

The effect of climatic factors on the radial growth and vascular characteristics of *Paulownia fortunei* (Seem.) Hemsl. in the Golestan Province, Iran

Sh. Moghadamshoar ¹, R. Oladi ^{2*}, K. Pourtahmasi ³, and M. Emaminasab ⁴

1- M.Sc. Student, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2* - Corresponding author, Associate Prof., Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: oladi@ut.ac.ir

3- Prof., Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

4- Ph.D., Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Received: 20.12.2023

Accepted: 04.03.2024

Abstract

Background and objectives: Globally, paulownia (*Paulownia fortunei* (Seem.) Hemsl.) is one of the most important wood species used in forestry. Despite extensive research on this genus, the influence of climatic factors on the growth and anatomical wood properties of paulownia has not been thoroughly investigated. Therefore, this research aims to examine how climatic factors—such as temperature, precipitation, relative humidity, and sunshine hours—affect radial growth and specific wood anatomical traits of cultivated paulownia trees in Gorgan County, Golestan Province, Northwest Iran.

Materials and methods: Five 20-year-old *Paulownia fortunei* trees were selected from Hashemabad in Gorgan County. These trees were felled in late 2012, and a five-centimeter-thick disk was extracted from each stem base. Strips from the bark to the pith were cut radially from each disk, and the surfaces of the specimens were smoothed using a microtome blade before scanning. To enhance the contrast between the vessels and the background tissue, a charcoal blackening technique was employed prior to scanning. Using images obtained from image processing software, several features were measured: growth ring width, average vessel lumen area, porosity, vessel frequency, vessel area greater than 0.06 mm², radial and tangential diameter of vessels, and ray frequency in each growth ring. To eliminate the effect of juvenile wood—which consists of very wide rings in the early years of growth—five rings near the pith were excluded from measurements and analyses. Consequently, growth rings from 1998 to 2012 (15 years) were evaluated. Pearson correlation was used to investigate the relationships between climatic variables (monthly, bimonthly, seasonal, bi-seasonal, and tri-seasonal) and growth variables (growth rate and quantitative anatomical wood characteristics) from three months prior to growth until the end of the growing season. Additionally, internal relationships among the measured variables were assessed similarly.

Results: The radial growth of paulownia exhibited a decreasing trend with age, particularly notable at seven and thirteen years. Other anatomical features (vascular traits and ray frequency) showed an increasing trend; however, vessel frequency did not exhibit a clear age trend. Correlation analysis revealed that all anatomical characteristics had an inverse relationship with growth rate; thus, as growth ring width increased, other characteristics (e.g., vessel area and vessel diameter) decreased. Vascular traits and ray frequency primarily showed positive correlations with each other, while the correlation between vessel frequency and other variables was weaker. Among climatic factors, total monthly rainfall and average sunshine hours in spring (especially May and June) significantly impacted radial growth and anatomical features of paulownia wood. Climatic factors from three months prior to the growth period (the previous winter) did not show significant correlations with anatomical characteristics; furthermore, correlations between

anatomical traits and summer climatic factors were much weaker than those observed in spring. Increased spring rainfall enhanced radial growth while reducing anatomical features such as vessel size and ray frequency; average sunshine hours had a similar but less intense effect on these traits. Temperature and air humidity did not significantly affect the studied characteristics.

Conclusion: Overall, it can be concluded that paulownia has high water and light requirements but shows low sensitivity to temperature in the studied region. The months of May and June (mid to late spring) are particularly influential for radial growth and hydraulic architecture (water transport system) in paulownia trees. Increased precipitation and average sunshine hours promote radial growth but reduce vessel size. Additionally, ray frequency can be considered a valuable wood anatomical characteristic for studying the relationship between climate and tree physiology in future research.

Keywords: Fast-growing tree, growth rate, hydraulic conductivity of xylem, number of sunny hours, rainfall, wood anatomy.

تأثیر عوامل اقلیمی بر رشد قطری و ویژگی‌های آوندی پائولونیا (*Paulownia fortunei* (Seem.) Hemsl.) در استان گلستان

شقایق مقدم‌شعار^۱، رضا اولادی^{۲*}، کامبیز پورطهماسی^۳ و محمد امامی‌نسب^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. پست الکترونیک: Oladi@ut.ac.ir

۳- استاد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴- فارغ‌التحصیل دکتری، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸

چکیده

سابقه و هدف: در سطح جهانی، پائولونیا (*Paulownia fortunei* (Seem.) Hemsl.) یکی از مهم‌ترین گونه‌های مورد استفاده در زراعت چوب است. علی‌رغم اینکه پژوهش‌های فراوانی در مورد این گونه انجام شده است، تاکنون تأثیر عوامل آب‌وهوایی بر رشد و ویژگی‌های آناتومی چوب آن ارزیابی نشده است. از این‌رو، هدف این پژوهش، بررسی تأثیر عوامل اقلیمی (دما، بارندگی، رطوبت نسبی هوا و ساعت‌های آفتابی) بر رویش عرضی و برخی ویژگی‌های کمی آناتومی چوب در درختان دست‌کاشت پائولونیا در استان گلستان بود. مواد و روش‌ها: پنج درخت دست‌کاشت ۲۰ ساله پائولونیا در هاشم‌آباد در شهرستان گرگان انتخاب شدند. این درختان در اواخر سال ۲۰۱۲ میلادی قطع شدند و دیسکی به ضخامت پنج سانتی‌متر از یقه هر درخت تهیه شد. باریکه‌ای از پوست تا مغز از مقاطع عرضی هر دیسک بریده شد و سطح مقطع آن‌ها با تیغ میکروتوم صاف و سپس، اسکن شدند. پیش از اسکن نمونه‌ها، تمایز بین آوندها و بافت زمینه با استفاده از تکنیک مازیک سیاه و گچ سفید بهبود یافت. در تصاویر به‌دست‌آمده، با کمک نرم‌افزار پردازش تصویر، پهنای حلقه رویش، میانگین مساحت حفره‌های آوندی، مجموع مساحت آوندها (تخلخل)، تعداد آوند در واحد سطح، درصد آوندهای بزرگ‌تر از ۰/۰۶ میلی‌متر مربع، قطر شعاعی و مماسی آوند و تعداد اشعه در واحد طول در هر حلقه رویشی اندازه‌گیری شدند. برای حذف اثر جوان‌چوبی که شامل حلقه‌های بسیار پهن در سال‌های نخست رویش می‌شود، پنج حلقه نزدیک به مغز از اندازه‌گیری‌ها و تحلیل‌ها کنار گذاشته شدند. بدین ترتیب، حلقه‌های رویشی از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۲ میلادی (۱۵ سال) بررسی شدند. با استفاده از همبستگی پیرسون، ارتباط بین متغیرهای آب‌وهوایی (ماهانه، دوماهه، فصلی، دوفصلی و سه‌فصلی) و متغیرهای رشد (نرخ رشد و برخی ویژگی‌های کمی آناتومی چوب) از سه ماه پیش از رویش تا انتهای فصل رویش بررسی شدند. همچنین، ارتباط درونی ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده با یکدیگر نیز به همین شیوه ارزیابی شد.

نتایج: رشد عرضی نمونه‌های چوب پائولونیا با افزایش سن، روندی کاهشی و در دو بازه زمانی هفت و ۱۳ سالگی، افت شدیدی نشان داد. همچنین، با افزایش سن، ویژگی‌های آوندی (مساحت و قطر آوندها، درصد آوندهای درشت و مجموع مساحت آن‌ها) و تعداد اشعه چوبی، روندی افزایشی داشتند. به‌جز تعداد آوند که روند مشخصی با افزایش سن نشان نداد. با بررسی همبستگی ویژگی‌های مورد بررسی با یکدیگر مشخص شد که همه ویژگی‌های آناتومی چوب با نرخ رشد، رابطه‌ای معکوس دارند. به‌طوری‌که با افزایش پهنای دایره رویش، ویژگی‌های دیگر کاهش یافتند. ویژگی‌های آوندی و تعداد اشعه نیز اغلب با هم همبستگی مثبتی نشان دادند. با این حال، همبستگی بین تعداد آوند و بقیه متغیرها کمتر بود. از بین عوامل اقلیمی، مجموع بارندگی ماهانه و میانگین تعداد ساعت‌های آفتابی در فصل بهار (به‌ویژه ماه‌های می و ژوئن) بیشترین تأثیر را بر رشد شعاعی و ویژگی‌های آناتومی چوب پائولونیا داشتند. عوامل اقلیمی سه‌ماهه پیش از رویش (زمستان سال قبل) با هیچ‌کدام از ویژگی‌های آناتومی، همبستگی معنی‌داری نشان ندادند. همبستگی بین ویژگی‌های آناتومی و عوامل اقلیمی در تابستان نیز بسیار ضعیف‌تر از بهار بود. بارش بهاره سبب افزایش رویش شعاعی و کاهش ویژگی‌های آناتومی مانند اندازه (مساحت) آوندها و تعداد اشعه‌ها شده بود. تعداد ساعت‌های آفتابی نیز با شدت کمتری، تأثیر مشابهی

بر ویژگی‌های مورد نظر داشت. دما و رطوبت هوا، تأثیر معنی‌داری بر ویژگی‌های مورد بررسی نشان ندادند. نتیجه‌گیری کلی: به‌طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نیاز آبی و نوری پائولونیا زیاد است، اما در رویشگاه مورد مطالعه، حساسیت کمی به دما دارد. دو ماه می و ژوئن (اواسط و اواخر بهار) تأثیرگذارترین ماه‌ها برای رشد عرضی و معماری هیدرولیک درخت پائولونیا است. بارندگی و تعداد ساعت‌های آفتابی بیشتر، رشد عرضی آن را افزایش می‌دهند، اما سبب کاهش اندازه آوندها می‌شوند. همچنین، تعداد اشعه در واحد طول را می‌توان به‌عنوان یک ویژگی آناتومی چوب برای بررسی ارتباط اقلیم و رشد درختان در پژوهش‌های آینده در نظر گرفت.

واژه‌های کلیدی: آناتومی چوب، بارندگی، تعداد ساعت‌های آفتابی، درخت تندرشد، نرخ رشد، هدایت هیدرولیکی.

مقدمه

افزایش تقاضا برای چوب و کمبود منابع جنگلی، تمرکز مجدد بر استفاده از گونه‌های تندرشد را به‌دنبال داشته است. جنگل‌های طبیعی در طول سال‌ها برای تأمین چوب تخریب شده‌اند و جنگل‌های دست‌کاشت به‌عنوان جایگزین آن‌ها افزایش یافته‌اند. به‌طوری‌که طبق برآورد سازمان خواروبار جهانی، جنگل‌های دست‌کاشت در بخش‌هایی از جهان به‌عنوان منبع غالب و پایدار تولید چوب محسوب می‌شوند (FAO, 2022). برای این منظور، در سراسر جهان، کشت گونه‌های چوبی تندرشد که می‌توانند برای تولید چوب صنعتی استفاده شوند، مورد توجه قرار گرفته است (Ebrahimi, Ashbella et al., 2022). در ایران نیز زراعت چوب با چالش تأمین نیاز چوبی کشور پیشنهاد شده است (Haidari et al., 2023). درختان صنوبر، اکالیپتوس و برخی سوزنی‌برگان جزو درختان تندرشد محسوب می‌شوند.

یکی از تندرشدترین گونه‌های درختی در دنیا، جنس پائولونیا (*Paulownia spp.*) است که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. پائولونیا به خانواده Paulowniaceae تعلق دارد و بومی چین و شرق آسیا است. این جنس شامل نه گونه خزان‌کننده است که در شرایط مطلوب، نرخ رشد بسیار زیادی دارند (Zhu et al., 1986). جذب زیاد دی‌اکسیدکربن هوا، مزیت دیگر درختان مذکور است (Icka et al., 2016). این درختان تندرشد در شرایط بهینه می‌توانند در عرض پنج تا شش سال، چوب مفید تولید کنند و باتوجه‌به

محل کاشت با محیط، بسیار سازگار هستند. پائولونیا بیشتر در خاک‌های ماسه‌ای و رسی رشد می‌کند، اما در خاک‌های فقیر نیز می‌تواند به رویش قطری قابل توجهی دست یابد. این درخت، گونه‌ای به‌شدت نورپسند است که برای کشت تلفیقی با درختان دیگر مانند صنوبر، بید و اقاچیا مناسب نیست. نقطه اشباع نوری این گونه، شصت هزار لوکس و نقطه بهینه نوری آن، دو هزار لوکس است (Zhu et al., 1986). پائولونیا، سطح برگ بسیار بزرگ با سرعت تعرق زیادی دارد و دارای سیستم ریشه‌ای بسیار توسعه‌یافته‌ای است، بنابراین رطوبت کافی برای رشد این درختان، بسیار مهم است. در مناطق استوایی و نیمه‌استوایی، پائولونیا از ماه ژوئن تا سپتامبر به‌سرعت رشد می‌کند و ۶۵ درصد بارندگی‌های سالانه با دوره رشد پائولونیا همراه است، بنابراین توزیع بارندگی برای رشد آن مفید است (Jakubowski, 2022).

پائولونیا در مناطق نیمه‌خشک به شوری خاک حساس است. گاهی اوقات این حساسیت با تبخیر و تعرق پائولونیا تشدید می‌شود. دمای بهینه هوا برای رشد سریع این درختان بین ۲۵ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد متغیر است و می‌تواند طیف دمایی متفاوتی را تحمل کند (Icka et al., 2016). با این حال، پائولونیا، مقاومتی در برابر یخ‌زدگی ندارد. رشد آن در دمای هشت درجه سانتی‌گراد آغاز می‌شود، بنابراین رشد خوب پائولونیا، ارتباط نزدیکی با دما دارد (Zhu et al., 1986).

یکی از گونه‌های پائولونیا، پائولونیا فورتونی (*P. fortunei* (Seem.) Hemsl.) است. پراکنش طبیعی آن از مناطق گرمسیری تا معتدل در رویشگاه‌هایی با میانگین

چوبی ممکن است به دمای محیط به طور مستقل از تبخیر و تأمین آب واکنش نشان دهد. تغییر در اندازه آوند چوبی در پاسخ به افزایش دمای فصل رویش با کاهش ویسکوزیته آب همراه است. از این رو وقتی دما افزایش می‌یابد، دیگر برای یک گیاه، ضروری نیست که برای حفظ هدایت هیدرولیکی، آوند چوبی درشتی ایجاد کند (Roderick & Berry, 2001).

در پژوهش‌های زیادی، تأثیر عوامل اقلیمی بر رویش عرضی و ویژگی‌های آوندی درختان مختلف بررسی شده است (Campelo *et al.*, 2010; Oladi *et al.*, 2016, 2017; Najafi-Harsini *et al.*, 2022). اما تاکنون پژوهشی در این زمینه بر پائولونیا انجام نشده است. از این رو، هدف پژوهش پیش‌رو، بررسی تأثیر عوامل اقلیمی بر رویش عرضی و ویژگی‌های آوندی این درختان دست‌کاشت در شهرستان گرگان است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در هاشم‌آباد در شهرستان گرگان از توابع استان گلستان (۳۶ درجه و ۵۱ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی و ۵۴ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی) واقع شده است. براساس اطلاعات ایستگاه هواشناسی گرگان طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۲ میلادی، میانگین دمای سالانه ۲۲/۶ درجه سانتی‌گراد، مجموع بارندگی سالانه ۵۲۷ میلی‌متر، میانگین تعداد ساعت‌های آفتابی سالانه ۶/۳ ساعت در روز، میانگین رطوبت نسبی سالانه ۶۹ درصد و ارتفاع از سطح دریا ۱۳/۳ متر بود (شکل ۱). خاک منطقه مورد مطالعه، رسی و قهوه‌ای جنگلی است. در سال ۲۰۱۲ میلادی، پنج درخت ۲۰ ساله پائولونیا (*P. fortunei*) که در این منطقه به صورت دستی کاشته شده بودند، قطع شد. سپس، دیسکی به ضخامت پنج سانتی‌متر از یقه هر درخت تهیه شد.

روش پژوهش

آماده‌سازی نمونه‌ها و اندازه‌گیری‌ها

به منظور بررسی اثر عوامل اقلیمی بر ویژگی‌های رویشی

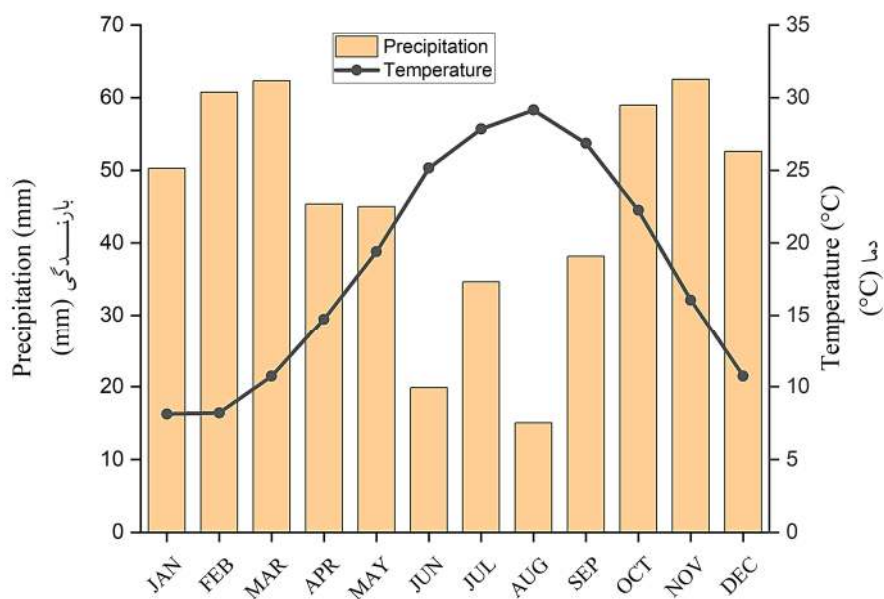
بارندگی سالانه از ۵۰۰ میلی‌متر تا بیشتر از ۲۰۰۰ میلی‌متر متغیر است. این درخت در اقلیم‌های معتدل، خزان‌کننده و در مناطق گرمسیری، همیشه‌سبز است. از این گونه به عنوان یک درخت زینتی و نیز برای تولید الوار، گیاه پالایی و پروژه‌های تثبیت و مرمت خاک استفاده می‌شود. پائولونیا در استان گلستان در شمال ایران کشت شده است و رشد قطری و ارتفاعی مناسبی دارد. هم‌اکنون، حدود ۱۵ هکتار از جنگل‌کاری‌های استان گلستان به کشت پائولونیا تعلق دارد. همچنین، این گونه، گزینه‌ای مناسب برای درخت‌کاری تلفیقی در شمال ایران محسوب می‌شود (Abbasi, 2000).

عوامل اقلیمی یکی از مؤلفه‌های مؤثر بر سرعت رشد و برخی ویژگی‌های آناتومی چوب هستند و حوزه مهمی از پژوهش را در برمی‌گیرند (Plavcova & Hacke, 2012). ویژگی‌هایی مانند پهنای حلقه یا چگالی چوب به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی قرار می‌گیرند. به خصوص اگر دما یا بارندگی، رشد درخت را محدود کنند. با این حال، ویژگی‌های کمتر مطالعه‌شده چوب مانند ساختار آناتومی آن می‌تواند اطلاعات بیشتری در مورد نحوه تأثیر اقلیم بر فیزیولوژی درخت ارائه کند (Oladi *et al.*, 2022). تنوع در ویژگی‌های آناتومی چوب در واقع راه‌حل‌های ساختاری و انطباقی است که توسط درخت به منظور دستیابی به تعادل بهینه بین نیازهای رقابتی، ذخیره‌سازی و انتقال شیره خام تحت شرایط متغیر محیطی و محدودیت‌های تکاملی درخت استفاده می‌شود. آناتومی حلقه رویشی (مانند اندازه و تعداد آوندها)، اطلاعات ارزشمندی از نحوه پاسخ‌های درخت به محیط را در خود ذخیره می‌کند (Oladi *et al.*, 2014).

از جمله ویژگی‌های آناتومی چوب می‌توان به ویژگی‌های آوندی اشاره کرد که رابطه معنی‌داری با تغییرات اقلیمی دارند. به طور کلی، دسترسی بیشتر به منابع آبی، اندازه آوندها را افزایش می‌دهد و تنش خشکی و تبخیر و تعرق شدید باعث کوچک شدن آن‌ها می‌شود (Oladi *et al.*, 2016). در سرما یا خشکی برای جلوگیری از تولید حباب هوا در آوندها، درختان به تولید پُر تعداد آوندهای کوچک‌تر تمایل دارند (Pourtahmasi *et al.*, 2011; Oladi *et al.*, 2014). آوند

و آناتومی چوب، دیسک‌های تهیه‌شده به آزمایشگاه منتقل شدند. سپس، باریکه‌ای از پوست تا مغز از مقطع عرضی نمونه‌های خشک‌شده در هوا تهیه شد تا بتوان آن‌ها را در دهانه میکروتوم تثبیت کرد. پس‌از آن، سطح مقطع‌ها با تیغ میکروتوم برای بهبود دید صاف شدند تا وضوح افزایش پیدا کند. طول باریکه‌ها زیاد بود (بین ۹ تا ۱۲ سانتی‌متر) و در دهانه میکروتوم جای نمی‌گرفت، بنابراین این باریکه‌ها به قطعه‌های متوالی دو تا سه سانتی‌متری تقسیم شدند. سپس، باریکه‌ها با استفاده از اسکنر Epson GT- 15000 با وضوح

۲۴۰۰ dpi اسکن شدند. روی تصاویر به‌دست‌آمده، با کمک نرم‌افزار Image J، پهنای حلقه‌های سالانه و تعداد اشعه‌ها (فراوانی اشعه‌ها) در هر حلقه رویشی اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های آوندی لازم است که تباین (کنتراست) بین آوندها و بافت زمینه بهبود یابد. به‌این‌منظور، از تکنیک مازیک سیاه و گچ سفید (Oladi *et al.*, 2014) استفاده شد. سپس، باریکه‌ها دوباره با وضوح ۴۸۰۰ dpi اسکن شدند (شکل ۲).



شکل ۱- روند ماهانه تغییرات دما (خط) و مجموع بارندگی (ستون) در ایستگاه هواشناسی هاشم‌آباد طی بازه ۱۹۹۸-۲۰۱۲ میلادی

Figure 1. The trend of changes in monthly average temperature (line) and total rainfall (column) of Hashemabad weather station for the period of 1998-2012

تعداد آوندها در هر میلی‌متر مربع به‌شکل خودکار توسط نرم‌افزار محاسبه شدند و به‌صورت فایل اکسل ذخیره شدند. میانگین مساحت آوندها از تقسیم مجموع مساحت حفره‌های آوندی در یک نمونه بر تعداد آن‌ها حاصل می‌شود و معرف اندازه معمول یک آوند در یک حلقه رویشی است. مجموع سطح حفره‌های آوندها یا تخلخل آوندی از حاصل‌جمع مساحت همه حفره‌های آوندی در یک نمونه تقسیم بر کل مساحت آن نمونه به‌دست آمد و

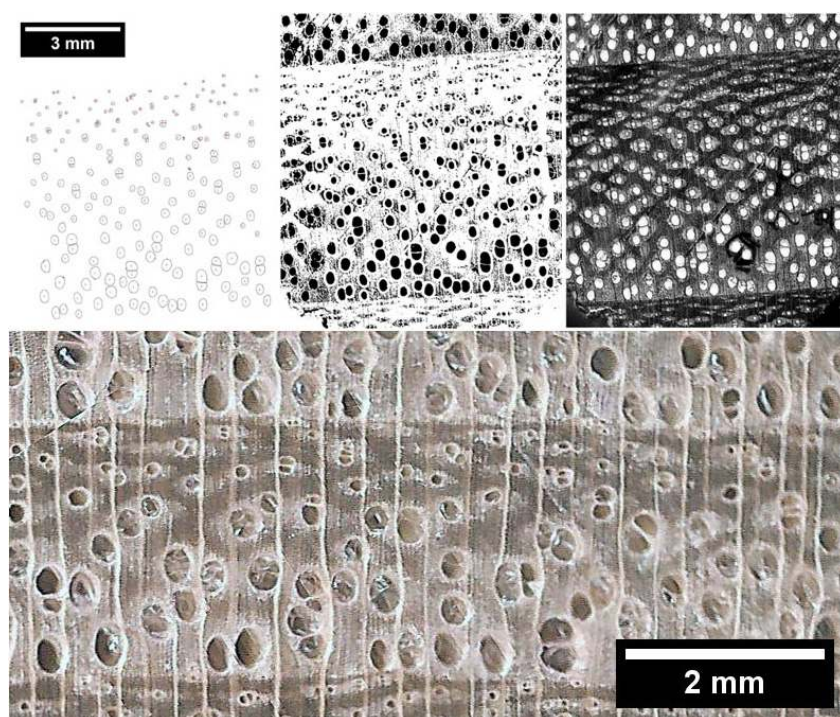
برای اندازه‌گیری ویژگی‌های آوندی، عکس اسکن‌شده از هر حلقه به فرمت هشت بایت درآمد. سپس، تباین تصویر اصلاح و تصویر، باینری (سیاه و سفید) شد. به‌دلیل وجود پارانشیم‌های گردآوندی فراوان که پس از باینری شدن تصویر به‌صورت خودکار از آوند قابل‌تمایز نبودند، گاهی نیاز بود تا این بخش به‌شکل دستی اصلاح شود. درنهایت، ویژگی‌های آوندی شامل میانگین مساحت آوندها، مجموع سطح حفره‌های آوندی (تخلخل آوندی) و

برای حذف اثر جوان چوبی که شامل حلقه‌های بسیار پهن در سال‌های نخست رویش می‌شود، پنج حلقه نزدیک به مغز چوب از اندازه‌گیری‌ها و تحلیل‌ها کنار گذاشته شدند. بدین ترتیب، حلقه‌های رویشی از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۲ میلادی (۱۵ سال) بررسی شدند. داده‌های آب‌وهوایی ماهانه نیز برای دوره متناظر (۱۹۹۸ تا ۲۰۱۲ میلادی) از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی (ایستگاه هواشناسی هاشم‌آباد گرگان) به دست آمد.

تحلیل داده‌ها

از آنجاکه در بیشتر ویژگی‌های آناتومی مورد اندازه‌گیری، گرایش سنی دیده می‌شد، حذف گرایش سنی (استانداردسازی سری‌های زمانی) با برازش منحنی انجام شد (Bošel'a *et al.*, 2012).

به شکل درصد بیان می‌شود. این ویژگی بیانگر ظرفیت کل بافت چوبی یک حلقه رویشی برای حمل و نقل آب از طریق آوندها است و در واقع نشان می‌دهد که چند درصد از مقطع عرضی از آوند پوشیده شده است. برای اندازه‌گیری تعداد اشعه در هر میلی‌متر، خطی مماسی با طول مشخص در هر حلقه رویشی (مقطع عرضی) رسم شد. تعداد اشعه‌هایی که با این خط تماس داشتند، به صورت دستی شمرده شدند. سپس، تعداد اشعه در هر میلی‌متر با توجه به طول پاره‌خط رسم شده محاسبه شد (شکل ۲). برای هر حلقه رویشی، رشد عرضی، ویژگی‌های آوندی و فراوانی اشعه‌ها اندازه‌گیری شد (جدول ۱). پراکنش اندازه همه آوندها بررسی شد و با استفاده از نرم‌افزار SPSS، چارک چهارم داده‌ها (آوندهایی با مساحت بیشتر از ۰/۰۶ میلی‌متر مربع) به عنوان آوندهای درشت در نظر گرفته شدند.



شکل ۲- مراحل آماده‌سازی تصاویر اسکن‌شده از حلقه‌های رویشی برای اندازه‌گیری ویژگی‌های آوندی (بالا). نمونه‌ای از شکل مورد استفاده برای شمارش تعداد اشعه در هر میلی‌متر (پایین)

Figure 2. Preparation steps of scanned images of a tree ring to measure vascular characteristics (top). An example of an image used to count the number of rays per millimeter (bottom)

از ضریب همبستگی پیرسون، ارتباط بین ویژگی‌های آناتومی

پس از بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها، ابتدا با استفاده

آفتابی با ویژگی‌های آناتومی چوب در این بازه به شکل ماهانه، دوماهه، فصلی، دوفصلی (بهار و تابستان) و کل دوره رویش (زمستان پیش از رویش، بهار و تابستان) تعیین شدند. همچنین، به منظور تعیین ارتباط بین متغیرهای مورد بررسی، آزمون تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای ویژگی‌های آوندی چوب و متغیرهای آب‌وهوایی انجام گرفت.

بررسی شدند. سپس، به همین شیوه، همبستگی بین متغیرهای آب‌وهوایی (ماهانه، دوماهه، فصلی، دوفصلی و سه‌فصلی) و متغیرهای رشد (ویژگی‌های آناتومی چوب) از سه ماه پیش از رویش تا انتهای فصل رویش ارزیابی شد. بازه زمانی مورد بررسی از ژانویه پیش از رویش تا سپتامبر در نظر گرفته شد و همبستگی متغیرهای آب‌وهوایی شامل میانگین دما، میانگین رطوبت هوا، مجموع بارندگی و میانگین تعداد ساعت‌های

جدول ۱- پارامترهای اندازه‌گیری شده و داده‌های اقلیمی مورد بررسی

investigated climatological data Table 1. Measured parameters and

Parameter	Examined period	Climatological data
Tree-ring width (mm)	Spring and Summer	Average temperature (°C)
Average vessel lumen area (mm ²)	Winter	Average humidity (%)
Porosity (%)	Spring	Sum of rainfall (mm)
Vessel frequency (n/mm ²)	Summer	Average of sunny hours (hour)
Vessel area bigger than 0.06 mm ² (%)	April and May	
Average radial vessel diameter (mm)	May and June	
Average tangential vessel diameter (mm)	April	
Ray frequency (n/mm)	May	
	June	

نتایج

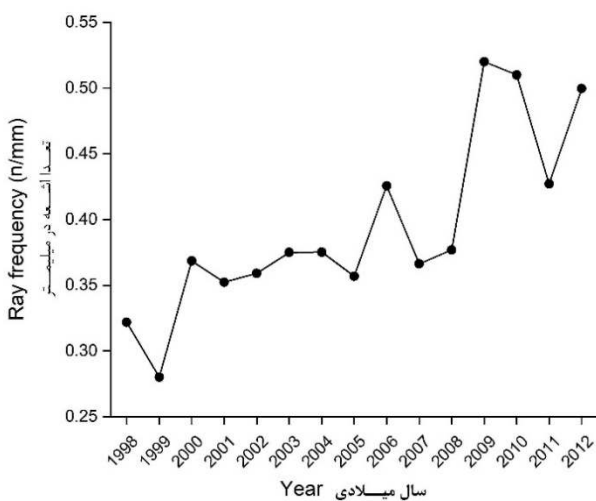
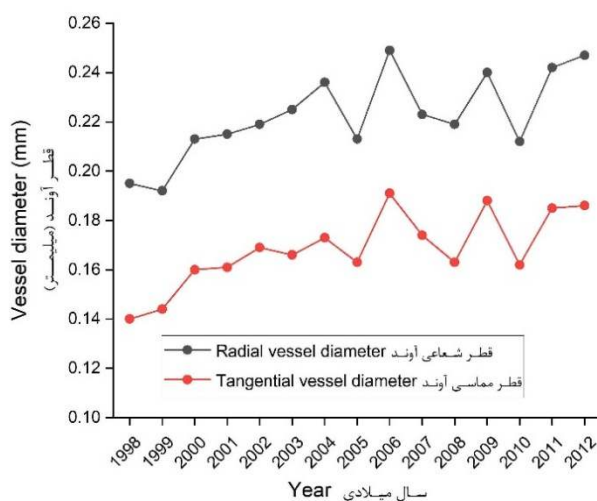
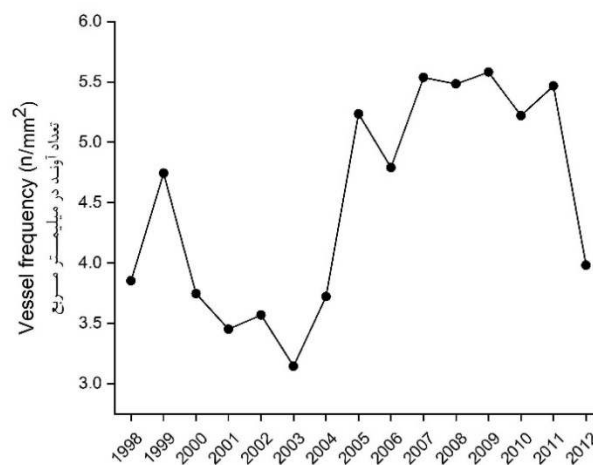
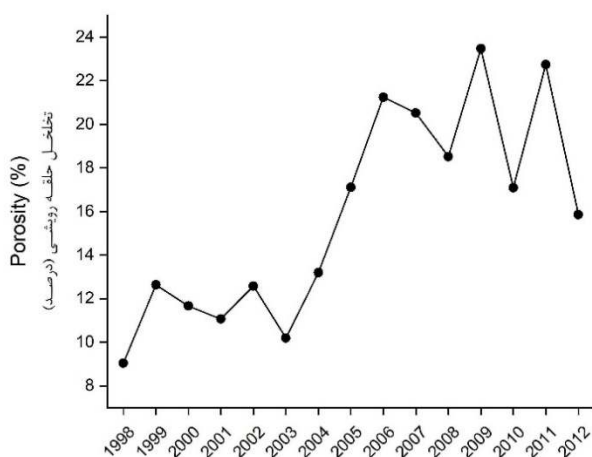
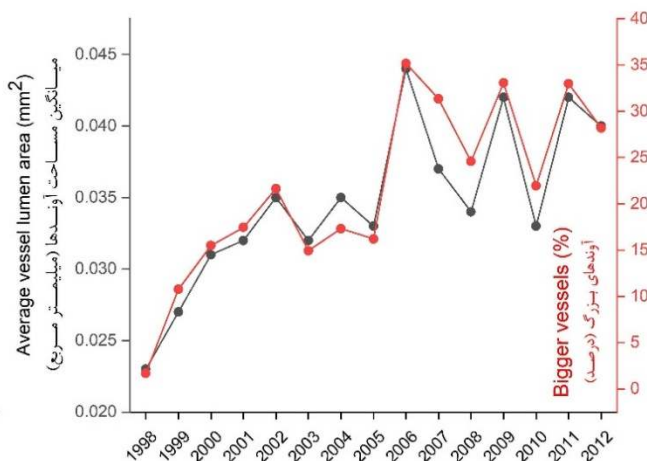
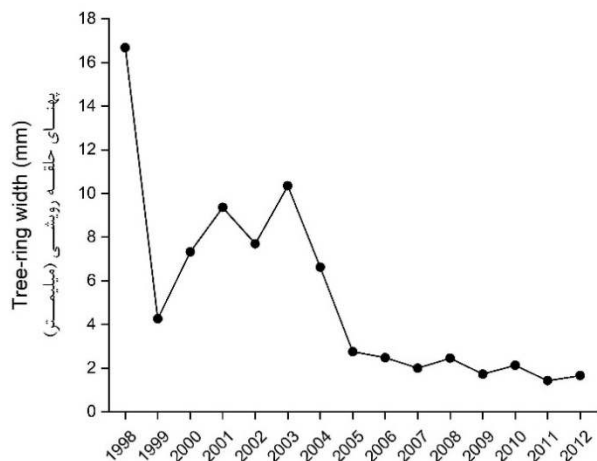
همبستگی بین ویژگی‌های آناتومی چوب

ضریب‌های همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های مورد اندازه‌گیری در جدول ۲ آمده است. همبستگی بین همه ویژگی‌های آناتومی مورد بررسی با پهنای دایره رویش منفی بود. به طوری که با افزایش پهنای دایره رویش، ویژگی‌های مورد بررسی دیگر کاهش یافتند. بیشترین همبستگی پهنای حلقه رویش به ترتیب با تخلخل، درصد آوندهای بزرگ‌تر از ۰/۰۶ و تعداد آوند در واحد سطح یافت شد، در حالی که بین پهنای حلقه رویش و قطر شعاعی آوند، رابطه معنی‌داری مشاهده نشد. میانگین مساحت حفره‌های آوندی با ویژگی‌های آناتومی دیگر، همبستگی مثبتی نشان داد. بیشترین همبستگی این متغیر به ترتیب با قطر مماسی آوند و درصد آوندهای بزرگ‌تر از ۰/۰۶ میلی‌متر مربع بود. میانگین مساحت حفره‌های آوندی با تعداد آوند در واحد سطح و تعداد اشعه در واحد طول، همبستگی معنی‌داری نداشت. تخلخل حلقه رویشی (مجموع مساحت آوندها) با همه ویژگی‌های دیگر اندازه‌گیری شده (به جز میانگین قطر

روند تغییرات ویژگی‌های آناتومی چوب با افزایش سن تغییرات ویژگی‌های مورد بررسی از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۲ میلادی در شکل ۳ آمده است. در سال‌های ابتدایی رشد درخت، پهنای دایره رویش زیاد بود. طی گذر از مرحله جوان‌چوبی و رسیدن به مرحله بالغ‌چوبی، روند نزولی در پهنای حلقه رویشی مشاهده شد. این کاهش در دو بازه، شدت بیشتری یافت: حلقه‌های رویشی هفتم و سیزدهم (سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۵). روند تغییرات سالانه میانگین مساحت حفره‌های آوندی، قطر شعاعی و مماسی آوندها، درصد آوندهای درشت‌تر از ۰/۰۶ میلی‌متر مربع و تخلخل حلقه رویشی در این مدت، افزایشی بودند. با این حال، این الگو به طور کامل در مورد تعداد آوندها در واحد سطح تکرار نشده است. با افزایش سن درختان، تعداد اشعه در واحد طول نیز روندی افزایشی نشان می‌دهد، اما تا سال ۲۰۰۸ میلادی، تغییرات آن اندک بود. از سال ۲۰۰۹ میلادی، یک جهش افزایشی در آن دیده شد.

داشت. تعداد اشعه چوبی، قوی ترین همبستگی‌ها را به ترتیب با قطر مماسی آوند، درصد آوندهای درشت و قطر شعاعی آوند نشان داد.

شعاعی آوند)، همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد. تخلخل، بیشترین همبستگی را به ترتیب با درصد آوندهای بزرگ‌تر از ۰/۰۶ میلی‌متر مربع و تعداد آوند در واحد سطح



شکل ۳- روند تغییرات پهنای حلقه رویش، ویژگی‌های آوندی و تعداد اشعه در پائولونیا با افزایش سن

Figure 3. Variations in tree-ring width, vascular characteristics and number of rays in paulownia with increasing age

جدول ۲- ضریب‌های همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های آناتومی چوب

Table 2. Pearson's correlation coefficients between wood anatomical characteristics

	Average vessel lumen area	Porosity	Vessel frequency	Percentage of vessel area bigger than 0.06 mm ²	Average radial vessel diameter	Average tangential vessel diameter	Ray Frequency
Tree-ring width	-0.64*	-0.83**	-0.74**	-0.79**	-0.38	-0.56*	-0.55*
Average vessel lumen area		0.61*	0.23	0.83**	0.75**	0.83**	0.48
Porosity			0.85**	0.88**	0.49	0.67**	0.6**
Vessel frequency				0.55*	0.01	0.21	0.34
Percentage of vessel area bigger than 0.06 mm ²					0.73**	0.87**	0.67**
Average radial vessel diameter						0.93**	0.65**
Average tangential vessel diameter							0.73**

** : Significant at p<0.01; * : Significant at p<0.05

آفتابی طولانی‌تر در بهار سبب کاهش معنی‌دار اندازه آوندها، درصد آوندهای درشت، قطر مماسی آوند و تخلخل حلقه رویشی شدند. بارش بیشتر بهاره نیز تخلخل حلقه رویشی و تعداد آوندها را کاهش داده بود. در بهار، رطوبت نسبی هوا فقط بر میانگین مساحت حفره‌های آوندی، تأثیر مثبت و معناداری نشان داد.

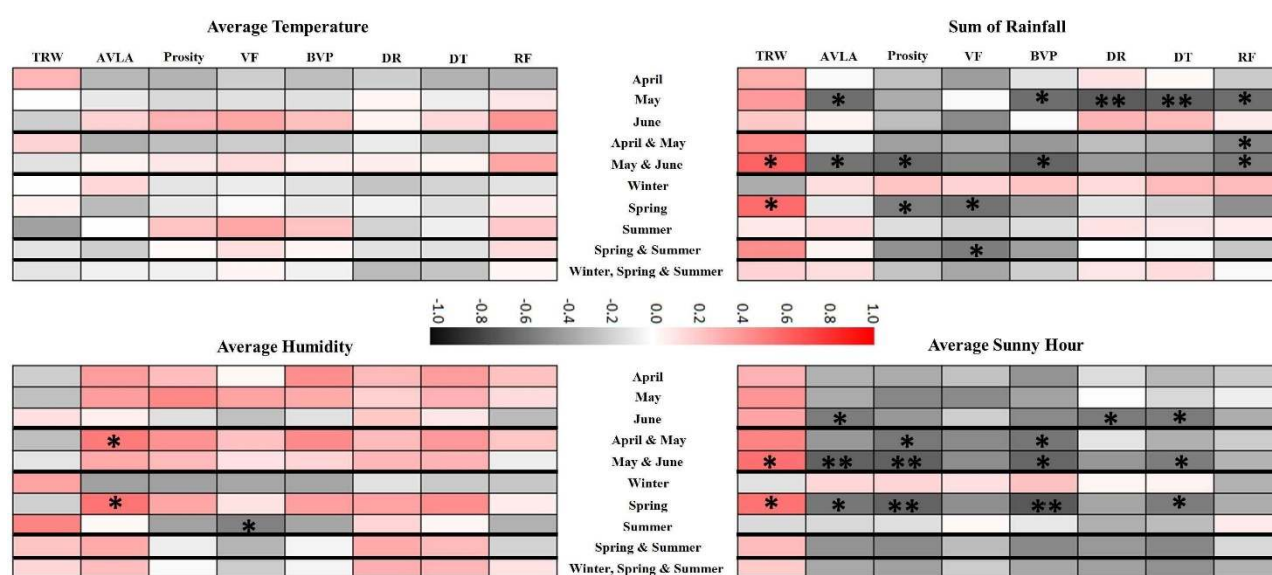
وقتی فصل بهار به شکل بازه‌های ماهانه (آوریل، می و ژوئن) در نظر گرفته شد، مشخص شد که دو ماه می و ژوئن به مراتب مهم‌تر از آوریل هستند. عوامل اقلیمی در بازه دوماهه می-ژوئن، بیشترین تأثیر را بر متغیرهای رشد و ویژگی‌های آناتومی چوب داشتند. در این دو ماه، پهنای دایره رویش با مجموع بارندگی و میانگین ساعت‌های آفتابی، همبستگی مثبت و معناداری نشان داد (شکل ۵). میانگین مساحت حفره‌های آوندی، تخلخل، درصد آوندهای بزرگ‌تر از ۰/۰۶ میلی‌متر مربع و تعداد اشعه در واحد طول با مجموع بارندگی، همبستگی منفی و معنی‌داری داشتند. درصد آوندهای بزرگ‌تر از ۰/۰۶ میلی‌متر مربع و قطر مماسی آوند نیز با میانگین ساعت‌های آفتابی، ارتباطی معکوس نشان دادند. همچنین، همبستگی منفی و معنی‌داری بین میانگین

همبستگی بین عوامل اقلیمی و ویژگی‌های آناتومی چوب در شکل ۴، ضریب همبستگی بین ویژگی‌های آناتومی چوب و عوامل اقلیمی به شکل هیت پلات (نقشه گرمایی) نمایش داده شده است. در بازه نه‌ماهه (زمستان پیش از فصل رشد، بهار و تابستان)، هیچ ارتباط معنی‌داری بین عوامل آب‌وهوایی و آناتومی چوب یافت نشد. همچنین، سه‌ماهه پیش از رویش (زمستان) با هیچ‌کدام از ویژگی‌های آناتومی، همبستگی معنی‌داری نشان نداد. در فصل تابستان نیز فقط افزایش رطوبت هوا سبب کاهش تعداد آوند شد.

در بازه فصلی، بیشترین همبستگی معنی‌دار بین ویژگی‌های آناتومی چوب و عوامل اقلیمی در فصل بهار مشاهده شد. در این فصل، مجموع بارندگی و میانگین تعداد ساعت‌های آفتابی، بیشترین همبستگی را با ویژگی‌های آناتومی داشتند، اما میانگین دما، همبستگی معنی‌داری با هیچ‌کدام از ویژگی‌های مذکور نشان نداد. افزایش در بارندگی و ساعت‌های آفتابی، افزایش نرخ رشد عرضی (پهنای حلقه رویش) را به دنبال داشت، درحالی‌که تأثیر این دو متغیر آب‌وهوایی بر ویژگی‌های آوندی معکوس بود. ساعت‌های

ضعیفی با مؤلفه دوم نشان دادند. از بین متغیرهای آب و هوایی، بارندگی نیز چنین بود و می توان این متغیر را با ویژگی های آناتومی در یک گروه قرار داد. برعکس، دما و رطوبت نسبی هوا، همبستگی قدرتمندی با مؤلفه دوم نشان دادند و با مؤلفه نخست، همبسته نبودند. متغیر ساعت های آفتابیی، همبستگی متوسطی با هر دو مؤلفه نشان داد.

مساحت حفره های آوندی و تخلخل با میانگین ساعت های آفتابیی مشاهده شد (شکل ۵). به طور کلی، مجموع بارندگی و میانگین ساعت های آفتابیی موجب افزایش رویش عرضی و کاهش ویژگی های آوندی پائولونیا شده بود. براساس تحلیل مؤلفه های اصلی (شکل ۶)، ویژگی های آناتومی چوب، همبستگی زیادی با مؤلفه نخست و همبستگی

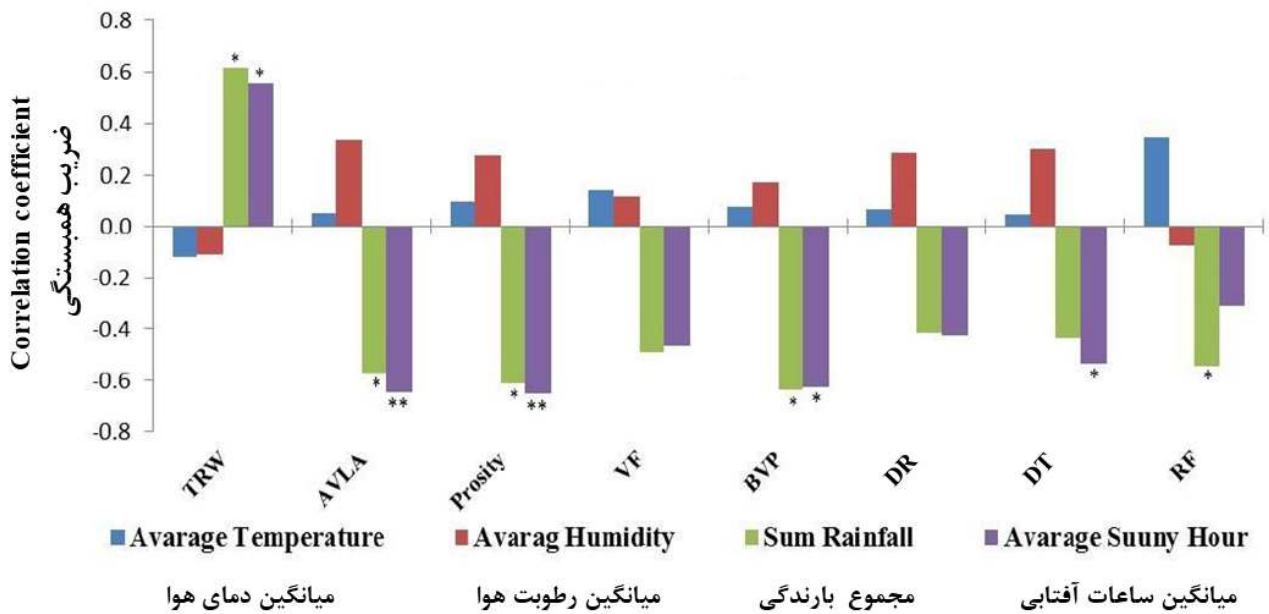


شکل ۴- نقشه گرمایی از همبستگی ویژگی های آناتومی و عوامل اقلیمی

TRW = پهنای حلقه رویشی، AVLA = میانگین اندازه آوندها، Prosiy = تخلخل، VF = تعداد آوند در واحد سطح، BVP = درصد آوندهای بزرگ تر از ۰/۰۶ میلی متر مربع، DR = میانگین قطر شعاعی آوند، DT = میانگین قطر مماسی آوند، RF = تعداد اشعه در واحد طول، ** = معنی داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد و * = معنی داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد.

Figure 4. Heatplot of significant correlations between anatomical features and climatic factors

TRW = Tree-ring width, AVLA = Average vessel lumen area, Porosity = Porosity, VF = Vessel frequency, BVP = Percentage of vessel area bigger than 0.06 mm², DR = Average radial vessel diameter, DT = Average tangential vessel diameter, RF = Ray frequency, ** = Significant at p<0.01, and * = Significant at p<0.05.

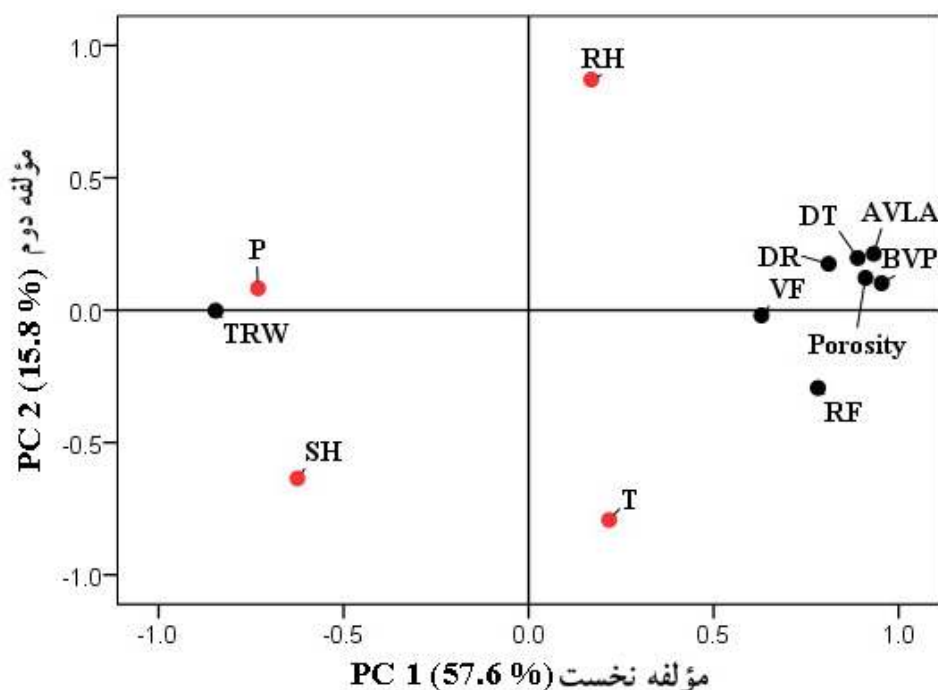


شکل ۵- ضریب‌های همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های آناتومی و متغیرهای اقلیمی در دو ماه بهار (می و ژوئن)

TRW = پهنای حلقه رویشی، AVLA = میانگین اندازه آوندها، Prosioty = تخلخل، VF = تعداد آوند در واحد سطح، BVP = درصد آوندهای بزرگ‌تر از ۰/۰۶ میلی‌متر مربع، DR = میانگین قطر شعاعی آوند، DT = میانگین قطر مماسی آوند، RF = تعداد اشعه در واحد طول، ** = معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد و * = معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد.

Figure 5. Pearson's correlation coefficients between anatomical features and climatic factors in two consecutive months of spring (May and June)

TRW = Tree-ring width, AVLA = Average vessel lumen area, Porosity = Porosity, VF = Vessel frequency, BVP = Percentage of vessel area bigger than 0.06 mm², DR = Average radial vessel diameter, DT = Average tangential vessel diameter, RF = Ray frequency, ** = Significant at p<0.01, and * = Significant at p<0.05.



شکل ۶- نمودار دومی محوری تحلیل مؤلفه‌های اصلی از ویژگی‌های آناتومی چوب و متغیرهای آب‌وهوایی مورد بررسی
 T = میانگین دما، P = مجموع بارندگی، RH = میانگین رطوبت نسبی، SH = میانگین ساعت‌های آفتابی، TRW = پهنای حلقه رویشی، AVLA = میانگین اندازه
 آوندها، Porosity = تخلخل، VF = تعداد آوند در واحد سطح، BVP = درصد آوندهای بزرگ‌تر از ۰/۰۶ میلی‌متر مربع، DR = میانگین قطر شعاعی آوند، DT =
 میانگین قطر مماسی آوند و RF = تعداد اشعه در واحد طول.

Figure 6. Rotated principal component analysis of quantitative wood anatomical features and climatic variables
 T = Average temperature, P = Sum of rainfall, RH = Average humidity, SH = Average sunny hours, TRW = Tree-ring width, AVLA =
 Average vessel lumen area, Porosity = Porosity, VF = Vessel frequency, BVP = Percentage of vessel area bigger than 0.06 mm², DR =
 Average radial vessel diameter, DT = Average tangential vessel diameter, and RF = Ray frequency.

بحث

ظرفیت انتقال آب اغلب با اندازه آوند و تعداد آوند تعریف می‌شود (Carlquist, 2013). با افزایش سن درخت، اندازه آوندهای تولیدشده در هر سال (هر حلقه رویشی) زیاد می‌شود. افزایش اندازه آوندها، تأثیر مهمی بر عملکرد هیدرولیکی بافت چوبی دارد. بدین ترتیب، تخلخل کلی حلقه رویشی افزایش می‌یابد (Pratt et al., 2017). تعداد اشعه به سمت پوست نیز به‌طور معمول با افزایش سن زیاد می‌شود که علت آن به کاهش هورمون اکسین برمی‌گردد (Carlquist, 2013).

نتایج دیگر پژوهش پیش‌رو نشان داد که پهنای حلقه‌های رویش با ویژگی‌های آناتومی دیگر (ویژگی‌های آوندی و تعداد اشعه)، همبستگی منفی دارد، اما اغلب ویژگی‌های آوندی، همبستگی مثبتی با یکدیگر داشتند. پهنای دایره رویش و تعداد آوند در واحد سطح با یکدیگر همبستگی منفی و معنی‌داری نشان دادند.

با افزایش سن درخت، بافت چوب نیز دچار تغییر می‌شود. تغییرساختار چوب با افزایش سن برای درک عملکرد هیدرولیکی کل درخت مهم است (Domec et al., 2009). به‌طورکلی براساس ژنتیک، پهنای حلقه رویشی طبق یک روند زیستی و طبیعی مشخص با افزایش سن و اندازه درختان کاهش می‌یابد. در واقع، پس از عبور درخت از مرحله جوان‌چوبی به مرحله بالغ‌چوبی، سرعت رشد عرضی نیز کاهش می‌یابد (Biondi & Qeadan, 2008). در پژوهش پیش‌رو، این روند در درختان پائولونیا نیز مشاهده شد. رشد عرضی پائولونیا در رویشگاه مورد بررسی با افزایش سن، روندی کاهشی و در دو بازه زمانی، افت شدیدی داشت: هفت و ۱۳ سالگی. همچنین، اندازه آوند با افزایش سن زیاد شد که الگویی عمومی در درختان پهن‌برگ محسوب می‌شود.

بارندگی ماه‌های می، می-ژوئن و بهار، همبستگی معنی‌داری با ویژگی‌های آناتومی اندازه‌گیری شده نشان داد. میانگین مساحت حفره‌های آوندی و درصد آوندهای بزرگ‌تر از $0/06$ میلی‌متر مربع، همبستگی معنی‌داری با بارندگی کل در ماه می و نیز در دوماه می-ژوئن داشتند. هم‌راستا با این نتایج، بررسی ویژگی‌های آوندی بلوط همیشه‌سبز (*Quercus ilex L.*) نشان داد که میانگین مساحت آوند و 20 تا 25 آوند درشت‌تر، همبستگی خوبی با بارش اواخر بهار (می-ژوئن) داشتند (Campelo et al., 2010). آوندهایی با مساحت بزرگ‌تر، همبستگی بهتری با بارش اوایل بهار (آوریل-می) دارند. چراکه بزرگ‌ترین آوندها در اوایل فصل رویش تشکیل می‌شوند و می‌توانند تعریف بهتری از شرایط اقلیمی در طول آن دوره در مقایسه با پهنای حلقه رویش ارائه کنند (Campelo et al., 2010). تأمین آب فراوان در اوایل فصل رویش با تشکیل آوندهای بزرگ، فشار تورژسانس زیاد و گسترش سریع سلولی همراه است (Schume et al., 2004). این مسئله، دلیل ارتباط مستقیم بارندگی بهار با اندازه آوندها است. براساس نتایج دیگر به‌دست‌آمده، تداخل با بارش بهار و می-ژوئن، همبستگی معنی‌دار و معکوسی نشان داد. بررسی پهنای حلقه‌های رویشی و ویژگی‌های آوندی راش شرقی (*Fagus orientalis Lipsky*) نشان داد که برخلاف بقیه ویژگی‌های آناتومی، هیچ سیگنال محیطی را نمی‌توان از تغییرات تداخل استخراج کرد (Pourtahmasi et al., 2011)، اما در پژوهش پیش‌رو، تداخل، یک ویژگی آناتومی خوب برای بررسی تأثیر اقلیم شناخته شد.

یکی از ویژگی‌های مهم آناتومی چوب برای بررسی اثر اقلیم که به‌ندرت به آن توجه می‌شود، تعداد یا حجم اشعه است. بارندگی بر تشکیل سلول‌های اشعه تأثیر می‌گذارد، اما نحوه این اثر در گونه‌ها و اقلیم‌های مختلف، متفاوت است. به‌طورکلی، در پهن‌برگان مناطق معتدله، درصد سلول‌های اشعه چوبی با دما، افزایش و با بارندگی، کاهش می‌یابد (Godfrey et al., 2020). طبق نتایج پژوهش پیش‌رو، تعداد اشعه با بارندگی در ماه‌های بهار، همبستگی منفی و معنی‌دار داشت که معرف ارتباط خوب این ویژگی با اقلیم است. در مجموع با قاطعیت می‌توان گفت که بارش‌های فصل بهار به‌ویژه ماه می-ژوئن، بیشترین تأثیر را بر رشد پائولونیا در منطقه مورد مطالعه دارند.

با این حال، افزایش تعداد آوند تحت تأثیر کاهش پهنای حلقه درخت نیست. بلکه درختان به‌طور فعال تعداد آوندهای تولیدشده را کنترل می‌کنند (Oladi et al., 2014). در بررسی ارتباط پهنای حلقه رویش و ویژگی‌های آوندی در توسکای قشلاقی (*Alnus glutinosa (L.) Gaertn.*) نیز گزارش شد که بدون در نظر گرفتن نوع رویشگاه و تغییرات اقلیمی، با افزایش پهنای حلقه رویش درختان مذکور، تعداد آوند در واحد سطح کمتر می‌شود (Oladi et al., 2015). تفاوت‌های سالانه در ویژگی‌های آوند نشان‌دهنده یک رابطه بین کارایی هیدرولیکی (آوندهای بزرگ) در طول فصل بارانی و ایمنی هیدرولیکی (آوندهای کوچک و به تعداد بیشتر) در طول فصل گرم و خشک است (Verheyden et al., 2005). با کمتر شدن تعداد آوند در حلقه پهن و تعداد آوند زیاد در حلقه باریک، ویژگی‌های آوندی دیگر نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرند. به‌طورکلی در بیشتر گونه‌های چوبی، رابطه‌ای منفی بین اندازه و تعداد آوندها در بافت چوبی وجود دارد (Hietz et al., 2017). در مورد پائولونیا، برخلاف انتظار، همبستگی معنی‌داری بین اندازه آوند و تعداد آوند در واحد سطح یافت نشد. این مسئله را می‌توان به تندرشدی و ویژگی‌های ذاتی پائولونیا نسبت داد. چون این گونه اغلب در محیطی رشد می‌کند که تنش آبی و خشکی زیادی وجود ندارد. از این‌رو، ایمنی انتقال سیال، اولویت درخت نیست.

دما با هیچ‌یک از ویژگی‌های آناتومی مورد بررسی، همبستگی معنی‌داری نداشت. با این حال، در بسیاری از پژوهش‌ها، دما یک عامل اقلیمی مؤثر بر نرخ رشد عرضی و ویژگی‌های آناتومی چوب محسوب می‌شود (Oladi & Pourtahmasi, 2012; Sadari et al., 2013; Oladi et al., 2017; Najafi-Harsini et al., 2022). ارزیابی اثرات درجه‌حرارت بر آناتومی و چگالی چوب در گونه تندرشد اکالیپتوس (*Eucalyptus grandis W.Hill*) نشان داد که افزایش دما باعث کاهش تعداد آوند و افزایش چگالی چوب می‌شود (Thomas et al., 2007). فنولوژی گونه‌های مختلف اکالیپتوس و گونه‌های درختی دیگر اغلب تحت کنترل دما است تا بارندگی (Rawal et al., 2014). عدم وجود همبستگی معنی‌دار بین دما و ویژگی‌های آناتومی چوب در پژوهش پیش‌رو را می‌توان ناشی از حساسیت کم پائولونیا به دما یا بهینه بودن شرایط دمایی برای رشد این گونه در منطقه مورد مطالعه دانست.

ساعت‌های آفتابی نسبت به رطوبت نسبی، عامل‌های تأثیرگذارتری بر رویش و ویژگی‌های آوندی پائولونیا هستند و دما تأثیر معنی‌داری بر آن‌ها ندارد. نحوه تأثیر تابش آفتاب و دما بر رویش به‌طور کامل یکسان نیستند. تابش آفتاب به‌طور مستقیم با افزایش نرخ فتوسنتز سبب ازدیاد رشد می‌شود، اما گرما در حالتی باعث افزایش فتوسنتز می‌شود که در محدوده مطلوب قرار داشته باشد. در رویشگاه مورد مطالعه ممکن است که نوسان‌های دمایی، اندک و در محدوده‌ای قرار داشته باشند که به‌عنوان عامل محدودکننده رشد محسوب نشود.

می و ژوئن (اواسط و اواخر بهار)، مهم‌ترین ماه‌ها برای رشد ویژگی‌های آناتومی پائولونیا هستند. افزایش در بارندگی و تعداد ساعت‌های آفتابی، رشد عرضی را زیاد می‌کند، اما سبب کاهش اندازه آوندها می‌شود. بهترین شرایط رشد برای پائولونیا از نظر تولید چوب در خاورمیانه و جنوب اروپا فراهم است (Jakubowski, 2022). براساس یافته‌های پژوهش پیش‌رو، در صورتی که دما در محدوده مطلوب قرار داشته باشد، تأمین آب پائولونیا و کاشت آن‌ها در مناطقی با روزهای آفتابی بیشتر به افزایش رشدشان کمک می‌کند. همچنین، تعداد اشعه در واحد طول را می‌توان به‌عنوان یک ویژگی آناتومی برای بررسی ارتباط اقلیم و رشد درختان در پژوهش‌های آینده در نظر گرفت.

یکی از عوامل مهم اقلیمی که کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته، میانگین تعداد ساعت‌های آفتابی است. در این پژوهش، این عامل اقلیمی مانند بارش، همبستگی معنی‌داری با همه ویژگی‌های آناتومی مورد بررسی به‌جز تعداد اشعه و تعداد آوند داشت. به‌طور خلاصه، افزایش تعداد ساعت‌های آفتابی، رشد عرضی را زیاد می‌کند، اما به تولید آوندهای کوچک‌تری منجر می‌شود. تراکم آوند و میانگین مساحت آوندها در گونه‌های نورپسند برخلاف گونه‌های سایه‌پسند اغلب تحت تأثیر تعداد ساعت‌های آفتابی است (Alarcon *et al.*, 2010). پائولونیا نیز به‌عنوان درختی به‌شدت نورپسند برای رشد بهینه به شدت نوری معادل شصت هزار لوکس نیاز دارد (Jakubowski, 2022). این گونه می‌تواند در شرایط نور زیاد به‌سرعت رشد کند. پیش‌تر گزارش شده است که فقط با افزایش ۳۰ درصدی تابش نور خورشید، پهنای حلقه‌های رویشی برخی گونه‌ها ممکن است دوبرابر شود (Vaganov *et al.*, 2009). با این حال، به‌نظر می‌رسد که آفتاب مستقیم بر اندازه آوندهای پائولونیا، تأثیر منفی داشته باشد. بررسی سازگاری آناتومی آوند چوبی و خواص هیدرولیکی چوب راش اروپایی (*F. sylvatica*) L. به افزایش نور نشان داد که قطر آوندها در شاخه‌هایی که در معرض مستقیم نور خورشید هستند، نسبت به شاخه‌های هم‌سن که در سایه قرار دارند، کمتر است (Lemoine *et al.*, 2002). به‌طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بارندگی و تعداد

References

- Abbasi, N., 2000. Growth and adaptability of *Paulownia fortunei*. Proceedings of the National Conference on Management of Northern Forest and Sustainable Development. Ramsar, Iran, 5-7 Sep. 2000: 21p (In Persian).
- Biondi, F. and Qeadan, F., 2008. A theory-driven approach to tree-ring standardization: defining the biological trend from expected basal area increment. *Tree-Ring Research*, 64(2): 81-96.
- Bošela, M., Kulla, L. and Marušák, R., 2012. Detrending ability of several regression equations in tree-ring research: a case study based on tree-ring data of Norway spruce (*Picea abies* [L.]). *Journal of Forest Science*, 57(11): 491-499.
- Campelo, F., Nabais, C., Gutiérrez, E., Freitas, H. and García-González, I., 2010. Vessel features of *Quercus ilex* L. growing under Mediterranean climate have a better climatic signal than tree-ring width. *Trees*, 24(3): 463-470.
- Carlquist, S., 2013. Comparative Wood Anatomy: Systematic, Ecological, and Evolutionary Aspects of Dicotyledon Wood. Springer Science, Berlin, Heidelberg, Germany, 448p.
- Domec, J.C., Warren, J.M., Meinzer, F.C. and Lachenbruch, B., 2009. Safety factors for xylem failure by implosion and air-seeding within roots, trunks and branches of young and old conifer trees. *IAWA Journal*, 30(2): 101-120.
- Ebrahimi Ashbela, A., Fallahchai, M.M., Salehi, A. and Soltani Tolarood, A.A., 2022. Evaluation of 25-year-old afforestation's of loblolly pine, black alder, velvet maple and chestnut leaved oak in Radar Poshteh area of Guilan province. *Iranian Journal of Forest*, 14(1): 15-26 (In Persian with English summary).
- FAO, 2022. The State of the World's Forests 2022. Forest pathways for green recovery and building

- inclusive, resilient and sustainable economies. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 166p
- Godfrey, J.M., Riggio, J., Orozco, J., Guzmán-Delgado, P., Chin, A.R.O. and Zwieniecki, M.A., 2020. Ray fractions and carbohydrate dynamics of tree species along a 2750 m elevation gradient indicate climate response, not spatial storage limitation. *New Phytologist*, 225(6): 2314-2330.
 - Haidari, M., Jaafari, A., Calagari, M., Pourhashemi, M. and Yousefi, B., 2023. Overcoming challenges and formulating management strategies for wood farming development in Kurdistan Province, Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 31(3): 169-189 (In Persian with English summary).
 - Hietz, P., Rosner, S., Hietz-Seifert, U. and Wright, S.J., 2017. Wood traits related to size and life history of trees in a Panamanian rainforest. *New Phytologist*, 213(1): 170-180.
 - Icka, P., Damo, R. and Icka, E., 2016. *Paulownia tomentosa*, a fast growing timber. *The Annals of Valahia University of Targoviste*, 10: 14-19.
 - Jakubowski, M., 2022. Cultivation potential and uses of paulownia wood: A review. *Forests*, 13(5): 668.
 - Lemoine, D., Jacquemin, S. and Granier, A., 2002. Beech (*Fagus sylvatica* L.) branches show acclimation of xylem anatomy and hydraulic properties to increased light after thinning. *Annals of Forest Science*, 59(7): 761-766.
 - Najafi-Harsini, F., Oladi, R., Pourtahmasi, K., Souto-Herrero, M. and García-González, I., 2022. Using tree-ring width and earlywood vessel features to study the decline of *Quercus brantii* Lindl in Zagros forests of Iran. *European Journal of Forest Research*, 141(3): 379-393.
 - Oladi, R. and Pourtahmasi, K., 2012. Intra-annual secondary growth rate-climate relations of *Fagus orientalis* Lipsky in the center of Hyrcanian forests. *Notulae Scientia Biologicae*, 4(2): 136-140.
 - Oladi, R., Bräuning, A. and Pourtahmasi, K., 2014. "Plastic" and "static" behavior of vessel-anatomical features in Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in view of xylem hydraulic conductivity. *Trees*, 28(2): 493-502.
 - Oladi, R., Emaminasab, M. and Eckstein, D., 2017. The dendroecological potential of shrubs in north Iranian semi-deserts. *Dendrochronologia*, 44: 94-102.
 - Oladi, R., Lamtari, Z. and Pourtahmasi, K., 2022. The effects of temperature and precipitation gradient on radial growth and vascular characteristics of *Fraxinus excelsior* L. in Hyrcanian forests. *Iranian Journal of Forest*, 14(2): 185-199 (In Persian with English summary).
 - Oladi, R., Nasiriani, S., Danekar, A. and Pourtahmasi, K., 2015. Inter-relations between tree-ring width and vessel features in black alder (*Alnus glutinosa*). *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 30(2): 278-288 (In Persian with English summary).
 - Oladi, R., Nasiriani, S., Danekar, A. and Pourtahmasi, K., 2016. Using wood anatomical proxies to study the effect of climate on black alder (Case Study: Forest Park of Astara). *Journal of Forest and Wood Products*, 69(1): 121-131 (In Persian with English summary).
 - Plavcova, P. and Hacke, U.G., 2012. Phenotypic and developmental plasticity of xylem in hybrid poplar saplings subjected to experimental drought, nitrogen fertilization, and shading. *Journal of Experimental Botany*, 63(18): 6481-6491.
 - Poorter, L., McDonald, I., Alarcón, A., Fichtler, E., Licona, J.C., Peña-Claros, M., ... and Sass-Klaassen, U., 2010. The importance of wood traits and hydraulic conductance for the performance and life history strategies of 42 rainforest tree species. *New Phytologist*, 185: 481-492.
 - Pourtahmasi, K., Lotfionran, N., Bräuning, A. and Parsapajouh, D., 2011. Tree-ring width and vessel characteristics of oriental beech (*Fagus orientalis*) along an altitudinal gradient in the Caspian forests, northern Iran. *IAWA Journal*, 32(4): 461-473.
 - Pratt, R.B. and Jacobsen, A.L., 2017. Conflicting demands on angiosperm xylem: tradeoffs among storage, transport and biomechanics. *Plant, Cell & Environment*, 40(6): 897-913.
 - Rawal, D.S., Kasel, S., Keatley, M.R., Aponte, C. and Nitschke, C.R., 2014. Environmental effects on growth phenology of co-occurring Eucalyptus species. *International Journal of Biometeorology*, 58: 427-442.
 - Roderick, M.L. and Berry, S.L., 2001. Linking wood density with tree growth and environment: a theoretical analysis based on the motion of water. *New Phytologist*, 149(3): 473-485.
 - Saderi, S.M., Pourtahmasi, K., Oladi, R. and Rathgeber, C.B.K., 2013. Wood formation in *Juniperus excelsa* ssp. *polycarpus* in the high mountains of North-East Iran. *Journal of Tropical Forest Science*, 25(3): 421-428.
 - Schume, H., Grabner, M. and Eckmüller, O., 2004. The influence of an altered groundwater regime on vessel properties of hybrid poplar. *Trees*, 18(2): 184-194.
 - Thomas, D.S., Montagu, K.D. and Conroy, J.P., 2007. Temperature effects on wood anatomy, wood density, photosynthesis and biomass partitioning of *Eucalyptus grandis* seedlings. *Tree Physiology*,

- 27(2): 251-260.
- Vaganov, E.A., Schulze, E.D., Skomarkova, M.V., Knohl, A., Brand, W.A. and Roscher, C., 2009. Intra-annual variability of anatomical structure and $\delta^{13}\text{C}$ values within tree rings of spruce and pine in alpine, temperate and boreal Europe. *Oecologia*, 161: 729-745.
 - Verheyden, A., De Ridder, F., Schmitz, N., Beeckman, H. and Koedam, N., 2005. High-resolution time series of vessel density in Kenyan mangrove trees reveal a link with climate. *New Phytologist*, 167(2): 425-435.
 - Zhu, Z.H., Chao, C.J., Lu, X.Y. and Xiong, Y.G., 1986. *Paulownia* in China: cultivation and utilization. Published by Asian Network for Biological Sciences and International Development Research Centre, Beijing, 65p.