Research Article

Iranian Journal of Wood and Paper Industries
Vol. 17, No. 1, Page 191 - 206 (2026)

DOI: 10.22034/ijwp.2026.2079736.1746

Biometrics, Physical, and Structural Properties of *Amygdalus haussknechtii* Wood in the Forests of Chaharmahal and Bakhtiari Province

Mohsen Bahmani[1*], Fatemeh Ebrahimi[2], Saleh Kahyani[3], Yaghoub Iranmanesh[4], Leila Fathi[5], Nasrin Gharahi[6] Elham Ghehsareh Ardestani[7]

1- Corresponding author, Associate Professor, Department of Furniture Industry Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: mohsen.bahmani@sku.ac.ir
2- MS graduate, Faculty of Natural, Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
3- Assistant Professor, Depsrtment. of Forestry, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
4- Associate Prof., Forests and Rangelands Research Dept. Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education 2
5- Assistant Professor, Department of Furniture Industry Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
6- Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
7- Associate Professor, Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University , Shahrekord, Iran

Received: December 2025 Accepted: January 2026

Abstract

Problem definition and objectives: The Zagros region is one of the most important natural forest ecosystems in Iran, where *Amygdalus haussknechtii* plays a significant ecological role. This study aimed to evaluate the effects of site conditions on the physical and biometric properties of this species' wood in two distinct sites, Kareh-Bas and Cholicheh, located in Chaharmahal and Bakhtiari Province.

Methodology: Wood samples were collected from healthy, even-aged trees at breast height, and traits such as oven-dry density, basic density, volumetric swelling and shrinkage, as well as fiber characteristics (length, diameter, and cell wall thickness) were measured. To investigate the impact of habitat and environmental factors on the physical and biometric properties of A. haussknechtii wood, the data were first evaluated for normality. Pearson correlation coefficient was used to analyze relationships between variables, and principal component analysis was employed to reduce data dimensions and identify principal components. MANOVA was applied to examine multivariate separation among habitats. To identify the variables influencing dry density, multiple linear regression models were performed using stepwise forward.

Results: Results indicated that differences between the two sites were significant for most traits ($P < 0.01$). In Kareh-Bas, oven-dry density was 0.92±0.03 g/cm3 and basic density was 0.77±0.02 g/cm3, which were lower than the values recorded in Cholicheh (1.01±0.03 g/cm3 and 0.84±0.06 g/cm3, respectively). Fiber length in Cholicheh averaged 0.98 mm compared to 0.78

mm in Kareh-Bas ($P < 0.01$). Fiber diameter (20.75 µm) and cell wall thickness (6.02 µm) were also higher in Cholicheh than in Kareh-Bas ($P < 0.01$). The Pearson correlation pattern indicates that the dominant axis of variation aligns with dry density, fiber diameter, cell wall thickness, wet density, and fiber length. These same variables emerge as the dominant and habitat-separating components in the first principal component analysis. Therefore, the correlation structure provides an intuitive basis for explaining the PCA separation and the significance of the MANOVA. PCA results revealed that the dominant axis of variation in the data aligns with fiber and moisture-related traits (fiber diameter, cell wall thickness, dry density, wet density, and fiber length), and this same axis appeared as the primary habitat separator in the first principal component (PC1). The MANOVA statistically confirmed the separation observed in the biplot. Regression models showed that fiber diameter is the most significant predictor of dry density across the entire dataset. In the Choliche habitat, in addition to fiber diameter, shrinkage had a positive effect and swelling had a negative effect, whereas in the Kareh-Bas habitat, only the constant (intercept) was significant. These results indicate that in the Choliche habitat, a combination of fiber and dimensional traits determines wood quality, whereas in the Karebas habitat, wood density is primarily influenced by the overall tissue average.

Conclusion: Overall, wood grown in Cholicheh exhibited longer fibers, thicker cell walls, and higher density, whereas wood from Kareh-Bas showed lower density and greater porosity. These findings highlight the direct influence of environmental factors such as temperature, precipitation, and altitude on the wood structure of A. haussknechtii. It can be concluded that site-specific differences lead to substantial variations in the physical and biometric properties of this species, and such information is valuable for selecting optimal sites for industrial utilization and genetic improvement programs.

Keywords: *Amygdalus haussknechtii*; wood physical properties; fiber biometry; Zagros forests; Chaharmahal and Bakhtiari.

بررسی ویژگی‌های بیومتری، فیزیکی و ساختاری چوب بادام ارجنک (*Amygdalus haussknechtii*) در جنگل‌های استان چهارمحال و بختیاری

محسن بهمنی[۱*]، فاطمه ابراهیمی[۲]، صالح کهیانی[۳]، یعقوب ایران منش[۴]، لیلا فتحی[۵]، نسرین قرهی[۶]، الهام قهساره اردستانی[۷]

۱- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی صنایع مبلمان، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد. ایران، رایانامه: mohsen.bahmani@sku.ac.ir
۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد. ایران.
۳- استادیار، گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد. ایران.
۴- دانشیار، بخش تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان. ایران.
۵- استادیار، گروه مهندسی صنایع مبلمان، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد. ایران.
۶- دانشیار، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
۷- دانشیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

تاریخ دریافت: آذر ۱۴۰۴ تاریخ پذیرش: بهمن ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: منطقه زاگرس یکی از مهم‌ترین رویشگاه‌های طبیعی کشور است که گونه بادام ارجنک (*Amygdalus haussknechtii*) در آن نقش بوم‌شناختی برجسته‌ای دارد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر شرایط رویشگاهی بر ویژگی‌های فیزیکی و زیست‌سنجی چوب این گونه در دو رویشگاه متفاوت، کره‌بس و چُلیچه در استان چهارمحال و بختیاری انجام شد.

مواد و روشها: نمونه‌های چوب از درختان سالم و هم‌سن در ارتفاع برابر سینه برداشت شدند و ویژگی‌هایی مانند دانسیته خشک، دانسیته پایه بحرانی، واکشیدگی، هم کشیدگی و مشخصات الیاف (طول، قطر و ضخامت دیواره سلولی) اندازه‌گیری شد. برای بررسی تأثیر رویشگاه و عوامل محیطی بر ویژگی‌های فیزیکی و زیست‌سنجی چوب بادام ارجنک، ابتدا داده‌ها از نظر نرمال بودن ارزیابی شدند. برای تحلیل روابط بین متغیرها، از ضریب همبستگی پیرسون و از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی مؤلفه‌های اصلی استفاده شد. آزمون MANOVA برای بررسی جدایش چندمتغیره بین رویشگاه‌ها به کار گرفته شد. برای شناسایی متغیرهای مؤثر بر دانسیته خشک، مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه با روش ورود گام‌به‌گام اجرا شدند.

نتایج: نتایج نشان داد که تفاوت بین دو رویشگاه در اغلب صفات اندازه‌گیری شده معنی‌دار است ($P<0/01$). در رویشگاه کره‌بس، دانسیته خشک برابر با ۰/۹۲ ± ۰/۰۳ g/cm۳ و دانسیته پایه بحرانی برابر با ۰/۷۷ ± ۰/۰۲ g/cm۳ بود که کمتر از مقادیر ثبت‌شده در رویشگاه چُلیچه (به ترتیب ۱/۰۱ ± ۰/۰۳ g/cm۳ و ۰/۸۴ ± ۰/۰۶ g/cm۳) است. طول الیاف در رویشگاه چُلیچه با میانگین ۰/۹۸ میلی‌متر در مقایسه با ۰/۷۸ میلی‌متر در رویشگاه کره‌بس به‌طور معنی‌داری بیشتر بود ($P<0/01$). قطر الیاف در رویشگاه چُلیچه ۲۰/۷۵ میکرومتر و ضخامت دیواره سلولی ۶/۰۲ میکرومتر اندازه‌گیری شد که نسبت به مقادیر رویشگاه کره‌بس بالاتر بودند ($P<0/01$). الگوی همبستگی پیرسون نشان داد محور غالب تغییرات با دانسیته خشک، قطر الیاف، ضخامت دیواره سلولی، دانسیته تر و طول الیاف هم‌راستاست؛ که همین متغیرها در تحلیل مؤلفه اول به‌عنوان مؤلفه‌ی غالب و جداساز رویشگاه‌ها ظاهر می‌شود؛ بنابراین شکل همبستگی، مبنای شهودی خوبی برای تبیین جدایش PCAو معنی‌داری MANOVA فراهم می‌کند. نتایج تحلیل PCA نشان داد که محور غالب تغییرات داده‌ها با صفات فیبری و رطوبتی (قطر الیاف، ضخامت دیواره سلولی، دانسیته خشک، دانسیته تر و

طول الیاف) هم‌راستا است و همین محور در مؤلفه اول (PC1) به‌عنوان جداساز اصلی رویشگاه‌ها ظاهر شد. آزمون MANOVA نیز جدایش مشاهده‌شده در بای‌پلات را از نظر آماری تأیید کرد. مدل‌های رگرسیونی نشان دادند که قطر الیاف مهم‌ترین پیش‌بینی کننده دانسیته خشک در کل داده‌هاست. در رویشگاه چُلیچه علاوه بر قطر الیاف، هم کشیدگی اثر مثبت و واکشیدگی اثر منفی داشتند، در حالی‌که در رویشگاه کره‌بس تنها میانگین ثابت معنی‌دار بود. این نتایج نشان می‌دهند که در رویشگاه چُلیچه ترکیب ویژگی‌های فیبری و ابعادی کیفیت چوب را تعیین می‌کند، اما در رویشگاه کره‌بس تراکم چوب بیشتر تحت تأثیر میانگین کلی بافت قرار دارد.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی، چوب‌های رشد یافته در رویشگاه چُلیچه دارای الیاف بلندتر و دیواره ضخیم‌تر بوده و از دانسیته بالاتری برخوردارند، در حالی‌که چوب‌های رویشگاه کره‌بس دانسیته کمتر و تخلخل بیشتری نشان دادند. این یافته‌ها حاکی از تأثیر مستقیم شرایط محیطی مانند دما، بارندگی و ارتفاع از سطح دریا بر ساختار چوب بادام ارجنک است. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت‌های رویشگاهی منجر به تغییرات قابل‌توجهی در ویژگی‌های فیزیکی و زیست‌سنجی این گونه می‌شود و این اطلاعات می‌تواند در انتخاب رویشگاه‌های بهینه برای بهره‌برداری صنعتی و برنامه‌های اصلاح ژنتیکی مفید واقع گردد.

واژه های کلیدی: بادام ارجنک، ویژگی‌های فیزیکی چوب، زیست‌سنجی الیاف، رویشگاه‌های زاگرس، چهارمحال و بختیاری.

مقدمه

جنگل‌های زاگرس، از جنوب پیرانشهر تا شیراز، با وسعتی حدود ۵ تا ۶ میلیون هکتار، یکی از مهم‌ترین رویشگاه‌های ایران به شمار می‌آیند. این اکوسیستم نقش اساسی در تأمین منابع آب سطحی، تعدیل اقلیم منطقه و حفظ تعادل اقتصادی و اجتماعی جوامع محلی دارد [۱]. پوشش غالب این جنگل‌ها در نواحی نیمه‌خشک زاگرس شامل گونه‌هایی مانند بلوط‌ها، بنه و انواع بادام وحشی است که از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی اهمیت ویژه دارند. بادام ارجنک (Amygdalus haussknechtii) از گونه‌های بومی، دارویی و کمتر شناخته‌شده زاگرس است که در ارتفاعات بلند، روی شیب‌های تند، خاک‌های آهکی و سست و در اقلیم نیمه‌خشک رشد می‌کند. این گونه به دلیل مقاومت چشمگیر در برابر خشکی، سرما، باد و شوری خاک، پتانسیل بالایی برای استفاده در پروژه‌های احیای جنگل، جنگل‌کاری و حفاظت از خاک دارد [۲]. از لحاظ اکولوژیکی، بادام ارجنک می‌تواند به‌عنوان گونه‌ی شاخص سازگار با شرایط غالب جنگل‌های زاگرس مورد توجه قرار گیرد؛ گزارش‌ها نشان می‌دهند که رویش آن در ارتفاعاتی بین حدود ۱۳۰۰ تا ۳۴۰۰ متر از سطح دریا مشاهده می‌شود و پراکنش آن عمدتاً در جنوب غرب آسیا، به‌ویژه ایران و افغانستان است. علاوه بر این، مطالعات اخیر تأکید کرده‌اند که ایران یکی از مراکز ژنتیکی و تنوع زیستی بادام‌های وحشی است.

مطالعات متعددی نشان داده‌اند که ویژگی‌های فیزیکی، بیومتری و ساختاری چوب گونه‌های جنگلی تحت تأثیر شرایط محیطی و آناتومی درختان تغییر می‌کند. برای نمونه، در بررسی ویژگی‌های فیزیکی چوب گونه‌های ممرز (Carpinus sp.)، شامل دانسیته خشک، دانسیته بحرانی و میزان هم کشیدگی در سه رویشگاه شمال ایران، اثر معنی‌دار رویشگاه بر این ویژگی‌ها گزارش شد که عمدتاً ناشی از تفاوت دانسیته اندازه‌گیری شده در هر رویشگاه بود [۳]. مطالعه‌ای بر روی بلوط ایرانی (Quercus brantii Lindl.) در سه طبقه ارتفاعی گردنه چری جنگل‌های بازفت نشان داد که تغییرات ارتفاع از سطح دریا تأثیر قابل‌توجهی بر ویژگی‌های چوب و ساختار درختان بلوط دارد [۴]. افزون بر این، ویژگی‌های بیومتری، فیزیکی و شیمیایی چوب گونه‌های جنگلی مانند بلوط ایرانی نشان داده‌اند که تفاوت در ساختار سلولی و شرایط رشد می‌تواند تغییرات قابل‌توجهی در خواص چوب ایجاد کند [۵]. همچنین، پژوهشی در جنگل‌های ماشلک نوشهر نشان داد که ارتفاع از سطح دریا موجب تغییر در دانسیته خشک چوب ممرز (Carpinus betulus) می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در محورهای

شعاعی روند صعودی و در محور طولی از پایین به بالا روند نزولی مشاهده شد [۶]. در مطالعه‌ای دیگر، Aghajani و همکاران (۲۰۱۹) بر روی چوب درخت بارانک (Sorbus tominalis L.) در جنگل‌های سنگده مازندران مشاهده کردند که میزان سلولز چوب بارانک در محدوده‌ای مشابه سایر گونه‌های پهن‌برگ قرار دارد [۷]، اما میزان لیگنین آن کمتر بوده و این تفاوت می‌تواند بر خواص فیزیکی و دوام طبیعی چوب اثرگذار باشد.

با توجه به اهمیت زیستی و اقتصادی بادام ارجنک، اطلاعات دقیقی درباره ویژگی‌های بیومتری، فیزیکی چوب و ساختاری الیاف آن در رویشگاه‌های مختلف زاگرس موجود نیست. مطالعات روی گونه‌هایی مانند بلوط ایرانی نشان می‌دهد شرایط رویشگاه مانند ارتفاع، شیب و خاک بر ویژگی‌های چوب تأثیرگذار است[۸]. همچنین پژوهش‌ها حاکی از تفاوت‌های معنی‌دار در خصوصیات چوب از جمله دانسیته، هم کشیدگی حجمی گونه‌های مختلف بادام وحشی است [۹]. با توجه به کمبود تحقیقات روی بادام ارجنک، این پژوهش برای پرکردن این خلأ طراحی شد. در این تحقیق، ویژگی‌های بیومتری، فیزیکی چوب (شامل دانسیته خشک، دانسیته پایه بحرانی، هم کشیدگی و واکشیدگی حجمی) و ساختاری الیاف (طول، قطر و ضخامت دیواره سلولی) در دو رویشگاه کره‌بس و چُلیچه در استان چهارمحال و بختیاری بررسی و مقایسه شد. این مقایسه امکان تحلیل تأثیر عوامل محیطی مانند ارتفاع، شیب، جهت و خاک بر کیفیت چوب این گونه را فراهم می‌کند. این مطالعه با تمرکز بر ویژگی‌های چوب بادام ارجنک، به بررسی نقش عوامل ژنتیکی و محیطی پرداخته و داده‌های ارزشمندی برای مدیریت پایدار و حفاظت از این گونه ارائه می‌دهد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در دو رویشگاه طبیعی کره‌بس و چِلیچه در استان چهارمحال و بختیاری انجام شد. رویشگاه کره‌بس با وسعتی حدود ۵۰۶/۷ هکتار در فاصله حدود ۶۰ کیلومتری جنوب غرب شهرکرد واقع شده است (شکل ۱). مختصات جغرافیایی این رویشگاه بین طول‌های شرقی ۵۱ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۱۲ دقیقه و عرض‌های شمالی ۳۱ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۳۵ دقیقه قرار دارد. بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی امام‌قیس (به‌عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه)، متوسط بارندگی سالیانه ۵۳۷ میلی‌متر و متوسط دمای سالیانه ۱۰/۴ درجه سانتی‌گراد، دارای رژیم بارشی نامنظمی است که در برخی ماه‌ها بارش به صفر می‌رسد و حداکثر بارش ماهانه آن ۸۵ میلی‌متر می‌باشد. از نظر توپوگرافی، این منطقه در ارتفاعاتی بین ۱۷۴۵ تا ۲۳۱۴ متر از سطح دریا و در واحد تپه‌ای واقع شده که شیب‌های آن عمدتاً در جهت‌های شمالی و جنوب شرقی گسترش یافته‌اند. خاک‌های این ناحیه با عمق متوسط و بافت رسی و شنی لومی، دارای ساختمان دانه‌ای و مکعبی هستند که باعث شده‌اند نفوذپذیری نسبتاً مناسب و زهکشی مطلوبی داشته باشند.

رویشگاه چِلیچه در فاصله حدود ۳۰ کیلومتری شمال غرب شهرکرد و در ارتفاع ۲۰۳۳ متر از سطح دریا (۲۲۰۶-۲۰۸۸ متر از سطح دریا) واقع شده است. مختصات جغرافیایی این منطقه در حدود طول شرقی ۵۰ درجه و ۳۵ دقیقه و عرض شمالی ۳۲ درجه و ۱۶ دقیقه قرار دارد. این رویشگاه در ناحیه‌ای کوهستانی با اقلیم مدیترانه‌ای معتدل واقع شده است. این منطقه دارای بارندگی سالیانه متوسط ۵۲۸ میلی‌متر است که توزیع ماهانه آن نامنظم بوده و در برخی ماه‌ها حداقل بارش صفر و حداکثر آن به ۶/۹۸ میلی‌متر می‌رسد. از نظر دمایی، اقلیم این ناحیه با متوسط دمای ۱۲/۱ درجه سانتی‌گراد، نوسان زیادی دارد به طوری که حداقل مطلق دما منفی ۲۰ درجه و حداکثر مطلق آن ۳۶ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. اراضی این منطقه عمدتاً در واحد تپه‌ای واقع شده و شیب غالب آن‌ها در جهت جنوب شرقی و شمال غربی است. خاک‌ها عموماً عمیق تا نسبتاً عمیق، با بافت رسی و شنی لومی و ساختار دانه‌ای و مکعبی می‌باشند که باعث شده نفوذپذیری نسبتاً مناسب و زهکشی خوبی داشته باشند.

روش اجرای پژوهش

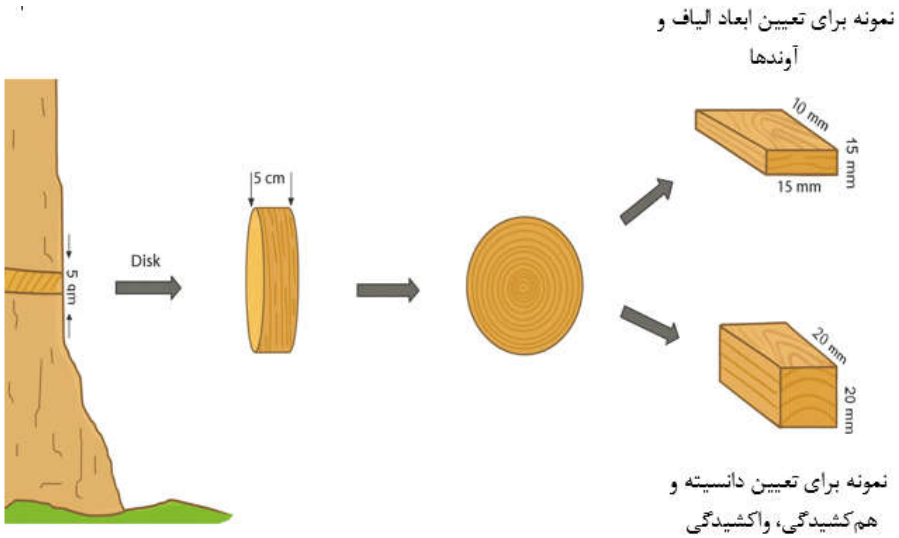
این پژوهش برای بررسی ویژگی‌های فیزیکی و زیست‌سنجی چوب گونه بادام ارجنک در دو رویشگاه کره‌بس و چِلیچه استان چهارمحال و بختیاری انجام شد. نمونه‌برداری به‌صورت انتخابی در قطعات ۱۵ آری از ارتفاع

برابر سینه انجام و ویژگی‌های کمی پایه‌ها شامل تراکم، ارتفاع، قطر تاج، سلامت تنه و تجدید حیات اندازه‌گیری شد. از هر رویشگاه یک پایه سالم برای نمونه‌برداری چوب انتخاب و نمونه‌ها در ارتفاع برابر سینه برداشت و به آزمایشگاه منتقل گردید. در آزمایشگاه، دانسیته خشک، دانسیته پایه بحرانی، هم کشیدگی، واکشیدگی حجمی و شاخص‌های زیست‌سنجی الیاف (طول، قطر، قطر حفره و ضخامت دیواره سلولی) اندازه‌گیری و تحلیل شد.

شکل ۱- رویشگاه‌های مورد مطالعه

اندازه‌گیری ویژگی‌های بیومتری

برای بررسی ویژگی‌های بیومتریک الیاف و آوندها، ابتدا از بخش‌های مختلف دیسک‌های چوب، تراشه‌هایی با ابعاد ۱۵ × ۱۰ میلی‌متر در جهت مماسی و ضخامت ۲ میلی‌متر تهیه شد (شکل ۲). این نمونه‌ها سپس در لوله‌های آزمایش سر پیچ‌دار حاوی محلول فرانکلین (ترکیب ۳۰٪ پراکسید هیدروژن و ۷۰٪ اسید استیک به نسبت ۱:۱) غوطه‌ور شدند [۱۰]. پس از فرآیند غوطه‌وری، نمونه‌ها برای وابری الیاف به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. سپس شستشو و رنگ‌آمیزی شدند تا آماده اندازه‌گیری شوند. اندازه‌گیری‌ها شامل تعیین طول، قطر کلی، قطر حفره سلولی و ضخامت دیواره سلولی برای فیبرها و طول و قطر مماسی برای آوندها بود. برای این منظور از میکروسکوپ نوری مجهز به چشمی مدرج استفاده شد. از هر دیسک حداقل ۵۰ فیبر و آوند انتخاب شدند. طول نمونه‌ها در بزرگنمایی



شکل ۲- آماده‌سازی نمونه از دیسک چوب بادام وحشی برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و ابعاد الیاف

۴۰ برابر و ابعاد مقطعی آن‌ها در بزرگنمایی ۴۰۰ برابر اندازه‌گیری گردید. ضرایب مربوط به هر بزرگنمایی با استفاده از الم مدرج محاسبه شد. لازم به ذکر است که تمام اندازه‌گیری‌ها به‌صورت مستقیم و بدون تصویربرداری انجام گرفت.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی

در این پژوهش، ویژگی‌های فیزیکی چوب بادام وحشی شامل دانسیته خشک (D_{od})، دانسیته بحرانی (DB)، درصد هم کشیدگی حجمی (SW) و درصد واکشیدگی حجمی (SH) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. برای سنجش دانسیته از استاندارد ISO 13061-2:2014 و برای اندازه‌گیری واکشیدگی از استاندارد ISO 13061-14:2016استفاده شد [۱۱، ۱۲]. به این منظور، از ناحیه قطر برابر سینه درخت، دیسک‌هایی تهیه و نمونه‌های آزمونی از آن‌ها جدا گردید. پس از برش، نمونه‌ها در آون با دمای ۳±۱۰۳ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند تا به وزن ثابت برسند. سپس ابعاد (D_o) و وزن خشک (M_o) هر نمونه اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد، نمونه‌ها در آب غوطه‌ور شدند و پس از رسیدن به حالت اشباع، وزن (Ms) و ابعاد (Ds) آن‌ها مجدداً اندازه‌گیری گردید. محاسبه ویژگی‌های مذکور بر اساس روابط ارائه‌شده توسط Panshin و de Zeeuw (۱۹۸۰) انجام گرفت [۱۳].

برای تعیین درصد هم کشیدگی و واکشیدگی، حجم نمونه‌ها در دو حالت مرطوب اشباع (Vs) و خشک کامل (V_o) با کولیس اندازه‌گیری شد. درصد هم کشیدگی و واکشیدگی با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه گردید.

$$SW = \frac{v_s - v_0}{v_o} \times 100 \qquad (۱)$$

$$SH = \frac{v_s - v_0}{v_s} \times 100 \qquad (۲)$$

دانسیته خشک (D_{od}) و دانسیته بحرانی (DB) با استفاده از رابطه‌های (۳) و (۴) محاسبه شدند (جرم خشک: m0).

$$D_o d = \frac{m_o}{v_o} \qquad (۳)$$

$$D_B = \frac{m_o}{v_s} \qquad (۴)$$

برای اندازه‌گیری ویژگی‌های زیست‌سنجی الیاف، تراشه‌هایی از چوب با ابعاد ۱۵×۱۰ میلی‌متر در جهت مماسی و ضخامت ۲ میلی‌متر از بخش‌های مختلف دیسک تهیه شد. نمونه‌ها در لوله آزمایش حاوی محلول فرانکلین (مخلوط پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد و اسید استیک گلاسیال به نسبت ۱:۱) قرار داده شدند و به منظور تفکیک الیاف، در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. در پایان، نمونه‌ها شست‌وشو و رنگ‌آمیزی شدند. اندازه‌گیری ابعاد فیبرها شامل طول، قطر کلی و ضخامت دیواره سلولی با استفاده از میکروسکوپ نوری مجهز به چشمی مدرج انجام گرفت.

تجزیه‌وتحلیل آماری

به‌منظور بررسی تأثیر رویشگاه و عوامل محیطی بر ویژگی‌های فیزیکی و زیست‌سنجی چوب بادام ارجنک، ابتدا داده‌ها از نظر نرمال بودن با آزمون کولموگروف–اسمیرنوف و همگنی واریانس‌ها با آزمون لوین ارزیابی شدند. در صورت تأیید فرض نرمال بودن و همگنی واریانس‌ها، مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن انجام گرفت. در مواردی که فرض همگنی واریانس نقض شد از آزمون Dunnett T3 برای مقایسه میانگین‌ها استفاده گردید.

برای تحلیل روابط بین متغیرها، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد و ماتریس همبستگی به‌عنوان مبنای شناسایی محورهای غالب تغییرات ارائه گردید. این ماتریس امکان بررسی هم‌خطی بین صفات و تعیین مجموعه متغیرهای هم‌راستا را فراهم کرد.

به‌منظور کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی مؤلفه‌های اصلی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) با روش استخراج مؤلفه‌های اصلی و چرخش واریماکس[1]اجرا شد. تعداد مؤلفه‌های حفظ‌شده[2]بر اساس دو معیار تعیین گردید؛ ۱- نمودار اسکری[3]: نقطه شکست پس از مؤلفه چهارم به‌عنوان مرز انتخاب مؤلفه‌ها در نظر گرفته شد. ۲- معیار کایزر (Eigenvalue > 1): تنها مؤلفه‌هایی با مقدار ویژه بزرگ‌تر از یک حفظ شدند.

[1] Varimax Rotation
[2] Retained Component
[3] Scree Plot

برای ارزیابی کفایت نمونه‌گیری و مناسب بودن داده‌ها برای تحلیل عاملی، شاخصKMO[4] محاسبه شد و آزمون کرویت بارتلت[5]اجرا گردید. مقادیر KMO بالاتر از ۰/۷ و معنی‌داری آزمون کرویت بارتلت (P< ۰/۰۰۱) نشان‌دهنده‌ی کفایت داده‌ها برای اجرای PCA بودند.

نتایج PCA به‌صورت نمودار اسکری، بای‌پلات و نقشه پراکنش نمونه‌ها ارائه شد و بارگذاری متغیرها در مؤلفه‌های اصلی برای شناسایی صفات کلیدی در جدایش رویشگاه‌ها گزارش گردید. لازم به ذکر است که این بررسی صرفاً الگوهای هم‌رفتاری میان متغیرها (همبستگی) را نشان می‌دهد و هرگونه استنباط علّی بر پایه این نتایج، نیازمند مطالعات عمیق‌تر و طراحی‌های تحقیقاتی مناسب است. این تحلیل‌ها مبنای تفسیر جدایش چند متغیره و آزمون MANOVA قرار گرفتند. برای بررسی جدایش چندمتغیره بین رویشگاه‌ها، از آزمون MANOVAبا شاخص‌های آماری Pillai’s trace، Wilks’ Lambdaو Hotelling’s trace استفاده شد. معنی‌داری اثر رویشگاه در سطح ۱ و ۵ درصد گزارش گردید.

به‌منظور شناسایی متغیرهای مؤثر بر دانسیته خشک (D0)، مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه با روش ورود گام‌به‌گام[6]اجرا شدند. در این مدل‌ها، متغیرهای فیبری و ابعادی به‌عنوان متغیرهای مستقل و D0 به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. شاخص‌های ضریب تعیین (R^2)، ضرایب استاندارد شده (β)، خطای معیار (SE)، آماره t و سطح معنی‌داری (p) برای ارزیابی مدل‌ها گزارش گردید. تمامی تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ و نرم افزار R انجام شد. نمودارهای PCA و مشارکت متغیرها با نرم‌افزار R ترسیم گردیدند.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و زیست‌سنجی چوب بادام ارجنک در دو رویشگاه کره‌بس و چُلیچه در استان چهارمحال و بختیاری در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

نتایج مقایسه ویژگی‌های فیزیکی چوب بادام ارجنک در دو رویشگاه کره‌بس و چُلیچه در استان چهارمحال و بختیاری (جدول ۳) نشان داد که در برخی از متغیرها تفاوت‌های معنی‌دار آماری وجود دارد. میانگین جرم خشک در رویشگاه کره‌بس برابر با۰/۲۹ ± ۷/۱۲ گرم و در رویشگاه چُلیچه ۰/۳۴ ± ۷/۶۶ گرم گزارش شد که این تفاوت در سطح یک درصد معنی‌دار بود. به همین ترتیب، دانسیته خشک نیز در رویشگاه چُلیچه (۰/۰۳ ± ۱/۰۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب) نسبت به رویشگاه کره‌بس (۰/۰۳ ± ۰/۹۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب) افزایش معنی‌دار داشت. در بررسی ویژگی‌های رطوبتی، وزن تر و دانسیته تر در چُلیچه به ترتیب ۰/۳۴ ± ۷/۹۲ گرم و ۰/۰۳ ±۱/۰۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب و در کره‌بس ۰/۲۹ ± ۷/۴۳ گرم و ۰/۰۵ ± ۰/۹۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب بودند که هر دو تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد نشان دادند. وزن معمولی و حجم معمولی نیز اختلاف معنی‌داری داشتند، در حالی که دانسیته معمولی تفاوت آماری قابل‌توجهی نشان نداد. علاوه بر این، دانسیته پایه بحرانی در چُلیچه (۰/۰۶ ± ۰/۸۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب) نسبت به کره‌بس (۰/۰۲ ± ۰/۷۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) افزایش معنی‌دار در سطح یک درصد داشت. ویژگی‌های حجمی مانند حجم خشک، حجم‌تر و واکشیدگی و هم کشیدگی تفاوت معنی‌دار آماری نداشتند.

در خصوص ویژگی‌های زیست‌سنجی الیاف، میانگین طول الیاف در رویشگاه چُلیچه برابر با ۰/۰۴ ± ۰/۹۸ میلی‌متر و در کره‌بس ۰/۸۷ ± ۰/۰۱ میلی‌متر بود که تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد مشاهده شد. همچنین قطر الیاف و ضخامت دیواره سلولی در چُلیچه به ترتیب ۲۰/۷۵ ± ۱/۳۱ و ۰/۴۳ ± ۶/۰۲ میکرومتر و در رویشگاه کره‌بس ۰/۹۳ ± ۱۸/۲۶ و ۰/۰۷ ± ۵/۱۷ میکرومتر اندازه‌گیری شد که این تفاوت‌ها نیز در سطح یک درصد معنی‌دار بودند. به طور کلی، داده‌ها نشان دادند که چوب بادام ارجنک در رویشگاه چُلیچه در اغلب ویژگی‌های دانسیته و مشخصه‌های فیبری از مقادیر بالاتری نسبت به کره‌بس برخوردار است، در حالی که برخی ویژگی‌های حجمی مانند حجم خشک و حجم‌تر اختلاف آماری معنی‌داری نشان ندادند.

[4] Kaiser–Meyer–Olkin
[5] Bartlett’s Test of Sphericity
[6] Stepwise

جدول ۱- مقادیر ویژگی‌های فیزیکی چوب و برخی از ویژگی‌های زیست‌سنجی الیاف چوب گونه بادام ارجنک در رویشگاه کره بس در استان چهارمحال و بختیاری

ویژگی مورد بررسی	میانگین	انحراف معیار	بیشینه	کمینه	ضریب تغییرات
جرم خشک (گرم)	۷/۱۲	۰/۲۹	۷/۶۵	۶/۷۷	۲۴/۸۳
حجم خشک (سانتی‌متر مکعب)	۷/۶۹	۰/۲۷	۸/۱۳	۷/۲۵	۲۸/۱۹
دانسیته خشک (گرم/سانتی‌متر مکعب)	۰/۹۲	۰/۰۳	۰/۹۷	۰/۸۸	۳۴/۱۵
وزن تر (گرم)	۷/۴۳	۰/۲۹	۷/۹۵	۷/۰۷	۲۵/۵۴
حجم‌تر (سانتی‌متر مکعب)	۷/۸۷	۰/۲۸	۸/۱۶	۷/۴۷	۲۷/۶۹
دانسیته تر (گرم/سانتی‌متر مکعب)	۰/۹۵	۰/۰۵	۱/۰۶	۰/۹۱	۲۰/۴۴
وزن معمولی (گرم)	۹/۸۴	۰/۴۳	۱۰/۴۶	۹/۰۲	۲۲/۶۶
حجم معمولی (سانتی‌متر مکعب)	۹/۲۴	۰/۳۳	۹/۶۵	۸/۶۲	۲۷/۸۷
دانسیته معمولی (گرم/سانتی‌متر مکعب)	۱/۰۷	۰/۰۴	۱/۱۴	۱/۰۱	۲۵/۳۶
دانسیته پایه بحرانی (گرم/سانتی‌متر مکعب)	۰/۷۷	۰/۰۲	۰/۸۰	۰/۷۲	۳۳/۰۸
واکشیدگی (درصد)	۰/۱۷	۰/۰۳	۰/۲۱	۰/۱۳	۵/۳۸
هم کشیدگی (درصد)	۰/۲۰	۰/۰۵	۰/۲۷	۰/۱۵	۴/۳۷
طول الیاف (میلی‌متر)	۰/۸۷	۰/۱۰	۰/۹۹	۰/۶۹	۸/۷۱
قطر الیاف (میکرومتر)	۱۸/۲۶	۰/۹۳	۱۹/۸۱	۱۷/۰۱	۱۹/۵۸
قطر دیواره سلولی (میکرومتر)	۵/۱۷	۰/۰۷	۵/۳۵	۵/۱۰	۶۹/۳۲

میانگین دانسیته خشک در رویشگاه چُلیچه (۱/۰۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بیشتر از رویشگاه کره‌بس (۰/۹۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بود. این اختلاف معنی‌دار ($P< ۰/۰۰۱$، جدول ۳) نشان‌دهنده‌ی تراکم بالاتر بافت چوب در رویشگاه چُلیچه است که می‌تواند ناشی از رشد کندتر و شرایط اقلیمی خشک‌تر این منطقه باشد. همچنین دانسیته پایه بحرانی در چُلیچه (۰/۸۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب) نسبت به کره‌بس (۰/۷۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) افزایش نشان داد که این امر تأییدکننده‌ی تفاوت در تراکم بافت چوب بین دو رویشگاه است. جرم خشک در رویشگاه کره‌بس ۷/۱۲ گرم بود، در حالی که در رویشگاه چُلیچه مقدار متناظر آن ۷/۶۶ گرم گزارش شد. حجم خشک چوب در دو رویشگاه کره‌بس و چلیچه (به ترتیب ۷/۶۹ و ۷/۵۳ سانتی‌متر مکعب) فاقد اختلاف معنی‌دار است. این امر بیانگر چوب نسبتاً سنگین‌تر در چُلیچه است، با افزایش دانسیته در آن به دلیل حجم برابر چوب در واحد جرم تبیین می‌شود. در بررسی ویژگی‌های رطوبتی، دانسیته تر نیز در چُلیچه (۱/۰۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بیشتر از کره‌بس (۰/۹۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بود. این تفاوت، به احتمال زیاد، به ظرفیت بالاتر چوب در جذب آب در چُلیچه مربوط است.

درصد واکشیدگی و هم کشیدگی چوب نیز در هر دو رویشگاه مقادیر نزدیکی داشتند، اما کره‌بس اندکی مقادیر بالاتری (به ترتیب ۰/۱۷ و ۰/۲۰ درصد) نسبت به چُلیچه (۰/۱۵ و ۰/۱۸ درصد) نشان داد. این موضوع حاکی از پایداری ابعادی بیشتر چوب در چُلیچه است. ویژگی‌های زیست‌سنجی الیاف بادام ارجنک نشان داد که میانگین طول الیاف در چُلیچه (۰/۹۸ میلی‌متر) اندکی بیش از کره‌بس (۰/۸۷ میلی‌متر) بود که می‌تواند نتیجه‌ی رشد کندتر و تراکم سلولی بالاتر در شرایط اکولوژیکی سخت‌تر باشد. در مقابل، قطر الیاف و ضخامت دیواره سلولی نیز در چُلیچه (به ترتیب ۲۰/۷۵ و ۶/۰۲ میکرومتر) نسبت به کره‌بس (۱۸/۲۶ و ۵/۱۷ میکرومتر) بیشتر بود. این افزایش در ابعاد الیاف و ضخامت دیواره‌ها معمولاً با مقاومت مکانیکی بالاتر و کیفیت فیزیکی بهتر چوب همراه است. نتایج نشان داد که چوب بادام ارجنک در رویشگاه چُلیچه از دانسیته و ضخامت دیواره‌ی بالاتر و در نتیجه استحکام بیشتر برخوردار است، در حالی‌که چوب در رویشگاه کره‌بس دارای هم کشیدگی و واکشیدگی بیشتر و در نتیجه پایداری ابعادی پایین‌تری است.

جدول ۲- مقادیر ویژگی‌های فیزیکی چوب و برخی از ویژگی‌های زیست‌سنجی الیاف چوب گونه بادام ارجنک در رویشگاه چلیچه در استان چهارمحال و بختیاری

ویژگی مورد بررسی	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه	ضریب تغییرات
جرم خشک (گرم)	۷/۶۶	۰/۳۴	۷/۱۹	۸/۲۱	۲۲/۳۵
حجم خشک (سانتی‌متر مکعب)	۷/۵۳	۰/۲۸	۷/۰۷	۷/۹۲	۲۶/۹۸
دانسیته خشک (گرم/سانتی‌متر مکعب)	۱/۰۱	۰/۰۳	۰/۹۳	۱/۰۸	۲۹/۹۴
وزن تر (گرم)	۷/۹۲	۰/۳۴	۷/۴۳	۸/۵۰	۲۳/۱۲
حجم‌تر (سانتی‌متر مکعب)	۷/۷۴	۰/۳۷	۷/۱۰	۸/۶۰	۲۰/۸۴
دانسیته تر (گرم/سانتی‌متر مکعب)	۱/۰۲	۰/۰۳	۰/۹۴	۱/۰۷	۳۱/۴۷
وزن معمولی (گرم)	۹/۴۷	۰/۳۷	۸/۷۵	۱۰/۳۶	۲۵/۳۳
حجم معمولی (سانتی‌متر مکعب)	۸/۸۸	۰/۶۲	۷/۹۴	۱۰/۹۷	۱۴/۳۰
دانسیته معمولی (گرم/سانتی‌متر مکعب)	۱/۰۶	۰/۰۵	۰/۸۹	۱/۱۰	۲۳/۲۷
دانسیته پایه بحرانی (گرم/سانتی‌متر مکعب)	۰/۸۴	۰/۰۶	۰/۷۲	۰/۹۵	۱۳/۲۰
واکشیدگی (درصد)	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۳۱	۲/۸۳
هم کشیدگی (درصد)	۰/۱۸	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۴۴	۲/۳۳
طول الیاف (میلی‌متر)	۰/۹۸	۰/۰۴	۰/۸۸	۱/۰۴	۲۶/۰۹
قطر الیاف (میکرومتر)	۲۰/۷۵	۱/۳۱	۱۸/۱۲	۲۲/۲۳	۱۵/۸۴
قطر دیواره سلولی (میکرومتر)	۶/۰۲	۰/۴۳	۵/۱۲	۷/۰۱	۱۳/۸۷

جدول ۳- مقایسه ویژگی‌های فیزیکی چوب و برخی از ویژگی‌های زیست‌سنجی الیاف چوب گونه بادام ارجنک در رویشگاه کره بس و چلیچه در استان چهارمحال و بختیاری

متغیر	میانگین ± انحراف معیار		معنی‌داری
	منطقه کره بس	منطقه چلیچه	
جرم خشک	۰/۲۹ ± ۷/۱۲	۰/۳۴ ± ۷/۶۶	**۰/۰۰۰
حجم خشک	۰/۲۷ ± ۷/۶۹	۰/۲۸ ± ۷/۵۳	ns۰/۱۴۹
دانسیته خشک	۰/۰۳ ± ۰/۹۲	۰/۰۳ ± ۱/۰۱	**۰/۰۰۰
وزن تر	۰/۲۹ ± ۷/۴۳	۰/۳۴ ± ۷/۹۲	**۰/۰۰۱
حجم‌تر	۰/۲۸ ± ۷/۸۷	۰/۳۷ ± ۷/۷۴	ns۰/۳۴۴
دانسیته تر	۰/۰۵ ± ۰/۹۵	۰/۰۳ ± ۱/۰۲	**۰/۰۰۰
وزن معمولی	۰/۴۳ ± ۹/۸۴	۰/۳۷ ± ۹/۴۷	*۰/۰۲۲
حجم معمولی	۰/۳۳ ± ۹/۲۴	۰/۶۲ ± ۸/۸۸	**۰/۰۰۵
دانسیته معمولی	۰/۰۴ ± ۱/۰۷	۰/۰۵ ± ۱/۰۶	ns۰/۸۲۹
دانسیته پایه	۰/۰۲ ± ۰/۷۷	۰/۰۶ ± ۰/۸۴	**۰/۰۰۴
واکشیدگی	۰/۰۳ ± ۰/۱۷	۰/۰۵ ± ۰/۱۵	ns۰/۲۹۰
هم کشیدگی	۰/۰۵ ± ۰/۲	۰/۰۸ ± ۰/۱۸	ns۰/۳۹۸
طول الیاف	۰/۱۰ ± ۰/۸۷	۰/۰۴ ± ۰/۹۸	**۰/۰۰۰
قطر الیاف	۰/۹۳ ± ۱۸/۲۶	۱/۳۱ ± ۲۰/۷۵	**۰/۰۰۰
قطر دیواره سلولی	۰/۰۷ ± ۵/۱۷	۰/۴۳ ± ۶/۰۲	**۰/۰۰۰

ns عدم معنی‌داری، ** تفاوت معنی‌دار در سطح ۱ درصد، * تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

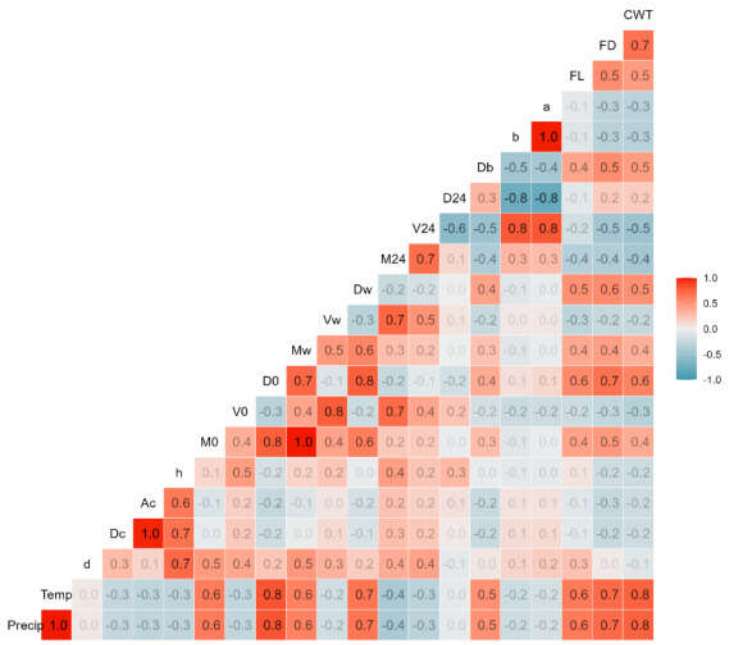
نتایج نشان داد که میانگین دانسیته خشک، تر و پایه بحرانی در رویشگاه چُلیچه به‌طور معنی‌داری بیشتر از رویشگاه کره‌بس بود، در حالی‌که تفاوت در دانسیته معمولی معنی‌دار نبود. همچنین، اندازه‌های ساختاری الیاف (طول، قطر و ضخامت دیواره سلولی) در رویشگاه چُلیچه بیشتر مشاهده شد. این یافته‌ها نشان‌دهنده‌ی کیفیت بالاتر چوب در رویشگاه چُلیچه است.

افزایش دانسیته چوب در رویشگاه چلیچه را می‌توان به شرایط محیطی متفاوت این رویشگاه از جمله بازده بارندگی سالانه بیشتر، دمای بالاتر و احتمالاً رشد کندتر درختان نسبت داد. مطالعات جهانی نیز ارتباط مثبت بین شرایط هیدرو-ترمال (رطوبت خاک و دمای متوسط سالانه) و دانسیته چوب را تأیید کرده‌اند [۱۴]. همچنین، بررسی نظام‌مند Boakye و همکاران (۲۰۲۳) [۱۵] نشان داد که علاوه بر ژنتیک، عوامل اقلیمی و غیر اقلیمی مانند وضعیت خاک، شیب، ارتفاع از سطح دریا و رقابت بین درختی نقش مهمی در تغییرات دانسیته دارند؛ بنابراین، یافته‌های این پژوهش مبنی بر افزایش دانسیته در رویشگاه مرطوب‌تر (رویشگاه چُلیچه) با شواهد جهانی همخوانی دارد.

در این پژوهش، طول الیاف، قطر الیاف و ضخامت دیواره سلولی در رویشگاه چُلیچه بیشتر از رویشگاه کره‌بس بودند. این نتایج با مطالعات آناتومیکی همسو هستند که نشان می‌دهند ضخامت بیشتر دیواره سلولی و طول الیاف بالاتر معمولاً به چوبی با مقاومت مکانیکی بیشتر و دانسیته بالاتر منتهی می‌شوند[۱۶،۱۷]؛ بنابراین، الیاف ضخیم‌تر و بلندتر در رویشگاه چُلیچه احتمالاً یکی از دلایل اصلی دانسیته بالاتر و کیفیت مکانیکی بهتر چوب این رویشگاه هستند.

تفاوت معنی‌داری در مقادیر واکشیدگی و هم کشیدگی حجمی بین دو رویشگاه مشاهده نشد. با این حال، مطالعات گذشته نشان داده‌اند که افزایش دانسیته معمولاً با کاهش واکشیدگی همراه است[۱۸،۱۹]. هرچند نتایج این پژوهش از نظر آماری تفاوت معنی‌داری نشان ندادند، اما هم کشیدگی کمتر چوب در رویشگاه چُلیچه می‌تواند بازتابی از ساختار سلولی ویژه یا شرایط رویشی متمایز آن باشد که بر رفتار فیزیکی چوب تأثیرگذار است.

در شکل ۳ شدت رنگ نشان‌دهنده‌ی اندازه و علامت ضرایب همبستگی پیرسون بین متغیرها (از ۱- تا +۱) برای مجموعه داده‌های دو رویشگاه است. روابط مثبت و قوی قطر الیاف با ضخامت دیواره سلولی؛ حجم معمولی با هم کشیدگی و واکشیدگی؛ وزن معمولی با حجم معمولی و حجم‌تر با وزن معمولی مشاهده شد. روابط مثبت قوی بین دانسیته خشک با وزن تر، دانسیته تر و قطر الیاف وجود دارد. همبستگی مثبت و قوی بین حجم خشک با حجم‌تر و وزن معمولی؛ جرم خشک با دانسیته خشک و قطر یقه با ارتفاع جست مشاهده شد. دما با دانسیته خشک، دانسیته تر، قطر الیاف و ضخامت دیواره سلولی و بارش سالیانه با دما، دانسیته خشک، دانسیته تر، قطر الیاف و ضخامت دیواره سلولی همبستگی مثبت و بالایی را نشان داد. همچنین هم‌خطی بسیار زیاد بین شاخص‌های ابعادی هم کشیدگی با واکشیدگی؛ جرم خشک با وزن تر؛ قطر تاج با سطح مقطع تاج و بارش سالیانه با دما نشان داده شده است. روابط منفی و قوی بین دانسیته معمولی با هم کشیدگی و واکشیدگی مشاهده شد.

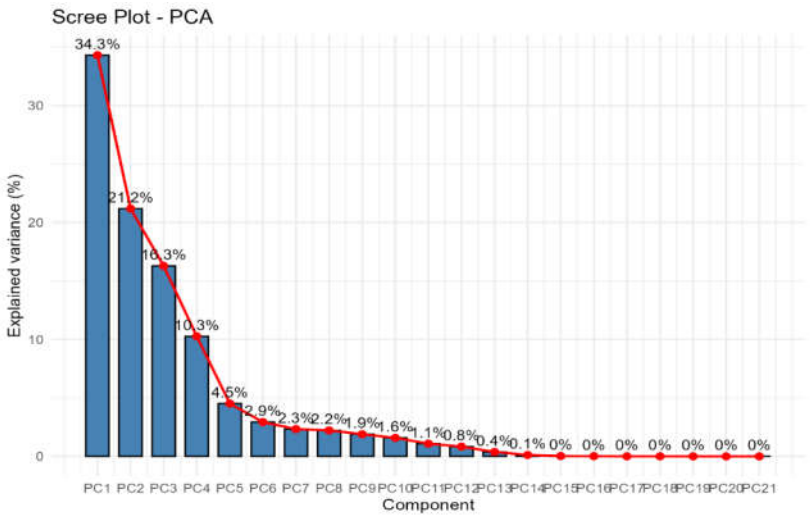


شکل ۳- ماتریس همبستگی متغیرهای کلیدی مورد مطالعه

در نقشه حرارتی (هیتمپ) ماتریس همبستگی، رنگ‌های قرمز نشان‌دهنده همبستگی مثبت، رنگ‌های آبی نشان‌دهنده همبستگی منفی و شدت هر رنگ بیان‌گر قدرت آن رابطه است (CWT: ضخامت دیواره سلولی، FD: قطر الیاف، FL: طول الیاف، a: هم کشیدگی، b: واکشیدگی، Db: دانسیته پایه بحرانی، D24: دانسیته معمولی، V24: حجم معمولی، M24: وزن معمولی، Dw: دانسیته تر، Vw: حجم‌تر، Mw: وزن تر، D0: دانسیته خشک، V0: حجم خشک، M0: جرم خشک، h: ارتفاع جست به متر، Ac: سطح مقطع تاج به مترمربع، Dc: قطر تاج به متر، d: قطر یقه به سانتی‌متر، Temp: دما به درجه سانتی‌گراد، Precip: بارش سالیانه به میلی‌متر)

همبستگی‌های مثبت و قوی بین دانسیته خشک با ساختار قطر الیاف و قطر الیاف با ضخامت دیواره سلولی نشان می‌دهد تراکم خشک چوب مستقیماً با افزایش قطر الیاف و ضخامت دیواره سلولی افزایش می‌یابد؛ این همسو با فیزیک چوب است؛ دیواره‌های ضخیم‌تر و الیاف قطورتر فضای خالی کمتر و ماده جامد بیشتری در واحد حجم ایجاد می‌کنند، در نتیجه دانسیته خشک بالا می‌رود. ارتباط مثبت دانسیته خشک با ویژگی‌های جرمی وزن تر نشان می‌دهد تراکم خشک با وضعیت رطوبتی- جرمی نمونه‌ها هم‌راستا است. حضور روابط منفی بین برخی حجم‌ها/وزن‌های زمانی (مثل حجم معمولی و دانسیته معمولی) با متغیرهای فیبری نشان می‌دهد ابعاد رفتاری چوب در شرایط رطوبتی متفاوت، نقش تعدیل‌کننده دارند (شکل ۲).

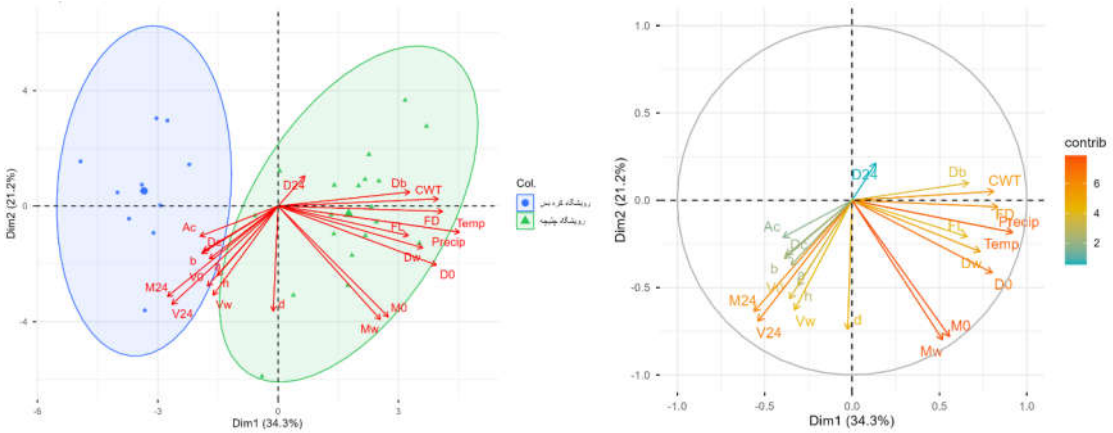
تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان داد که سه مؤلفه نخست مجموعاً ۷۱/۸ درصد واریانس داده‌ها را توضیح می‌دهند. مؤلفه اول (PC1) با ۳۴/۳ درصد و مؤلفه دوم (PC2) با ۲۱/۲ درصد بیشترین سهم را در تبیین ساختار داده‌ها داشتند. این دو مؤلفه به‌عنوان محورهای اصلی جدایش بین نمونه‌ها انتخاب شدند. پس از مؤلفه چهارم، روند کاهش واریانس به‌صورت واضحی مشاهده شد و مؤلفه‌های بعدی سهم ناچیزی در تبیین داده‌ها داشتند (شکل ۴). این الگو بیانگر وجود نقطه شکست پس از مؤلفه چهارم (PC4) است و توجیه آماری مناسبی برای تمرکز بر مؤلفه‌های اول و دوم در تحلیل جدایش رویشگاه‌ها فراهم می‌کند (شکل ۳).



شکل ۴- نمودار اسکری تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و درصد واریانس توضیح داده‌شده توسط هر مؤلفه (چهار مؤلفه اول به‌عنوان مؤلفه‌های اصلی انتخاب می‌شوند زیرا مقادیر ویژه این محورها بیشتر از عصای شکسته هستند قابل تفسیر هستند.)

بارگذاری متغیرها در مؤلفه اول (شکل‌های ۳ و ۴) نشان داد که صفات دانسیته خشک، قطر الیاف، ضخامت دیواره سلولی و دانسیته تر و طول الیاف بیشترین سهم را در شکل‌گیری مؤلفه اول دارند. این ترکیب نشان‌دهنده‌ی آن است که محور اصلی تغییرات داده‌ها با ویژگی‌های ساختاری و رطوبتی چوب هم‌راستا است.

الگوی همبستگی‌ها پیرسون نشان می‌دهد محور غالب تغییرات با دانسیته خشک، قطر الیاف، ضخامت دیواره سلولی، دانسیته تر و طول الیاف هم‌راستاست؛ که همین متغیرها در تحلیل مؤلفه اول به‌عنوان مؤلفه‌ی غالب و جداساز رویشگاه‌ها ظاهر می‌شود.



شکل ۵- بای‌پلات (Biplot) تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای جدایش رویشگاه‌ها بر اساس متغیرهای ساختاری و زیست‌سنجی چوب

طول پیکان هر متغیر در بی‌پلات معمولاً نشان‌دهنده‌ی واریانس متغیر در فضای مؤلفه‌های اصلی انتخابی است. هر چه پیکان بلندتر باشد، آن متغیر سهم بیشتری در مؤلفه‌های اصلی نمایش داده شده دارد. زاویه بین دو بردار متغیر نشان‌دهنده همبستگی بین آن دو متغیر در فضای مؤلفه‌های اصلی نمایش داده شده است. اگر دو بردار نزدیک به هم باشند (زاویه کوچک)، همبستگی مثبت و قوی دارند. اگر دو بردار عمود بر هم باشند (زاویه ≈ ۹۰ درجه)، همبستگی نزدیک به صفر است. اگر در جهت مخالف باشند (زاویه ≈ ۱۸۰ درجه)، همبستگی منفی قوی دارند (CWT: ضخامت دیواره سلولی، FD: قطر الیاف، FL: طول الیاف، a: هم کشیدگی، b: واکشیدگی، Db: دانسیته پایه بحرانی، D24: دانسیته معمولی، V24: حجم معمولی، M24: وزن معمولی، Dw: دانسیته تر، Vw: حجم‌تر، Mw: وزن تر، D0: دانسیته خشک، V0: حجم خشک، M0: جرم خشک، h: ارتفاع جست به متر، Ac: سطح مقطع تاج به مترمربع، Dc: قطر تاج به متر، d: قطر یقه به سانتی‌متر، Temp: دما به درجه سانتی‌گراد، Precip: بارش سالیانه به میلی‌متر).

نمودار بای‌پلات PCA (شکل ۴) جدایش روشن دو رویشگاه را در فضای دو مؤلفه اول و دوم نشان داد؛ نمونه‌های رویشگاه چُلیچه عمدتاً در ناحیه مثبت‌تر مؤلفه اول قرار گرفتند، در حالی‌که نمونه‌های رویشگاه کره‌بس در ناحیه منفی‌تر مؤلفه دوم تجمع یافتند. بیضی‌های رنگی محدوده پراکنش و اعتماد گروه‌ها را مشخص می‌کنند و نشان می‌دهند که جدایش مشاهده‌شده نه‌تنها بصری بلکه آماری نیز قابل استناد است. این جدایش ساختاری با تفاوت‌های مشاهده‌شده در ویژگی‌های فیزیکی و فیبری چوب هم‌خوانی دارد و بیانگر چوب متراکم‌تر و الیاف ضخیم‌تر در رویشگاه چُلیچه است.

نمودار مشارکت متغیرها در مؤلفه‌ها تأیید کرد که متغیرهای دانسیته خشک، قطر الیاف، ضخامت دیواره سلولی و دانسیته تر و طول الیاف بیشترین سهم را در مؤلفه‌ی اول در بخش مثبت و متغیرهای وزن تر، جرم خشک، حجم معمولی و وزن معمولی بیشترین سهم را در مؤلفه‌ی دوم در بخش منفی دارند. شدت رنگ بردارها از آبی تا قرمز نشان‌دهنده‌ی میزان مشارکت هر متغیر در جدایش گروه‌هاست. این متغیرها در هر دو رویشگاه تفاوت معنی‌دار آماری نشان دادند و نقش کلیدی در جدایش چندمتغیره ایفا کردند.

آزمون چند متغیره MANOVA برای مجموعه صفات دانسیته خشک، دانسیته تر، دانسیته پایه بحرانی، طول الیاف، قطر الیاف، ضخامت دیواره سلولی، هم کشیدگی و واکشیدگی نشان داد که اثر رویشگاه بر ساختار چندمتغیره داده‌ها بسیار معنی‌دار است (۰/۸۲۶ = Pillai's trace، ۱۱/۸۷ = F، P<۰/۰۰۱). این نتیجه جدایش مشاهده‌شده در بای‌پلات را از نظر آماری تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که تفاوت‌های بین دو رویشگاه نه‌تنها در سطح تک متغیره بلکه در سطح کل‌نگر نیز قابل تشخیص هستند.

مدل‌های رگرسیونی به‌منظور شناسایی متغیرهای مؤثر بر دانسیته خشک اجرا شدند. نتایج نشان دادند که در مدل کلی، پس از کنترل اثر رویشگاه، تنها قطر الیاف به‌عنوان پیش‌بینی کننده معنی‌دار (۰/۳۱ = β) باقی ماند (جدول ۴). این یافته بیانگر آن است که افزایش قطر الیاف به‌طور مستقیم با افزایش تراکم خشک چوب همراه است و نقش کلیدی در تعیین کیفیت فیزیکی چوب ایفا می‌کند؛ بنابراین،قطر الیاف می‌تواند به‌عنوان شاخص اصلی در پیش‌بینی تراکم خشک در کل داده‌ها معرفی شود.

جدول ۴- خلاصه مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی دانسیته خشک (D0)

مدل	متغیرهای وارد شده	ضریب β	اشتباه معیار (SE)	آماره t	سطح معنی‌داری (Sig)	R^2
مدل کلی	FD	۰/۳۱	۰/۱۲	۲/۵۸	۰/۰۱۴*	۰/۴۲
مدل رویشگاه چلیچه	FD	۰/۲۸	۰/۱۱	۲/۵۵	۰/۰۱۶*	۰/۵۷
	a	۰/۲۲	۰/۰۹	۲/۴۴	۰/۰۱۹*	
	b	-۰/۱۹	۰/۱۰	-۱/۹۲	۰/۰۶۱ns	
مدل رویشگاه کره‌بس	ثابت (Intercept)	۰/۹۲۲	۰/۰۸	۱۱/۵		۰/۰۸
	سایر متغیرها	-	-	-	ns	

ns عدم معنی‌داری و * تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

در مدل اختصاصی برای رویشگاه چُلیچه، علاوه بر قطر الیاف، متغیر هم کشیدگی اثر مثبت و معنی‌دار داشت (۰/۲۲ = β)، در حالی‌که واکشیدگی اثر منفی و در مرز معنی‌داری قرار گرفت (۰/۱۹- = β) که نشان‌دهنده‌ی احتمال اثر ضعیف این متغیر است و نیازمند بررسی بیشتر می‌باشد (جدول ۴). این نتایج نشان می‌دهند که در شرایط اکولوژیکی سخت‌تر رویشگاه چُلیچه، رفتار ابعادی چوب در فرآیند خشک شدن نیز بر تراکم خشک اثرگذار است؛ به عبارت دیگر، ترکیب ویژگی‌های فیبری (قطر الیاف) و ویژگی‌های ابعادی (هم کشیدگی و واکشیدگی) به‌طور هم‌زمان کیفیت چوب را تعیین می‌کنند. این امر با یافته‌های همبستگی و PCA هم‌راستا است که نشان دادند محور غالب تغییرات داده‌ها با صفات فیبری و رطوبتی هم‌پوشانی دارد.

در مقابل، مدل رویشگاه کره‌بس تنها شامل میانگین ثابت (D0≈0.922) بود و هیچ‌یک از متغیرهای ساختاری اثر معناداری نشان ندادند. این یکنواختی ساختاری بیانگر آن است که در رویشگاه کره‌بس، تغییرات فیبری و ابعادی

نقش چندانی در پیش‌بینی تراکم خشک ندارند و تراکم چوب بیشتر تحت تأثیر میانگین کلی بافت قرار می‌گیرد. این نتیجه با یکنواختی مشاهده‌شده در تحلیل PCA و نتایج توصیفی هم‌خوانی دارد.

نتایج تحلیل PCA نشان داد که محور غالب تغییرات داده‌ها با صفات فیبری و رطوبتی (قطر الیاف، ضخامت دیواره سلولی، دانسیته خشک، دانسیته تر و طول الیاف) هم‌راستا است و همین محور در مؤلفه اول (PC1) به‌عنوان جداساز اصلی رویشگاه‌ها ظاهر شد. آزمون MANOVA نیز جدایش مشاهده‌شده در بای‌پلات را از نظر آماری تأیید کرد. مدل‌های رگرسیونی نشان دادند که قطر الیاف مهم‌ترین پیش‌بینی کننده دانسیته خشک در کل داده‌هاست. در رویشگاه چُلیچه علاوه بر قطر الیاف، هم کشیدگی اثر مثبت و واکشیدگی اثر منفی داشتند، در حالی‌که در رویشگاه کره‌بس تنها میانگین ثابت معنی‌دار بود. این نتایج نشان می‌دهند که در رویشگاه چُلیچه ترکیب ویژگی‌های فیبری و ابعادی کیفیت چوب را تعیین می‌کند، اما در رویشگاه کره‌بس تراکم چوب بیشتر تحت تأثیر میانگین کلی بافت قرار دارد.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که شیب زمین، وضعیت رطوبتی و رقابت بین درختی نیز می‌توانند بر دانسیته چوب تأثیرگذار باشند [۲۰]. افزون بر این، ویژگی‌های بیومتری، فیزیکی و شیمیایی چوب گونه‌های جنگلی مانند بلوط ایرانی نیز نشان می‌دهند که تفاوت در ساختار سلولی و شرایط رشد می‌تواند به تغییرات قابل‌توجه در خواص چوب منجر شود[۵].

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ویژگی‌های فیزیکی و آناتومیکی چوب گونه بادام ارجنک در دو رویشگاه کره‌بس و چلیچه مقایسه شد. این مقایسه امکان تحلیل تأثیر عوامل محیطی بر کیفیت چوب این گونه را فراهم نمود. از دیدگاه کاربردی، دانسیته، طول الیاف و ضخامت دیواره سلولی چوب، شاخص‌های مهمی برای کیفیت چوب هستند. هنگامی که دانسیته و ضخامت دیواره بیشتر شود، چوب به لحاظ مکانیکی قوی‌تر و از نظر دوام بهتر خواهد بود.

یافته‌های این پژوهش نشان دادند که رویشگاه چُلیچه به دلیل شرایط محیطی و ویژگی‌های فیبری خاص، چوبی با دانسیته و کیفیت مکانیکی بالاتر تولید می‌کند. در مقابل، چوب رویشگاه کره‌بس یکنواخت‌تر اما با مقاومت کمتر است. این نتایج علاوه بر تأیید مطالعات پیشین، می‌توانند مبنای تصمیم‌گیری در مدیریت جنگل و بهره‌برداری صنعتی از گونه بادام ارجنک باشند.

همچنین، پیشنهادهای ارائه‌شده برای تحقیقات آینده می‌توانند به درک عمیق‌تر از روابط بین عوامل محیطی، ساختار سلولی و خواص فیزیکی چوب منجر شوند. (۱) بررسی سیستماتیک تأثیر سن درخت (عامل درونزاد) بر پارامترهای ریخت شناختی چوب از قبیل ضخامت دیواره‌ی سلولی و طول الیاف که می‌تواند تغییرات بنیادی در ویژگی‌های فیزیکی چوب را تبیین کند. (۲) گردآوری نظام‌مند داده‌های تفصیلی از هر رویشگاه شامل ویژگی‌های خاک (ترکیب ماده آلی و ظرفیت نگهداری آب) و پارامترهای توپوگرافی (به‌ویژه ارتفاع از سطح دریا) که امکان مدل‌سازی دقیق‌تر و آشکارسازی سازوکارهای مؤثر را فراهم می‌آورد.

منابع

[1] Talebi, M., Sagheb Talebi, Kh., and Jahanbazi, H., 2006. Site demands and some quantitative and qualitative characteristics of Persian Oak (Quercus brantii Lindl.) in chaharmahal and Bakhtiari Province (western Iran). Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 14(1), pp. 67- 79. (in Persian).

[2] Pirbalouti, A.G., Reisei, M., Razavi-Zade, R., Hamedi, B., and Alavi-Samani, S.M., 2013. Antioxidant Activity and Total Phenolic of Extracts from Five Species of Amygdalus Leaves. Electronic Journal of Biology, 9(4), pp. 92-95.

[3] Ashrafi, M. N., Far, M. G., and Kiani, A. M., 2021. Investigating the physical properties of Carpinus species in three different regions of Iran. European Journal of Wood and Wood Products, 79(4), pp. 511–520. https://doi.org/10.1007/s00107-021-01672-1.

[4] Nazari, N., Bahmani, M., Kahyani, S., Humar, M., and Koch, G., 2020. Geographic variations of the wood density and fiber dimensions of the Persian oak wood. Forests, 11 (9), pp. 1003. https://doi.org/10.3390/f11091003.

[5] Saeedi, S., Bahmani, M., Kool, F., Iranmanesh, Y., Abbasi, M., 2017. 'Investigation of biometrical, chemical and physical properties of Persian oak (Quercus brantii Lindl.) (Case study: Lordegan Township)', Journal of Wood and Forest Science and

Technology, 24(3), pp. 171-182. https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.13170.1676. (in Persian).

[6] Kiaei, M., and Samariha, A., 2011. Fiber dimensions, physical and mechanical properties of five important hardwood plants. Indian Journal of Science and Technology, 4 (11), pp. 1460–1463.

[7] Aghajani, H., bahmani, M., Raeisi gahrooyi, M., Efhamisisi, D., Kool, F., 2019. Anatomical, Biometrical, Physical and Chemical properties of wild service tree (Sorbus torminalis L.) (Case study: Sangdeh forests of Mazandaran), Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 9(4), pp. 597-608. . (in Persian).

[8] Dong, H., Dahmardeh Ghalehno, M., Bahmani, M., Ghehsareh Ardestani, E., and Fathi, L., 2022. Influence of soil physicochemical properties on biometrical and physical features of Persian oak wood. Maderas. Ciencia y Tecnología, 24 (1), pp. e404. https://doi.org/10.4067/S0718-221X2022000100404

[9] Fathi, L., Hasanagić, R., Iranmanesh, Y., Dahmardeh Ghalehno, M., Humar, M., and Bahmani, M., 2022. Physical and chemical properties of three wild almond wood species grown in Zagros forests. Les-Wood, 71(1), pp. 23-30.https://doi.org/10.26614/les-wood.2022.v71n01a03.

[10] Franklin, G., 1946. A rapid method of softening wood for microtome sectioning. Tropical woods, 88, pp. 35-36. https://eurekamag.com/research/013/622/013622801.php.

[11] International Organization for Standardization. ISO 13061-2., 2014. Physical and mechanical properties of wood-Test methods for small clear wood specimens-Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. ISO 13061-2. 2014. International Organization for Standardization Geneva, Switzerland. https://www.iso.org/standard/60064.html

[12] International Organization for Standardization. ISO 13061-14., 2016. Physical and mechanical properties of wood-Test methods for small clear wood specimens-Part 14: Determination of volumetric shrinkage. Geneva, Switzerland, p.5.

[13] Panshin, A. J., and de Zeeuw, C., 1980. Textbook of Wood Technology (722 p). New York: McGraw-Hill Book Company.

[14] Mo, L., Crowther, T. W., Maynard, D. S., et al., 2024. The global distribution and drivers of wood density and their impact on forest carbon stocks. Nature Ecology and Evolution, 8, pp. 2195–2212. https://doi.org/10.1038/s41559-024-02564-9.

[15] Boakye, E. A., Mvolo, C. S., and Stewart, J., 2023. Systematic review: Climate and non-climate factors influencing wood density in the boreal zone. BioResources, 18 (4), pp. 8757–8770.

[16] Zhao, M., and Yang, L., 2025. Free drying shrinkage of wood: A review. BioResources, 20 (3), pp. 7890–7902.

[17] Leonardon, M., Altaner, C., Vihermaa, L., and Jarvis, M. C., 2010. Wood shrinkage: Influence of anatomy, cell wall architecture, chemical composition and cambial age. European Journal of Wood and Wood Products, 68 (1), pp. 87–94. https://doi.org/10.1007/s00107-009-0355-8.

[18] Zhang, S. Y., Ren, H., and Jiang, Z., 2021. Wood density and wood shrinkage in relation to initial spacing and tree growth in black spruce (Picea mariana). Journal of Wood Science, 67,pp. 1-10. https://doi.org/10.1186/s10086-021-01965-9.

[19] Mazzanti, P., Togni, M., and Uzielli, L., 2012. Drying shrinkage and mechanical properties of poplar wood (Populus alba L.) across the grain. Journal of Cultural Heritage, 13 (3, Suppl.), pp. S85–S89. https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.03.015.

[20] Tetemke, B. A., Birhane, E., Rannestad, M. M., and Eid, T., 2024. Competition and slope effect on wood basic density and its variation among tree species and within individual trees in a dry Afromontane forest. Scandinavian Journal of Forest Research, 39 (4), pp. 349–360. https://doi.org/10.1080/02827581.2024.