Iranian Journal of Wood and Paper Science Research

Print ISSN: 1735-0913

Online ISSN: 2383-112X

Vol. 41, No. 1, Page 126-138 (2026) DOI: 10.22092/ijwpr.2026.371526.1821

(OPEN ACCESS)

Anatomical, Physical, and Chemical Properties of Stem and Branch Wood of Populus nigra

Majid Kiaei[1*] and Sadegh Karimi[2]

1*-Corresponding author, Department of Wood and Paper Science and Technology, Cha. C., Islamic Azad University, Chalus, Iran, Email:mjd_kia59@iau.ac.ir

2-Department of Wood and Paper Science and Technology, Cha. C., Islamic Azad University, Chalus, Iran

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 26 November 2025
Revised: 29 December 2025
Accepted: 15 March 2026
Published online: 19 June 2026

Keywords:
Populus nigra,
density,
anatomical properties,
chemical composition.

ABSTRACT

Background and Objectives: Poplar (*Populus nigra*) is widely used in afforestation programs due to its rapid growth and easy availability, making it an important source of raw material for wood-based industries. This study aimed to evaluate and compare the physical, anatomical, and chemical properties of stem and branch wood of this species, as well as to examine their variation along the branch axis.

Materials and methods: ‹Three trees were selected and from each tree, one sample at breast height of the stem and three samples from three branches at different elevation of the tree were taken. Fiber length, fiber diameter, cell-wall thickness, lumen diameter, biometric indices, vessel diameter, wood density, lignin, cellulose, hot-water extractives, and alcohol–acetone extractives were measured using appropriate preparation and test methods

Results: The results showed that all measured properties differed significantly between stem and branch wood. Stem fibers are longer, diameter, and wall thickness are wider, indicating a higher level of anatomical maturity. In contrast, branch wood with its smaller fibers exhibited higher slenderness ratio and Runkel ratio. Branch wood also showed fairly higher density, while vessel diameter was larger in the stem and displayed a decreasing trend from the base to the tip of the branch. Chemically, cellulose, lignin, and extractive contents were all higher in stem wood, whereas these components declined gradually along the branch.

Conclusion: Overall, the findings indicate that stem wood, due to its structural maturity and higher lignocellulosic content, is more suitable for wood and paper applications. However, branch wood owing to its higher density, acceptable papermaking indices, and

adequate fiber characteristics can serve as an economical and accessible supplementary source for pulp production. These results highlight the potential role of branches in improving raw-material utilization and promoting sustainable wood-resource management.

Cite this article: Majid Kiaei and Sadegh Karimi, 2026. Anatomical, Physical, and Chemical Properties of Stem and Branch Wood of Populus nigra. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research,41(1), 126-138. DOI: https://doi.org/10.22092/ijwpr.2026.371526.1821

Copyright: © 2025 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (http://ijwpr.areeo.ac.ir/) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

بررسی ویژگی‌های آناتومی، فیزیکی و شیمیایی چوب تنه و شاخه صنوبر تبریزی *(Populus nigra)*

مجید کیائی[۱*] و صادق کریمی[۲]

۱*- نویسنده مسئول، گروه صنایع چوب و کاغذ، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران،پست الکترونیک: mjd_kia59@iau.ac.ir

۲- گروه صنایع چوب و کاغذ، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
علمی - پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۴
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۹

واژه‌های کلیدی:
چوب صنوبر تبریزی،
دانسیته،
خواص آناتومی،
ترکیب شیمیایی.

چکیده

سابقه و هدف: صنوبر تبریزی به دلیل رشد سریع و دسترسی آسان، به‌عنوان یکی از گزینه‌های مناسب به‌منظور تأمین مواد اولیه صنایع برای جنگل‌کاری مطرح است. ازاین‌رو، این تحقیق باهدف بررسی و مقایسه ویژگی‌های فیزیکی، آناتومی و ترکیب شیمیایی چوب تنه و شاخه صنوبر تبریزی و روند تغییرات آنها در طول شاخه انجام شد.

مواد و روش‌ها: بدین منظور نمونه‌های چوبی از قسمت تنه و سه شاخه در طول آن تهیه شدند و مقادیر طول الیاف، قطر الیاف، ضخامت دیواره سلولی، قطر حفره سلولی، ضرایب بیومتری، قطر آوندها، دانسیته چوب، لیگنین، سلولز، مواد استخراجی در آب گرم و مواد استخراجی در الکل استن اندازه‌گیری گردیدند.

نتایج: نتایج نشان داد که اختلاف میان تنه و شاخه در همه ویژگی‌های اندازه‌گیری شده کاملاً معنی‌دار است. الیاف تنه ازنظر طول، قطر و ضخامت دیواره دارای مقادیر بیشتری بوده و بلوغ آناتومیکی بالاتری را نشان می‌دهند، درحالی‌که شاخه باوجود الیاف کوچک‌تر، دارای نسبت درهم‌رفتگی و رانکل بالاتری بود. البته روند تغییرات ابعاد الیاف در محور طولی شاخه کاهش محسوسی نشان می‌دهد. دانسیته شاخه به‌طور محسوسی بیشتر از تنه اندازه‌گیری شد و قطر آوندها در تنه نسبت به شاخه بزرگ‌تر بوده و روند تغییرات آن در طول شاخه نزولی است. ازنظر ترکیب شیمیایی نیز درصد سلولز، لیگنین و مواد استخراجی در چوب تنه بالاتر بود و این مقادیر در محور طولی شاخه به‌طور یکنواخت کاهش یافت.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها نشان داد که چوب تنه به دلیل بلوغ ساختاری و مقادیر بیشتر اجزای لیگنوسلولزی، ماده اولیه مناسب‌تری برای کاربردهای چوبی و کاغذی باکیفیت بالا محسوب می‌شود؛ اما چوب شاخه نیز با داشتن دانسیته بالاتر، ضرایب کاغذسازی قابل‌قبول و الیاف مناسب، می‌تواند به‌عنوان یک منبع اقتصادی و در دسترس در تولید خمیرکاغذ مورد استفاده قرار گیرد. این نتایج نقش قابل‌توجه شاخه‌ها را در افزایش بهره‌وری مواد خام و مدیریت پایدار منابع چوبی برجسته می‌سازد.

استناد: مجید کیائی و صادق کریمی، ۱۴۰۵. بررسی ویژگی‌های آناتومی، فیزیکی و شیمیایی چوب تنه و شاخه صنوبر تبریزی *(Populus nigra)*. نشریه تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران، ۴۱(۲)، ۱۲۵-۱۳۷.

DOI: https://doi.org/10.22092/ijwpr.2026.371526.1821

مقدمه

صنوبرها جزو مهمترین و پرکاربردترین درختان در جنگل‌داری کوتاه‌مدت هستند. این درختان از ویژگی‌هایی مانند رشد سریع و سازگاری با شرایط محیطی برخوردارند و با توجه به روش‌های متداول جنگل‌کاری مانند کاشت نهال، قلمه‌کاری، هرس مدیریت تاج، فاصله کاشت مناسب و کنترل رقابت با گونه‌های دیگر، گزینه‌ای مناسب برای جنگل‌کاری به‌شمار می‌روند. این ویژگی‌ها، امکان تولید مقادیر زیادی چوب را در کوتاه‌مدت فراهم کرده که می‌تواند در صنعت چوب و کاغذ، تولید انرژی، کبریت‌سازی، تخته خرده

چوب، فیبر، جعبه‌سازی و در ساختمان‌های روستایی و اسکلت گلخانه‌ها استفاده شود. کاشت صنوبر همچنین باهدف ترسیب کربن و مقابله با آبشویی مواد غذایی خاک انجام می‌شود (Johsnsson and Karacic, 2011).

جنس صنوبر (*Populus*) از تیره *Salicaceae*، از حدود ۳۰ گونه چوبی تشکیل شده که در نیمکره شمالی انتشار دارند (Sterck *et al.*, 2005). صنوبرها درختانی دوپایه بوده و چوبی نرم دارند. ریشه این درختان سطحی بوده و از دیرزیستی متوسطی برخوردارند (Mozafarian 2004; Benetka *et al.*, 2022). در ایران، چهار گونه از جنس صنوبر شامل تبریزی (*Populus nigra*)، سپیدار (*P. alba*)، پده (*P.euphratica*) و سفیدپلت (*P.caspica*) می‌روید (Sabeti, 2002). گونه تبریزی پراکنش وسیعی از دریای مدیترانه در جنوب تا عرض جغرافیایی ۶۴ درجه شمالی و از ایرلند و جزایر بریتانیا تا غرب آسیا دارد (Ma *et al.*, 2021). این گونه در ایران در حسنبگلوی ارسباران، حیران، دامنه‌های جنوبی البرز، بختیاری، سروستان و مناطق دیگر در نهرها و جویبارها به‌صورت خودرو دیده می‌شود (Sabeti, 2002).

شاخه‌های درختان به‌عنوان بخشی مهم از کل حجم چوب، نقش قابل‌توجهی در صنایع مختلف دارند. معمولاً شاخه‌ها حدود ۲۵ تا ۳۲ درصد از حجم کل چوب را تشکیل می‌دهند و به‌عنوان منبع ثانویه برای تولید خمیرکاغذ، تخته خرده‌چوب و سایر محصولات فیبری به‌کار می‌روند (Hilton, 2001). استفاده از شاخه‌ها به کاهش ضایعات چوب و بهره‌برداری بهینه از منابع جنگلی کمک می‌کند و می‌تواند سهم مهمی در تولید محصولات با ارزش افزوده بالا در صنایع چوب و کاغذ داشته باشد.

تحقیقات گسترده‌ای درباره ویژگی‌های بیومتری الیاف و ویژگی‌های آوندی در چوب تنه صنوبر تبریزی با اهداف متفاوت انجام شده که می‌توان به مقاله Oladi و همکاران (۲۰۱۸) درباره تأثیر رژیم‌های آبیاری بر ویژگی‌های آناتومی چوب و ابعاد الیاف دو صنوبر برجسته و مقاله Efhamisisi (۲۰۱۷) درباره ارتباط بین ابعاد الیاف و میزان رشد در صنوبر تبریزی اشاره کرد؛ اما در حقیقت چوب شاخه و تنه درختان ممکن است ازنظر ابعاد الیاف، ساختار آوندی و خواص مکانیکی و شیمیایی متفاوت باشند و بررسی این تفاوت‌ها اهمیت کاربردی دارد. برای نمونه، Mahdavi و همکاران (۲۰۰۳) در تحقیقی تحت عنوان بررسی ابعاد الیاف چوب تنه و شاخه ممرز گزارش کردند که طول الیاف چوب تنه بلندتر از شاخه است. البته روند تغییرات طول الیاف در طول شاخه روند منظمی ندارد. تغییرات طول الیاف با محور طولی همبستگی منفی و معنی‌دار دارد و با جهت شعاعی همبستگی معنی‌دار ندارد. باوجود بیشتر بودن ابعاد الیاف برای تنه درخت ممرز نسبت به شاخه آن، ضریب درهم‌رفتگی و رانکل فیبرهای شاخه بیشتر از تنه است. Kiaei و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی خواص بیومتری و شیمیایی چوب تنه و شاخه آلوچه بیان کردند که اختلاف معنی‌داری بین شاخه و تنه در خواص شیمیایی و ابعاد الیاف و ضرایب کاغذسازی به‌غیراز قطر الیاف و قطر حفره سلولی وجود ندارد. نتایج بررسی ویژگی‌های آناتومی، فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی چوب شاخه دو گونه *Tilia amurensis* و *Tilia mandshurica* و مقایسه آن با تنه آنها نشان داد که فیبرهای شاخه کوتاه‌تر، باریک‌تر و دارای نسبت رانکل پایین‌تر از تنه هستند، اما بیش از ۴۰ درصد بافت شاخه را تشکیل می‌دهند. دانسیته شاخه‌ها کم و مقاومت فشاری آن‌ها حدود ۳۰ مگاپاسکال گزارش شد. ترکیب شیمیایی نشان داد که شاخه‌ها به‌ویژه در *T. amurensis* به دلیل هولوسلولز بیشتر و لیگنین کمتر، ظرفیت مناسبی برای تولید خمیر و کاغذ دارند(Guo *et al.*, 2023).

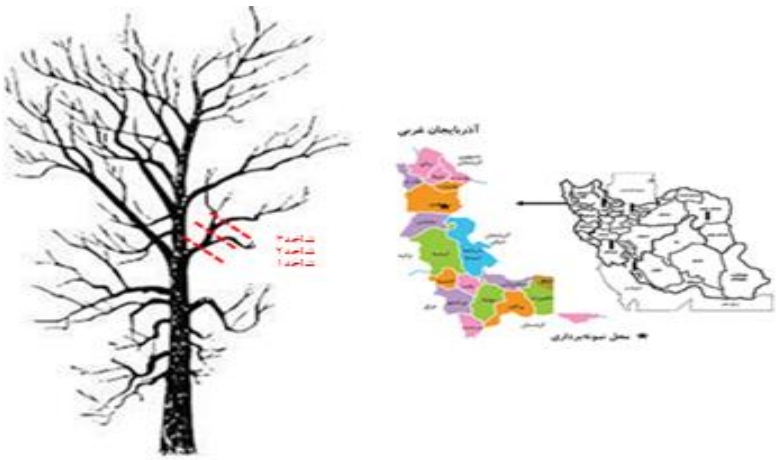
با توجه به جایگاه و نقش مهم صنوبرها به‌عنوان گونه تندرشد در برنامه‌های سیاستی جنگل‌کاری هر کشور، ضروری است که شناخت کامل و دقیقی از ویژگی‌های چوب آن (شاخه و تنه) انجام شود. شناخت این خواص می‌تواند به فهم بهتری از این منبع مهم مواد اولیه و بهبود استفاده‌های آن

در صنایع مختلف کمک کند. با توجه به تفاوت‌های احتمالی چوب تنه و شاخه و اهمیت کاربردی آنها، این تحقیق باهدف بررسی و مقایسه خواص آناتومی، بیومتری و شیمیایی چوب تنه و شاخه چوب صنوبر و روند تغییرات این خصوصیات در محور طولی شاخه انجام شد.

مواد و روش‌ها

مشخصات جغرافیایی محل نمونه‌برداری

برای این منظور تعداد سه اصله درخت صنوبری تبریزی بدون عیب با سن درختان ۱۵ سال و با قطر تقریبی بین ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر برای اندازه‌گیری ابعاد الیاف، ضرایب بیومتری، قطر آوندها و خواص شیمیایی به‌طور تصادفی در منطقه فنایی شهرستان خوی انتخاب و قطع گردید. شهر خوی با مختصات جغرافیایی ۳۸ درجه و ۳۳ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ درجه و ۵۸ دقیقه طول شرقی در شمال‌غربی ایران و در استان آذربایجان‌غربی واقع شده است. این شهر در ارتفاع حدود ۱۱۸۰ متر از سطح دریا واقع شده است و مساحت آن تقریباً ۵۵۳۰ کیلومترمربع می‌باشد. با توجه به موقعیت جغرافیایی و ارتفاع آن، خوی دارای آب‌وهوای نسبتاً سرد در زمستان و معتدل در تابستان است. پس از قطع درختان، تنه-های پوست‌کنی شده به آزمایشگاه انتقال داده شدند. سپس، از هر پایه، دیسک‌هایی به قطر ۵ سانتی‌متر از ارتفاع برابرسینه (قسمت تنه) و سه دیسک از قسمت شاخه (شاخه اول ۵۰ سانتی‌متر بالاتر از تقاطع تنه و شاخه، شاخه دوم ۵۰ سانتی‌متر بالاتر از شاخه اول و شاخه سوم ۵۰ سانتی‌متر بالاتر از شاخه دوم) قطع گردید. نمونه‌های آزمونی در سطح دیسک و نزدیک پوست بعد از حذف مغز درخت تهیه شد (شکل ۱). قطر شاخه‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۶/۸۳، ۶/۱۶ و ۶/۰۲ سانتیمتر است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی شهرستان خوی و نحوه تهیه نمونه‌های آزمونی

Figure 1. Geographic location of Khoy County and preparation of the test samples

وابری الیاف

روش Franklin (۱۹۴۵) یکی از تکنیک‌های متداول برای وابری الیاف و جداسازی دیواره‌های سلولی گیاهیست. در ابتدا، تراشه‌هایی به طول ۳-۱ سانتی‌متر و ضخامت ۳-۱ میلی‌متر در محلول اسید استیک و آب‌اکسیژنه به نسبت یک‌به‌یک مطابق با روش فرانکلین در لوله آزمایش ریخته و

محتوای تراشه و محلول در آون با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفتند. سپس، لوله‌های آزمایشی محتوای تراشه چوب و محلول از آون خارج و با آب مقطر شستشو داده شدند. نمونه‌های شسته‌شده را در آب مقطر غوطه‌ور نموده و با تکان دادن آن الیاف جداسازی شدند. پس از جداسازی کامل، یک قطره محلول سافرانین درون لوله آزمایش ریخته تا رنگ‌آمیزی الیاف انجام شود. برای اندازه‌گیری طول الیاف از میکروسکوپ دوچشمی الیمپوس و با استفاده از عدسی شیئی با بزرگنمایی X ۴ (به دلیل بلند بودن الیاف) و برای اندازه‌گیری قطر الیاف و قطر حفره سلولی از میکروسکوپ دوچشمی الیمپوس (Olympus) با استفاده از عدسی شیئی با بزرگنمایی X۴۰ استفاده گردید. درمجموع، ۲ نمونه از هر تیمار (۸ نمونه برای ۴ تیمار) و از هر نمونه ۳۰ عدد فیبر (۲۴۰ فیبر) برای مطالعه ابعاد الیاف اندازه‌گیری شد. در انتهای ضرایب کاغذسازی چوب صنوبر تبریزی شامل نسبت درهم‌رفتگی (Slenderness ratio) از تقسیم طول الیاف بر قطر الیاف، ضریب انعطاف‌پذیری (Flexibility ratio) از نسبت قطر حفره سلولی به قطر الیاف به درصد و نسبت رانکل (Runkel ratio) از تقسیم ضخامت دو دیواره سلولی بر قطر حفره سلولی محاسبه می‌شوند.

خواص شیمیایی

برای تعیین پودر، نمونه‌های تهیه‌شده از چوب تنه و شاخه‌ها به‌طور جداگانه آسیاب و غربال شدند. تهیه آرد چوب براساس استاندارد T 257-cm-85، مواد استخراجی قابل حل در آب گرم براساس استاندارد T207-cm-88، مواد استخراجی محلول در الکل – استن براساس استاندارد T 204-CM-88 و لیگنین براساس استاندارد T 222-om-88 و سلولز T 203 تعریف شده‌اند. مواد استخراجی محلول در آب گرم شامل ترکیباتی هستند که در چوب با آب داغ مانند قندها، تانن‌ها، صمغ‌ها، پکتین‌ها و برخی املاح معدنی حل می‌شوند. مواد استخراجی محلول در الکل استن شامل موم، چربی، فتواسترول، هیدروکربن‌های غیرفرار، کربوهیدرات با وزن مولکولی کم، نمک و مواد قابل حل در آب است. آزمایش‌های شیمیایی چوب برای هریک از ویژگی‌های یادشده ۳ بار تکرار شده است.

دانسیته خشک

تعداد ۱۵ نمونه چوبی (نزدیک پوست) از هر تیمار به مجموع ۶۰ نمونه مطابق با استاندارد ISO 3131 تهیه و در اتوکلاو در دمای ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفتند تا رطوبت کامل از بین برود. وزن خشک (با ترازو با دقت ۰/۰۰۱ گرم) و حجم خشک (با کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر) اندازه‌گیری شده و دانسیته خشک با تقسیم وزن خشک بر حجم خشک محاسبه شد.

قطر آوندها

روش استاندارد IAWA برای اندازه‌گیری قطر آوندها بر پایه مقطع‌برداری دقیق و سنجش میکروسکوپی است: ابتدا مقطع عرضی چوب با ضخامت یکنواخت ۱۵–۲۰ میکرون به‌وسیله میکروتوم تهیه شد و پس از رنگ‌آمیزی مناسب (سافرانین) و نصب دائم لام، نمونه تحت میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی X ۴۰ قرار گرفت. سپس تعداد آوندهای سالم، گرد و بدون شکستگی (۳۰ آوند در هر تیمار به مجموع ۱۲۰ آوند) انتخاب و میانگین قطر آوندها اندازه‌گیری شد.

روش تجزیه‌وتحلیل آماری

در این تحقیق، تأثیر نمونه‌های تهیه‌شده در چوب تنه و شاخه بر ویژگی‌های مختلف چوب صنوبر تبریزی با استفاده از آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه با نرم‌افزار SPSS 21 بررسی و در صورت معنی‌داری با آزمون چند دامنه‌ای دانکن گروه‌بندی و مقایسه شدند.

نتایج

آزمون تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر نمونه‌های چوبی (تنه و شاخه) بر طول الیاف، قطر الیاف، قطر حفره سلولی، ضخامت دیواره سلولی، سلولز، لیگنین، مواد استخراجی، نسبت درهم‌رفتگی، ضریب انعطاف‌پذیری، نسبت رانکل، دانسیته و قطر آوندها در سطح یک درصد معنی‌دار بود. میانگین و گروه‌بندی آنها برای هریک از چوب صنوبر تبریزی

در جدول ۱ نشان داده شده است.

ابعاد الیاف: طول الیاف در چوب تنه به مقدار ناچیزی بیشتر از شاخه است، به‌طوری‌که میانگین این صفت در تنه ۱/۱۵ میلی‌متر است که نسبت به میانگین طول الیاف در شاخه‌ها (سه نمونه شاخه) حدود ۰/۰۵ میلی‌متر بیشتر است. روند تغییرات طول الیاف در محور طولی از پایین به انتهای شاخه آن، نزولی است، به‌طوری‌که طول الیاف آن از ۱/۲۷ میلی‌متر به ۰/۹۵ میلی‌متر کاهش می‌یابد. قطر الیاف نیز در چوب تنه بزرگ‌تر از چوب شاخه است، به‌طوری‌که در چوب تنه قطر الیاف به ۲۵/۵ میکرومتر می‌رسد، درحالی‌که در چوب شاخه این مقدار برای نمونه‌های مختلف بین ۱۸ تا ۲۰ میکرومتر متغیر است. روند تغییرات قطر الیاف در محور طولی شاخه (از قطر انشعاب شاخه از تنه تا انتهای شاخه) نزولی است. ضخامت دیواره سلولی نیز در چوب تنه نسبت به شاخه بیشتر بوده، به‌طوری‌که ضخامت دیواره سلولی در چوب تنه ۴/۹۳ میکرومتر محاسبه شد. درحالی‌که میانگین ضخامت دیواره سلولی در طول شاخه از پایین به انتهای شاخه کاهش یافته، به‌طوری‌که مقدار آن از ۳/۶۷ تا ۴/۱۹ میکرومتر متغیر است. میانگین حفره سلولی نیز در چوب تنه (۱۵/۶۶ میکرومتر) بیشتر از شاخه صنوبر تبریزی (۱۰/۵۱ میکرومتر) است. میانگین قطر حفره سلولی با افزایش طول شاخه از پایین (۱۲/۴۵ میکرومتر) به انتهای شاخه (۱۰/۹۵ میکرومتر) حدود ۱۳/۷ درصد کاهش نشان می‌دهد.

ضرایب کاغذسازی: مطابق با جدول ۱، میانگین ضریب درهم‌رفتگی در چوب شاخه بیشتر از چوب تنه است. روند تغییرات این صفت در محور طولی از انشعاب شاخه از تنه تا انتهای شاخه نزولی است، به‌طوری‌که مقدار آن از ۶۲ به ۵۲ می‌رسد. ضریب انعطاف‌پذیری چوب تنه بیشتر از شاخه است، به‌طوری‌که مقدار آن در تنه ۶۱ درصد و در شاخه در محدوده ۵۷ تا ۶۰ درصد قرار دارد. میزان ضریب انعطاف‌پذیری در محور طولی شاخه از پایین به انتهای شاخه کاهش یافت. همچنین نسبت رانکل در شاخه بیشتر از چوب تنه است و با افزایش طول شاخه از پایین به انتهای آن، مقدار این ضریب روند نزولی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- میانگین خواص چوب تنه و شاخه صنوبر تبریزی

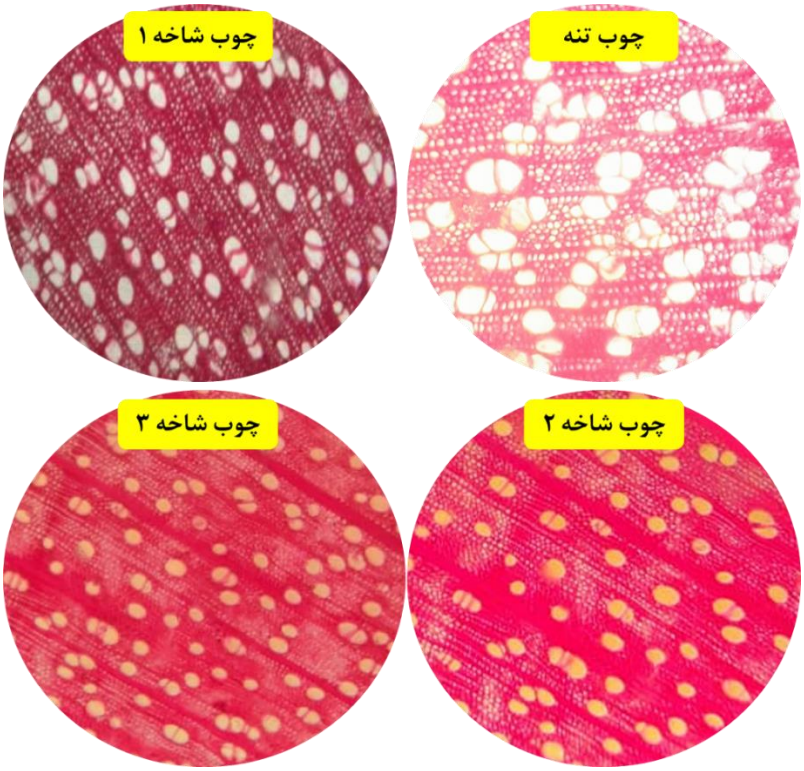
Table 1- Average of poplar properties of stem and branch wood

Wood properties	Stem wood	Branch wood			Statistical results
		1	2	3	
Fiber length (mm)	1.15b	1.27a	1.08c	0.95d	**
Fiber diameter (µm)	25.54a	20.49b	19.49c	18.30d	**
Lumen diameter (µm)	15.66a	12.45b	11.11c	10.95c	**
Cell wall thickness (µm)	4.93a	4.02b	4.19c	3.67c	**
Slenderness ratio	45.09d	62.12a	55.93b	52.44c	**
Flexibility coefficient (%)	61.40a	60.93a	57.10c	59.96b	*
Runkel ratio	0.63b	0.65a	0.76a	0.68b	**
Wood density (g.cm-3)	0.41c	0.45a	0.46a	0.43b	**
Vessel diameter (µm)	133a	112b	98c	76d	**
Cellulose (%)	42.30a	40.50b	39.50c	37.66d	**
Lignin (%)	19.03b	21.50a	17.55c	15.63d	**
Alcohol acetone extractives (%)	2.02a	1.33b	1.08c	0.87d	**
Hot water extractive (%)	3.12a	1.02b	0.923c	0.77d	**

**significant at 0.01; *significant at 0.05

دانسیته: نتایج نشان داد که دانسیته چوب تنه در مقایسه با چوب شاخه کمتر است، به‌طوری‌که میانگین دانسیته در چوب تنه ۰/۴۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و برای چوب شاخه ۰/۴۴۶ گرم بر سانتیمتر مکعب محاسبه شد. میانگین دانسیته چوب صنوبر تبریزی در طول شاخه از پایین به انتهای آن در حدود ۴ درصد کاهش یافته است.

قطر آوند: ساختار صنوبر تبریزی در مقطع عرضی نشان داد که آوندهای چوبی در تنه و شاخه به‌صورت حفره‌های بزرگ و گرد در سراسر دایره رویش سالیانه پراکنده شده‌اند (شکل ۲). قطر آوندها به‌طورکلی در چوب تنه بزرگ‌تر از چوب شاخه به نظر می‌رسند، به‌طوری‌که در چوب تنه قطر آوند به ۱۳۳ میکرومتر می‌رسد، درحالی‌که در چوب شاخه‌ها این مقدار بین ۷۶ تا ۱۱۲ میکرومتر متغیر است. تغییرات قطر سلول‌های آوندی در ناحیه چوب بهاره و پاییزه زیاد نیست که نشان‌دهنده پراکنده بودن آوند گونه صنوبر تبریزی است. میانگین قطر آوند در محور طولی شاخه از پایین به انتهای شاخه کاهش می‌یابد، اما تعداد آوندها در شاخه بیشتر از تنه درختان است. به‌عبارتی‌دیگر، چوب شاخه آوندهایی با قطر بزرگ‌تر و تعداد بیشتر از تنه درختان متمایز می‌شوند.



شکل ۲- مقطع عرضی چوب تنه و شاخه گونه صنوبر تبریزی (۴۰X)

Figure 2. cross-section of poplar stem and branch wood (40X)

خواص شیمیایی

نتایج نشان داد که میزان سلولز در چوب تنه (۴۲/۳ درصد) نسبت به چوب شاخه‌ها بیشتر است که نشان‌دهنده ساختار متراکم‌تر و پایدارتری در تنه نسبت به شاخه‌ها است. روند تغییرات سلولز در محور طولی شاخه از پایین به انتهای آن از ۴۰/۵ درصد به ۳۷/۶۶ درصد نزولی است. میزان لیگنین غیرمحلول در اسید در چوب تنه ۱۹/۰۳ درصد بود، درحالی‌که در محور طولی شاخه‌ها از ۲۱/۵ درصد به ۱۵/۶۳ درصد کاهش می‌یابد. میزان مواد استخراجی محلول در الکل–استون که نشانگر حضور ترکیبات غیرساختاری مانند رزین‌ها، تانن‌ها و برخی ترکیبات فنولی است، در چوب تنه (۲/۰۲ درصد) نسبت به شاخه‌ها بیشتر بوده و در محور طولی شاخه‌ها به‌تدریج از ۱/۳۳ درصد به ۰/۸۷ درصد کاهش یافته

است. روند مشابهی در مواد استخراجی محلول در آب گرم دیده می‌شود، به‌طوری‌که مقدار آن در چوب تنه (۳/۱۳ درصد) بیشتر از شاخه‌ها است و در محور طولی شاخه‌ها از ۱/۰۲ درصد به ۰/۷۷ درصد کاهش می‌یابد.

بحث

در این تحقیق خواص آناتومی، شیمیایی و دانسیته چوب تنه و ساقه صنوبر تبریزی و روند تغییرات آنها در طول شاخه در رویشگاه خوی بررسی شد. طول الیاف یکی از بنیادی‌ترین ویژگی‌های آناتومیکی چوب است که نقش مستقیمی در استحکام مکانیکی و کیفیت خمیرکاغذ دارد. الیاف بلندتر معمولاً سطح اتصال بیشتری ایجاد می‌کنند و باعث افزایش مقاومت کششی و پارگی محصولات کاغذی می‌شوند (Riki *et al.*, 2019). قطر الیاف چوب یکی از شاخص‌های مهم آناتومی چوب است که بر استحکام، انعطاف‌پذیری و کیفیت خمیرکاغذ تأثیر می‌گذارد. ضخامت دیواره سلولی یکی از مهمترین ویژگی‌های آناتومیکی الیاف چوب است که نقش تعیین‌کننده‌ای در استحکام، سختی، انعطاف‌پذیری و دانسیته چوب دارد. هر چه دیواره سلولی ضخیم‌تر باشد، الیاف مقاومت بیشتری در برابر فشار و کشش نشان می‌دهند، اما در عوض از میزان انعطاف‌پذیری آن‌ها کاسته می‌شود (Carrillo *et al.*, 2015). قطر حفره سلولی (لومن) یکی از ویژگی‌های تعیین‌کننده در انتقال آب و مواد غذایی در بافت چوب است. قطر آوندها تأثیر مهمی بر خواص فیزیکی و مکانیکی چوب دارد. آوندهای بزرگ‌تر معمولاً باعث افزایش هدایت آب و شیره چوبی می‌شوند، اما می‌توانند دانسیته چوب را کاهش داده و استحکام مکانیکی را کمتر کنند. بعکس، آوندهای ریز و کوچک‌تر باعث چوب متراکم‌تر با مقاومت بیشتر در برابر فشار و شکست می‌شوند، اگرچه هدایت آب کاهش می‌یابد (Plavcova *et al.*, 2019).

نتایج نشان داد که گونه صنوبر تبریزی به‌طورکلی دارای الیاف بلند و نسبتاً ظریفی است که در صنایع خمیرکاغذ و کاغذسازی کاربرد زیادی دارد. یافته ها تحقیق حاکی از آن است که ابعاد الیاف در تنه بیشتر از شاخه بوده و روند تغییرات آن در محور طولی شاخه از محل انشعاب از تنه به نوک شاخه نزولی است.

بیشتر بودن ابعاد الیاف در تنه نسبت به شاخه را می‌توان به بلوغ بیشتر چوب تنه، سهم کمتر چوب جوان و نقش مکانیکی مهم‌تر آن در پایداری درخت نسبت داد؛ در حالی که شاخه‌ها به دلیل سهم بیشتر چوب جوان و نقش فعال‌تر در آبرسانی، معمولاً ساختار ظریف‌تری دارند. به طورکلی شاخه‌ها از پهنای دوایر رویشی باریک‌تر (Bowyer *et al.*, 2003)، قطر حفره سلولی کوچک‌تر، دیواره سلولی نازک‌تر و طول سلول کوچک‌تر (Hakkila, 1989) نسبت به ساقه‌ها برخوردارند. طول سلول‌های شاخه‌ها با افزایش قطر آن‌ها افزایش می‌یابد؛ احتمالاً به این دلیل که شاخه‌های با قطر کمتر دارای سهم بیشتری از چوب جوان هستند. همچنین طول الیاف در محور شعاعی از مغز به سمت پوست شاخه با دامنه تغییرات بزرگ‌تری نسبت به تنه افزایش می‌یابد (Vurdu and Bensend, 1989). شاخه‌ها از درصد فیبر و پارانشیم طولی بالاتر در پهن‌برگان و تعداد کانال صمغی بیشتری در سوزنی‌برگان نسبت به ساقه‌ها برخوردار هستند. همچنین در شاخه‌ها تعداد پره‌های چوبی بیشتر، قطر آوندها کوچک‌تر ولی یا تعداد بیشتر نسبت به ساقه‌ها متمایز می‌شوند (Bowyer *et al.*, 2003).

نتایج نشان داد که دانسیته در چوب شاخه بیشتر از ساقه است. اختلاف دانسیته بین تنه و شاخه بسته به نوع گونه چوبی به طور غیرقابل پیش‌بینی متفاوت است (Hakkila 1989). در سوزنی‌برگان تغییرات دانسیته در چوب شاخه در حدود ۵ تا ۲۰ درصد کوچک‌تر از ساقه است (Philips *et al.*, 1967). در مورد چوب تنه و شاخه صنوبر تبریزی مشاهده شده است که قطر آوندها در شاخه کوچکتر از چوب تنه است. وقتی آوندها کوچکتر می‌شوند، درخت برای حفظ ظرفیت آبرسانی، باید تعداد بیشتری آوند بسازد، تا افت قطر کوچکتر آوندها را جبران نماید. این افزایش تعداد سلول‌ها در کنار کاهش فضاهای حفره‌ای آوندها، عملاً باعث بالا رفتن سهم دیواره سلولی و در نتیجه افزایش دانسیته در شاخه می‌شود.

در مورد چوب تنه و شاخه صنوبر تبریزی مشاهده شده است که قطر آوندها در شاخه کوچک‌تر از چوب تنه است. وقتی آوندها کوچک‌تر می‌شوند درخت برای حفظ ظرفیت آب‌رسانی، باید تعداد بیشتری آوند بسازد تا افت قطر کوچک‌تر آوندها را جبران نماید.

ضریب درهم‌رفتگی یکی از شاخص‌های مهم در بررسی رفتار فیزیکی و مکانیکی الیاف چوب و میزان درهم‌تنیدگی آن‌ها در ساختار چوب یا فراورده‌های لیگنوسلولزی (به‌ویژه کاغذسازی) است. افزایش آن می‌تواند در اتصال شبکه الیاف تأثیر مؤثری را ایفا کند. محدوده قابل‌قبول ضریب درهم‌رفتگی برای تولید کاغذ بیش از ۳۳ است (Xu *et al.*, 2006, Enayati *et al.*, 2006) که میانگین این ضریب در چوب تنه و شاخه در مقدار بالاتری از محدوده قابل‌قبول قرار دارد.

چهار گروه برای طبقه‌بندی فیبر ازنظر ضریب انعطاف‌پذیری وجود دارد: ۱. فیبرهای خیلی الاستیک که مقدار ضریب انعطاف‌پذیری آن بیش از ۷۵ باشد، ۲. فیبرهای الاستیک با ضریب بین ۷۵-۵۰، ۳. فیبرهای سخت و سفت با نسبت بین ۵۰-۳۰ و ۴. فیبرهای با سفتی بالا که میزان ضریب آن کمتر از ۳۰ باشد (Bektas *et al.*, 1999). مقدار ضریب انعطاف‌پذیری چوب تنه و شاخه در محدوده قابل‌قبول فیبرهای الاستیک در محدوده ۷۵-۵۰ درصد قرار دارد.

نسبت رانکل بیانگر نسبت ضخامت دیواره سلولی به قطر حفره الیاف است و نقش مهمی در رفتار الیاف هنگام کاغذسازی دارد. مقادیر کمتر از ۱ نشان‌دهنده الیاف نازک دیواره و انعطاف‌پذیر هستند که توانایی فشرده شدن و ایجاد سطح تماس بیشتر برای پیوند الیاف را دارند. این ویژگی برای محصولات چاپی باکیفیت، روزنامه و کاغذهای بهداشتی مناسب است. نسبت‌های بالای ۱ مربوط به الیاف ضخیم و توخالی است که کمتر فشرده می‌شوند و کاغذ با حجم بیشتر و استحکام مکانیکی بالاتر تولید می‌کنند و مناسب بسته‌بندی و مقوا است؛ بنابراین، انتخاب نسبت رانکل متناسب با نوع محصول، نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت و ویژگی‌های کاغذ دارد (San *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2006). میانگین این ضریب در چوب شاخه و تنه (۰/۶۳ تا ۰/۷۶) در محدوده قابل‌قبول برای تولید کاغذهای چاپی باکیفیت یادشده قرار دارد.

مقایسه میانگین‌های ضرایب کاغذسازی فیبرهای شاخه با تنه نشان داد که با وجود کمتر بودن ابعاد فیبر شاخه نسبت به تنه درخت اصلی، میانگین ضریب درهم‌رفتگی و ضریب مقاومت به پارگی (رانکل) فیبرهای شاخه بیشتر از تنه است و فقط ضریب انعطاف‌پذیری فیبرهای تنه بیشتر از شاخه است که با نتایج تحقیقات Mahdavi و همکاران (۲۰۰۳) در مورد چوب تنه و شاخه ممرز مطابقت دارد. این موضوع به لحاظ امکان استفاده عملی از چوب شاخه در صنایع چوب و کاغذ می‌تواند حائز اهمیت باشد.

نتایج ویژگی‌های شیمیایی نشان داد که چوب تنه صنوبر دارای مقدار بالاتر سلولز (۴۲/۳ درصد) نسبت به شاخه‌ها است. سلولز، به‌عنوان اصلی‌ترین پلی‌ساکارید دیواره سلولی، نقش تعیین‌کننده‌ای در استحکام مکانیکی و پایداری چوب دارد (Rowell, 2012). افزایش سلولز در تنه درخت با عملکرد مکانیکی آن همخوانی دارد؛ تنه به‌عنوان ستون اصلی درخت، نیاز به مقاومت کششی و فشاری بالاتر دارد، درحالی‌که شاخه‌ها، به‌ویژه بخش‌های انتهایی، با درصد کمتر سلولز از انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردارند تا رشد و خمیدگی طبیعی در طول شاخه را ممکن سازند. روند نزولی سلولز در طول شاخه از پایین به انتهای شاخه نشان‌دهنده تغییرات فیزیولوژیکی و ساختاری در طول شاخه است که با کوتاه‌تر شدن سلول‌ها و نازک‌تر شدن دیواره‌های سلولی همراه است.

میزان لیگنین غیرمحلول در اسید در تنه نسبت به شاخه‌ها بیشتر بود و در طول شاخه‌ها از پایین به انتهای شاخه کاهش یافت. لیگنین ماده‌ای غیرکربوهیدراتی است که باعث سختی و مقاومت دیواره سلولی در برابر فشار و پوسیدگی می‌شود (Sjostrom, 1993). کاهش لیگنین در

انتهای شاخه‌ها نشان‌دهنده کاهش محتوای لیگنوسلولزی و ساختار ضعیف‌تر است که با نقش مکانیکی کمتر این بخش‌ها در تحمل وزن درخت هماهنگ است. کاهش میزان سلولز و لیگنین در چوب شاخه‌ها می‌تواند با افزایش سهم نسبی همی‌سلولزها همراه باشد. همی‌سلولزها با افزایش انعطاف‌پذیری دیواره سلولی و تسهیل رفتار خمشی، نقش مهمی در رشد و عملکرد مکانیکی شاخه‌ها ایفا می‌کنند؛ بنابراین، تفاوت ترکیب شیمیایی بین تنه و شاخه را می‌توان به‌عنوان یک سازوکار سازگاری بین نیاز به استحکام در تنه و نیاز به انعطاف‌پذیری در شاخه‌ها تفسیر کرد (Rowell, 2012).

مواد استخراجی محلول در الکل–استون و آب گرم نیز در تنه بیشتر از شاخه‌ها بود و در طول شاخه‌ها از انشعاب تنه تا انتهای شاخه کاهش یافت. این ترکیبات شامل رزین‌ها، تانن‌ها و برخی ترکیبات فنولی هستند که علاوه بر نقش حفاظتی در برابر میکروارگانیسم‌ها، در قابلیت چسبندگی و فراوری شیمیایی چوب نیز مؤثرند. این کاهش می‌تواند نشان‌دهنده کاهش ترکیبات هیدروفیل مانند همی‌سلولزها و برخی ترکیبات فنولی در بخش‌های انتهایی شاخه باشد. درمجموع، این داده‌ها بیانگر آن است که چوب تنه به دلیل درصد بیشتر سلولز و لیگنین و میزان بیشتر مواد استخراجی، ساختار متراکم‌تر و پایدارتری نسبت به شاخه دارد، درحالی‌که شاخه‌ها، به‌ویژه در بخش‌های انتهایی، دارای ترکیب شیمیایی ضعیف‌تر و میزان بیشتری از ترکیبات محلول هستند (Rowell, 2012).

نتیجه‌گیری

تنه‌ها از الیاف بلندتر، قطر الیاف بزرگ‌تر، درصد بالاتر سلولز و ضرایب انعطاف‌پذیری مطلوب‌تر نسبت به شاخه‌ها برخوردارند که این ویژگی‌ها درمجموع موجب ایجاد ساختار مستحکم، پایدار و دارای مقاومت مکانیکی بالا در این بخش از درخت می‌شود. افزایش طول الیاف و قطر بیشتر آن‌ها در تنه، باعث افزایش پیوستگی بین الیاف و ایجاد شبکه سلولی منسجم‌تر می‌شود؛ موضوعی که نقش مهمی در تحمل تنش‌های فشاری و خمشی وارد بر تنه دارد. علاوه بر این، درصد بالاتر سلولز و میزان متعادل‌تر لیگنین در تنه، نشان‌دهنده بلوغ فیزیولوژیکی و تکامل ساختاری این بخش است، زیرا تولید سلولز بیشتر منجر به استحکام در راستای طولی و تولید لیگنین کافی موجب افزایش سختی و مقاومت در برابر کاهش رطوبت و تجزیه زیستی می‌شود.

در مقابل، شاخه‌ها به‌ویژه بخش‌های انتهایی آن‌ها دارای ساختار ضعیف‌تر، دیواره سلولی نازک‌تر، آوندهای کوچک‌تر و الیاف کوتاه‌تر هستند و ازنظر شیمیایی نیز محتوای سلولز و لیگنین کمتری دارند. این ویژگی‌ها شاخه‌ها را به‌طور طبیعی انعطاف‌پذیرتر و سبک‌تر می‌کند، موضوعی که برای نقش مکانیکی آن‌ها در تحمل نیروهای خمشی ناشی از باد، وزن برگ‌ها و برف ضروریست. این تغییرات، نوعی سازگاری آناتومیکی و شیمیایی محسوب می‌شود؛ شاخه‌ها نیاز به مقاومت زیاد ندارند، بلکه به انعطاف‌پذیری و قابلیت حرکت بدون شکستگی نیاز دارند. کاهش لیگنین در بخش‌های انتهایی شاخه‌ها نیز نشان می‌دهد که سختی دیواره سلولی کمتر است و این ویژگی امکان خم شدن و حرکت آزادانه شاخه‌ها را فراهم می‌سازد. افزون بر این، وجود چوب‌کششی در شاخه‌ها نقش مهمی در ایجاد این انعطاف‌پذیری و تنظیم راستای رشد دارد.

براساس داده‌های به‌دست‌آمده، مشخص شد که تنه صنوبر تبریزی طول الیاف و میزان سلولز بیشتری دارد که ازنظر کیفیت خمیر و تولید کاغذ، آن را به منبع اصلی تبدیل می‌کند. بااین‌حال، شاخه‌ها در برخی ویژگی‌ها مانند دانسیته، نسبت درهم‌رفتگی، نسبت رانکل و میزان کمتر لیگنین و مواد استخراجی عملکرد بهتری نشان دادند که می‌تواند فرایند خمیرگیری را تسهیل کرده و کیفیت کاغذ تولیدی را تحت تأثیر مثبت قرار دهد؛ بنابراین، اگرچه تنه همچنان بهترین گزینه برای کاغذسازی است اما شاخه‌ها با توجه به ویژگی‌های مطلوب خود می‌توانند به‌عنوان منبع مکمل در شرایط کمبود چوب استفاده شوند.

References

-Bektas, I., Tutus, A. & Eroglu, H., 1999. A study of the suitability of Calabrian pine (Pinus brutia Ten.) for pulp and paper manufacture. Turk Journal of Agriculture and Forestry, 23, 589–599.

-Benetka, V., Bartáková, I. & Mottl, J., 2002. Productivity of Populus nigra L. ssp. nigra under short-rotation culture in marginal areas. Biomass and Bioenergy, 23(5), 327–336. https://doi.org/10.1016/s0961-9534(02)00065-x

-Bowyer, J.L., Shmulsky, R. & Haygreen, J.G., 2003. Forest products and wood science: An introduction (4th ed.). Blackwell Publishing.

-Carrillo, I., Aguayo, M.G., Valenzuela, S., Mendonça, R.T. & Elissetche, J.P., 2015.Variations in wood anatomy and fiber biometry of Eucalyptus globulus genotypes with different wood density. Wood Research, 60(1), 1–10. https://doi.org/10.1080/02773810802607559

-Enayati, A.A., Hamzeh, Y., Mirshokraie, S.A. & Molaii, M., 2009. Papermaking potential of canola stalks. Bioresource, 4(1), 245–256. https://doi.org/10.15376/biores.4.1.245-256

-Efhamisisi, D., 2017. The relationships between fiber dimensions and growth rate in Populus nigra. Journal of Wood and Forest Science and Technology, 23(2), 169-184.

-Franklin, G.L., 1945. Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites, and a new macerating method for wood. Nature, 155, 51. https://doi.org/10.1038/155051a0

-Guo, P., Zhao, X., Feng, Q. & Yang, Y., 2023. Branchwood properties of two Tilia species collected from natural secondary forests in northeastern China. Forests, 14(4), Article 760. https://doi.org/10.3390/f14040760.

-Hakkila, P., 1989. Utilisation *of residual forest biomass*. Springer Verlag.

-Hilton, M., 2001. Design for sustainable development: Success factors. European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions.

-ISO 3131, 1975. Wood. Determination of density. International Organization for Standardization.

-Johansson, T. & Karačić, A., 2011. Increment and biomass in hybrid poplar and some practical implications. Biomass and Bioenergy, 35(5), 1925–1934. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.040

-Kiaei, M., Tajik, M. & Vaysi, R., 2014. Chemical and biometrical properties of plum wood and its application in pulp and paper production. Maderas. Ciencia y Tecnología, 16(3), 313–322. https://doi.org/10.4067/S0718-221X2014005000024

-Mahdavi, S. & Habibi, M.R., 2004. Comparative investigation on fiber dimensions of trunk and branch wood of Carpinus betulus L. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 19(2), 243–258. https://sid.ir/paper/109625/en

-Ma, J., Gao, Y., Jiang, T. & Tian, F., 2021. Excellent anti-lung cancer activity of Populus nigra and phylogenetic analysis. Journal of Oleo Science, 70(12), 1783–1789. https://doi.org/10.5650/jos.ess21220

-Mozafarian, V., 2004. Trees and shrubs of Iran. Farhange Moaser Press.

-Philips, D.R., Clark, A. & Taras, M.A., 1976. Wood and bark properties of southern pine branches. Wood Sci, 8(3), 164–169.

-Oladi, R., Heidari, L., Bagheri, R. & Pourtahmasi, K. 2018. Effect of different irrigation regimes on wood anatomical features and fiber biometry of two elite poplars. Journal of Wood and Forest Science and Technology, 25(2), 153-164.

-Plavcová, L., Gallenmüller, F., Morris, H., Khatamirad, M., Jansen, S. & Speck, T., 2019. Mechanical properties and structure–function trade-offs in secondary xylem of young roots and stems. Journal of Experimental Botany, 70(14), 3679–3691. https://doi.org/10.1093/jxb/erz286

-Riki, J.T.B., Sotannde, O.A. & Oluwadare, A.O., 2019. Anatomical and chemical properties of wood and their practical implications in pulp and paper production: A review. Journal of Research in Forestry, Wildlife & Environment, 11(3), 358-368

-Rowell, R.M., 2012. Handbook of wood chemistry and wood composites (2nd ed.). CRC Press.

-Sabeti, H., 2002. Forests, trees and shrubs of Iran. Yazd University Press.

-San, H.P., Long, L.K., Zhang, C.Z., Hui, T.C., Seng, W. V., Lin, F.S., Hun, A.T. & Fong, W.F., 2016. Anatomical features, fiber morphological, physical and mechanical properties of three-year-old new hybrid Paulownia: Green Paulownia. Research Journal of Forest, 10, 30–35. https://doi.org/10.3923/rjf.2016.30.35

-Sjöström, E., 1993. Wood chemistry: Fundamentals and applications (2nd ed.). Academic Press.

-Streck, L., Rombauts, S., Jansson, S., Sterky, F., Rouzé, P. & Van de Peer, Y., 2005. EST data suggest that poplar is an ancient polyploid. New Phytologist, 167(1), 165–170. https://doi.org/ 10.1111/j.1469-8137.2005.01378.x

-Vurdu, H. & Bensend, D.W., 1979. Specific gravity and fiber length in European black alder roots, branches and stems. Wood Sci, 12(2), 103–105.

-Xu, F., Zhong, X.C., Sun, R.C. & Lu, Q., 200). Anatomy, ultra structure, and lignin distribution in cell wall of Caragana korshinskii. Industrial Crops and Products, 24, 186–193. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2006.04.002