

## Evaluation of the local dynamic modulus of elasticity in wooden tie by the stress wave method with semi-destructive estimation of density

Ebrahim Khosravi<sup>1</sup>, Amir Lashgari<sup>2\*</sup>, Mehran Roohnia<sup>3</sup>,  
Ahmad Jahan-Latibari<sup>3</sup> and Ajang Tajdini<sup>4</sup>

- 1- Ph.D. Student, Department of Wood and Paper Science and Technology, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran
- 2\*- Corresponding author, Associate Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran, Email: [amir.lashgari@kiaui.ac.ir](mailto:amir.lashgari@kiaui.ac.ir)
- 3- Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran
- 4- Associate Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

Received: March 2023

Revised: June 2023

Accepted: November 2023

### Abstract

**Background and objectives:** Due to the limitations of determining the remaining useful life in the components of the wooden structures at the conditions of use with destructive methods is the impossibility of calculating the modulus of elasticity due to the impossibility of removing the part from the structure. Therefore, most of the classifications during use in the components of structures such as historical buildings are based on measuring the speed of sound. In this research, to calculate the local and global density, the method of pin penetration rate in wooden tie was used to calculate the amount of the remaining useful life. Pin penetration rate was combined with stress wave and free longitudinal vibration methods..

**Methodology:** The three beech wood (*Fagus orientalis*) impregnated wooden tie from Iran Railway Company with the dimensions of 15x25x260 cm, were selected and the density was measured by pin penetration method at 5 points of each wooden tie (50 cm distance between each point) and the average results of 5 points were compared with the results of ISO 13910 standard method. The stress wave test was carried out at the same 5 points of density determination by pin penetration rate method to determine the local modulus of elasticity and the results of each point were compared with the global modulus of elasticity of the beam. Longitudinal vibration test was also performed to calculate the damping factor values of the samples.

**Results:** The results showed that there was no significant difference at the 95% level between the values calculated with both the ISO 13910 standard methods and the pin penetration rate method, and there was a favorable linear correlation between the results of the two methods. According to the results, there was no significant difference between the global sound speed of the beams and their local sound speed in any of the five measured points at the 95% level and there was a linear correlation between the values of the global sound speed and each of the five local points. There was no significant difference at the 95% level between the values of the global

modulus of elasticity and the values of the local modulus of elasticity calculated in each of the five points. Also, there was a linear correlation between the values of the global modulus of elasticity and the results of the local modulus of elasticity in each of the five points. There was an exponential correlation between the values obtained from the global modulus of elasticity and the damping factor of each of the wooden tie.

**Conclusion :**The equality of density according to the ISO 13910 standard method and the nail penetration method, as well as the equality of the modulus of elasticity calculated by the stress wave method and the free longitudinal vibration method, make it possible to obtain all the data required for required calculations without removing the part from the structure. The remaining strength of wooden components should be provided according to EN338 standard.

**Keywords:** wooden tie, stress wave, local modulus of elasticity, density, structure.

## ارزیابی مدول الاستیسیته‌ی دینامیک ناحیه‌ای در تراورس‌های چوبی با روش موج تنش از طریق تخمین نیمه‌مخرب دانسیته

ابراهیم خسروی<sup>۱</sup>، امیر لشگری<sup>۲\*</sup>، مهران روح نیا<sup>۳</sup>، احمد جهان لتیبیاری<sup>۳</sup> و آژنگ تاج دینی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکترای تخصصی، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران، پست الکترونیک: [amir.lashgari@kiauo.ac.ir](mailto:amir.lashgari@kiauo.ac.ir)

۳- استاد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

۴- دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

تاریخ پذیرش: آبان ۱۴۰۲

تاریخ اصلاح نهایی: خرداد ۱۴۰۲

تاریخ دریافت: اسفند ۱۴۰۱

### چکیده

سابقه و هدف: از محدودیت‌های تشخیص میزان عمر مفید باقی‌مانده در اجزای سازه‌های چوبی در شرایط مصرف با روش‌های مخرب، عدم امکان محاسبه‌ی مدول الاستیسیته به دلیل امکان نداشتن خروج قطعه از سازه می‌باشد. بنابراین اکثر درجه‌بندی‌های در حین مصرف در اجزای سازه‌هایی از قبیل بناهای تاریخی براساس سنجش سرعت صوت می‌باشد. در این تحقیق به محاسبه‌ی دانسیته‌ی کلی و ناحیه‌ای با روش میزان نفوذ میخ در تراورس‌های چوبی به منظور محاسبات مربوط به تشخیص میزان عمر مفید باقی‌مانده‌ی آن‌ها با تلفیق روش‌های موج تنش، ارتعاش طولی آزاد پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها: تعداد سه تراورس اشباع شده از شرکت راه آهن ایران و با ابعاد  $260 \times 25 \times 15$  سانتی‌متر که جنس آن‌ها از گونه‌ی راش (*Fagus orientalis*) تهیه گردید و دانسیته به روش میزان نفوذ میخ در ۵ نقطه از هر تراورس صورت پذیرفت (فاصله‌ی ۵۰ سانتی‌متری بین هر نقطه) و میانگین نتایج حاصل از ۵ نقطه با نتایج حاصل از روش استاندارد ایزو ۱۳۹۱۰ مقایسه شد. آزمون موج تنش در همان نقاط ۵ گانه‌ی تعیین دانسیته به روش میزان نفوذ میخ برای تعیین مدول الاستیسیته‌ی ناحیه‌ای صورت پذیرفت و نتایج حاصل از هر نقطه، با مدول الاستیسیته‌ی کلی تیر مقایسه گردید. آزمون ارتعاش طولی در تیر دوسرآزاد نیز جهت محاسبه‌ی میرایی ارتعاش بر روی نمونه‌ها اجرا شد.

نتایج: نتایج نشان داد بین مقادیر محاسبه شده با هر دو روش استاندارد ایزو ۱۳۹۱۰ و روش میزان نفوذ میخ در برآورد دانسیته اختلاف معنی‌داری در سطح ۹۵٪ وجود نداشته و همبستگی مطلوب خطی بین نتایج حاصل از دو روش برقرار است. مطابق با نتایج سرعت صوت کلی تیر با سرعت صوت ناحیه‌ای آن‌ها در هیچ یک از نقاط پنج‌گانه‌ی اندازه‌گیری شده تفاوت معنی‌داری در سطح ۹۵٪ نداشت و بین مقادیر سرعت صوت کلی با هر یک از نقاط پنج‌گانه ناحیه‌ای همبستگی خطی برقرار بود. بین مقادیر مدول الاستیسیته‌ی کلی با مقادیر مدول الاستیسیته ناحیه‌ای محاسبه شده در هر یک از نقاط پنج‌گانه تفاوت معنی‌داری در سطح ۹۵٪ وجود نداشت. همچنین بین مقادیر مدول الاستیسیته کلی با نتایج مدول الاستیسیته‌ی ناحیه‌ای در هر یک از نقاط پنج‌گانه نیز همبستگی خطی برقرار بود. بین مقادیر حاصل از مدول الاستیسیته‌ی کلی و میرایی ارتعاش هر یک از تراورس‌ها، همبستگی نمایی وجود داشت.

نتیجه‌گیری: برابری دانسیته به روش استاندارد ایزو ۱۳۹۱۰ و روش میزان نفوذ میخ، و همچنین برابری مدول الاستیسیته‌ی محاسبه شده به روش موج تنش و روش ارتعاش طولی آزاد، این امکان را فراهم می‌آورد که بدون خروج قطعه از سازه کلیه‌ی دیتاهای مورد نیاز جهت محاسبات میزان مقاومت باقی‌مانده‌ی اجزای چوبی براساس استاندارد EN338 فراهم گردد.

واژه‌های کلیدی: تراورس، موج تنش، ارتعاش طولی، مدول الاستیسیته ناحیه‌ای، دانسیته، سازه.

## مقدمه

آزمون‌ها غیرمخرب مجموعه‌ی متنوعی از آزمایش‌هایی هستند با قابلیت اجرا بر روی مواد که حتی در شرایط سرویس نیز قابلیت اجرا دارند. نتایج حاصل از این قبیل آزمون‌ها شامل اطلاعات جامع در مورد ویژگی‌های مکانیکی، و نیز احتمال وجود معایب در نمونه‌های مورد آزمون می‌باشد (Schimleck *et al.*, 2001). از طرف دیگر غیرمخرب بودن این روش‌ها به ما این اجازه را می‌دهد که در صورت لزوم در کل حجم نمونه چندین بار آزمایش را تکرار نماییم (Kubojima *et al.*, 2017). اهمیت این آزمون‌ها زمانی بیشتر می‌گردد که در برخی از سازه‌های چوبی‌ای که به دلایل مختلفی همچون تاریخی بودن، کمیاب بودن چوب مورد مصرف در ساخت آن‌ها و ملاحظات دیگر، در صورت ایجاد خسارت به بخشی از آن‌ها، امکان خروج قطعه از سازه وجود ندارد، می‌توان به‌وسیله این آزمون‌ها، به میزان مقاومت باقی مانده در این قطعات پی برد (Kubojima *et al.*, 2009). تحقیقات بسیاری در مورد اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی قابل‌سنجش چوب و محصولات چوبی، به‌منظور درجه‌بندی، عیب‌یابی و یا تخمین میزان مقاومت باقی‌مانده سازه با روش‌های غیرمخرب صورت پذیرفته است. Laurence و همکاران (۱۹۹۹) به بررسی بافت پوسیده در دو گونه اکالیپتوس و ملج با استفاده از دو روش رزیستوگراف و مته زنی پرداختند. آنان دریافتند روش نوین استفاده از رزیستوگراف دقت و سرعت بالاتری نسبت به روش قدیمی‌تر مته زنی دارد. هر دو روش به کار رفته بدون محاسبه‌ی مدول الاستیسیته برآوردی از شرایط مکانیکی با توجه به رابطه‌ی بین مدول الاستیسیته و وزن مخصوص داشتند. Booker و همکاران (۲۰۰۰) برآوردی از ابزارها برای اندازه‌گیری سرعت صوت و سختی گرده‌بینه سبز کاج رادیاتا انجام دادند. سرعت صوت در بینه کاج رادیاتا با چندین ابزار و تکنیک مختلف (Metriguard, Siva Test, FAKKOP) انجام دادند. نتایج حاکی از آن بود که ابزار FAKKOP که بر مبنای اختلاف صوت طراحی شده است کارایی بهتری نسبت به دو ابزار Metriguard, Siva Test که (بر مبنای اختلاف دانسیته

طراحی شده‌اند) دارد. Divos و Szalai (۲۰۰۲) با روش پرتونگاری بر پایه موج تنش برای ارزیابی ویژگی‌های درخت سرپا استفاده کرد. تعیین و ارزیابی و تعیین اندازه پوسیدگی ریشه از گام‌های مهم در ارزیابی درخت سرپا می‌باشد و این کار را با بررسی سرعت موج تنش در این ناحیه می‌توان انجام داد. در این روش سرعت در نواحی عاری از عیب را قبلاً در درخت سالم به دست آورده و به‌عنوان سرعت مرجع انتخاب کرده و اختلاف سرعت احتمالی بین درخت مورد آزمون با سرعت مرجع را مقایسه و به ارزیابی درخت سرپا پرداخته می‌شود. Wang و همکاران (۲۰۰۹) مدول الاستیسیته و مدول برشی الوارهای خارج از سرویس نوئل و سرخدار را با استفاده از تکنیک فراصوت با امواج طولی و عرضی بررسی و تعیین کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که، مدول الاستیسیته در جهت طولی، در هر دو گونه با یک روند افزایش می‌یابد که به این معنی است که در گونه‌هایی با دانسیته بالا، مدول الاستیسیته در جهت طولی، زیاد است. Guyette و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از دستگاه رزیستوگراف به بررسی آسیب‌های قدیمی پنهان‌شده در زیر پوست درختان بلوط پرداختند. آن‌ها بیان داشتند که کاربرد این دستگاه به دلایل گراف‌های متفاوت از دانسیته در راستای عرض تنه اطلاعات بسیار خوبی از وقایعی همچون آتش‌سوزی و غیره که در سالیان قبل در طول عمر درخت رخ داده است در اختیار کاربر قرار می‌دهد. Kohantorabi و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی تأثیر اتصال در خارج از سازه در نواحی مختلف تیرهای چوبی با روش ارتعاش طولی آزاد پرداختند. نتایج تحقیقات حاکی از آن بود که تغییر محل اتصال در تیر تأثیر معنی‌دار بر نتایج حاصل از مدول الاستیسیته دینامیک دارد. یکی از مهم‌ترین پارامترهای مواد در تعیین ویژگی‌های مکانیکی مدول الاستیسیته می‌باشد. مدول الاستیسیته را می‌توان به‌عنوان قابلیت برگشت یک ماده به حالت اولیه خود پس از ایجاد تنش تعریف نمود (Albert *et al.*, 2002). آزمون‌های غیرمخرب به دلیل سهولت و مقرون‌به‌صرفه بودن در تعیین و ویژگی‌های مکانیکی (به‌ویژه مدول الاستیسیته) چوب و فراورده‌های چوبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هست

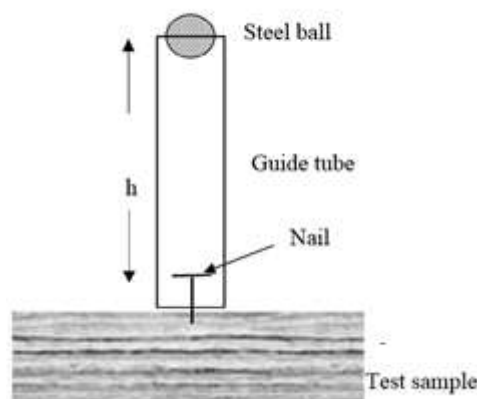
علاوه بر ارتقا دقت ارزیابی‌های کیفی در تراورس‌های چوبی، سبب بهبود دقت در بازرسی سازه‌های چوبی دیگر در حال مصرف می‌گردد. به علاوه نتایج حاصل می‌تواند در طراحی ابزارهای جدید در بازرسی کیفی چوب و محصولات چوبی جهت محاسبه‌ی مدول الاستیسیته دینامیک که از الزامات استاندارد EN338 به شمار می‌آید کارایی داشته باشد.

### مواد و روش‌ها

محاسبه دانسیته بر اساس میزان نفوذ میخ

تعداد سه تراورس اشباع شده از شرکت راه آهن ایران و با ابعاد  $25 \times 25 \times 260$  سانتی‌متر که جنس آن‌ها از گونه‌ی راش (*Fagus orientalis*) تهیه گردید. نمونه‌های انتخاب شده به منظور رسیدن به دما و رطوبت تعادل (۱۲٪) به اتاق کلیماتیزه با دمای  $20 \pm 2$  سانتی‌گراد و رطوبت نسبی  $65 \pm 5$  انتقال یافتند. پس از مدت مذکور دانسیته‌ی نمونه‌ها با روش میزان نفوذ میخ، مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. لازم به ذکر است دانسیته به روش میزان نفوذ میخ در ۵ نقطه از هر تراورس صورت پذیرفت (فاصله‌ی ۵۰ سانتی‌متری بین هر نقطه) و نتایج حاصل از ۵ نقطه جهت مقایسه با نتایج حاصل از استاندارد شده به روش استاندارد ایزو به کار گرفته شد. با توجه به اینکه اندازه‌گیری دانسیته با این روش نیازی به استخراج نمونه از سازه ندارد، در این تحقیق دانسیته ابتدا با روش میزان نفوذ میخ و سپس نتایج حاصل با مقادیر اندازه‌گیری شده به روش استاندارد ایزو ۱۳۹۱۰ مقایسه گردید.

(Bucur, 2006., Bodig and Jayne., 1993). اندازه‌گیری دانسیته چوب پیش‌نیاز محاسبه مدول الاستیسیته به‌منظور برآورد و تخمین میزان مقاومت قطعه‌ی چوبی می‌باشد. این امر در چوب‌آلاتی که خارج از سازه هستند به راحتی و با شیوه‌های متنوع قابلیت اجرا دارد. ولی در چوب‌هایی که در شرایط مصرف در یک سازه هستند باید شیوه‌ای به کار گرفت تا بدون خروج قطعه از سرویس مقادیر دانسیته محاسبه گردد (Khosravi et al., 2021). به همین دلیل است که اکثر بررسی‌هایی که در مورد چوب‌آلات در شرایط سرویس و یا در درختان سرپا صورت می‌پذیرد، بر مبنای اختلاف سرعت صوت حاصل از امواج موج تنش و یا اختلاف دانسیته (به‌وسیله‌ی مته‌ی رزیستوگراف) با توجه به بانک جامعی که از مقادیر سرعت صوت و یا دانسیته‌ی گونه‌ی مورد آزمون از قبل در دسترس است، ارائه شده است. بدیهی است نتایج اکثر تحقیقات حاضر که بر مبنای اختلاف سرعت صوت و یا دانسیته (در چوب‌آلات در شرایط سرویس و یا درخت سرپا) نتیجه‌ای در مورد مدول الاستیسیته چوب مورد آزمون با توجه به دانسیته‌ی آن در زمان انجام آزمون را در پی نداشته و امکان کلاسه‌بندی چوب در شرایط مصرف با توجه به استاندارد EN338 نیز فراهم نیست. لذا در این تحقیق برآنیم تا با روش موج تنش مدول الاستیسیته تراورس‌های چوبی را از طریق تخمین نیمه‌مخرب دانسیته به روش میزان نفوذ میخ، در نواحی مختلف محاسبه نماییم و همچنین با محاسبه‌ی میرایی ارتعاش از طریق ارتعاش طولی، زمینه‌ی تخمین مقاومت خمشی بر اساس استاندارد EN338 را فراهم نماییم. نیل به این هدف



شکل ۱- تصویر شماتیک از آزمون نفوذ میخ

Figure 1. Schematic view of the pin penetration test

$$\rho_N = 1200 \times EXP^{\frac{-0/2 \times N_P}{0/95}} \quad (2)$$

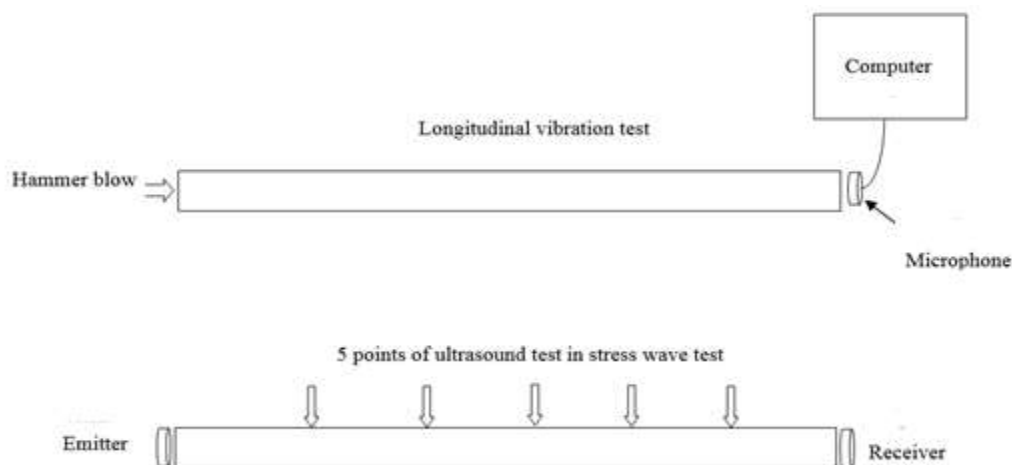
در آن  $\rho$  و  $\rho_N$  دانسیته برحسب کیلوگرم بر مترمکعب،  $m$  جرم قطعه برحسب کیلوگرم،  $b$  و  $h$  و  $L$  به ترتیب عرض، ارتفاع و طول قطعه برحسب متر و  $N_p$  میزان نفوذ میخ در چوب می‌باشد (Khosravi et al., 2021).

### آزمون غیرمخرب موج تنش

توسط آزمون موج تنش بررسی مدول الاستیسیته کلی (فرستنده ابتدای تیر و گیرنده انتهای تیر)، در طول هر یک از سه تراورس و مدول الاستیسیته ناحیه‌ای در همان پنج نقطه‌ای که دانسیته بر اساس میزان نفوذ میخ تخمین زده شده بود انجام گرفت. جهت اندازه‌گیری میرایی ارتعاش نیز آزمون ارتعاش طولی آزاد در تیر دو سر آزاد بر روی هر سه تراورس صورت پذیرفت. آزمون موج تنش با دستگاه TOMOTREE و آزمون ارتعاش طولی در تیر دو سر آزاد توسط سیستم NDT- lab انجام شد (Roohnia et al., 2007 and 2017).

در اثر سقوط گوی بر روی میخ، انرژی نهفته در گوی به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود و بر اساس رابطه‌ی  $E=mgh$ ، میزان انرژی جهت نفوذ میخ در سطح مورد بررسی محاسبه گردید. در این آزمون، گوی فلزی به جرم  $0/1738$  گرم از ارتفاع  $2$  متری در لوله استوانه‌ای بلند هدایت شد و میخ را با انرژی ثابت  $mgh$  به نمونه کوبید و عمق نفوذ آن در هر نقطه ثبت گردید. مطابق تحقیقات Cai و همکاران (2002) و Del menezzi همکاران (2018) عمق نفوذ میخ نسبت مستقیمی با دانسیته چوب مورد آزمایش دارد. لذا توسط آزمون رگرسیون خطی، رابطه عمق نفوذ میخ با دانسیته اندازه‌گیری شده و کالیبره شد. این آزمون در پنج نقطه از هر الوار صورت پذیرفت و میانگین نتایج حاصل از نقاط پنج‌گانه‌ی هر تراورس محاسبه شده و با نتایج حاصل از روش استاندارد ایزو 13910 مقایسه گردید (دانسیته‌ی کلی تیر به روش ایزو 13910). دانسیته بر اساس روش استاندارد ایزو 13910 توسط رابطه 1 و دانسیته بر اساس میزان نفوذ میخ از طریق رابطه 2 محاسبه گردید.

$$\rho = \frac{m}{b \times h \times L} \quad (1)$$



شکل ۲- تصویر شماتیک از آزمون ارتعاش طولی و موج تنش

Figure 2. Schematic view of longitudinal vibration and stress wave test

مدول الاستیسیته کلی تیر مقایسه گردید. جهت بالاتر رفتن دقت اندازه‌گیری مدول الاستیسیته کلی در تیرها در ۵ نقطه در پهنای چوب صورت گرفت و نتایج حاصل با مدول الاستیسیته ناحیه‌ای مقایسه شد. جهت بررسی رابطه‌ی بین مدول الاستیسیته و میرایی ارتعاش نیز مدول الاستیسیته کلی تیرها با نتایج حاصل از میرایی ارتعاش هر یک از آنها مقایسه گردید. آزمون ارتعاش طولی در تیر دو سر آزاد نیز جهت محاسبه‌ی میرایی ارتعاش مطابق با شکل ۲ بر روی نمونه‌ها اجرا شد.

همبستگی بین مقادیر حاصل شده از دانسیته به روش استاندارد ایزو ۱۳۹۱۰ و روش میزان نفوذ میخ (مقایسه‌ی میانگین مقادیر ۵ نقطه از هر تراورس با مقادیر حاصل از استاندارد ایزو ۱۳۹۱۰ هر یک از تراورس‌ها) و همچنین مقادیر حاصل از سرعت صوت و مدول الاستیسیته (ناحیه‌ای و کلی در نقاط پنج‌گانه به صورت مجزا) با روش موج تنش و مدول الاستیسیته کلی با میرایی ارتعاش توسط آزمون همبستگی پیرسون و برازش مدل رگرسیونی بررسی شد. مقایسه‌ی میانگین‌های هر یک از ویژگی‌های آکوستیکی حاصل از هر مرحله‌ی آزمونی نیز توسط آزمون آماری T test

محاسبات مدول الاستیسیته کلی و ناحیه‌ای در نواحی پنج‌گانه از طریق رابطه‌ی ۳ صورت پذیرفت (Brancheriau and Bailleres 2002).  $E_L$  مدول الاستیک در جهت طولی چوب حاصل از ارتعاش طولی و  $l$  طول نمونه،  $\rho$  دانسیته،  $f$  فرکانس،  $n$  امین مد استخراج شده  $\rho$  دانسیته‌ی آزمون‌ها با روش میزان نفوذ میخ و بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب است.

$$E_L = 4l^2 \rho \frac{f_n^2}{n^2} \quad (3)$$

میرایی حاصل از ارتعاش طولی آزاد در تیر دو سر آزاد که شاخصی برای میزان افت ارتعاش در طول زمان است از رابطه زیر محاسبه گردید (Bodig & Jayne, 1993).

$$\lambda = \frac{1}{n} \ln \left| \frac{X_1}{X_{n+1}} \right| \quad (4)$$

$X_1$  بلندی اولیه موج در حال کاهش و:  $X_{n+1}$  بلندی  $n$  امین موج پس از موج متناظر با  $X_1$ . لازم به ذکر است آزمون موج تنش در همان نقاط ۵ گانه تعیین دانسیته به روش میزان نفوذ برای تعیین مدول الاستیسیته ناحیه‌ای صورت پذیرفت و نتایج حاصل از هر نقطه، با

نتایج حاصل از دانسیته‌ی اندازه‌گیری شده با روش استاندارد ایزو ۱۳۹۱۰ در هریک از تیرها در مقایسه با میانگین دانسیته محاسبه شده در نقاط پنج‌گانه‌ی هریک از تیرها با روش میزان نفوذ میخ در شکل ۳ مورد بررسی قرار گرفته است. بین مقادیر محاسبه شده با هر دو روش اختلاف معنی‌داری در سطح ۹۵٪ وجود ندارد. همچنین نتایج حاکی از آن است که بین مقادیر محاسبه شده از هر دو روش، همبستگی خطی برقرار است.

صورت پذیرفت. برای انجام آزمون‌های آماری از نرم‌افزار SPSS Ver. 17 و برای رسم نمودار و خط رگرسیون از نرم‌افزار MS EXCEL استفاده گردید.

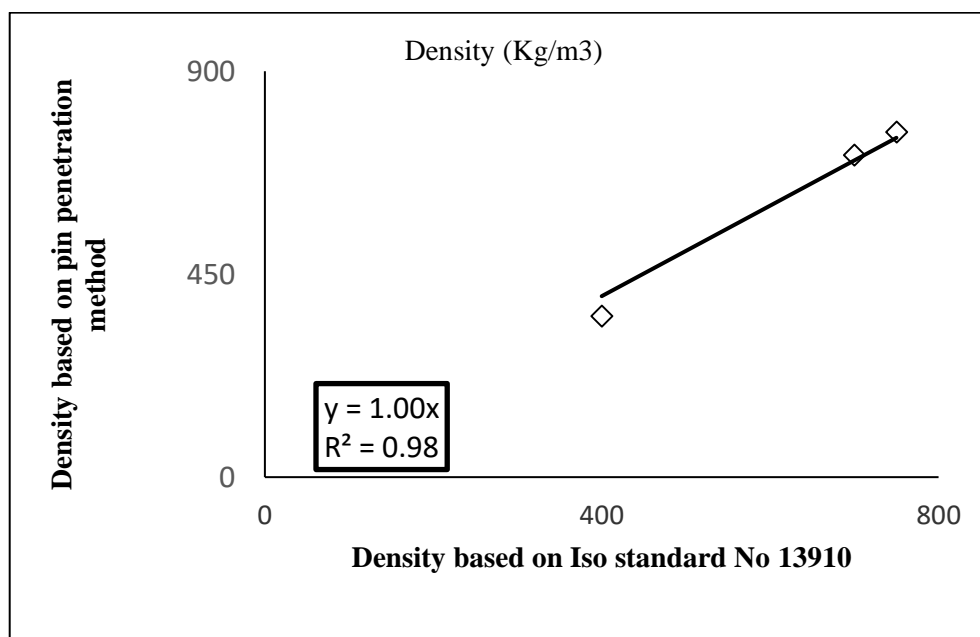
## نتایج

در جداول ۱ و ۲ مقادیر میانگین مقادیر کمی و تجزیه و تحلیل آماری فاکتورهای محاسبه شده آمده است.

جدول ۱- میانگین فاکتورهای محاسبه شده

Table 1- Average calculated factors

	Density by ISO 13910 method (kg/m <sup>3</sup> )	Density by pin penetration method (kg/m <sup>3</sup> )	Local V (m/s)	Global V (m/s)	Local E (Gpa)	Global E (Gpa)	Damping factor
Sample 1	400	357	3840.30	4184.98	11.39	11.34	0.012
Sample 2	750	764	3452.86	3762.58	8.44	8.51	0.017
Sample 3	700	714	3590.08	4291.75	11.81	11.99	0.009



شکل ۳- مقایسه دانسیته بر اساس روش استاندارد ایزو ۱۳۹۱۰ و روش میزان نفوذ میخ

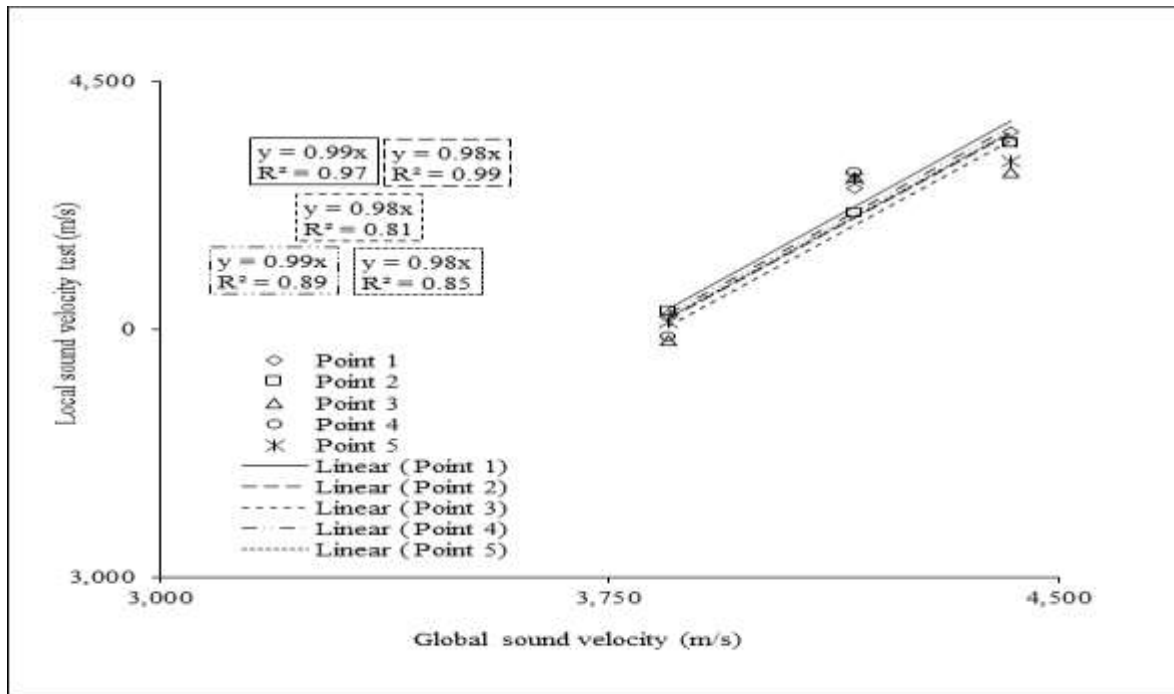
Figure 3. Comparison of density based on the based on Iso standard No 13910 and the pin penetration method



جدول ۲- تجزیه و تحلیل آماری

Table 2- Statistical Analysis

		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	t	df	Sig. (2-tailed)
1	VG1 - VL1	353.3	566.21	326.9	1.081	2	.393
2	VG2 - VL2	556.6	247.91	143.14	3.889	2	.060
3	VG3 - VL3	346.2	157.97	91.20	3.796	2	.063
4	VG4 - VL4	441.99	297.6	171.83	2.572	2	.124
5	VG5 - VL5	563.32	355.28	205.12	2.747	2	.111
6	EG1 - EL1	1.8E8	2.50E8	1.44E8	1.267	2	.333
7	EG2 - EL2	1.8E8	2.24E8	1.29E8	1.410	2	.294
8	EG3 - EL3	1.9E8	5.99E8	3.45E8	.292	2	.798
9	EG4 - EL4	2.0E8	2.48E8	1.43E8	-1.425	2	.290
10	EG5 - EL5	1.9E8	2.60E8	1.50E8	.466	2	.687
11	DI - DP1	4.66	33.20	19.16	.243	2	.830
12	DI - DP2	4.33	33.54	19.36	.224	2	.844
13	DI - DP3	1.66	34.96	20.18	.083	2	.942
14	DI - DP4	5.30	30.03	17.34	.308	2	.788
15	DI - DP5	7.00	33.86	19.55	.358	2	.755

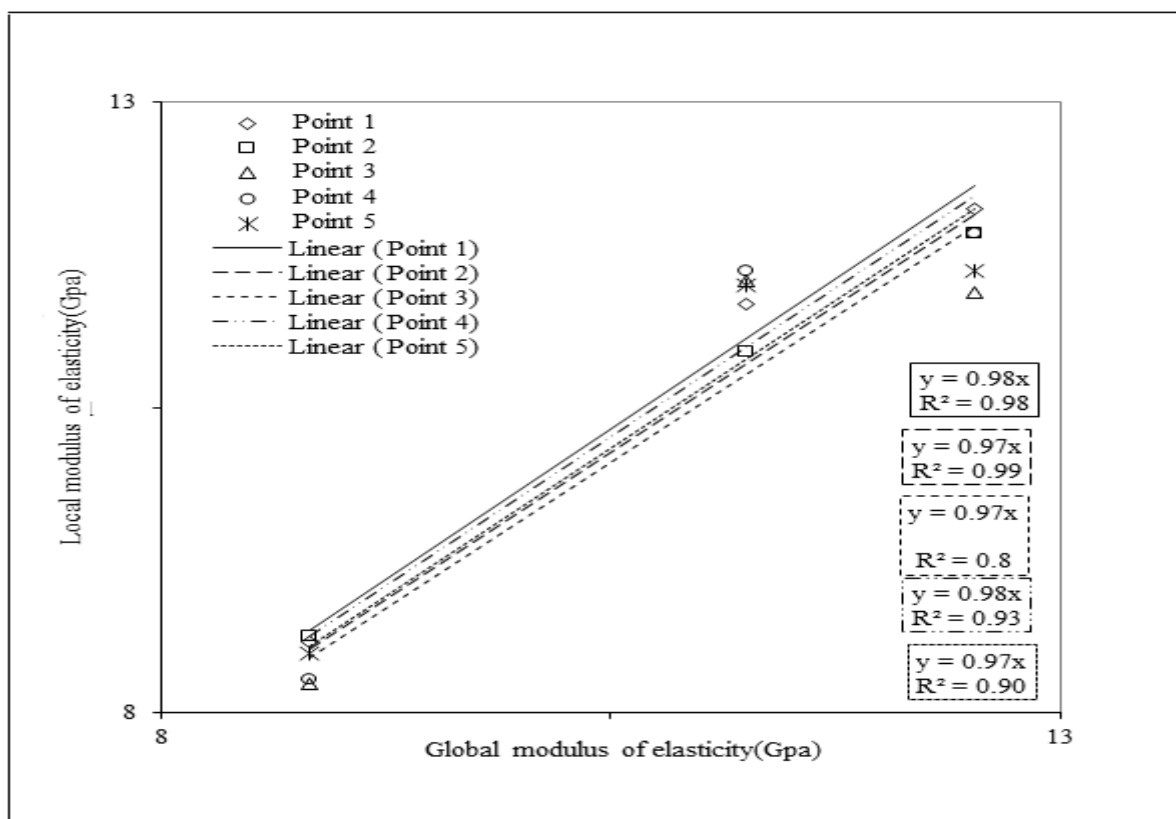


شکل ۴- مقایسه سرعت صوت کلی و سرعت صوت ناحیه‌ای در نقاط پنج گانه

Figure 4. Comparison of local sound velocity and global sound velocity in five points

صوت کلی تیر با سرعت صوت ناحیه‌ای آن‌ها در هیچ یک از نقاط پنج‌گانه‌ی اندازه‌گیری شده تفاوت معنی‌داری در سطح ۹۵٪ ندارد. بین مقادیر سرعت صوت کلی با هر یک از نقاط پنج‌گانه ناحیه‌ای همبستگی خطی برقرار است.

در شکل ۴ سرعت صوت کلی در نقاط ۵ گانه‌ی هریک از سه تراورس با سرعت ناحیه‌ای در هر یک از پنج نقطه‌ی اندازه‌گیری شده‌ی آن‌ها مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌گردد مقادیر سرعت

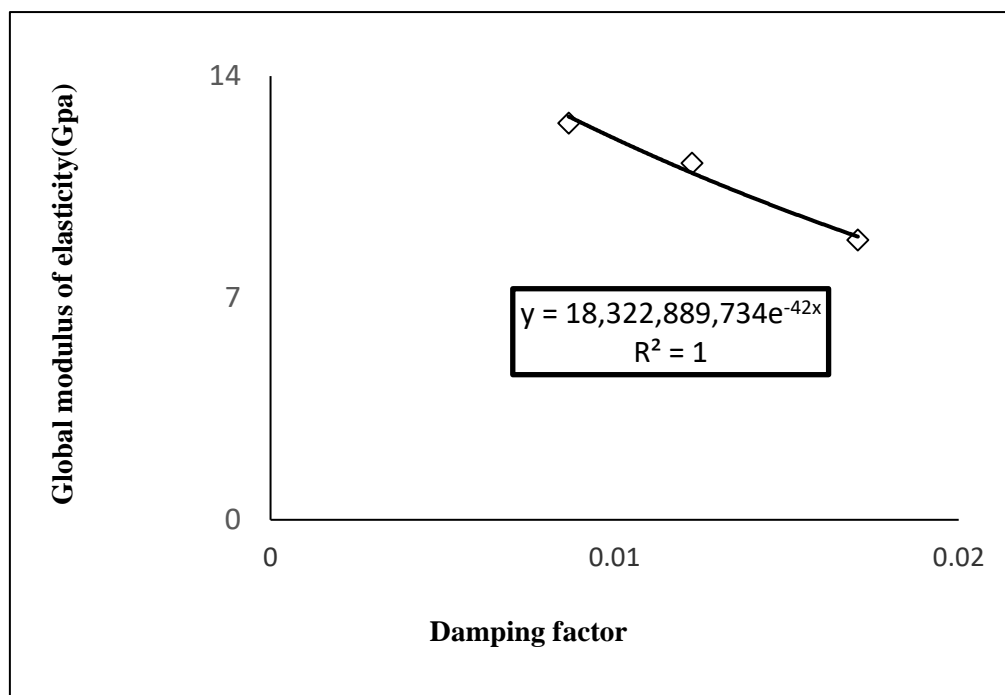


شکل ۵. مقایسه مدول الاستیسیته کلی و مدول الاستیسیته ناحیه‌ای در نقاط پنج‌گانه

Figure 5. Comparison of local modulus of elasticity and global modulus of elasticity in five points

یک از نقاط پنج‌گانه تفاوت معنی‌داری در سطح ۹۵٪ وجود ندارد. بین مقادیر مدول الاستیسیته کلی با نتایج مدول الاستیسیته ناحیه‌ای در هر یک از نقاط پنج‌گانه نیز همبستگی خطی برقرار است.

شکل ۵ مدول الاستیسیته کلی هریک از سه تراورس را با مدول الاستیسیته ناحیه‌ای در پنج نقطه‌ی اندازه‌گیری شده‌ی آن‌ها مورد مقایسه و بررسی قرار داده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد بین مقادیر مدول الاستیسیته کلی با مقادیر مدول الاستیسیته ناحیه‌ای محاسبه شده در هر



شکل ۶. مقایسه مدول الاستیسیته کلی با مقادیر میرایی ارتعاش

Figure 6. Comparison of local modulus of elasticity and damping factor

سنجش سرعت صوت اجزای سازه و مقایسه‌ی نتایج با بانک اطلاعاتی موجود در مورد گونه‌ی مورد بررسی می‌باشد (Adebawo *et al.*, 2019). همانطور که در شکل ۳ مشاهده شد دانسیته‌ی محاسبه شده از روش استاندارد ایزو ۱۳۹۱۰ که بر مبنای اندازه‌گیری وزن و ابعاد در شرایط رطوبتی تعادل ۱۲ درصد می‌باشد با نتایج حاصل از دانسیته‌ی محاسبه شده به روش میزان نفوذ میخ علاوه بر اینکه برابری نمود بلکه از همبستگی بسیار مطلوبی هم برخوردار بود (شکل ۳) Cai و همکاران (۲۰۰۲) و Del menezzi همکاران (۲۰۱۸) موفق به اجرای این شیوه از اندازه‌گیری دانسیته در سازه‌های چوبی شده و با توجه به استاندارد EN338 میزان مقاومت باقی‌مانده‌ی اجزای مورد بررسی را کلاسه بندی نموده بودند. در بخش اول این تحقیق نیز Khosravi و همکاران (۲۰۲۱) موفق به اندازه‌گیری دانسیته به روش میزان نفوذ میخ در گونه‌های چوبی و فراورده‌های مرکب چوبی شده بودند که

مقادیر حاصل از میرایی ارتعاش و مدول الاستیسیته کلی در هر یک از نمونه‌ها در شکل ۶ مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌گردد بین مقادیر حاصل از مدول الاستیسیته کلی و میرایی ارتعاش هر یک از تراورس‌ها، همبستگی‌ی نمایی وجود دارد.

### بحث

یکی از معضلات در درجه‌بندی و تشخیص میزان عمر مفید باقی‌مانده در اجزای سازه‌های در شرایط مصرف با روش‌های صوتی (ارتعاش و فراصوت)، عدم امکان محاسبه‌ی مدول الاستیسیته به دلیل امکان نداشتن خروج قطعه از سازه می‌باشد. چرا که جهت محاسبه‌ی مدول الاستیسیته، دانسیته قطعه نیز باید در اختیار کاربر باشد. بنابراین اکثر درجه بندی‌های در حین مصرف در اجزای سازه‌هایی از قبیل بناهای تاریخی، پل‌های چوبی، تراورس‌های چوبی و غیره براساس

مورد استفاده قرار گیرد در تحقیقات پیشین رابطه‌ی نمایی بین مدول الاستیسیته دینامیک و میرایی ارتعاش گزارش شده بود در این تحقیق نیز بین مقادیر میرایی ارتعاش حاصل از ارتعاش آزاد طولی در تیر دو سر آزاد و مدول الاستیسیته‌ی حاصل از روش موج تنش همبستگی نمایی بسیار مطلوبی برقرار بود (Brémaud, 2012). اندازه‌گیری میرایی ارتعاش از آن جهت در این تحقیق حائز اهمیت بود که با توجه به استاندارد می‌توان مقاومت خمشی چوب آلات در شرایط سرویس را بدون خارج نمودن قطعه از سازه برآورد نمود. پیش از این با شیوه‌هایی نظیر ارتعاش اجباری با تجهیزاتی هزینه‌بر امکان ارزیابی کیفی تراورس‌های چوبی (بدون برآورد مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی که از الزامات استاندارد EN338 می‌باشد) فراهم بود. با نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان در شرایط سرویس کلیه‌ی دیتاهای لازم جهت محاسبه‌ی میزان مقاومت باقی‌مانده اجزای سازه را با توجه به استاندارد EN338 فراهم نمود و چوب مورد نظر را درون سازه و به صورت بر خط کلاسه‌بندی نمود.

### منابع مورد استفاده

- Adebawo, F., Ajala, O. and Aderemi, T., 2019. Variation of physical and mechanical properties of *Boscia angustifolia* (a. rich.) wood along radial and axial stem portion. *PRO LIGNO*, 15(1):34-42.
- Baar, J., Tippner, J. and Rademacher, P., 2015. Prediction of mechanical properties – modulus of rupture and modulus of elasticity of five tropical species by nondestructive methods. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 17(2):239-252.
- Bodig, J. and Jayne, B.A., 1993. *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Krieger Pub Co, USA, 736PP.
- Brancheriau, L. and Bailleres, H., 2003. Use of the Partial Least Squares Method with Acoustic Vibration Spectra as a New Grading Technique for Structural Timber. *Holzforchung*, 57 (1): 644-652.
- Booker, RF., Ridoutt, B., McConchie, D., Whealleans, K. and Ball, R., 2000. Evaluation of Tools to Measure the Sound Velocity and Stiffness of Green Radiata Pine Logs, Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood University of Western Hungary, Sopron, 13-15 September 2000, ISBN 963 7180 88 5, Publisher:

نتایج این تحقیق بر روی تراورس‌های چوبی حاکی از کارآمد بودن روش مورد تحقیق در اندازه‌گیری دانسیته می‌باشد. نتایج حاصل از سرعت صوت کلی در کل طول هر تراورس و سرعت صوت ناحیه‌ای در نقاط پنج‌گانه نیز علاوه بر برابری، از همبستگی بسیار مطلوبی برخوردار بودند (شکل ۴). Kabir و همکاران در سالهای ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ با روش موج تنش موفق به اندازه‌گیری سرعت صوت در نواحی مختلف تیرهای چوبی شدند که بر اساس نتایج بدست آمده وجود معایبی همچون گره و ترک را در تیرهای چوبی تشخیص دادند. همچنین Kovryga و همکاران (۲۰۲۰) موفق شدند از طریق برآورد سرعت صوت در جهت عرضی تیرهای چوبی آن‌ها را درجه‌بندی نمایند. عملکرد بسیاری از دستگاههای صوتی که جهت ارزیابی با استفاده از سرعت صوت ناحیه‌ای صورت می‌پذیرد مبنای مقایسه‌ی نتایج آزمون با بانک جامع اطلاعاتی سرعت صوت همان گونه از سازه در شرایط کاملاً سالم می‌باشد (Bucur, 2006; Baar et al., 2015). بنابراین بدیهیست با در اختیار داشتن سرعت صوت ناحیه‌ای، ارزیابی نمی‌تواند به دقتی در اختیار داشتن مقادیر مدول الاستیسیته در هنگام آزمون سازه و کلاسه‌بندی براساس استاندارد EN338 باشد. چرا که از تعیین مدول الاستیسیته از الزامات استاندارد EN338 می‌باشد. نتایج حاصل از مدول الاستیسیته ناحیه‌ای در نقاط پنج‌گانه از هر یک از تراورس‌ها نیز حاکی از برابری و همبستگی بسیار مطلوب با نتایج مدول الاستیسیته کلی بود. پیش از این Papandrea و همکاران در سال ۲۰۲۲ موفق به ارزیابی مدول الاستیسیته کلی در سه کلن از گونه‌ی صنوبر شده بودند. آن‌ها نتایج مدول الاستیسیته‌ی کلی برآورد شده را با نتایج مدول الاستیسیته ناحیه‌ای بعد از قطع درختهای مورد آزمون و اندازه‌گیری دانسیته بعد از قطع گونه‌ها مورد بررسی قرار دادند و همبستگی مطلوبی بین مقادیر گزارش نمودند. نتایج تحقیق حاضر آنجا حائز اهمیت می‌شود که هم مدول الاستیسیته و هم دانسیته در شرایط مصرف سازه بدست آمد و مقادیر محاسبه شده با انطباق با استاندارد EN338 می‌تواند در کلاسه‌بندی و تشخیص میزان عمر مفید باقی‌مانده هر یک از تراورس‌ها

- A. and Tajdini, A., 2021. Evaluation of pin penetration probing technique for the assessment of basic density in air-dried wood. *BioResources*, 16(4): 6577-6586.
- Kohantorabi, M., Hemmasi, A.M., Talaeipour, M., Roohnia, M. and Bazayar, B., 2020. Effect of artificial inhomogeneity of density and drilling on dynamic properties developed by Poplar block species (*Populus Nigra*) jointed with oak wood (*Quercus Castaneifolia*) beams. *BioResources*, 15(3):4711-4726.
- Kovryga, A., Khaloian Sarnaghi. A. and van de Kuilen, JWG., 2020. Strength grading of hardwoods using transversal ultrasound. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78:951-960
- Kubojima, Y., Inokuchi, Y., Suzuki, Y. and Tonosaki, M., 2009. Shear modulus of several kinds of Japanese Bamboo obtained by flexural vibration test. *Journal of Wood Science and technology*, 56(1): 64-70.
- Kubojima, Y., Suzuki, Y. and Tonosaki, M., 2017. Effect of Additional Mass on the apparent Young's modulus of a wooden bar by longitudinal vibration. *BioResources*, 9(3): 5088-5098.
- Papandrea, SF., Cataldo, MF., Bernardi, B., Zimbalatti, G. and Proto, AR., 2022. The Predictive Accuracy of Modulus of Elasticity (MOE) in the Wood of Standing Trees and Logs. *Forests*, 13: 2-15.
- Schimleck L. R., Evans R. and Ilic J., 2001. Estimation of Eucalyptus delegatensis wood properties by Near Infrared Spectroscopy. *Can J For Res*, 31:1671-1675.
- Roohnia, M., 2007: NDT-LAB, System to evaluate the mechanical properties of wood. IR-Patent No. 4032/22-08 1386. Iranian official Journal. Retrieved 14-04-2017: [http://www.gazette.ir/Detail.asp?NewsID=914760224197351 & paper ID=975266637116773](http://www.gazette.ir/Detail.asp?NewsID=914760224197351&paperID=975266637116773)
- Wang S.Y., Lin C.J. and Tsai M.J., 2008. Evaluation of the Mechanical Properties of Douglas- fir and Japanese Cedar Lumber and its Structural Glulam by Nondestructive Techniques. *Construction and Building Materials*, 22: 487-493.
- University of Western Hungary, H 9400 Sopron
- Brémaud, I., 2012. What do we know on" resonance wood" properties? Selective review and ongoing research. *Proc. Acoustics 2012, Nantes Conf*, 23-27 April 2012, Nantes France: 2759-2764.
- Bucur, V., 2006. *Acoustics of Wood*. 2<sup>nd</sup> Ed., Springer, Berlin, Germany, 625p.
- Cai, Z., Hunt, M., Ross, R. and Soltis, L., 2003. Screw Withdrawal – A Means to Evaluate Densities of In-situ Wood Members. In *Proc. 13<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. University of California, Berkeley Campus California, August 19-21, 2002: 277-281.
- Del Menezzi, C., Henrique, C., Soares, L., Siqueira, L. and Melo, R., 2018. Effect of wood density and screw length on the withdrawal resistance of tropical wood. *Nativa Sinop*, 6,(4):p. 402-406.
- Divos, F. and Szalai, L., 2002. Tree evaluation by acoustic tomography. In: *Proceedings of the 13th International symposium on nondestructive testing of wood*. Berkeley, CA. Madison, 2002 August 19-21, WI: Forest Products Society: 251-256.
- Guyette, R., Stambaugh, M., Stevenson, A. and Muzika, RM., 2008. Prescribed fire effects on the wood quality of oak (*Quercus* species) and shortleaf pine (*Pinus echinata*) Final report prepared by Richard. Technical Report. 7pp.
- ISO international standard No. 13910. 2005. Structural timber — Characteristic values of strength-graded timber — Sampling, full-size testing and evaluation. 45pp.
- Kabir, MF., Schmoltdt, DL. and Schafer, ME., 2002. Time domain ultrasonic signal characterization for defects in thin unsurfaced hardwood lumber. *Wood Fiber Sci*, 34(1):165-182
- Kabir, MF., Schmoltdt, DL., Araman, PA., Schafer, ME. and Lee, SM., 2003. Classifying defects in pallet stringers by ultrasonic scanning. *Wood Fiber Sci*, 35(3):341-350
- Khosravi, E., Roohnia, M., Lashgari, A., Jahanlatibari,