۰۰۱۴	۰/۰۱۲۵ ± ۰/۰۰۲۷	
	قطر یقه	۱/۶۴ ± ۰/۱۱	۲/۵۸ ± ۰/۱۹	۵/۰۲ ± ۰/۳۶	۶/۵۷ ± ۰/۴۲	۴۰۶۶
	ارتفاع	۲/۳۳ ± ۰/۲۲	۲/۹۴ ± ۰/۲۷	۵/۱۹ ± ۰/۵۱	۶/۷۹ ± ۰/۵۸	
cv. ۴۴/۱۳	حجم	۰/۰۰۰۴ ± ۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱۱ ± ۰/۰۰۰۳	۰/۰۱۰۵ ± ۰/۰۰۲۵	۰/۰۲۴۷ ± ۰/۰۰۵۴	
	قطر یقه	۱/۸۷ ± ۰/۱۴	۲/۸۷ ± ۰/۳۱	۶/۴۰ ± ۰/۴۱	۸/۵ ± ۰/۴	۶۰۷۵
	ارتفاع	۲/۵۸ ± ۰/۲۶	۳/۰۶ ± ۰/۳۵	۶/۰۷ ± ۰/۴۴	۸/۰۹ ± ۰/۵۱	
شاهد محلی	حجم	۰/۰۰۰۱ ± ۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۴ ± ۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۳۵ ± ۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۸۹ ± ۰/۰۰۱۱	
	قطر یقه	۱/۶۲ ± ۰/۳۱	۲/۳۵ ± ۰/۳	۴/۵۷ ± ۰/۵۴	۵/۹ ± ۱/۳۳	۸۸۰۰
	ارتفاع	۱/۴۶ ± ۰/۲۷	۲/۰۰ ± ۰/۳۸	۴/۳۱ ± ۰/۵۲	۵/۷۴ ± ۰/۶۱	

### ۳-۶. عملکرد کلن‌ها در فواصل کشت مختلف

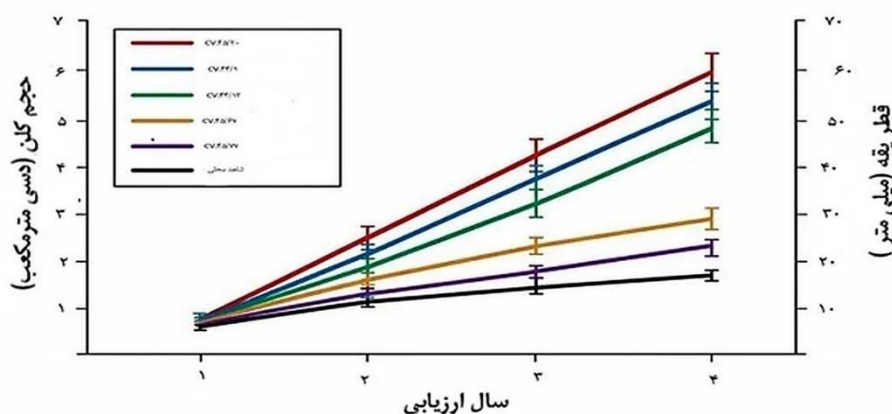
نتایج تحلیل آماری نشان می‌دهد که اثر متقابل (کلن × فاصله کاشت) در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار نیست ( $P > 0.05$ ). این امر گویای آن است که عملکرد نسبی کلن‌ها در فواصل مختلف کاشت از روندی تقریباً مشابه پیروی کرده و ژنوتیپ‌های مورد بررسی از پایداری فنوتیپی بالایی برخوردارند. با این وجود، بررسی دقیق‌تر مقادیر میانگین (جدول ۵)، اطلاعات مدیریتی ارزشمندی

را ارائه نموده و یافته‌های کاربردی مهمی را برای بخش اجرای زراعت چوب آشکار می‌سازد. بررسی واکنش‌های اختصاصی کلن‌ها نشان می‌دهد که کلن cv. ۴۵/۲۰ (کلن وارداتی/ایتالیایی) بیشترین حجم تک‌درخت، معادل ۶/۳ دسی متر مکعب، را در بازرترین فاصله کاشت (۲×۳ متر) تولید کرده است. این رکورد، نشان‌دهنده پتانسیل بالای رشد انفرادی این کلن در شرایط کاهش رقابت نوری تاج و تغذیه‌ای بین‌درختی است [۱۵]. این رفتار زیستی، سازگاری اختصاصی این کلن خارجی با محیط‌های کم‌تراکم و سیستم‌های کشت بازتر را به خوبی تأیید می‌کند. در تقابل با این الگو، کلن بومی cv. ۴۴/۱۳ رفتار بوم‌شناختی متفاوتی از خود بروز داده است؛ به طوری که این ژنوتیپ توانست حجم چشمگیر ۵/۶ دسی متر مکعب را در متراکم‌ترین فاصله کاشت (۲×۱ متر، معادل تراکم ۵۰۰۰ اصله در هکتار) به دست آورد [۲۳]. دستیابی به بالاترین عملکرد در تراکم بالا، حاکی از تحمل بالای این کلن بومی به شرایط رقابت شدید است و آن را به گزینه‌ای مناسب و اقتصادی برای توسعه عرصه‌های متراکم زراعت چوب با هدف حداکثر تولید در واحد سطح تبدیل می‌نماید.

جدول ۵. میانگین حجم چوب تک‌درخت (دسی مترمکعب) در سال چهارم (۱۴۰۴) بر حسب کلن و فاصله کشت (با میانگین کلن  $\pm$  انحراف معیار)

کلن	۲×۱ متر	۲×۲ متر	۳×۲ متر	میانگین کلن ( $\pm$ SD)
cv. ۴۵/۲۰	۴/۸۶۲	۴/۵۶۴	۶/۳۸۵	۵/۲۷۰ $\pm$ ۰/۹۹
cv. ۴۴/۹	۴/۵۹۳	۵/۱۱۰	۴/۷۸۹	۴/۸۲۱ $\pm$ ۰/۲۶
cv. ۴۴/۱۳	۶۲۷/۵	۵۸۹/۳	۹۳۱/۴	۴/۷۱۶ $\pm$ ۱/۰۲
cv. ۴۵/۶۷	۳/۱۹۶	۲/۵۳۵	۲/۴۰۲	۲/۷۱۱ $\pm$ ۰/۴۱
cv. ۴۵/۷۷	۲/۹۴۹	۲/۲۹۴	۱/۹۴۶	۲/۴۹۷ $\pm$ ۰/۵۱
شاهد محلی	۱/۵۵۰	۱/۶۷۰	۱/۹۸۳	۱/۷۰۳ $\pm$ ۰/۲۲

مقدار عددی این کلن در جدول ۵ حتی از عملکرد برخی کلن‌های دیگر در فواصل بازتر بیشتر است و بیانگر سازگاری بالای کلن cv. ۴۴/۱۳ با شرایط کشت متراکم است. این ویژگی، با توجه به بیشینه‌سازی تولید در واحد سطح در زراعت چوب، منجر به برتری چشمگیر تولید هکتاری خواهد شد [۱۶].



شکل ۳. اثر متقابل کلن و فاصله کشت بر میانگین حجم چوب تولیدی کلن‌ها (دسی مترمکعب)

شکل ۳ روند تغییرات میانگین حجم چوب تک‌درخت (برحسب دسی مترمکعب) و قطر یقه (برحسب میلی‌متر) را برای شش کلن صنوبر کبوده طی چهار سال ارزیابی نشان می‌دهد. بررسی میانگین حجم چوب در پایان سال چهارم حاکی از آن است که اگرچه اثر متقابل کلن و فاصله کاشت از نظر آماری معنی‌دار نبود (که نشان‌دهنده پایداری فنوتیپی کلن‌هاست)، اما از منظر عددی، تفاوت‌هایی در سازگاری اختصاصی کلن‌ها با تراکم‌های مختلف مشهود است. نتایج، پایداری عملکرد کلن‌های برتر (شامل

۴۵/۲۰، cv. ۴۴/۹ و cv. ۴۴/۱۳) را در تراکم‌های گوناگون تأیید می‌کند؛ با این وجود، کلن بومی cv. ۴۴/۱۳ در فاصله کاشت بسته (۲×۱ متر) عملکردی شاخص و متمایز از خود نشان داد. این رفتار متفاوت بین کلن غیربومی (cv. ۴۵/۲۰) و کلن بومی (cv. ۴۴/۱۳)، با یافته‌های مطالعات پیشین همخوانی دارد؛ گزارش‌ها نشان داده‌اند که کلن‌های غیر بومی و اصلاح‌شده غالباً در تراکم‌های پایین و فواصل باز، رشد انفرادی بهتری دارند، درحالی‌که کلن‌های بومی سازگار با شرایط محلی، در تراکم‌های بالا رقابت‌پذیری و پایداری بیشتری از خود نشان می‌دهند [۲۳، ۲۶]. بررسی روند تغییرات میانگین حجم چوب تک‌درخت طی چهار سال (شکل ۳) نشان‌دهنده رشد افزایشی و شیب تند توسعه برای تمامی کلن‌هاست. در این میان، کلن cv. ۴۵/۲۰ با ثبت بالاترین حجم نهایی و تندترین شیب رشد، پتانسیل ممتاز خود را در تولید چوب به اثبات رساند. کلن‌های cv. ۴۴/۹ و cv. ۴۴/۱۳ نیز از سرعت رشد بالایی برخوردار بوده و در پایان سال چهارم به حجم تقریبی ۵ دسی‌متر مکعب دست یافتند. در مقابل، کلن‌های cv. ۴۵/۶۷ و cv. ۴۵/۷۷ رشد متوسطی را تجربه کردند و توده شاهد محلی نیز با کمترین میزان حجم و کندترین شیب، در پایین‌ترین رده قرار گرفت. محدود بودن دامنه نوارهای خطا (انحراف معیار) در نمودار، تأییدی مضاعف بر ثبات و پایداری نسبی عملکرد کلن‌های برتر در طول سال‌های ارزیابی است. به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش برتری کلن‌های cv. ۴۵/۲۰، cv. ۴۴/۹ و cv. ۴۴/۱۳ را در تولید چوب طی دوره چهار ساله ارزیابی اثبات می‌کند. بنابراین این کلن‌ها به‌عنوان مستعدترین و مناسب‌ترین گزینه‌ها جهت توسعه زراعت چوب در منطقه مورد مطالعه و شرایط اقلیمی مشابه معرفی می‌گردند [۱۱، ۱۵].

#### ۴. نتیجه‌گیری

عامل ژنتیکی (کلن) در شرایط نیمه‌خشک غرب ایران نقش غالب‌تری نسبت به فاصله کاشت در رشد و تولید حجم چوب صنوبر کبوده (*Populus alba*) ایفا می‌کند [۸]. اثر کلن بر صفات قطر یقه، ارتفاع و حجم چوب معنی‌دار بود و بیش از ۶۵ درصد تغییرات حجم چوب را می‌توان مربوط به این ویژگی دانست. اثر فاصله کاشت و برهم‌کنش کلن × فاصله کاشت معنی‌دار نبود و پایداری فنوتیپی بالای کلن‌ها را تأیید کرد [۲۱]. کلن‌های cv. ۴۵/۲۰، cv. ۴۴/۹ و cv. ۴۴/۱۳ عملکرد برتر داشتند. کلن cv. ۴۴/۱۳ پایدارترین کلن (براساس GGE Biplot) و در فاصله ۲×۱ متر پربازده‌ترین کلن بود [۲۳]. وراثت‌پذیری گسترده حجم چوب ۰/۷۸ بود که واپایش قوی ژنتیکی این صفت و پتانسیل بالای گزینش را نشان داد [۸]. ترکیب بهینه برای زراعت چوب، کلن cv. ۴۴/۱۳ با فاصله کاشت ۲×۱ متر (تراکم ۵۰۰۰ اصله در هکتار) است [۱۶، ۱]. در جمع‌بندی می‌توان توصیه نمود که:

- ✓ کلن cv. ۴۴/۱۳ در استان‌های غربی ایران با فاصله کاشت مترامک توسعه یابد.
- ✓ عملکرد و کیفیت چوب کلن‌های برتر در مقیاس تجاری و دوره ۸-۱۰ ساله ارزیابی شود.
- ✓ تحلیل اقتصادی ترکیب‌های بهینه پیش از گسترش انجام گیرد.

یافته‌های این مطالعه مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی زراعت صنعتی چوب صنوبر کبوده در مناطق نیمه‌خشک غرب و شمال غربی ایران فراهم می‌کند. اولویت انتخاب کلن‌های برتر به‌ویژه کلن cv. ۴۴/۱۳ بر مدیریت فاصله کاشت، همراه با پایداری فنوتیپی بالا و وراثت‌پذیری گسترده حجم چوب، امکان دستیابی به تولید هکتاری بالاتر را با هزینه مدیریت کمتر فراهم می‌سازد. این نتایج بر لزوم سرمایه‌گذاری در برنامه‌های ارزیابی و اصلاح کلن‌های بومی *Populus alba* تأکید دارد تا خلأ عملکرد فعلی صنوبر کاری‌های کشور کاهش یابد.

#### ملاحظات اخلاقی

##### پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید آنهاست.

##### تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

## حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت لجستیکی و معنوی اداره کل منابع طبیعی استان آذربایجان غربی انجام شد.

## مشارکت نویسندگان

نحوه مشارکت نویسندگان در مقاله حاضر: نویسنده اول ۶۰ درصد؛ نویسنده دوم ۱۵ درصد؛ نویسنده سوم ۲۵ درصد در همه مراحل طراحی و اجرای پژوهش، گردآوری داده‌ها، مقاله مشارکت داشتند.

## بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

## سپاسگزاری

از مدیر کل محترم منابع طبیعی استان آذربایجان غربی جناب آقای مهندس سید نبی قائمی، رئیس اداره جنگل‌کاری اداره کل منابع طبیعی استان آذربایجان غربی جناب آقای دکتر سعید آذری پویا، معاون اداره جنگل اداره کل منابع طبیعی استان آذربایجان غربی جناب آقای مهندس محمد رضا غفارلو و نگهبان نهالستان دکتر جوانشیر مه‌باد جناب آقای محمد کرده به‌خاطر حمایت معنوی/همکاری در مدت اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

## References

- [1] FAO. (2023). Global Forest Resources Assessment 2023: Plantation forests. Rome: FAO Forestry Paper No. 188.
- [2] Isebrands, J.G., & Richardson, J. (2014). Poplars and willows: Trees for society and the environment. Wallingford, UK: CABI.
- [3] Abassi, M., Lamhamedi, M.S., Albouchi, A., Khasa, D. & Bejaoui, Z. (2025). Clonal variation in growth, physiology and ultrastructure of *Populus alba* L. seedlings under NaCl stress. *Forests*, 16(5), 721.
- [4] Sabitī, H. (1976). *Forests, trees and shrubs of Iran*. Tehran: Forests and Rangelands Organization Press. (in Persian)
- [5] Forests and Rangelands Organization of Iran. (2024). *National report on poplar plantation status*. Tehran: FRWO.
- [6] Ghāsemī, M., Karīmī, M. & Kalāgerī, A. (2022). Yield gap analysis in poplar plantations of western Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 30(1), 45-58. (In Persian)
- [7] Dickson, R.E. & Tomlinson, P.T. (1996). Genetic and environmental controls on plant allocation to growth and defense. *Journal of Experimental Botany*, 47(305), 1719-1726.
- [8] Sabatti, M., et al. (2021). Clonal selection for short-rotation plantations: A meta-analysis of *Populus* trials across Europe. *GCB Bioenergy*, 13(4), 621-635.
- [9] Alonso-Blanco, C. & Koornneef, M. (2000). Naturally occurring variation in *Arabidopsis*: An underexploited resource for plant genetics. *Trends in Plant Science*, 5(1), 22-29.
- [10] Sabatti, M., Scarascia-Mugnozza, G.E., Fabbrini, F., Gaudet, M., Paolucci, I. & Ducci, F. (2020). Genetic improvement of white poplar (*Populus alba* L.) for biomass production in short-rotation forestry: A review of Italian breeding programs. *Annals of Forest Science*, 77(3), Article 78.
- [11] Kalāgerī, A., Karīmī, M. & Madanī, H. (2020). Growth performance of poplar clones in semi-arid conditions of Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 28(2), 201-214. (In Persian)
- [12] Ghadīrīpour, A., Aḥmadī, H., & Zangeneh, S. (2016). Assessment of genetic diversity in native populations of *Populus euphratica* and its hybrids using ISSR markers. *Iranian Journal of Forest and Wood Products Research*, 4(1), 1-14. (In Persian)

- [13] Nūrī, A., Ghāsemī, M. & Karīmī, M. (2021). Phenotypic evaluation of native *Populus alba* clones in Gorgan. *Forest Research and Development*, 7(1), 89-102. (In Persian)
- [14] Mohammadi, S., et al. (2024). High genetic diversity in *Populus alba* populations of western Iran revealed by SSR markers. *Tree Genetics & Genomes*, 20(2), 18.
- [15] Ceulemans, R., & Deraedt, W. (1999). Water use and production of short-rotation poplar coppice: Influence of clone, planting density and rotation length. *Forest Ecology and Management*, 121(1-2), 195–211.
- [16] Zhang, S., Gui, J. & Zhang, Y. (2023). Optimal planting density for biomass production in *Populus* short-rotation coppice: A global meta-analysis. *Biomass and Bioenergy*, 173, 106798.
- [17] Hemmatī, S. & Modīr Raḥmatī, S. (2022). Effect of thinning on crown dieback in *P. nigra* plantations. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 30(3), 371-384. (In Persian)
- [18] Fang, S., et al. (2022). Sex-specific response to planting density in dioecious trees: Evidence from *Populus* spp. *Annals of Botany*, 130(5), 621-632.
- [19] Yūsefī, M. & Modīr Raḥmatī, S. (2021). Growth performance of male vs. female poplar clones under high-density planting. *Journal of Forest Science*, 9(2), 145-156. (In Persian)
- [20] Cooper, M., et al. (2023). Genotype × environment interaction in tree improvement: Current status and future directions. *Tree Physiology*, 43(1), 1-15.
- [21] Yan, W. & Kang, M.S. (2003). *GGE Biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists*. CRC Press.
- [22] Ghāsemī, M., Karīmī, M. & Kalāgerī, A. (2011). Evaluation of adaptability of selected poplar clones under Dezful climatic conditions. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 24(3), 327-340. (In Persian)
- [23] Hemmatī, S. & Modīr Raḥmatī, S. (2005). Study of planting spacing effect on growth traits of different *Populus nigra* clones in Urmia nursery. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 18(3), 285-296. (in Persian)
- [24] Clark, J.S. & Wilson, J.B. (2003). The genetic consequences of selection in natural populations. *Molecular Ecology*, 12(5), 1129-1136.
- [25] Jobling, J. (1990) *Poplars for Wood Production and Amenity*. Forestry Commission Bulletin No. 92, HMSO, London.
- [26] Birler, B. (2014). *Silvicultural guidelines for Populus species in Turkey*. Ankara: General Directorate of Forestry.
- [27] Birler, B. (1985). Spacing trials with poplar clones in Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 9(4), 329-336.