Research Article

Iranian Journal of Wood and Paper Industries
Vol. 17, No. 1, Page 100 - 112 (2026)

DOI: 10.22034/ijwp.2025.2072213.1728

The influence of soil physical and chemical characteristics on the biometrical and mechanical properties of *Pinus eldarica* wood

Majid Kiaei[1*]

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

Received: October 2025 Accepted: December 2025

Abstract

Problem definition and objectives: Soil is one of the important site factors that affects wood properties. Precise understanding of its influence on wood characteristics is essential for optimizing forestry practices and better utilization of wood resources. The present study aimed to investigate the effect of altitude and the physical and chemical properties of soil on the biometry and mechanical characteristics of eldar pine (*Pinus eldarica*) wood in the western region of Mazandaran province.

Methodology: To this end, 9 healthy trees were selected from three altitude levels of 500, 1200, and 1400 meters, and disc samples were taken at breast height. A soil profile sample was collected from the base of each tree. Wood properties measured included density, modulus of rupture, compression strength parallel to the grain, tracheid length and diameter, and cell wall thickness. Simultaneously, soil characteristics such as texture, pH, macro-and micronutrients, organic matter, lime content, and electrical conductivity were evaluated.

Results: The results of analysis of variance showed that altitude had a significant effect on most wood properties, with many mechanical traits, including static bending and compression strength parallel to the grain, reaching their highest values at 1200 meters, while density and cell wall thickness were highest at 500 meters. Soil properties indicated that the silty-clay texture at 500 meters had a higher capacity for water and nutrient retention but offered limited drainage, whereas the clay-loam texture at 1200 meters, with relatively low acidity and the presence of key elements such as iron, manganese, and copper, provided optimal conditions for wood growth and development. At 1400 meters, an increase in sand content accompanied by decreases in nutrients and calcium led to reduced wood quality. The results of Pearson's correlation analysis and the multiple regression model showed that wood density had a positive relationship with soil calcium and a negative relationship with sand. The modulus of rupture, bending strength, and tracheid length exhibited positive correlations with clay and copper, while tracheid diameter showed a positive relationship with soil copper, nitrogen, and iron. These findings highlight the key role of soil conditions, especially clay, copper, and calcium, in improving the biometry and mechanical quality of wood.

Conclusion: The altitude of 1200 meters, due to balanced soil texture, suitable pH, and micronutrient richness, provides the best growth conditions for eldar pine and can be recommended as the optimal elevation for afforestation of this species.

Keywords: biometry properties, mechanical properties, soil chemical properties, soil physical properties.

تأثیر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک بر خواص بیومتری و مکانیکی چوب کاج الداریکا

مجید کیائی [۱*]

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

تاریخ دریافت: مهر ۱۴۰۴ تاریخ پذیرش: دی ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: خاک یکی از عوامل مهم رویشگاهی است که بر خواص چوب مؤثر است. شناخت دقیق تأثیر آن بر ویژگی‌های چوب، برای بهینه‌سازی فرآیندهای جنگل‌داری و استفاده بهتر از منابع چوبی ضروری است. پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر ارتفاع از سطح دریا و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر خصوصیات بیومتری و مکانیکی چوب کاج الدار (*Pinus eldarica*) در غرب استان مازندران انجام شد.

مواد و روشها: بدین منظور، تعداد ۹ اصله درخت سالم از سه کلاسه ارتفاعی شامل ۵۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۴۰۰ متر انتخاب و دیسک‌هایی از ارتفاع برابر سینه تهیه شد. در هر پایه درخت یک پروفیل خاک نمونه‌برداری شدند. در نهایت، ویژگی‌های چوب شامل دانسیته خشک، مدول گسیختگی، مقاومت فشاری موازی الیاف، طول و قطر تراکئید و ضخامت دیواره سلولی اندازه‌گیری شد و همزمان خصوصیات خاک شامل بافت، اسیدیته، عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف، مواد آلی، آهک و هدایت الکتریکی مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج: نتایج آزمون تجزیه واریانس نشان داد که ارتفاع تأثیر معناداری بر اغلب ویژگی‌های چوب دارد، به‌گونه‌ای که در ارتفاع ۱۲۰۰ متر، بسیاری از ویژگی‌های مکانیکی از جمله مقاومت خمشی و فشاری در بالاترین سطح مشاهده شد، در حالی‌که دانسیته و ضخامت دیواره سلولی در ارتفاع ۵۰۰ متر بیشترین مقدار را داشتند. بررسی خصوصیات خاک نیز بیانگر آن بود که بافت سیلتی–رسی در ارتفاع ۵۰۰ متر ظرفیت بالاتری برای نگهداری آب و عناصر غذایی داشت، اما زهکشی محدودتری فراهم می‌کرد، در حالی که در ارتفاع ۱۲۰۰ متر ترکیب رسی لوم با اسیدیته نسبتاً پایین و حضور عناصر مهمی چون آهن، منگنز و مس شرایط بهینه‌ای برای رشد و توسعه چوب فراهم نمود. در ارتفاع ۱۴۰۰ متر افزایش درصد شن همراه با کاهش عناصر غذایی و کلسیم منجر به افت کیفیت چوب شد. نتایج تحلیل همبستگی پیرسون و مدل چندگانه نشان داد که دانسیته چوب با کلسیم خاک رابطه مثبت و با شن رابطه منفی دارد، مدول خمشی، مقاومت خمشی و طول تراکئید با رس و مس همبستگی مثبت نشان داد و همچنین قطر تراکئیدها رابطه مثبتی با مس، نیتروژن و آهن خاک داشتند. این یافته‌ها بیانگر نقش کلیدی شرایط خاک، به‌ویژه رس، مس و کلسیم، در بهبود کیفیت بیومتری و مکانیکی چوب هستند.

نتیجه‌گیری: ارتفاع ۱۲۰۰ متر به دلیل تعادل بافت خاک، شرایط اسیدیته و غنای عناصر ریزمغذی، بهترین شرایط رویشی را برای کاج الدار فراهم کرده و می‌تواند به‌عنوان ارتفاع مناسب برای توسعه جنگل‌کاری‌های این گونه معرفی شود.

واژه های کلیدی: خواص بیومتری، خواص مکانیکی، خواص فیزیکی خاک، خواص شیمیایی خاک.

مقدمه

با افزایش جمعیت و در پی آن رشد تقاضا برای فرآورده‌های چوبی، تأمین مواد اولیه مورد نیاز صنایع وابسته به چوب با چالش جدی روبه‌رو شده است. به منظور جبران این کمبود، استفاده از گونه‌های تند رشد در برنامه‌های جنگل‌کاری مورد توجه قرار گرفته است. در میان این گونه‌ها، سوزنی‌برگان به دلیل توان سازگاری با شرایط اکولوژیکی گوناگون، رشد بالا و قابلیت مصرف گسترده در صنایع چوب و کاغذ، از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. در ایران نیز سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور از سال ۱۳۳۸ با هدف گسترش پوشش جنگلی و افزایش تولید چوب، اقدام به کشت گونه‌های غیربومی مختلف نموده است. در میان گونه‌های معرفی‌شده، جنس کاج‌ها سهم قابل توجهی در طرح‌های جنگل‌کاری داشته‌اند؛ زیرا این درختان با نیاز آبی نسبتاً کم، توانایی رشد در خاک‌های سبک، شنی و فقیر از مواد غذایی را دارند. از میان گونه‌های کاج، کاج الدار به عنوان یکی از گونه‌های تند رشد و مقاوم شناخته می‌شود. خاستگاه طبیعی این گونه کشور گرجستان بوده و در ارتفاعات ۲۰۰ تا ۵۰۰ متر از سطح دریا می‌روید، جایی که توده‌های خالصی از آن با وسعتی حدود ۱۱۰ هکتار وجود دارد [۱]. این گونه در طرح‌های جنگل‌کاری شهرستان چالوس، واقع در غرب استان مازندران، مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به گذشت زمان و استقرار کامل توده‌ها، ضرورت دارد بررسی جامعی از ویژگی‌های چوب این گونه در شرایط مختلف محیطی و خاکی انجام شود تا قابلیت‌های واقعی آن در جنگل‌کاری‌های شمال کشور مشخص گردد.

در فرآیند شکل‌گیری سلول‌ها و بافت چوب، عوامل ژنتیکی و محیطی نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. عوامل محیطی شامل شرایط اقلیمی (مانند دما، نور، رطوبت نسبی، باد و میزان بارندگی)، ویژگی‌های فیزیوگرافیکی (ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت دامنه)، عوامل ادافیکی (خاک) و زیستی (نقش انسان، گیاهان، جانوران و میکروارگانیسم‌ها هستند[۲]. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ترکیب فیزیکی و شیمیایی خاک و نیز میزان مواد معدنی موجود در آن می‌تواند تأثیر چشمگیری بر ویژگی‌های چوب از جمله دانسیته، ابعاد سلولی، درصد لیگنین و سلولز و ساختار آوندی و پارانشیمی داشته باشد. نحوه و شدت این اثرگذاری در میان گونه‌های مختلف چوب متفاوت است. بافت خاک، یعنی نسبت اجزای رس، سیلت و شن، نقش مستقیمی در ظرفیت نگهداری آب، تهویه و تغذیه ریشه‌ها دارد و از این طریق بر رشد قطری و طولی سلول‌های چوبی مانند فیبرها، آوندها و سلول‌های پارانشیمی تأثیر می‌گذارد[۳]. خاک‌هایی با درصد بالای رس معمولاً از نظر نگهداری رطوبت و عناصر غذایی غنی‌ترند، اما به علت تهویه ضعیف، ممکن است رشد قطری سلول‌ها را محدود کرده و در نتیجه موجب افزایش ضخامت دیواره سلولی و بالا رفتن دانسیته چوب شوند [۴]. در مقابل، خاک‌های سبک‌تر (دارای درصد بیشتر شن و سیلت) با وجود تهویه بهتر، اغلب به دلیل شست‌وشوی سریع مواد غذایی موجب تولید چوب با تراکم کمتر می‌شوند. به عنوان نمونه، درختان بلوط و زبان‌گنجشک که در خاک‌های رسی مرطوب می‌رویند، مقاومت فشاری موازی الیاف آن‌ها تا حدود ۵۰ مگاپاسکال افزایش می‌یابد، در حالی که همین گونه‌ها در خاک‌های خشک و شنی چوبی با مقاومت حدود ۳۵ مگاپاسکال تولید می‌کنند. همچنین اگر گونه‌ای مانند کاج جنگلی در ارتفاعات زیاد و بر روی خاک‌های فقیر یا اسیدی رشد کند، دوایر سالیانه باریک و رشد کلی ضعیفی خواهد داشت؛ در حالی‌که در نواحی پایین‌دست با خاک‌های حاصل‌خیز، رشد سریع‌تر و دوایر سالیانه پهن‌تر مشاهده می‌شود. کاج‌ها در خاک‌های رسی عملکرد مناسبی دارند، اما رشد آن‌ها در خاک‌های شنی معمولاً منجر به کاهش دانسیته چوب می‌گردد [۵]. در مجموع، پایین بودن دانسیته چوب اغلب در رویشگاه‌هایی دیده می‌شود که از نظر خاکی برای رشد قطری مطلوب‌ترند[۶].

رفتارهای خواص چوب نسبت به تغییرات خواص فیزیکی و شیمیایی خاک بسته به گونه چوبی و شرایط اقلیمی و محیطی بسیار متفاوت است. به عنوان مثال در ماداگاسکار، گونه اکالیپتوس تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به عوامل محیطی رشد و شرایط مدیریت جنگلداری اشاره کرد. بررسی نمونه‌های چوب اکالیپتوس در ارتفاعات ماداگاسکار (۵ کلاسه ارتفاعی) نشان داد که سن بهره‌برداری چوب، میانگین بارندگی سالانه، میانگین دمای سالانه و برخی خواص شیمیایی خاک مانند اسیدیته خاک، مقدار نیتروژن و کربن آلی، نقش مهمی در تعیین دانسیته چوب ایفا می‌کنند. دانسیته چوب در نمونه‌های مطالعه شده بین

۵۴۳ تا ۸۳۶ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر بود و به طور معناداری بین مناطق مختلف تفاوت داشت. مناطق گرم‌تر و دارای خاک‌های کمتر اسیدی، چوب‌هایی با دانسیته بالاتر تولید کردند. در مقابل، مناطق با بارش زیاد و خاک غنی از نیتروژن و کربن آلی، چوب با دانسیته پایین‌تری داشتند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی خاک، به ویژه اسیدیته و مقادیر نیتروژن و کربن آلی، تأثیر مهمی بر دانسیته چوب دارد. دانسیته چوب به طور مثبت با اسیدیته خاک و به طور منفی با مقادیر نیتروژن و کربن آلی همبستگی دارد. افزایش نیتروژن خاک معمولاً نشان‌دهنده خاک‌های اسیدی‌تر است که باعث کاهش دانسیته چوب می‌شود؛ بنابراین، خاک‌هایی با اسیدیته کمتر شرایط بهتری برای رشد و تولید چوب با کیفیت بالاتر فراهم می‌آورند. متغیرهای فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیر معنی‌داری بر مواد استخراجی، لیگنین و هولوسلولز نداشته است [۷].

Bottom of Form

خواص فیزیکی و بیومتریکی چوب بلوط غرب (*Quercus brantii*) در سه منطقه رویشگاهی از جنگل زاگرس ایران بررسی شده و ارتباط آن با خواص فیزیکی و شیمیایی خاک مطالعه گردید. نتایج نشان داد که رویشگاه بر برخی از ویژگی‌های فیزیکی و بیومتری چوب بلوط غرب معنی‌دار بود. دانسیته چوب معمولاً در خاک‌های غنی‌تر کمتر است که این نوع خاک‌ها موجب رشد سریع‌تر درختان می‌شوند. بر اساس نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، دانسیته چوب با مقدار سیلت و فسفر رابطه منفی دارد و با رس، شن و محتوای پتاسیم رابطه مثبت ضعیفی نشان می‌دهد. واکشیدگی حجمی به‌طور مثبت با پتاسیم قابل استفاده، محتوای ماده آلی، رس و کل نیتروژن همبستگی دارد، در حالی که با هدایت الکتریکی رابطه منفی دارد. همچنین طول فیبر با هدایت الکتریکی رابطه مثبت و با پتاسیم رابطه منفی دارد، در حالی که قطر فیبر با درصد شن خاک رابطه مثبت نشان داد. همچنین مشخص شد قطر فیبر ارتباط معنی‌داری با عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم ندارد. ضخامت دیواره سلولی با کل نیتروژن و پتاسیم قابل استفاده رابطه مثبت دارد، اما فسفر و درصد ماده آلی رابطه ضعیفی با ضخامت دیواره سلولی نشان دادند. علاوه بر این، اسیدیته خاک نیز با تأثیر بر قابلیت جذب عناصر مغذی، به طور غیرمستقیم کیفیت چوب را تحت تأثیر قرار داد. خاک‌هایی با اسیدیته نزدیک به خنثی عملکرد جذب مواد مغذی بهینه‌تری داشتند و رشد بهتری را موجب شدند [۸].

مطالعات درباره تأثیر عوامل محیطی از جمله نوع خاک، ارتفاع و اقلیم بر خواص فیزیکی و مکانیکی چوب *Neolamarckia cadamba* در هشت رویشگاه از مناطق غرب جاوه و بانتن اندونزی نشان دادند که **دانسیته چوب** که شاخص مهمی برای تعیین مقاومت و کیفیت چوب است، بین ۰/۲۹ تا ۰/۴۳ گرم بر سانتی‌مترمکعب متغیر بود. بیشترین مقدار دانسیته در رویشگاه Cianjur و کمترین مقدار آن در رویشگاه Tanjungsari ثبت شده است. عوامل محیطی شامل بارندگی و ارتفاع از سطح دریا بر دانسیته چوب مؤثر بودند. افزایش ارتفاع با کاهش معنی‌دار دانسیته چوب همراه بود. این ممکن است به دلیل تأثیر ارتفاع بر دما، رطوبت و در نتیجه رشد سلولی و ترکیب چوب باشد. بارندگی سالانه به صورت غیرمستقیم و ضعیف‌تر، اثر منفی بر دانسیته چوب داشته است. بارندگی بالا می‌تواند رشد سریع‌تر سلول‌های چوبی را تحریک کند که منجر به بافت چوب سبک‌تر می‌شود. خاک‌های آندوسول که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاصی دارند، به ویژه درصد بالای مواد آلی و بافتی نرم، تمایل به تولید چوب‌هایی با دانسیته پایین‌تر دارند. این به دلیل تأثیر بافت خاک بر نگهداری آب و مواد غذایی و به‌تبع آن بر فرآیندهای رشد سلولی است [۹].

تعداد ۲۳ مساحت جنگل‌کاری با سنین بین ۷ تا ۱۵ سال در مناطق شمال و شمال‌غربی کاستاریکا انتخاب شدند که گستره وسیعی از حاصلخیزی خاک‌ها را در بر می‌گرفتند. خواص فیزیکی چوب ساج (*Tectona grandis*) شامل جرم ویژه، هم کشیدگی مماسی و هم کشیدگی شعاعی و ارتباط آن با خواص فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج همبستگی چندگانه نشان داد که جرم ویژه با مس خاک رابطه منفی معنی‌داری داشته است. هم کشیدگی مماسی با فسفر، سیلت و شن خاک و هم کشیدگی شعاعی با آهن، سیلت، شن، اسیدیته خاک و فسفر ارتباط معنی‌داری داشتند. دامنه وسیعی از خاک‌ها در کاستاریکا برای کشت چوب ساج مناسب است بدون آنکه تأثیر منفی بر برخی از

خواص چوب داشته باشد[۱۰]. نتایج مطالعه Tufekcloglu و همکاران (۲۰۰۵) نشان داد که خواص فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیر قابل توجهی بر رشد صنوبر در ترکیه دارند. محتوای رس، یون منیزیم و همچنین اسیدیته خاک در دسترس درخت دارای همبستگی منفی معناداری با رشد صنوبر بودند، در حالی که فسفر و درصد شن خاک‌ها با رشد این گونه رابطه مثبت نشان دادند [۱۱].

هدف از این مطالعه، بررسی تأثیر ارتفاع از سطح دریا بر ویژگی‌های بیومتری و مکانیکی چوب گونه کاج الدار (*Pinus eldarica*) و تحلیل ارتباط آن با خواص فیزیکی و شیمیایی خاک در غرب استان مازندران (شهرستان چالوس) می‌باشد. این پژوهش با گسترش مطالعات پیشین در زمینه اثر خاک بر رشد رویشی درختان کاج الدار[۱۲] تلاش می‌کند رابطه بین کیفیت خاک، شرایط محیطی ارتفاع و ویژگی‌های ساختاری و مکانیکی چوب را شناسایی کند و به درک بهتر تأثیر عوامل محیطی و خاکی بر کیفیت چوب کمک نماید.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، تعداد نه اصله درخت سالم کاج الدار در سه کلاسه ارتفاعی از سطح دریا در غرب استان مازندران انتخاب و از هر درخت، یک دیسک از ارتفاع برابر سینه قطع گردید. سن درختان ۳۵ سال و توده جنگلی هر یک از کلاسه ارتفاعی ناخالص بوده، به طوری که در ارتفاع ۵۰۰ متری (منطقه مرزن آباد با طول جغرافیایی ۵۱ درجه ۱۸ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه ۲۷ دقیقه) از سطح دریا آمیخته با گونه زربین، در ارتفاع ۱۲۰۰ متری (منطقه گرگپس کلاردشت با طول جغرافیایی ۵۱ درجه ۱۰ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه ۲۹ ثانیه)، همراه با گونه نوئل و در ارتفاع ۱۴۰۰ متری (منطقه بنفشه ده با طول جغرافیایی ۵۱ درجه ۱۴ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه ۳۰ ثانیه)، آمیخته با گونه کاج سیلوستریس می‌باشد (شکل ۱). مطابق آمار اقلیمی در منطقه کلاردشت (۱۲۰۰ و ۱۴۰۰ متر)، معدل درجه حرارت حداکثر گرم‌ترین ماه سال (مرداد) ۳۲ درجه سانتی‌گراد و معدل درجه حرارت حداقل سردترین ماه سال (بهمن) ۱۶/۵- درجه سانتیگراد است. بارندگی سالیانه حدود ۴۴۲ میلی‌متر است که اکثریت آن در پاییز رخ می‌دهد. فصل خشک حیاتی در برخی سال‌ها از ۱۰۰ روز در سال تجاوز می‌نماید. مطابق طبقه بندی امبرژه، آب و هوای این منطقه با اقلیم نیمه مرطوب همراه با زمستان خیلی سرد تطابق پیدا می‌کند [۱۳]. در ارتفاع ۵۰۰ متر میزان بارندگی ۳۵۰ میلی‌متر و تبخیر سالانه ۱۰۴۰ میلی‌متر، متوسط درجه حرارت سالیانه ۱۴/۴۲ درجه سانتی‌گراد و حداقل و حداکثر مطلق درجه حرات به ترتیب ۱۰- و ۳۶ درجه سانتی‌گراد است. نوع اقلیم به روش آمبرژه نیمه خشک با زمستان خنک و با استفاده از منحنی آمبروتیک با حدود ۱۵۰ روز خشکی جز اقلیم مدیترانه‌ای گرم طبقه بندی می‌شود[۱۴].

شکل ۱- منطقه رویشگاهی غرب استان مازندران مرزن‌آباد، کلاردشت و بنفشه ده

خواص مکانیکی چوب

نمونه‌های آزمونی از ارتفاع برابر سینه هر درخت و از قسمت چوب بالغ بر اساس استاندارد ASTM D143 برای اندازه‌گیری مقاومت خمشی و مقاومت فشاری موازی الیاف تهیه شدند. نمونه‌ها در اتاق کلیماتیزه در رطوبت ۶۵ درصد و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به منظور رسیدن به رطوبت تعادل قرار داده شده است. در نهایت پارامترهای مکانیکی با استفاده از دستگاه اینسترون اندازه‌گیری شدند. همچنین دانسیته (تقسیم وزن به حجم چوب بعد از قرار دادن نمونه‌ها در اتاق کلیماتیزه) هریک از نمونه‌های مکانیکی پس از رسیدن به رطوبت تعادل محاسبه شد. ابعاد نمونه‌ها در آزمون خمش استاتیک و فشار موازی الیاف به ترتیب ۴۱×۲/۵×۲/۵ و ۱۰×۲/۵×۲/۵ سانتی‌مترمکعب بودند.

بیومتری تراکئید

از روش فرانکلین (۱۹۴۶) برای جداسازی تراکئید استفاده گردید [۱۵]. به منظور مشاهده آن و همچنین اندازه‌گیری ابعاد آن‌ها (طول، قطر و ضخامت الیاف)، خرده‌های چوب کاج به اندازه خلال کبریت در لوله آزمایشگاهی حاوی مخلوط آب اکسیژنه ۳۰ درصد و اسید استیک به نسبت ۱ به ۱ در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خیسانده شدند. سپس خرده چوبهای سفید شده در یک بشر کوچک قرار گرفته و توسط یک آهنربا بر روی همزن مغناطیسی الکتریکی کوچک تراکئید از یکدیگر جدا شدند و بعد یک تا سه قطره تراکئید غلیظ در یک بشر حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب رقیق شده و بعد توسط قطره‌چکان بر روی لام های تمیز منتقل شدند. لامهای میکروسکوپی مرطوب و حاوی تراکئید به مدت ۲۴ ساعت در هوای آزاد بر روی یک میز ثابت و تمیز گذاشته شد تا رطوبت آن به تدریج و در دمای محیط آزمایشگاه تبخیر گردد. پس از تبخیر رطوبت، تراکئیدهای چوب به شکل رسوب سفیدرنگ بر روی شیشه لام قابل مشاهده بود. بر روی الیاف خشک شده سفید چند قطره محلول رنگی سافرانین یک درصد چکانده و بر روی آن لامل قرار داده شد. در نهایت ابعاد تراکئید با استفاده از میکروسکوپ نوری (Nikon microscopic, Eclipse 50i, Japan) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (برای طول تراکئید از بزرگنمایی ۴X و برای قطر الیاف و ضخامت دیواره سلولی ۴۰X).

خواص فیزیکی و شیمیایی خاک

در هر کلاسه ارتفاعی و از زیر تاج پوشش هر پایه درخت چهار پروفیل خاک از عمق ۲۰-۴۰ سانتیمتری سطح خاک نمونه‌گیری و با هم ادغام گردید. نمونه‌های خاک هوا خشک شده و سپس از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. درصد رس، درصد سیلت و درصد شن با استفاده از روش هیدرومتری [۱۶] تعیین شدند. اسیدیته خاک و هدایت الکتریکی با استفاده از دستگاه pH/EC متر اندازه‌گیری شدند. نیتروژن کل با روش کجلدال محاسبه شد [۱۷]. مقدار فسفر به روش اولسن[۱۸] تعیین گردید. پتاسیم قابل دسترس توسط فلیم فتومتری[۱۷]. اندازه‌گیری شد. میزان ماده آلی بر اساس روش Walkley و Black (۱۹۳۵) برآورد گردید [۱۹]. منگنز، آهن، مس و روی با استفاده از جذب اتمی، کلیسم و منیزیم با تیتراسیون با اتیلن دی آمین و آهک موجود در خاک با روش اسیدسنجی اندازه‌گیری شدند [۲۰].

روش تجزیه و تحلیل آماری

در این تحقیق، تأثیر کلاسه ارتفاعی از سطح دریا بر خواص چوب و خاک مورد بررسی قرار گرفت که از آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه برای تعیین معنی‌داری و از جدول دانکن برای مقایسه میانگین‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS 21 استفاده شده است. برای بررسی ارتباط بین خواص فیزیکی و شیمیایی خاک، دما و بارندگی با تمام ویژگی‌های چوب، همبستگی پیرسون و همبستگی چندگانه (Stepwise) اعمال گردید. در این تحلیل، هر رویشگاه شامل سه درخت بود و در مجموع ۹ درخت مورد بررسی قرار گرفتند. میانگین نمونه‌های هر درخت محاسبه شد و همبستگی‌ها بر اساس این ۹ نقطه (۹ درخت) به صورت تجمیعی در کل سطوح ارتفاعی از دریا انجام شد.

نتایج و بحث

خواص چوب

نتایج آزمون تجزیه واریانس نشان داد که تفاوت‌های معناداری بین میانگین‌های ویژگی‌های مختلف چوب کاج

الدار در ارتفاعات متفاوت وجود دارد؛ بنابراین می‌توان گفت که ارتفاع تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات بیومتری و مکانیکی چوب از جمله دانسیته، مقاومت خمشی، مقاومت فشار موازی الیاف، طول و قطر تراکئیدها و ضخامت دیواره سلولی دارد. به طور خاص، مشاهده شد که در ارتفاع ۱۲۰۰ متر، بسیاری از ویژگی‌های چوب به بهترین شکل خود ظاهر شدند که نشان‌دهنده بهبود کیفیت چوب در این ارتفاع است. دانسیته و ضخامت دو دیواره سلولی بالاتر در ارتفاع ۵۰۰ متر ثبت شد، با افزایش ارتفاع از سطح دریا این دو پارامتر کاهش یافته است، اما مقاومت مکانیکی خمشی و فشاری در ارتفاع ۱۲۰۰ متر بیشترین مقدار را داشتند. این نتایج با نتایج به دست آمده از تأثیرگذاری مؤثر ارتفاع از سطح دریا بر ابعاد تراکئید در کاج بروسیا در ترکیه و گرگان ایران مطابقت دارد [۲۱ و ۲۲]. این نتایج اهمیت نقش عوامل محیطی مانند ارتفاع از سطح دریا و شرایط خاک را در تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی چوب تأیید می‌کند و می‌تواند راهنمایی مهمی برای انتخاب محل کاشت و مدیریت تولید چوب با کیفیت بهتر باشد.

جدول ۱- نتایج خواص چوب کاج در سه کلاسه ارتفاعی از سطح دریا

ارتفاع (متر)	۵۰۰	۱۲۰۰	۱۴۰۰
دانسیته (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	a۰/۵۷۸	b۰/۵۴۵	c۰/۴۸۶
مقاومت خمشی (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)	a۷۵۲	a۸۲۸	b۶۱۰
فشار موازی الیاف (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)	a ۳۶۰	a۴۴۰	b۲۹۴
طول تراکئید (میلی‌متر)	a۲/۶۵	b ۲/۸۱	a۲/۵۴
قطر تراکئید (میکرومتر)	a۳۶/۴۳	b۴۶/۷۶	c۳۴/۹۱
ضخامت دو دیواره سلولی (میکرومتر)	a۱۱/۹۸	b۱۰/۸۳	c۹/۲۱

تأثیر ارتفاع از سطح دریا بر همه خصوصیات چوب معنی‌دار بود، دانسیته از وزن به حجم نمونه‌ها بعد از قرار دادن نمونه‌ها در اتاق کلیماتیزه به دست آمده است.

خواص فیزیکی و شیمیایی خاک

آزمون تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر ارتفاع از سطح دریا بر مواد معدنی و مغذی موجود در خاک به غیر از کلسیم در سطح ۵ درصد معنی‌دار است (جدول ۲). میانگین خواص فیزیکی و شیمیایی خاک در سه کلاسه ارتفاعی از سطح دریا در جدول ۳ ارائه شده است. بالاترین مقدار رس و سیلت در ارتفاع ۵۰۰ متر و مقدار شن در ارتفاع ۱۴۰۰ متر مشاهده شده است، به عبارت دیگر رس بیشتر ظرفیت نگهداری آب را افزایش داده ولی تهویه خاک را کاهش می‌دهد. افزایش شن در خاک باعث زهکشی بهتر ولی باعث کاهش ظرفیت نگهداری مواد غذایی می‌شود. رس باعث سنگینی خاک و شن باعث سبکی خاک می‌شود [۳]. اسیدیته خاک در ارتفاع ۱۲۰۰ و ۱۴۰۰ متر اسیدی و در ارتفاع ۵۰۰ متر خنثی تا قلیایی است. مقدار آهن، منگنز، سدیم در ارتفاع ۱۲۰۰ متر به طور قابل توجهی و مشهود نسبت به سایر کلاسه ارتفاعی بالاتر بود. مقدار روی، پتاسیم، مواد آلی، منیزیم، آهک و نیتروژن در ارتفاع ۵۰۰ متر و مقدار فسفر و هدایت الکتریکی در ارتفاع ۱۴۰۰ متر نسبت به سایر کلاسه ارتفاعی بالاتر است. منگنز معمولاً در اسیدیته پایین‌تر قابلیت جذب بهتری را دارند. جهش بزرگ در ارتفاع ۱۲۰۰ متر در مقدار آهن خاک و کاهش آن در ۱۴۰۰ متر با تغییرات اسیدیته خاک هماهنگ است چون آهن در محیط اسیدی محلول‌تر است. پتاسیم بیشتر برای تنظیم فرایندهای فیزیولوژیک، انتقال مواد و مقاومت گیاه مهم است در حالی که کلسیم بیشتر نقش ساختاری و پایداری بافت‌ها را دارد [۲۳]. خاک‌های رسی و سیلتی توان نگهداری پتاسیم را در خاک دارند که در ارتفاع ۵۰۰ و ۱۲۰۰ متر مشاهده می‌شود. بهترین منطقه برای رشد درختان در ارتفاع ۱۲۰۰ متر به دلیل تعادل بافت، زهکشی و شرایط اسیدیته خاک است.

در ارتفاع ۵۰۰ متر با داشتن بافت سیلتی‌رسی‌لوم و درصد رس بالا، ظرفیت نگهداشت پتاسیم و کلسیم بیشتری دارد که می‌تواند رشد گونه‌های پهن‌برگ پرنیاز به مواد غذایی را بهبود دهد، اما نیاز به مدیریت زهکشی دارد. بافت رسی‌لوم در ۱۲۰۰ متر تعادلی بین زهکشی،

نگهداشت رطوبت و دسترسی به عناصر غذایی ایجاد کرده که برای اغلب گونه‌های جنگلی ایده‌آل است. پتاسیم بالای منطقه ۵۰۰ متر می‌تواند مقاومت درختان به تنش خشکی و بیماری‌ها را افزایش دهد، اما در ارتفاعات بالاتر کاهش یافته و ممکن است نیاز به مدیریت تغذیه‌ای داشته باشد. مقدار کلسیم تقریباً ثابت در دو ارتفاع اول و کمی کمتر در ارتفاع ۱۴۰۰ متر است؛ این ثبات نشان می‌دهد که تأمین کلسیم در این مناطق بیشتر تحت تأثیر آهک خاک است تا ارتفاع از سطح دریا. در ارتفاع ۱۲۰۰ متر، اسیدیته خاک پایین‌تر باعث افزایش حلالیت و جذب آهن و منگنز شده است که برای رشد درختان در خاک‌های اسیدی‌دوست مزیت محسوب می‌شود. با افزایش هدایت الکتریکی، شوری خاک افزایش می‌یابد که در ارتفاع ۱۲۰۰ متر کمترین مقدار را نسبت به سایر ارتفاع دارند. به طور کلی، مقادیر هدایت الکتریکی در هر سه منطقه پایین است، بنابراین خطر شوری برای گیاهان وجود ندارد. این شرایط برای رشد بیشتر گونه‌های جنگلی مناسب است [۲۳].

جدول ۲- آزمون تجزیه واریانس فیزیکی و شیمیایی خاک در سه کلاسه ارتفاعی از سطح دریا

متغیر	درجه آزادی	مجموع مربعات	سطح معنی‌داری	F	میانگین مربعات
رس	۲	۱۶۸	۰/۰۰۰	۸۴	۸۴
سیلت	۲	۶۱/۵۵۶	۰/۰۰۰	۳۹/۵۷۱	۳۰/۷۷۸
شن	۲	۲۲۱/۵۵۶	۰/۰۰۰	۳۵/۶۰۷	۱۱۰/۷۷۸
اسیدیته	۲	۱/۳۴۴	۰/۰۰۰	۲۸۱/۳۷۷	۰/۶۷۲
هدایت الکتریکی	۰/۰۰۰۱	۲	۰/۰۰۰۱	۰/۴۶۹	۰/۰۴۴
مواد آلی	۲/۵۷۶	۲	۱/۲۸۸	۶۴۷/۶۰۳	۰/۰۰۰۱
منگنز	۶۱/۹۰۲	۲	۳۰/۹۵۱	۵۸۱۵	۰/۰۰۰۱
آهن	۷۹۱/۱۳۳	۲	۳۹۵/۵۶۶	۸۵۹۹۰	۰/۰۰۰۱
مس	۵/۵۱۳	۲	۲/۷۵۷	۴۲۷۸	۰/۰۰۰۱
روی	۵/۹۷۴	۲	۲/۹۸۷	۵۰۷۳	۰/۰۰۰۱
فسفر	۵۹/۹۱۲	۲	۲۹/۹۵۶	۶۶۲۴	۰/۰۰۰۱
پتاسیم	۲۴۹۴۵۰	۲	۱۲۴۷۲۵	۱۲۴۷۰۰	۰/۰۰۰۱
کلسیم	۲	۱	۰/۵۰۰	۲/۷۰۳	۰/۱۴۶
منیزیم	۲۴/۷۳۶	۲	۱۲/۳۶۸	۲۲۲۶	۰/۰۰۰۱
آهک	۶۵۰/۶۰۲	۲	۳۲۵/۳۰۱	۹۴۴/۴۲۳	۰/۰۰۰۱
نیتروژن	۰/۰۳۴	۲	۰/۰۱۷	۲۸۷/۰۹۵	۰/۰۰۰۱

ارتباط بین خواص چوب و خاک

نتایج تحلیل‌های همبستگی پیرسون و همبستگی چندگانه نشان داد که خواص بیومتری و مکانیکی چوب بیش‌تر تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک قرار دارند و عوامل محیطی مانند دما و بارندگی تأثیر معنی‌داری بر خواص چوب نداشتند. در همبستگی پیرسون، دانسیته چوب با درصد شن رابطه منفی و با کلسیم رابطه مثبت دارد. در مدل همبستگی چندگانه، کلسیم نسبت به شن به عنوان متغیر مؤثرتر و با اولویت بالاتر نسبت به شن بر دانسیته چوب تعیین شد (جدول ۴ و ۵). پایداری نسبی میزان کلسیم در خاک دو ارتفاع پایین‌تر (۵۰۰ و ۱۲۰۰ متر) نشان می‌دهد که منابع کلسیم در این مناطق ثابت و بدون تغییرات قابل توجه ناشی از عوامل محیطی باقی مانده‌اند. این موضوع ممکن است به وجود آهک بالاتر در این ارتفاعات مرتبط باشد که نقش عمده‌ای در تأمین کلسیم خاک ایفا می‌کند. کاهش جزئی کلسیم در ارتفاع ۱۴۰۰ متر می‌تواند به کاهش درصد آهک خاک در این ارتفاع باشد که منجر به کاهش منابع کلسیم خاک شود. شسته شدن عناصر خاک در ارتفاعات بالاتر به علت بارش بیشتر یا زهکشی بهتر که ممکن است کلسیم محلول خاک را کاهش دهد. تغییرات در ترکیب بافت خاک که بر دسترسی به کلسیم تأثیر

می‌گذارد. با توجه به اهمیت کلسیم در ساختار و ثبات دیواره سلولی گیاهان [۲۳] این کاهش جزئی می‌تواند در برخی موارد بر خواص فیزیکی چوب مانند دانسیته تأثیرگذار باشد. در این راستا دونگ و همکاران (۲۰۲۳) بیان کردند که دانسیته چوب با مقدار رس، شن و پتاسیم در دسترس گیاه رابطه مثبت و با فسفر و سیلت خاک رابطه منفی داشته است[۸]. همچنین کاج‌ها قابلیت رویش در خاک‌هایی با درصد رس بالا را دارد [۱] و شن خاک باعث کاهش دانسیته چوب می‌شود [۵].

جدول ۳- نتایج خواص فیزیکی و شیمیایی خاک در سه کلاسه ارتفاعی از سطح دریا

ارتفاع	۵۰۰ متر	۱۲۰۰ متر	۱۴۰۰ متر	توضیحات
رس (درصد)	۴۵	۴۷	۳۷	بیشترین رس در ۱۲۰۰ متر است که می‌تواند نگهداری بهتر آب و مواد غذایی را فراهم کند. کاهش رس در ۱۴۰۰ متر احتمالاً باعث کاهش ظرفیت نگهداری آب می‌شود.
سیلت (درصد)	۴۱	۳۴/۷	۳۷	سیلت در ۵۰۰ متر بیشترین است، سپس کاهش و کمی افزایش در ۱۴۰۰ متر. سیلت متوسط است و باعث تهویه نسبی خاک می‌شود.
شن (درصد)	۱۴	۱۸/۳	۲۶	شن در ۱۴۰۰ متر بیشترین است؛ شن زیاد معمولاً به خاک خاصیت زهکشی بالا و ظرفیت نگهداری پایین آب می‌دهد.
اسیدیته خاک	۷/۳۳	۶/۳۸	۶/۸۶	در ۵۰۰ متر نزدیک به خنثی (کمی قلیایی)، در ۱۲۰۰ متر کمی اسیدی‌تر است. اسیدیته مناسب برای جذب مواد غذایی در محدوده ۶-۷ است.
منگنز (ppm)	۱۳/۷	۱۹/۸۵	۱۸/۳۶	منگنز در ۱۲۰۰ و ۱۴۰۰ متر بالاتر است که می‌تواند در متابولیسم گیاه مؤثر باشد ولی مقدار زیاد ممکن است سمی باشد.
آهن (ppm)	۶/۰۹	۲۹/۰۳	۱۸/۵	آهن در ۱۲۰۰ متر بالاتر است، عنصر ضروری برای سنتز کلروفیل و فعالیت آنزیم‌ها.
مس (ppm)	۱/۵۲	۳/۰۵	۱/۲۹	بیشترین مقدار مس در ۱۲۰۰ متر است که بهبود رشد و خواص چوب را تسهیل می‌کند.
روی (ppm)	۳/۱۸	۱/۴۵	۱/۴۶	روی در ۵۰۰ متر بالاتر است، عنصر کم‌مقدار مهم برای رشد گیاه.
فسفر (ppm)	۱/۴۰	۵/۸۰	۷/۵۳	فسفر در ارتفاعات بالاتر افزایش می‌یابد، برای انتقال انرژی و رشد ریشه حیاتی است.
پتاسیم (ppm)	۶۴۰	۳۰۰	۲۷۵	پتاسیم در ۵۰۰ متر بالاتر است که به تنظیم فشار اسمزی و مقاومت گیاه کمک می‌کند. کاهش پتاسیم در ارتفاعات بالاتر می‌تواند باعث کاهش رشد شود.
هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	۰/۰۲	۰/۰۱۶	۰/۰۲۲	هدایت الکتریکی نسبتاً ثابت است، در ۱۴۰۰ متر کمی افزایش که می‌تواند نشانه تجمع یون‌ها باشد.
مواد آلی (درصد)	۳/۳۴	۲/۰۳	۲/۸۰	مواد آلی بالاتر در ۵۰۰ متر است که موجب بهبود ساختار خاک و تأمین مواد غذایی می‌شود. کاهش در ۱۲۰۰ متر مشاهده می‌شود.
کلسیم (میلی اکی والان بر لیتر)	a۸/۷	a۸/۷	a۷/۷	کمی کاهش در ۱۴۰۰ متر، اما مقدار کلی کلسیم نسبتاً ثابت است.
منیزیم (میلی اکی والان بر لیتر)	a۷/۴۳	b۳/۹	b۳/۹	افزایش منیزیم در ارتفاعات بالاتر دیده می‌شود که به متابولیسم گیاه کمک می‌کند.
آهک (درصد)	a۲۱	b۲/۵	b۳/۴۶	آهک بسیار بالا در ۵۰۰ متر است که ممکن است باعث قلیایی شدن خاک شود، در ارتفاعات بالاتر کاهش یافته است.
نیتروژن (درصد)	۰/۳۷۴	۰/۲۲۴	۰/۲۹۲	نیتروژن در ۵۰۰ متر بالاتر است که برای رشد گیاه و تشکیل پروتئین ضروری است.

ارتباط بین مدول خمشی با خواص فیزیکی و شیمیایی خاک نشان داد که با هدایت الکتریکی رابطه منفی و با رس و مس رابطه مثبت دارد که همبستگی چندگانه عامل رس را نسبت به دو متغیر دیگر مؤثرتر و مهم‌تر دانست. ارتباط مثبت بین درصد رس خاک و مدول خمشی چوب کاج الدار نشان می‌دهد که افزایش میزان رس در خاک به بهبود مقاومت خمشی چوب منجر می‌شود. خاک‌های رسی به دلیل ذرات ریز و سطح ویژه

بالا، ظرفیت نگهداری آب و مواد مغذی بیشتری دارند. این شرایط سبب تأمین بهتر نیازهای آبی و غذایی درخت می‌شود که رشد سلولی مناسب‌تری را فراهم کرده و منجر به تشکیل چوب با ساختار متراکم‌تر و مستحکم‌تر می‌گردد. در ارتفاع ۱۲۰۰ متر که بیشترین مقدار رس مشاهده شده، بافت خاک رسی‌لوم تعادل مناسب بین ظرفیت نگهداری آب و زهکشی را به وجود آورده که در نهایت منجر به ایجاد شرایط ایده‌آل برای رشد درخت و توسعه چوب با خصوصیات مکانیکی بهتر شده است. همچنین در همین ارتفاع مقادیر مناسبی از عناصر مانند آهن، منگنز و مس که در سنتز و ساختار چوب نقش دارند، دیده شده است که ممکن است به افزایش مدول خمشی کمک کند؛ بنابراین، افزایش رس خاک به طور غیرمستقیم باعث بهبود خواص مکانیکی چوب از جمله مدول خمشی می‌شود که با نتایج Moya و Perez (۲۰۰۸) مطابقت دارد [۱۰].

طول تراکئید به طور مثبتی تحت تأثیر رس و مس خاک قرار داشت که مطابق با همبستگی چندگانه عامل مس نسبت به رس مهم‌تر است. قطر تراکئید به شدت با هفت متغیر از خواص فیزیکی و شیمیایی خاک ارتباط دارد به طوری که با سیلت، اسیدیته، هدایت الکتریکی، مواد آلی و نیتروژن رابطه منفی و با آهن و مس رابطه مثبت داشت. همبستگی چندگانه عامل مس را نسبت به سایر متغیرها مهم‌تر دانست. هیچ ارتباطی بین خواص فیزیکی و شیمیایی خاک با ضخامت دیواره سلولی یافت نشد. مقاومت فشاری موازی الیاف با رس و مس رابطه مثبت و با هدایت الکتریکی و مواد آلی رابطه منفی داشت که همبستگی چندگانه عامل مس و مواد آلی را به عنوان عامل مؤثر بر تغییرات مقاومت فشاری معرفی نموده است. ارتباط مثبت و قابل توجه بین مس خاک و ویژگی‌های آناتومیکی و مکانیکی چوب کاج الدار، از جمله طول تراکئید، قطر تراکئید و مقاومت مکانیکی نشان‌دهنده نقش کلیدی این عنصر کم‌مقدار در بهبود کیفیت چوب است. به طوری که مس به عنوان یک عنصر کم‌مقدار ضروری، در فعالیت آنزیم‌های مرتبط با سنتز لیگنین و سایر پلیمرهای دیواره سلولی مشارکت دارد. این فعالیت‌ها منجر به تقویت دیواره سلولی و افزایش استحکام ساختاری می‌شود که به طور مستقیم بر قطر و طول تراکئیدها تأثیر مثبت دارد. تراکئیدهای بلندتر و قطورتر باعث بهبود انتقال آب و استحکام مکانیکی چوب می‌شوند. مقادیر بالاتر مس در خاک، با بهبود فرآیندهای بیوشیمیایی گیاه، رشد بهینه سلول‌های چوبی و توسعه ساختار متراکم‌تر را تسهیل می‌کند [۲۳]. همچنین این عنصر در افزایش سختی و استحکام چوب نقش دارد. افزایش مس باعث تقویت دیواره سلولی و کاهش نقص‌های ساختاری می‌شود که مقاومت مکانیکی چوب را بهبود می‌بخشد. در ارتفاع ۱۲۰۰ متر که مقدار مس خاک بالاتر است، شرایط بهینه خاک از نظر بافت (رس متوسط)، اسیدیته مناسب و مواد آلی کافی فراهم شده که باعث جذب بهتر مس و سایر عناصر می‌شود و در نهایت بر کیفیت چوب اثر مثبت می‌گذارد. در همین راستا، Dong و همکاران (۲۰۲۳) بیان کردند که هدایت الکتریکی با طول تراکئید رابطه مثبت و با پتاسیم رابطه منفی دارند. همچنین قطر تراکئید رابطه مثبتی با درصد شن خاک داشته است [۸].

جدول ۴- ارتباط بین خواص فیزیکی و شیمیایی خاک بر ویژگی‌های چوب با استفاده از همبستگی پیرسون

خواص چوب	ارتباط با خواص خاک	R
دانسیته	ارتباط منفی با شن	٭-۰/۷۳۱
	ارتباط مثبت با کلسیم	٭۰/۷۳۴
مقاومت خمشی	ارتباط مثبت با رس	۰/۸۱۷ ٭٭
	ارتباط منفی با هدایت الکتریکی	-۰/۶۹۳ ٭
	ارتباط مثبت با مس	۰/۶۹۴ ٭
مقاومت فشاری موازی الیاف	ارتباط مثبت با رس	٭٭۰/۸۷۸
	ارتباط منفی با هدایت الکتریکی	٭-۰/۷۹۳
	ارتباط مثبت با مس	٭٭۰/۹۲۲
	ارتباط منفی با مواد آلی	٭-۰/۶۲۴
طول تراکئید	ارتباط مثبت با رس	٭۰/۷۱۲
	ارتباط مثبت با مس	٭۰/۷۸۸
قطر تراکئید	ارتباط منفی با سیلت	٭-۰/۶۷۲
	ارتباط منفی با اسیدیته خاک	٭-۰/۷۴۸
	ارتباط منفی با هدایت الکتریکی	٭-۰/۷۸۵
	ارتباط منفی با مواد آلی	٭-۰/۸۲۱
	ارتباط مثبت با آهن	٭۰/۷۲۸
	ارتباط مثبت با مس	٭٭۰/۹۴۷
	ارتباط منفی با نیتروژن	٭۰/۷۲۹

٭درسطح پنج درصد و ٭٭ در سطح یک درصد.

جدول ۵- ارتباط بین خواص فیزیکی و شیمیایی خاک با ویژگی‌های چوب با استفاده از همبستگی چندگانه

خواص چوب	۱	۲
دانسیته	کلسیم٭ r = ۰/۷۳۴	-
مدول خمشی	رس٭٭ r = ۰/۸۱۷	-
مقاومت فشاری	مس٭٭ r = ۰/۹۲۲	مواد آلی٭٭ r = ۰/۹۷۶
طول تراکئید	مس٭ r = ۰/۷۸۸	-
قطر تراکئید	مس٭٭ r = ۰/۹۴۷	-

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که ارتفاع از سطح دریا تأثیر معناداری بر ویژگی‌های فیزیکی، بیومتری و مکانیکی چوب دارد. به طور خاص، ویژگی‌هایی مانند دانسیته، مقاومت خمشی، مقاومت فشار موازی الیاف، طول و قطر تراکئیدها و ضخامت دیواره سلولی در ارتفاع ۱۲۰۰ متر به بهترین حالت خود رسیدند که نشان‌دهنده بهینه بودن شرایط رشد در این ارتفاع است. همچنین، دانسیته و ضخامت دیواره سلولی در ارتفاع ۵۰۰ متر بالاتر بود، اما مقاومت‌های مکانیکی در ارتفاع ۱۲۰۰ متر بیشترین مقدار را داشتند. از سوی دیگر، خواص فیزیکی و شیمیایی خاک نشان می‌دهد رس و سیلت در ارتفاع ۵۰۰ متر بیشتر است و شن در ۱۴۰۰ متر افزایش دارد. اسیدیته خاک در ارتفاع ۱۲۰۰ و ۱۴۰۰ متر اسیدی و در ۵۰۰ متر خنثی تا قلیایی بود. مقدار عناصر معدنی مانند آهن، منگنز، روی، مس و پتاسیم در ارتفاعات مختلف تفاوت داشت که بر

جذب و انتقال مواد مغذی و در نهایت کیفیت چوب تأثیر می‌گذارد. خاک رسی- لوم در ارتفاع ۱۲۰۰ متر شرایط متعادلی برای نگهداری آب، زهکشی و دسترسی به مواد مغذی فراهم کرده است که این موارد در بهبود عملکرد مکانیکی چوب نقش دارند. تحلیل‌های همبستگی پیرسون و چندگانه نشان داد که دانسیته چوب با درصد شن خاک رابطه منفی و با کلسیم رابطه مثبت دارد. کلسیم و مس از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر خواص چوب از جمله دانسیته و مقاومت مکانیکی هستند. همچنین درصد رس خاک تأثیر مثبتی بر مدول خمشی چوب دارد که با بهبود ظرفیت نگهداری آب و مواد مغذی خاک مرتبط است. افزایش مواد آلی باعث کاهش مقاومت فشاری چوب شده که به دلایل تجمع رطوبت، رشد سریع‌تر سلول‌ها و تثبیت عناصر مغذی توسط مواد آلی مرتبط است. این یافته‌ها اهمیت تأثیر متقابل شرایط محیطی و خصوصیات خاک را در تعیین کیفیت و عملکرد چوب کاج الدار برجسته می‌کند و می‌تواند راهنمایی مؤثری برای انتخاب مناطق مناسب جنگل‌کاری و مدیریت بهینه خاک و تغذیه درختان فراهم آورد.

منابع

[1] Zare, H. 2001. Native and Exotic species of conifer in Iran. Publications of Research Institute of Forests and Rangelands. Page 498

[2] Wodzicki, T. J. 2001. Natural Factors Affecting Wood Structure. Wood Science and Technology, 35(1-2), pp. 5-26.

[3] Zobel, B.J. and Buijtenen, J.P. 1989. Wood variation: its causes and control. Springer Science and Business Media. https://doi.org/10.1007/978-3-642-74069-5

[4] Lima, I. L. Rosado, A. M. and Rosado, S. C. 2010. Effect of soil physical and chemical properties on wood density of Eucalyptus. Cerne, 16(1), pp. 105–114.

[5] Parsapajouh, D. 2000. Wood Technology. Tehran Publication.

[6] Cutter, B.E. Coggeshall, M.V. Phelps, J.E. and Stokke, D.D. 2004. Impacts of forest management activities on selected hardwood wood quality attributes: a review. Wood and Fiber Science, 36, pp. 84–97.

[7] Mevanarivo, Z. E. Ramananantoandro, T. Tomazello Filho, M. Napoli, A. Razafimahatratra, A. R. Razakamanarivo, H. R. and Chaix, G. 2020. Variability in the physico-chemical properties of wood from Eucalyptus robusta depending on ecological growing conditions and forestry practices: The case of small holdings in the highlands of Madagascar. Maderas. Ciencia y tecnología, 22(4), pp. 425–438.

[8] Dong, H. Dahmardeh Ghalehno, M. Bahmani, M. Ghehsareh Ardestani, E. and Fathi, L. 2023. Influence of soil physicochemical properties on biometrical and physical features of Persian oak (*Quercus brantii*) wood. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, *25*(4), https://doi.org/10.4067/s0718-221x2023000100404

[9] Suhaya, Y. Sumardi, I. Alamsyah, E. M. Sutrisno. And Hidayat, Y. 2024. Environment's effect on wood characteristics of White Jabon grown in West Java and Banten area, Indonesia. BioResources, 19(1), pp. 405–415. https://doi.org/10.15376/biores.19.1.405-415

[10] Moya, R. and Perez, D. 2008. Effects of physical and chemical soil properties on physical wood characteristics of Tectona grandis plantations in Costa Rica. Journal of Tropical Forest Science, 20(4), pp. 248–257.

[11] Tufekcloglu, A. Altun, L. Zeki Kalay, H. and Yilmaz, M. 2005. Effects of some soil properties on the growth of hybrid poplar in the terme-Golardi region of Turkey. Turkish Journal Agriculture and Forest, 29, pp. 221-226.

[12] Kiaei, M. 2014. Investigation on wood properties of Eldar pine (*Pinus eldarica* Medw) and its relations to soil chemical and physical characteristics (in western of Mazandaran province plantation). *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 29(2), pp. 199–207.

[13] Kia-Lashaki, A. 2006. The study of the effects of some natural factors on the quantitative characteristics of Pinus elderica Medw in the plantation of west of Mazandaran. Journal of Agriculture Science, 12(1), pp. 81–89.

[14] Memarian, F. Tabari, M. Hosseini, S. M. and Shafiei, A. B. ۲۰۰۶. Comparison of growth in man-made pure and mixed Norway spruce stands of Kelardasht (north of Iran). Pajouhesh & Sazandegi, 73, pp. 171–176.

[15] Franklin, L. 1945. Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites, and a new macerating method for wood. *Nature, 155*(3924), 51. https://doi.org/10.1038/155051a0

[16] Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analysis of Soils. Agronomy Journal 54, pp.464-465. https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x

[17] Zarinkafsh, M. 1993. Soil survey, methods of assessment morphologic and analysis for soil, water

and plant. Tehran University Publication, Tehran, Iran.

[18] Nelson, D.W. and Sommers, L.E. 1996. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. In Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. Sparks, D.L. Page, A.L. Helmke, P.A. Loeppert, R.H. (eds.) SSSA Book Series No. 5, SSSA and ASA, Madison, WI, 961-1010.

[19] Walkley, A. and Black, I.A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37(1), pp. 29-37. https://journals.
lww.com/soilsci/Citation/1934/01000.

[20] Pansu, M. and Gautheyrou, J. 2006. Handbook of soil analysis: Mineralogical, organic and inorganic methods. Berlin, Germany: Springer.

[21] Gürboy, B. 2007. Fiber Morphology of Calabrian Pine (Pinus brutia Ten.) Naturally Grown in North Cyprus. Süleyman Demirel University, Journal of Forest Faculty, A (2), pp.119-127.

[22] Vaziri, V. Hosseini, S. and Dehghani, M. R. 2009. Effect of Altitude on Fiber Characteristics, Chemical Composition and Kraft Yield Pulp of Brutian Pine (Pinus brutia). Journal of Wood and Forest Science and Technology, 16(1), pp. 1-13.

[23] Pallardy, S. G. 2008. *Physiology of woody plants* (3rd ed.). Elsevier publication.