



Study of the effect of extractives, ash content, and density on the thermal conductivity in five wood species (*Abies*, *Alnus glutinosa*, *Albizia julibrissin*, *Juglans regia*, *Platanus orientalis*)

Milad Tajik^{1*}, Hossein Kermanian^{2*}

1- Corresponding Author: MSc, Department of Bio Refinery, Faculty of New Technologies and Aerospace Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: milad.tajik67@yahoo.com

2- Associate Professor, Department of Bio Refinery, Faculty of New Technologies and Aerospace Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: February 2025

Accepted: March 2025

Abstract

Problem definition and objectives: Wood, as a natural and widely used material in various industries, possesses diverse physical and chemical properties that affect its applications. One of the important properties of wood is its thermal conductivity, which is influenced by multiple factors. In this study, the effect of the amount of extractives, ash content, and density on the thermal conductivity of five wood species—including fir (*Abies alba*), alder (*Alnus glutinosa*), silk tree (*Albizia julibrissin*), plane tree (*Platanus orientalis*), and walnut (*Juglans regia*)—was investigated. The main objective of this study is to gain a more precise understanding of the relationship between the physical and chemical properties of wood and its thermal conductivity to enhance industrial applications.

Methodology: For this purpose, two sound and knot-free samples of each species, measuring 2×20×20 centimeters, were prepared in an intermediate direction between radial and tangential planes from trees grown in the forests of Nowshahr. The samples were placed for two weeks in a conditioning room with a relative humidity of 60% and a temperature of 20°C to reach an equilibrium moisture content of 12%. Thermal conductivity measurements were conducted using a device according to the ASTM C177 standard. Additionally, density measurements were performed based on the ISO 3131 standard, and the determination of extractives and ash content was carried out according to TAPPI standards.

Results: The results showed that walnut had the highest density at 0.66 g/cm³, while fir had the lowest at 0.42 g/cm³. Plane tree exhibited the highest ash content at 3.09%, whereas walnut had the lowest at 1.33%. Regarding extractives, silk tree showed the highest amount at 3.98%, and alder had the lowest at 0.77%. Statistical analysis indicated that there were significant differences in density, ash content, and extractives among the species at the 95% confidence level. Furthermore, the results demonstrated that species with higher density and higher extractives content also had higher thermal conductivity. For example, silk tree had the highest thermal conductivity (0.253 W/m·°C), and fir had the lowest value (0.129 W/m·°C). This can be attributed to the reduction of porosity and the replacement of air in the wood's voids with extractives, leading to increased heat transfer. Ash content and the presence of metal ions such as calcium, potassium, magnesium, iron, copper, zinc, and nickel can also affect thermal conductivity, but they are not solely determining factors. Increases in extractives content and density have a greater effect on

thermal conductivity than ash content. The findings of this study highlight the importance of the physical and chemical properties of wood in determining its thermal conductivity.

Conclusion: This information can be utilized in various industries such as construction, interior design, wood product manufacturing, and wood drying planning. A more precise understanding of these properties aids in selecting appropriate wood species for specific applications, enhancing the efficiency and performance of products. In general, this research shows that, in addition to density, extractives play a significant role in the thermal conductivity of wood. Therefore, considering the chemical composition of wood alongside its physical properties is of great importance for improving industrial processes and developing new applications.

Keywords: Thermal conductivity, Extractives, Ash, Density.

بررسی اثر مواد استخراجی، خاکستر و دانسیته بر ضریب هدایت حرارتی در پنج گونه چوبی (نراد، توسکا، گل ابریشم، چنار و گردو)

میلاذ تاجیک^{۱*}، حسین کرمانیان^۲

۱- نویسنده مسئول، کارشناس ارشد، گروه پالایش زیستی، دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: milad.tajik67@yahoo.com

۲- دانشیار، گروه پالایش زیستی، دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: اسفند ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: فروردین ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: چوب به عنوان یک ماده طبیعی و پرکاربرد در صنایع مختلف، دارای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متنوعی است که بر کاربردهای آن در صنایع مختلف تأثیر می‌گذارد. یکی از ویژگی‌های مهم فیزیکی چوب، ضریب هدایت حرارتی آن است که تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارد که شناخت این عوامل اهمیت ویژه‌ای دارد. در این پژوهش، به بررسی تأثیر میزان مواد استخراجی، خاکستر و دانسیته بر ضریب هدایت حرارتی پنج گونه چوبی شامل نراد (*Abies alba*)، توسکا (*Alnus glutinosa*)، گل ابریشم (*Albizia julibrissin*)، چنار (*Platanus orientalis*) و گردو (*Juglans regia*) پرداخته شده است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی ارتباط بین ترکیبات شیمیایی، فیزیکی و ساختاری چوب با ضریب هدایت حرارتی آن جهت بهبود کاربردهای صنعتی است.

مواد و روشها: برای این منظور، از هر گونه ۳ نمونه سالم و بدون گره با ابعاد $20 \times 20 \times 20$ سانتی‌متر در جهت بینابینی از درختان روئیده در جنگل‌های نوشهر تهیه شد. نمونه‌ها به مدت دو هفته در اتاق کلیما با رطوبت نسبی ۶۰ درصد و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا به رطوبت تعادل ۱۲ درصد برسند. اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی با استفاده از دستگاهی مطابق با استاندارد ASTM C177 انجام شد. همچنین، اندازه‌گیری دانسیته بر اساس استاندارد ISO 3131 و تعیین مواد استخراجی و خاکستر طبق استانداردهای T280 و T211 آیین‌نامه TAPPI صورت گرفت.

نتایج: نتایج نشان داد که گردو با دانسیته $0/66$ گرم بر سانتی‌متر مکعب بیشترین و نراد با $0/42$ گرم بر سانتی‌متر مکعب کمترین دانسیته را دارند. چنار با $3/09$ درصد بیشترین و گردو با $1/33$ درصد کمترین میزان خاکستر را دارا بودند. در مورد مواد استخراجی، گل ابریشم با $3/98$ درصد بیشترین و توسکا با $0/77$ درصد کمترین مقدار را نشان دادند. تحلیل آماری نشان داد که اختلاف معناداری در دانسیته، خاکستر و مواد استخراجی بین گونه‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد وجود دارد. همچنین، نتایج نشان داد که گونه‌هایی با دانسیته بالاتر و میزان مواد استخراجی بیشتر، ضریب هدایت حرارتی بالاتری نیز دارند. به عنوان مثال، گل ابریشم دارای بالاترین ضریب هدایت حرارتی ($0/253$ w/m.°C) و نراد دارای کمترین مقدار ($0/129$ w/m.°C) بود. این امر می‌تواند به دلیل کاهش تخلخل و جایگزینی هوای موجود در خلل و فرج چوب با مواد استخراجی باشد که منجر به افزایش انتقال حرارت می‌شود. خاکستر موجود در چوب نیز می‌تواند بر ضریب هدایت حرارتی تأثیرگذار باشد، اما به تنهایی عامل تعیین‌کننده‌ای نیست. همبستگی بین مواد استخراجی و دانسیته با ضریب هدایت حرارتی مثبت و قوی و همبستگی خاکستر و ضریب هدایت حرارتی منفی و ضعیف است.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان‌دهنده اهمیت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی چوب در تعیین ضریب هدایت حرارتی آن است. این اطلاعات می‌تواند در صنایع مختلف مانند ساختمان‌سازی، طراحی داخلی، تولید محصولات چوبی و برنامه‌ریزی‌های چوب خشک‌کنی مورد استفاده قرار گیرد. شناخت دقیق‌تر از این ویژگی‌ها، کمک می‌کند تا گونه‌های چوبی برای کاربردهای مناسب انتخاب شوند و بهره‌وری و کارایی محصولات را افزایش دهند. به طور کلی، این تحقیق

نشان می‌دهد که علاوه بر دانسیته، مواد استخراجی نقش مهمی در ضریب هدایت حرارتی چوب ایفا می‌کند؛ بنابراین، در نظر گرفتن ترکیبات شیمیایی چوب در کنار خواص فیزیکی آن، برای بهبود فرآیندهای صنعتی و توسعه کاربردهای نوین از اهمیت بالایی برخوردار است.

واژه های کلیدی: ضریب هدایت حرارتی، مواد استخراجی، خاکستر، دانسیته.

مقدمه

چوب به عنوان یک ماده زیستی و تجدیدپذیر، به طور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چوب می‌تواند تحت تأثیر عوامل متعددی قرار گیرد. چوب جسمی است غیر فشرده، شامل منافذ و حفرات که سبب به وجود آمدن تخلخل در چوب می‌شود. این خلل و فرج در چوب به وسیله مخلوطی از هوا و بخار آب و یا دیگر مایعات و ذرات پرشده‌اند که این عوامل، کلیه خواص فیزیکی چوب را دچار نوسان می‌کند. هدایت حرارتی چوب، یکی از ویژگی‌های مهم فیزیکی چوب به شمار می‌آید. چوب و دیگر مواد لیگنوسلولزی، به دلیل کم بودن الکترون‌های آزاد که عهده‌دار ساده انتقال انرژی هستند و نیز به دلیل تخلخلشان هادی ضعیف گرما هستند. ضریب هدایت حرارتی چوب مشخص‌کننده میزان انتقال گرما از طریق چوب بوده و عواملی مختلفی می‌تواند بر این ویژگی تأثیرگذار باشد. هدایت حرارتی چوب می‌تواند تحت تأثیر عواملی چون دانسیته، رطوبت، مواد استخراجی، جهت الیاف، مواد معدنی، بی‌نظمی‌های الیاف مانند وجود گره، زاویه میکروفیبریل‌ها و درجه حرارت قرار گیرد [۱]. دانستن مقدار ضریب هدایت حرارتی هرگونه چوبی و تأثیر عوامل مؤثر بر هدایت حرارت می‌تواند در افزایش مقاومت چوب با عملیات حرارتی بالا، برنامه‌های چوب خشک‌کنی، پنل‌های عایق حرارتی، تیمار حرارتی گرده‌بینه در کارخانه‌های روکش، زمان پرس در ساخت تخته‌خرده-چوب و تخته‌فیبر و کاربرد چوب‌ها در سازه‌های عایق مانند درب، پنجره، کف‌پوش و دیوارپوش از اهمیت بالایی برخوردار باشد [۲-۵]. تحقیقات متعددی به بررسی عوامل مؤثر بر ضریب هدایت حرارتی چوب پرداخته‌اند که در این میان کمتر به تأثیر مواد استخراجی و خاکستر به عنوان دو جزء مهم از ترکیبات شیمیایی چوب بر ضریب هدایت حرارتی پرداخته شده است. Rassoulinejad Mousavi و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیقی بر روی سه گونه پهن‌برگ در محدوده دمایی بین ۴۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد دریافتند که با افزایش دما، ضریب هدایت حرارت به صورت خطی افزایش می‌یابد. همچنین گونه ممرز بیشترین و گونه سپیدار کمترین هدایت حرارت را دارا

می‌باشند که دانسیته یکی از عوامل مهم این رده‌بندی می‌باشد [۲]. Yapici و همکاران (۲۰۱۱) بر روی ضریب هدایت حرارتی چوب‌های کاج اسکاتلندی، راش، صنوبر، بلوط و شاه‌بلوط آزمایش‌هایی را انجام دادند که نتایج حاصل نشان‌دهنده آن است که چوب کاج با $0.331 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ کمترین و چوب راش با $0.156 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ بیشترین ضریب هدایت حرارتی را داشته‌اند که این اختلاف، رابطه مستقیم با دانسیته گونه‌ها دارد [۶]. Layeghi و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی با عنوان بررسی تأثیر نانو نقره در خواص مکانیکی و ضریب هدایت حرارتی تخته‌خرده‌چوب دریافتند که با افزودن نانو نقره به تخته-خرده‌چوب هدایت حرارتی افزایش و زمان پرس می‌تواند کاهش پیدا کند (لایقی ۲۰۱۰) [۳]. Sahin Kol و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی بر روی ضریب هدایت حرارتی چوب بلوط دریافتند که با افزودن و آغشته‌سازی مواد شیمیایی، حفاظتی و رنگ‌ها به چوب، ضریب هدایت حرارتی افزایش خواهد یافت. بیشترین هدایت حرارتی در رنگ لاک‌الکل و کمترین هدایت در چوب بلوط بدون آغشته‌سازی به مواد شیمیایی بوده است [۷]. Sahin Kol (۲۰۰۹) آزمایش‌هایی بر روی خواص حرارتی، الکتریکی و همبستگی بین این دو در جهت عرضی چوب درخت کاج اسکاتلندی انجام داد. این بررسی‌ها در شرایط رطوبتی چوب خشک تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و نتایج نشان داد که با افزایش دما و رطوبت ضریب انتقال حرارت و الکتریک نیز به صورت خطی افزایش می‌یابد [۸]. Hunt و Gu (۲۰۰۶) معادله همبستگی جدیدی برای هدایت حرارتی مؤثر در جهت شعاعی و مماسی به‌عنوان تابعی از چگالی بر روی تعدادی از سوزنی‌برگان مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش دانسیته ضریب هدایت حرارتی نیز افزایش پیدا کرده و می‌توان از این روش در مدل دو بعدی آنالیز حرارتی ناپایدار استفاده نمود [۹]. Xie و همکاران (۲۰۰۵) در تحقیقی بر روی ضریب هدایت حرارتی ۲۰ گونه چوبی دریافتند که گونه‌هایی که دانسیته بالاتری دارند از ضریب هدایت حرارتی بالاتری نیز برخوردار هستند [۱۰]. در این پژوهش، اثر دانسیته، مواد استخراجی و خاکستر بر ضریب هدایت حرارتی پنج گونه چوبی نراد، توسکا، گل‌ابریشم (شب‌خسب)، چنار و گردو،

¹ *Pinus sylvestris*

میلی‌متر به عنوان منبع تأمین‌کننده گرما استفاده شد که در دو طرف آن نمونه‌های آزمونی و در طرف دیگر نمونه آزمونی از دو ژاکت آب با طول و عرض ۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۳۰ میلی‌متر برای خنک کردن سمت دیگر نمونه‌های آزمونی مورد استفاده قرار گرفتند. گرم‌کن، ژاکت‌های آب و نمونه‌های آزمونی چوب در قاب چوبی به‌عنوان عایق قرار گرفتند. برای ثابت نگه‌داشتن سطوح نمونه‌های آزمونی چوبی در تماس با گرم‌کن و ژاکت‌های آب از گیره‌های نگهدارنده در طرفین دستگاه استفاده شد. در این دستگاه از یک منبع تغذیه جهت ایجاد و کنترل مقدار ورود انرژی گرمایی به سطح گرم‌کن و چوب، یک وات متر از نوع Lutron, DW-6060 برای نمایش مقدار انرژی گرمایی وارده به سطح نمونه آزمونی استفاده گردید. حسگرهای دما نیز از نوع PT-۱۰۰ با دقت ± 0.1 درجه سانتی‌گراد برای اندازه‌گیری دمای طرفین چوب مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۱).

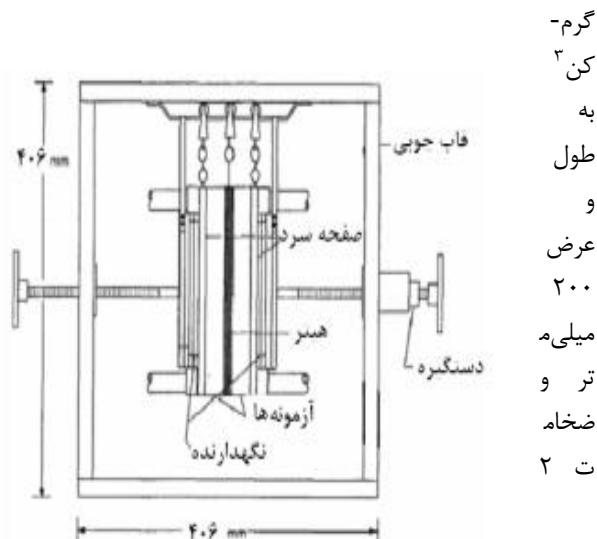


شکل ۱- نمای شماتیک و عکس دستگاه اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی

بررسی می‌شود. هدف از این تحقیق، تعیین میزان تأثیر هر یک از این عوامل بر ضریب هدایت حرارتی و ارائه اطلاعاتی جامع در خصوص خواص حرارتی این گونه‌های چوبی است. این اطلاعات می‌تواند در انتخاب مناسب چوب برای کاربردهای مختلف، به ویژه در صنایعی که خواص حرارتی چوب اهمیت زیادی دارد، مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش ضریب هدایت حرارتی از هر یک از گونه‌های مورد بررسی (نراد، توسکا، گل‌بریشم، چنار و گردو) ۳ نمونه آزمونی بدون عیب و گره با ابعاد $20 \times 20 \times 2$ سانتی‌متر از جنگل‌های نوشهر تهیه گردید. برش نمونه‌های آزمونی بینابینی بود که علت انتخاب این ابعاد با توجه به استاندارد^۲ NIST می‌باشد [۱۱]. این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM C177 انجام شد که از یک



گرم-
کن^۳
به
طول
و
عرض
۲۰۰
میلی‌م
تر و
ضخامت
۲

^۲ National institute of standards and technology (NIST)

^۳ Heater

دست آوردن (معادله ۱) برحسب K خواهیم داشت:

$$K = \frac{Q \cdot \Delta X}{2A \Delta T} \quad (2)$$

در تحقیق حاضر، مقدار $\Delta X = 0.005 \text{ m}$ و m^2 و $A = 0.04$ است. بنابراین معادله بالا به صورت زیر به دست می آید:

$$\frac{Q}{\Delta T} \cdot 0.0625 \text{ K} = \quad (3)$$

تعیین همبستگی خطی و غیرخطی و تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS در قالب طرح آنالیز واریانس یک‌طرفه انجام شد و در نهایت مقایسه و گروه‌بندی میانگین‌ها به کمک آزمون دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام گرفت.

نتایج و بحث

دانسیتة چوب یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار در خواص فیزیکی و به خصوص ضریب هدایت حرارتی می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌گردد گونه گردو با ۰/۶۶ و گونه نراد با ۰/۴۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب به ترتیب بیشترین و کمترین دانسیته را در بین نمونه‌های مورد آزمایش دارا می‌باشند. میزان خاکستر در چوب به علت وجود یون‌های فلزی مانند کلسیم، پتاسیم، منیزیم، آهن، مس، روی و نیکل است [۱۳-۱۵]. گونه چنار با ۳/۰۹ درصد و گونه گردو با ۱/۳۳ درصد، به ترتیب بیشترین و کمترین میزان خاکستر را دارند. در این بین گونه‌های گل‌ابریشم با ۳/۹۸ درصد، بیشترین و گونه توسکا با ۰/۷۷ درصد کمترین مواد استخراجی را دارا می‌باشند. اختلاف آماری دانسیته، خاکستر و مواد استخراجی بین گونه‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار می‌باشد.

ضمناً نمونه‌های آزمونی به مدت دو هفته در اتاق کلیما آزمایشگاه فیزیک گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران در رطوبت نسبی ۶۰ درصد و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا به رطوبت تعادل ۱۲ درصد برسند و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند. برای اندازه‌گیری مواد استخراجی محلول در استن از آرد چوب مش ۸۰ طبق آزمون شماره T 280 استاندارد TAPPI، به روش سوکسوله به مدت ۸ ساعت استفاده گردید. همچنین برای اندازه‌گیری درصد خاکستر از آرد چوب مش ۸۰ طبق استاندارد T 211 آیین‌نامه TAPPI در دمای 25 ± 575 درجه سانتی‌گراد استفاده شد [۱۲]. برای اندازه‌گیری دانسیته بر اساس استاندارد ISO-۳۱۳۱ به صورت صلیبی انجام شد. برای مشخص نمودن دانسیته، نمونه‌ها ابتدا در ظرف آب به مدت ۷۲ ساعت قرار داده شدند و سپس وزن اشباع و حجم اشباع آن‌ها اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد، نمونه‌ها را در آون با درجه حرارت 2 ± 103 درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند و در انتها وزن خشک و حجم خشک اندازه‌گیری و دانسیته نمونه‌ها تعیین شد.

برای انجام آزمون اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی ابتدا گرم‌کن را روشن و شار حرارتی مورد نظر تنظیم گردید (۳۵-۷۰ درجه سانتی‌گراد) تا دما به حالت پایدار برسد، سپس ضریب هدایت حرارتی متوسط نمونه‌های آزمونی توسط قانون فوریه بجهت دست آمد [۱۶]:

$$Q = 2KA \frac{\partial T}{\partial X} \quad (1)$$

که در معادله بالا Q نرخ انتقال حرارت از صفحه گرم برحسب وات، K ضریب هدایت حرارتی نمونه‌های آزمونی برحسب $w/m^{\circ}C$ و A مساحت قاعده نمونه‌ها برحسب m^2 است. لازم به ذکر است که ضریب ۲ به دلیل پخش گرما بین دو نمونه آزمونی، در معادله قرار داده شده است. با به

جدول ۱- مقدار مواد استخراجی، دانسیته و خاکستر موجود در گونه‌های مورد مطالعه و گروه‌بندی دانکن

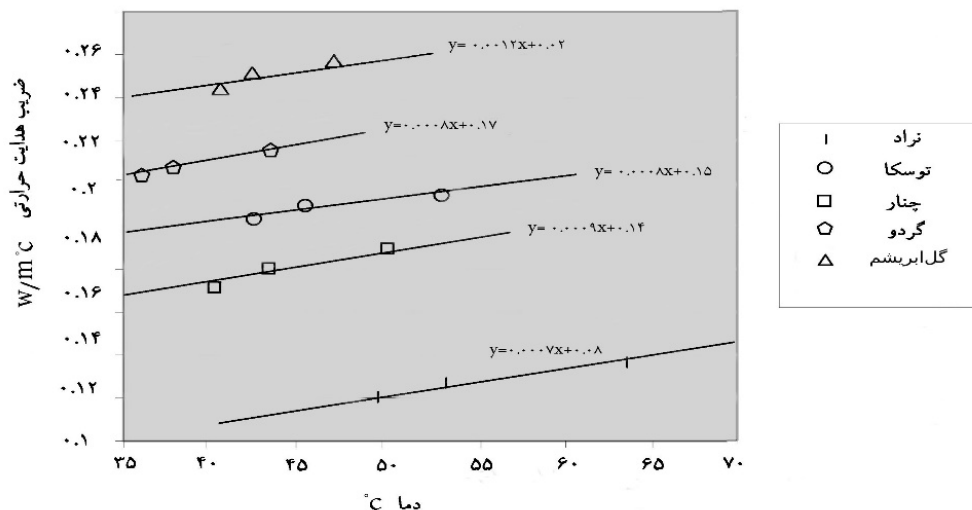
گونه	مواد استخراجی (درصد)	دانسیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	خاکستر (درصد)
نراد	۲/۰۷ (a)	۰/۴۲ (a)	۱/۹۹ (a)
توسکا	۰/۷۷ (a)	۰/۵ (b)	۱/۲۶ (a)
گل‌ابریشم	۳/۹۸ (b)	۰/۴۸ (c)	۱/۶۱ (a)
گردو	۳/۹۶ (b)	۰/۶۶ (d)	۱/۳۳ (a)
چنار	۱/۰۸ (a)	۰/۴۷ (c)	۳/۰۹ (b)

های مورد بررسی افزایش می‌یابد. دلیل این مسئله را می‌توان به افزایش جنبش مولکولی و برخورد مولکول‌های چوب در اثر افزایش انرژی دانست. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، روند تغییرات ضریب هدایت حرارتی با افزایش دما به طور خطی افزایش می‌یابد که با نتایج Sahin Kol (۲۰۰۹) و Mousavi Rassoulinejad و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت دارد.

ضریب هدایت حرارتی نمونه‌های آزمون در سه شار گرمایی مورد آزمایش قرار گرفت. این ضرایب بر اساس دمای میانگین بین منبع گرم و سرد گزارش می‌شود (معادله ۴) که اختلاف دما نیز بر اساس اختلاف دمای منبع گرم و سرد محاسبه شده است. جدول ۲ مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده ضریب هدایت حرارتی طبق فرمول ۳ در نمونه‌های آزمون را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دما، میزان ضریب هدایت حرارتی در گونه-

جدول ۲- مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده ضریب هدایت حرارتی در گونه‌های مورد مطالعه

گونه‌ها	شار گرمایی	دمای میانگین (°C)	اختلاف دما (°C)	انرژی (w)	ضریب هدایت حرارتی (w/m.°C)
نراد	۱	۴۹/۶	۲۴/۱	۲۴/۰۷	۰/۱۲۴
	۲	۵۳/۴	۲۶/۵	۲۵/۸	۰/۱۳
	۳	۶۳/۳	۳۱/۴	۳۴	۰/۱۳۵
توسکا	۱	۴۲/۷	۱۴/۶	۲۱/۵	۰/۱۸۴
	۲	۴۶/۹	۱۶/۶	۲۵	۰/۱۸۸
	۳	۵۳/۷	۲۰/۳	۳۱/۵	۰/۱۹۳
گل‌ابریشم	۱	۴۰/۲	۱۲	۲۳/۷	۰/۲۴۷
	۲	۴۱/۶	۱۲/۷	۲۶	۰/۲۵۵
	۳	۴۷/۱	۱۵/۸	۳۲/۵	۰/۲۵۷
گردو	۱	۳۵/۸	۱۳/۳	۲۱/۵	۰/۲۰۲
	۲	۳۸/۵	۱۵/۲	۲۵	۰/۲۰۵
	۳	۴۴/۶	۱۸/۸	۳۱/۵	۰/۲۰۹
چنار	۱	۴۰/۳	۱۶/۹	۲۳/۹	۰/۱۷۶
	۲	۴۳/۴	۱۸/۸	۲۷/۱	۰/۱۸۰
	۳	۵۰/۳	۲۲/۷	۲۳/۷	۰/۱۸۵



شکل ۲- نمودار تغییرات ضرایب هدایت حرارتی در گونه‌های مورد مطالعه

که k_0 ، میزان ضریب هدایت حرارتی نمونه‌های آزمونی در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد و $T_0 = 35$ فرض می‌شود. ثابت b ، شیب خط است که در جدول ۲ برای هر یک از گونه‌ها آمده است.

تغییر ضریب هدایت حرارتی را می‌توان به صورت رابطه ۴ فرض نمود:

$$k(t) = k_0 + b(T - T_0) \quad (4)$$

جدول ۲- معادله خط به‌دست‌آمده برای محاسبه فرمول تجربی ضریب هدایت حرارتی در محدوده دمایی ۳۵-۷۰ درجه سانتی‌گراد

گونه	شیب خط
زرد	$y = 0.0007x + 0.18$
توسکا	$y = 0.0008x + 0.15$
گل‌ابریشم	$y = 0.0012x + 0.2$
گردو	$y = 0.0008x + 0.17$
چنار	$y = 0.0009x + 0.14$

ضریب هدایت حرارتی و مواد استخراجی: ۰/۷۴ (همبستگی مثبت و قوی)

بررسی نتایج نمودارهای پراکندگی حاکی از آن است که روابط بین متغیرها ممکن است کاملاً خطی نباشد بنابراین، یک تحلیل غیرخطی نیز انجام شد.

نتایج مدل‌سازی غیرخطی (رگرسیون درجه ۲) نشان داد که ارتباط بین ضریب هدایت حرارتی و دانسیته قوی‌تر از آن چیزی است که پیرسون نشان می‌دهد. همچنین، ارتباط بین خاکستر و ضریب هدایت حرارتی نیز نسبت به

نتایج تحلیل همبستگی خطی (پیرسون) و مدل‌سازی رابطه بین متغیرها نشان داد که مواد استخراجی تأثیر قوی‌تری بر ضریب هدایت حرارتی دارند، در حالی که دانسیته و خاکستر ارتباط ضعیف‌تری با آن دارند. ارتباط بین ضریب هدایت حرارتی و متغیرهای مستقل (دانسیته، خاکستر و مواد استخراجی)، به شرح زیر است:

ضریب هدایت حرارتی و دانسیته: ۰/۳۹ (همبستگی مثبت ضعیف)

ضریب هدایت حرارتی و خاکستر: -۰/۳۲ (همبستگی منفی ضعیف)

چربی‌ها و موم‌ها در چوب می‌توانند یکی از عوامل مهم در هدایت حرارت باشند [۷ و ۱۳-۱۵]. در این بین گونه‌های گل‌ابریشم با ۳/۹۸ درصد و گردو با ۳/۹۶ درصد، بیشترین مواد استخراجی و ضریب هدایت حرارت را دارند. گونه‌هایی با مواد استخراجی بیشتر، حرارت بیشتری را منتقل می‌کنند که این مسئله را می‌توان به پر کردن فضای خالی و کاهش میزان هوا توسط مواد استخراجی دانست که با نتایج Sahin Kol و همکاران (۲۰۱۰) هم‌خوانی دارد نتایج همبستگی نیز نشان داد ارتباط خطی، مثبت و قوی بین ضریب هدایت حرارت چوب و مواد استخراجی وجود دارد.

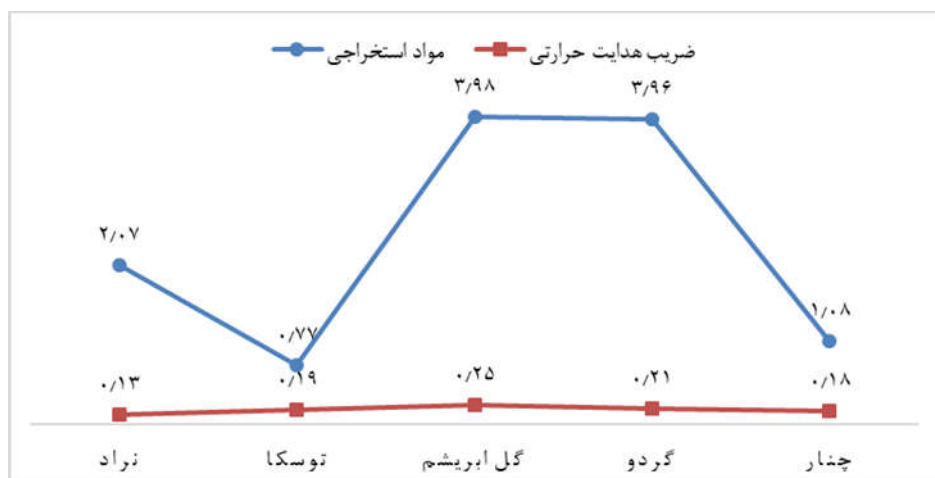
تحلیل خطی، منفی‌تر و معنادارتر است که نتایج به شرح زیر است:

ضریب هدایت حرارتی و دانسیته: ۰/۸۰ (همبستگی مثبت قوی‌تر از پیرسون)

ضریب هدایت حرارتی و خاکستر: ۰/۵ - (همبستگی منفی متوسط)

ضریب هدایت حرارتی و مواد استخراجی: ۰/۷ (همبستگی مثبت و قوی، مشابه پیرسون)

وجود مواد استخراجی محلول در استن (حلال نیمه قطبی) نظیر ترپنویدها، اسیدهای رزینی، مواد فنولی،



شکل ۳- بررسی میزان مواد استخراجی و ضریب هدایت حرارتی موجود در گونه‌های مورد بررسی

کمترین میزان دانسیته، کمترین ضریب هدایت حرارتی را نیز دارد. نتایج این مطالعه با نتایج Xie و همکاران (۲۰۰۵)، Hunt و Gu (۲۰۰۶)، Yapici و همکاران (۲۰۱۱) و Rassoulinejad Mousavi و همکاران (۲۰۱۱) نیز هم‌خوانی دارد. نتایج همبستگی نیز ارتباط مثبت، قوی و غیرخطی دانسته و ضریب هدایت حرارتی را نشان می‌دهد.

دانسیته چوب یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار در خواص فیزیکی و به خصوص ضریب هدایت حرارتی می‌باشد. هر چه دانسیته چوب بیشتر باشد، خلل و فرج کمتر و انتقال حرارت نیز بیشتر خواهد بود [۲، ۵، ۱۷].

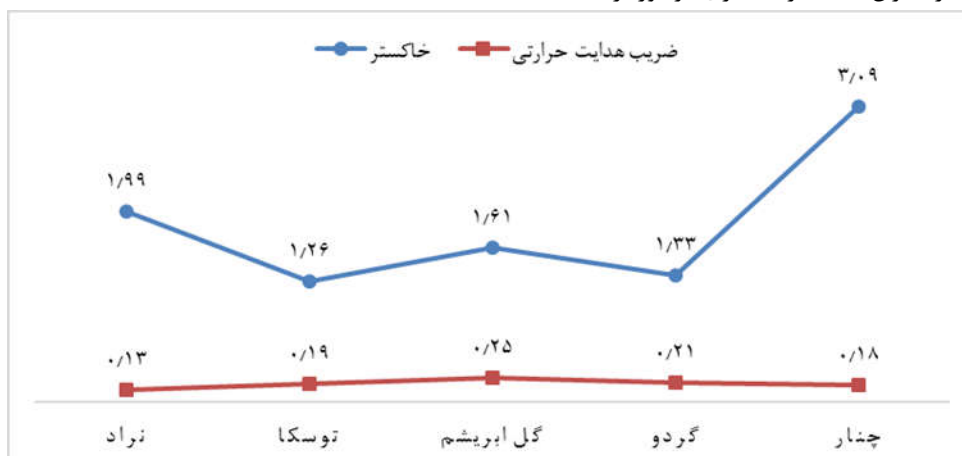
همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود گونه‌های گردو، گل‌ابریشم و توسکا با دانسیته بیشتر از ضریب هدایت بیشتری نیز برخوردار هستند. همچنین گونه نراد با



شکل ۴- بررسی مقدار دانسیته و ضریب هدایت حرارتی موجود در گونه‌های مورد بررسی

ولی از دانسیته و مواد استخراجی پایین‌تری برخوردار هستند که می‌توان نتیجه گرفت خاکستر به تنهایی نمی‌تواند تأثیرگذار باشد نتایج همبستگی نیز نشان داد ارتباط بین خاکستر و ضریب هدایت حرارتی منفی و ضعیف است.

خاکستر چوب از یون‌های فلزاتی مانند کلسیم، پتاسیم، منیزیم، آهن، مس، روی و نیکل تشکیل شده است [۱۳-۱۵] که می‌تواند بر ضریب هدایت حرارت باشد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود گونه‌های چنار و نراد اگرچه از میزان خاکستر بیشتری برخوردار هستند



شکل ۵- بررسی میزان خاکستر و ضریب هدایت حرارتی موجود در گونه‌های مورد بررسی

ترکیبات دیواره سلولی محسوب نمی‌شوند) به جای هوای موجود در خلل و فرج چوب (که یک عایق حرارتی است) باشد که در نتیجه منجر به افزایش هدایت حرارتی می‌شود.

گونه‌های با مقدار دانسیته بیشتر از ضریب هدایت حرارتی بیشتری نیز برخوردار هستند که این امر می‌تواند به دلیل افزایش دیواره سلولی، کاهش میزان خلل و فرج در چوب که منجر به افزایش الکترون‌های آزاد و کم شدن

نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف بررسی تأثیر مواد استخراجی، خاکستر و دانسیته گونه‌های چوبی نراد، توسکا، گل ابریشم، گردو و چنار بر ضریب هدایت حرارتی انجام شد که نتایج زیر به دست آمد:

گونه‌های با میزان مواد استخراجی بیشتر از ضریب هدایت حرارتی بیشتری نیز برخوردار هستند که این امر می‌تواند به دلیل جایگزین شدن مواد استخراجی (که جزو

- Conductivity of Some selected wood Species. *BioResources*. 6(3), pp.2757-2762. DOI:10.15376/BIORES.6.3.2757-2762
- [7] Sahin Kol, H., Uysal, B., Kurt, S. and Ozcan, C., 2010. Thermal Conductivity of oak impregnated with Some chemicals and finished. *BioResources*. 5(2), pp.545-555. DOI:10.15376/BIORES.5.2.545-555
- [8] Sahin Kol, H., 2009. Thermal and Dielectric properties of pine wood in the transverse Direction. *BioResources*. 4(4), pp.1603-1669. DOI:10.15376/BIORES.4.4.1663-1669
- [9] Hunt, J.F. and Gu, H., 2006. Two- Dimensional Finite Element heat transfer Model of soft wood. Part I. Effective Thermal Conductivity. *Wood and Fiber science*, 38 (4), pp.592-598.
- [10] Xie, Y., Yang, Q. And Zhang, B., 2005. Cross- grain cofficent of thermal conductivity for wood. In: international iufro wood drying conference, 9th, pp.101-106.
- [11] Zarr, R. R., Dalton, G. R. and Fiorovante, S. M., Dedelopment of a NIST Standard Reference Database for Thermal Conductivity of Building Materials, National Institute of Standards and Technology.
- [12] Tappi Standards, 2018. Regulations and Style Guidelines, Technical Association of pulp & paper industry, 92 pp.
- [13] Tajik, M., Vaysi, R. and Kiaei, M., 2014. Extraction, Identification and comparison of Organically chemical components in extractive of bark and wood from Eucalyptus by Gas Chromatography-Mass spectrometry. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 29(WINTER 4), pp.644-652. doi: 10.22092/ijwpr.2014.8480
- [14] Tajik, M. and Vaysi, R., 2013. Identification and comparison of chemical components in extractive of bark and wood from willow by Gas chromatography-Mass spectrometry, *Journal of Sciences and Techniques in Natural Resources*. 8 (3), pp.67-75.
- [15] Vaysi, R. and Tajik, M., 2015. An Investigation on the Physical, Chemical, and Biometrical Properties of Planted Bamboo. *Lignocellulose*, vol, 4, pp.50-57.
- [16] Moien, R., Layeghi, M., Lotfi, S. 2011. 'Design, Construction, and Performance Analysis of a Wood Thermal Conductivity Measurement Device using Flat Plate Heat Pipes', *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 1(2), pp.115-123. Doi: 20.1001.1.20089066.1389.1.2.9.5
- [17] Motie, N., Ebrahimi, G., Tajvidi, M., Layeghi, M. (2013). 'Minimizing hot-press time in the manufacturing process of wood plastic composites', *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 4(2), pp.79-90. DOI: 20.1001.1.20089066.1392.4.2.8.5
- میزان هوای موجود در حفرات سلولی شده که در نتیجه سبب افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌گردد.
- میزان خاکستر و وجود یون‌های فلزی در چوب اگرچه می‌تواند بر ضریب هدایت حرارتی تأثیرگذار باشد اما به تنهایی نمی‌تواند تأثیر بسزایی داشته باشد و همبستگی مثبتی نیز بین ضریب هدایت حرارتی و خاکستر وجود ندارد.
- به طور کلی وجود مواد ریز مولکولی آلی غیر ساختاری در چوب که از چربی‌ها و مواد روغنی تشکیل شده‌اند چون جایگزین هوای موجود در خلل و فرج چوب می‌شود سبب افزایش دانسیته و کاهش هوای موجود در خلل و فرج می‌شود. هوای موجود در خلل و فرج یک عایق حرارت است. همچنین ریز مولکول‌های غیر ساختاری در چوب هدایت حرارتی بالاتری نسبت هوا را دارند که در نتیجه سبب افزایش انتقال حرارتی می‌شوند.

منابع

- [1] Enayati, A. A., 2010. *Wood Physics*, University of Tehran Press, Tehran, Iran, 2nd Editinon, 317 p. (In Persian).
- [2] Rassoulinejad Mousavi, S.M., Barzegar, M. and Layeghi, M., 2011. A Comparison between Thermal Conductivity of Populus Alba, Carpinus Betulus and Acer Laetum Woods. *Journal of Sciences and Techniques in natural resources*. 5(4), pp.11-16 (in Persian). <https://sid.ir/paper/375795/en>
- [3] Layeghi, M., Binaye Salab, M. and Hashemi Moghadam, S.A., 2010. Investigation on the nano silver on the properties mechanical and thermal conductivity in particleboard. In: *New technologies in the wood and paper industry*. Chalous, Iran, May. 17-18: 147-148.
- [4] Hosseini, S. S., Shahrjerdi, A. 2022. 'Experimental Study of Thermal and Mechanical Properties of Wood Boards Processed with Hard Recycled Skin of Walnut and Pistachio', *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 54(8), pp.1933-1944. doi: 10.22060/mej.2022.20716.7302
- [5] Oumarou, N., Kocaefe, D. and Kocaefe, Y., 2015. Some investigations on moisture injection, moisture diffusivity and thermal conductivity using a three-dimensional computation of wood heat treatment at high temperature. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 61, pp.153-161. doi: [org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.12.014](http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.12.014)
- [6] Yapici, F., Ozcifici, A., Esen, R. and Kurt, S., 2011. The effect of Grain Angle and Species on Thermal