Research Article

Iranian Journal of Wood and Paper Industries
Vol. 15, No. 4, Page 361 - 373 (2025)

DOI: 10.22034/ijwp.2024.2022518.1648

Effects of particles size and direction on ultrasonic wave velocity and some mechanical properties of particleboard made of poplar wood

Mohsen Saffari[1*], Valiullah Moosavi[1*], Maryam Veylaki[2]

1- Assistant Professor, Department of Wood Science and Paper Technology, Islamic Azad University, Chalous branch, Chalous, Iran

2- Corresponding author, Assistant Professor, Department of Basic Sciences, Islamic Azad University, Chalous branch, Chalous, Iran. Email: saffari@iauc.ac.ir

Received: February 2024 Accepted: September 2024

Abstract

Problem definition and objectives: Today, in the product quality control process, the use of destructive tests is being replaced by non-destructive evaluations. Ultrasonic technique is one of the non-destructive testing methods. By means of this technique, if a relationship can be found between the velocity of ultrasonic waves and various physical and mechanical properties of wood and other wood products, then this technique can be used in the quality control of that material. The aim of this research was to investigate the correlation between the velocity of ultrasonic waves in different directions (longitudinal, transverse and thickness) of particleboards made with small and large poplar wood chips and modulus of elasticity, modulus of rupture and internal bonding of the particleboards, so that if there is a correlation, this technique can be used in industry instead of destructive evaluations quality control.

Methodology: In this research, at first, using poplar logs and urea formaldehyde resin, two types of particleboard were produced from small and large wood chips, with a density of 0.7 g/cm3 and a thickness of 16 mm. Press temperature was 170 degrees Celsius, press pressure was 200 bar, and pressing time was 5 minutes. After conditioning and cutting test samples from the manufactured particleboards, the velocity of ultrasonic waves in different directions (longitudinal, transverse and thickness) of the test samples was calculated by the ultrasound technique. Afterward, modulus of elasticity, modulus of rupture and internal bonding were measured in the same test samples by destructive testing. Then, the correlation between the ultrasonic waves velocity and the measured mechanical properties was determined by means of statistical analysis.

Results: Based on the results, the effect of sample direction on ultrasonic waves velocity in static bending and internal bonding samples, also the effect of wood chip dimensions on ultrasonic waves velocity in internal bonding samples were significant. The maximum average ultrasonic wave velocity was measured in longitudinal direction and the minimum in thickness direction of the samples. In addition, the correlation between the ultrasonic waves velocity and the modulus of rupture in the longitudinal direction of samples made of small and large chips was significant. Meanwhile, the correlation between ultrasonic waves velocity and internal bonding in the thickness direction of samples made of small and large chips was significant.

Conclusion: According to significant correlation between ultrasonic waves velocity in longitudinal direction of boards made of small and large chips and their modulus of rupture, the

ultrasonic technique can be used to monitor the modulus of rupture of particleboard in the production line. Also, according to significant correlation between ultrasonic waves velocity in the thickness direction of boards made from small and large chips and their internal bonding, the ultrasonic technique can be used to quality control of the internal bonding of particleboard in industry. Finally, it is concluded that by measuring ultrasonic waves velocity in the longitudinal and thickness directions of particleboard in the production line, its mechanical properties can be controlled in a non-destructive way.

Keywords: Non Destructive Tests, Ultrasonic Technique, Particleboard, Modulus of Elasticity, Modulus of Rupture.

تأثیر ابعاد خرده چوب و جهت نمونه بر سرعت امواج فراصوت و برخی خواص مکانیکی تخته - خرده چوب ساخته شده از چوب صنوبر

محسن صفاری[۱*]، ولی‌الله موسوی[۲]، مریم ویلکی[۳]

۱ و ۲ – استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد چالوس، چالوس، ایران.
۳- نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم پایه، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد چالوس، چالوس، ایران. پست الکترونیک : saffari@iauc.ac.ir

تاریخ دریافت: اسفند ۱۴۰۲ تاریخ پذیرش: شهریور ۱۴۰۳

چکیده

بیان مساله و اهداف: امروزه در فرایند کنترل کیفیت محصولات، استفاده از آزمون‌های مخرب در حال جایگزین شدن با آزمون‌های غیرمخرب هستند. تکنیک امواج فراصوت یکی از روش‌های آزمون‌های غیرمخرب است. با استفاده از این تکنیک، اگر بتوان بین سرعت امواج فراصوت با خواص فیزیکی و مکانیکی مختلف چوب و سایر فراورده‌های چوبی ارتباطی پیدا کرد، آنگاه می‌توان از این تکنیک در کنترل کیفی آن ماده استفاده کرد. هدف این تحقیق، بررسی وجود ارتباط بین سرعت امواج فراصوت در جهات مختلف (طولی، عرضی و ضخامتی) تخته‌خرده‌چوب‌های ساخته شده با خرده-چوب‌های ریز و درشت صنوبر با مدول الاستیسیته، مدول گسیختگی و چسبندگی داخلی تخته‌ها می‌باشد تا در صورت وجود ارتباط، بتوان از این تکنیک در صنعت به جای روش‌های مخرب کنترل کیفیت استفاده نمود.

مواد و روشها: در این تحقیق، ابتدا با استفاده از گرده‌بینه‌های صنوبر و رزین اوره فرمالدهید، دو نوع تخته‌خرده‌چوب از خرده‌چوب‌های ریز و خرده‌چوب‌های درشت، با دانسیته ۰/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ضخامت ۱۶ میلی‌متر تولید شد. دمای پرس ۱۷۰ درجه سانتیگراد، فشار پرس ۲۰۰ بار و زمان پرس نیز ۵ دقیقه بود. آنگاه پس از متعادل سازی و برش نمونه‌های آزمونی از تخته‌خرده‌چوب‌های تولیدی، با استفاده از تکنیک فراصوت، سرعت امواج فراصوت در جهات مختلف (طولی، عرضی و ضخامتی) نمونه‌های آزمونی محاسبه گردید. در مرحله بعد مدول الاستیسیته، مدول گسیختگی و چسبندگی داخلی در همان نمونه‌های آزمونی توسط آزمون مخرب اندازه گیری شد. سپس در مرحله تجزیه و تحلیل آماری، همبستگی بین سرعت امواج فراصوت با خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده، تعیین گردید.

نتایج: بر اساس نتایج، تأثیر جهت نمونه، بر سرعت امواج فراصوت در نمونه‌های خمش استاتیک و چسبندگی داخلی و تأثیر ابعاد خرده چوب (ریز و درشت) نیز بر سرعت امواج فراصوت در نمونه‌های چسبندگی داخلی معنی‌دار گردید. بیشترین میانگین سرعت امواج فراصوت در جهت طولی و کمترین آن در جهت ضخامتی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. ضمناً همبستگی بین سرعت امواج فراصوت با مدول گسیختگی در جهت طولی نمونه‌های ساخته شده از خرده‌چوب‌های ریز و نیز خرده‌چوب‌های درشت معنی‌دار شد. ضمن آن که همبستگی بین سرعت امواج فراصوت با چسبندگی داخلی در جهت ضخامتی نمونه‌های ساخته شده از خرده‌چوب‌های ریز و نیز خرده‌چوب‌های درشت معنی‌دار گردید.

نتیجه‌گیری: با توجه به معنی‌دار بودن همبستگی بین سرعت امواج فراصوت در جهت طولی تخته‌های ساخته شده از خرده‌چوب‌های ریز و نیز درشت با مدول گسیختگی آنها، می‌توان از تکنیک فراصوت برای پایش مدول گسیختگی تخته‌خرده‌چوب‌ها در خط تولید استفاده کرد. همچنین نظر به معنی‌دار بودن همبستگی بین سرعت امواج فراصوت در جهت ضخامتی تخته‌های ساخته شده از خرده‌چوب‌های ریز و نیز درشت با چسبندگی داخلی آنها، می‌توان از تکنیک فراصوت برای کنترل کیفیت چسبندگی داخلی تخته‌خرده‌چوب‌ها در صنعت استفاده کرد. در نهایت چنین نتیجه‌گیری می-

شود که با اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوت در جهات طولی و ضخامتی تخته‌خرده‌چوب در خط تولید، می‌توان بـه صـورت غیر مخرب خواص مکانیکی آن را کنترل کرد.

واژه های کلیدی: آزمون غیر مخرب، روش فراصوت، تخته خرده چوب، مدول الاستیسیته، مدول گسیختگی.

مقدمه

استفاده از آزمون‌های مخرب به عنوان روش کنترل کیفی محصول نهایی در کارخانه‌های تولیدکننده محصولات چوبی قابلیت اطمینان بالایی ندارد. با این روش تنها درصد خیلی کمی از مواد ساخته شده (تقریباً یک درصد) مورد ارزیابی قرارگرفته و نتایج با استفاده از روش-های آماری به‌کل محصول و خط تولید تعمیم داده می-شوند. از معایب این روش می‌توان به گران و وقت‌گیر بودن آن اشاره کرد. همچنین نتایج چنین ارزیابی‌هایی تصادفی بوده و امکان اصلاح و تنظیم فوری فرآیند تولید ازنظر زمانی امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین یک نیاز فوری برای ارزیابی کیفیت سریع و دقیق مواد چوبی و آگاهی از خصوصیات مواد چوبی به منظور درک رفتار و کارآیی آن سبب شد تا از آزمون‌های غیر مخرب استفاده شود [۱]. این روش می‌تواند نقش مهمی در کاهش عدم قطعیت روندهای ارزیابی چوب و محصولات چوبی به عنوان یک ماده مهندسی داشته باشد [۲]. آزمون غیر مخرب[1] به عنوان تکنیکی برای بررسی مواد یا اجزای آن به طوری که موجب تضعیف سودمندی و کارایی آن در آینده نشود، تعریف می‌گردد [۲]. روش‌های مختلف آزمون‌های غیر مخرب شامل روش دینامیکی، آکوستیکی و رادیوگرافی است. از روش‌های اکوستیکی می‌توان به موج تنشی، امواج فراصوت، گسیل صوتی و ارتعاش اشاره کرد [۲]. از تکنیک فراصوت می‌توان برای تعیین و پیش‌بینی خواص فیزیکی و مکانیکی دامنه وسیعی از مواد چوبی شامل درختان سرپا، گرده‌بینه‌ها، الوار، مواد مرکب چوبی و غیره استفاده کرد. Bucur و همکار (۱۹۹۲) بیان داشتند که سرعت امواج فراصوت در جهت طولی نمونه‌های چوب ماسیو بیش از جهت شعاعی و در جهت شعاعی نیز بیش از جهت مماسی می‌باشد. ضمن آن‌که تضعیف (میرایی) امواج در جهات غیر محوری، بیشترین مقدار خواهد بود [۳]. Sun و Arima (۱۹۹۹) مکانیسم انتشار امواج فراصوت در تخته خرده چوب و رابطه آن با چسبندگی داخلی را موردبررسی قراردادند. آنان بیان داشتند که دانسیته، چسبندگی داخلی و شکل خرده چوب‌ها از فاکتورهای اصلی تأثیرگذار بر سرعت امواج فراصوت در تخته خرده چوب می‌باشد [۴]. Bekhta و همکاران (۲۰۰۰) بیان داشتند که سرعت امواج فراصوت در جهت موازی با محور تولید فراورده‌های چوبی مورد مطالعه، بیش از جهت عمود بر محور تولید است. ضمناً دریافتند که بین مدول الاستیسیته و مدول-گسیختگی، با سرعت امواج فراصوت رابطه نزدیکی برقرار است. همچنین طول و ضخامت نمونه و فرکانس مورد استفاده بر سرعت امواج مؤثر است [۵]. Kazemi Najafi و همکاران (۲۰۰۶) نیز گزارش دادند که در تخته خرده چوب، مدول الاستیسیته ضریب هرسونایکسانی بیشتری، نسبت به مدول گسیختگی در برابر سرعت امواج فراصوت از خود نشان می‌دهد؛ یعنی این که مدول الاستیسیته حساسیت بیشتری نسبت به شکل و جهت خرده چوب‌ها از خود نشان می‌دهد [۶]. Arabi و همکاران (۲۰۱۱) دریافتند که با افزایش ضریب کشیدگی خرده چوب‌های مورد استفاده، مدول گسیختگی تخته‌خرده چوب افزایش و چسبندگی داخلی آن کاهش می‌یابد [۷].Saffari و همکاران (۲۰۱۵) در ارزیابی خواص مکانیکی تخته‌خرده-چوب همسان و لایه‌ای به وسیله تکنیک امواج فراصوت بیان داشتند که سرعت امواج فراصوت در جهت طولی نمونه‌ها به طور معنی‌داری بیش از سایر جهات بود و همچنین همبستگی بین امواج فراصوت با مدول الاستیسیته، مدول گسیختگی و چسبندگی داخلی در جهت ضخامتی تخته‌خرده‌چوب معنی‌دار بوده است [۸]. Duong Van و همکار (۲۰۱۹) ارتباط بین سرعت امواج آکوستیک و برخی خواص مکانیکی چوب آکاسیا را بررسی کردند. آنان بیان کردند که با استفاده از روش موج تنشی

[1] Non-Destructive Test

نسبت به روش امواج فراصوت، ضریب همبستگی بین مدول الاستیسیته استاتیک و مدول الاستیسیته دینامیک را بهتر و قوی‌تر نشان می‌دهد [۹]. Guntekin (۲۰۲۳) برای پیش‌بینی ثابت‌های الاستیک چوب کاج جنگلی از اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوت استفاده کرد و بیان نمود که افزایش ضریب کشیدگی خرده چوب‌های مورد استفاده، منجر به بیشتر شدن مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی تخته‌خرده‌چوب تولید شده می‌گردد [۱۰]. Engehausen و همکاران (۲۰۲۴) گزارش دادند که افزایش ابعاد خرده چوب مورد استفاده، منجر به افزایش مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته و برعکس باعث کاهش چسبندگی داخلی تخته‌خرده‌چوب تولید شده می‌گردد [۱۱]. در تحقیقات مشابه، سرعت امواج فراصوت و نیز همبستگی سرعت امواج فراصوت با مدول الاستیسیته دینامیک و استاتیک چوب ماسیو گونه‌های مختلف و یا فراورده‌های چوبی مطالعه گردیده است تا بتوان از تکنیک امواج فراصوت برای پیش‌بینی خواص مکانیکی چوب و فرآورده‌های چوبی استفاده نمود. این پژوهش با هدف اندازه‌گیری تأثیر ابعاد خرده چوب‌های مصرفی بر سرعت امواج فراصوت در جهات مختلف (طولی، عرضی و ضخامتی) تخته‌خرده‌چوب صنوبر انجام گردید. هدف دیگر این تحقیق نیز تعیین تأثیر ابعاد خرده چوب‌های مصرفی بر همبستگی سرعت امواج فراصوت با خواص مکانیکی (مدول‌الاستیسیته، مدول گسیختگی و چسبندگی داخلی) که از طریق آزمون مخرب اندازه‌گیری گردید، بود تا بتوان در صورت امکان از تکنیک امواج فراصوت در مقیاس صنعتی به عنوان جایگزین روش ارزیابی و کنترل کیفیت متداول فعلی که به‌صورت مخرب و ناپیوسته است، استفاده کرد.

مواد و روش‌ها

مواد

در این تحقیق از سه اصله درخت صنوبر (*Populus alba*) با سن تقریبی ۱۵ سال که محل رویش آن شهرستان ساری بود، استفاده گردید. دلیل استفاده از گونه صنوبر، فراوانی آن، دانسیته مناسب و نیز نداشتن مواد استخراجی می‌باشد که باعث استفاده زیاد آن در صنعت تولید تخته خرده چوب گردیده است. گرده‌بینه‌ها برای ساخت تخته خرده چوب و انجام آزمون‌های مکانیکی به موسسه تحقیقات البرز انتقال یافتند. برای ساخت تخته خرده چوب از چسب اوره فرم‌آلدهید (UF) به میزان ۱۲٪ با مشخصات زیر (جدول ۱) استفاده شد. هاردنر مورد استفاده نیز کلرور آمونیوم (NH_4CL) به میزان ۲٪ بود.

جدول ۱- مشخصات چسب اوره فرم آلدهید (UF)

رنگ	غلظت (cp)	جرم ویژه (gr/cm^3)	قابلیت انحلال	درصد مقدار ماده خشک (٪)	زمان ژله‌ای شدن (ثانیه)	pH	pot life (روز)	shelf life (روز)
شیری	۴۹	۱/۲۶۵	۵	۶۲	۶۰	۷/۶	۷	۲۵

روش‌ها

ابتدا گرده‌بینه‌های صنوبر پوست‌کنی و توسط دستگاه خردکن اولیه به قطعات کوچک‌تر تبدیل و با استفاده از یک آسیاب حلقوی آزمایشگاهی به خرده چوب‌های قابل استفاده در ساخت تخته خرده چوب تبدیل شدند. بعد از الک کردن، خرده چوب‌ها به مدت ۱۰ ساعت در خشک‌کن استوانه‌ای با دمای ۱۲۰-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. ابعاد خرده چوب‌های ریز و درشت مورد استفاده در ساخت تخته خرده چوب، در جدول ۲ ارائه‌شده است. دانسیته تخته‌خرده‌چوب‌های تولیدی ۰/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ضخامت آن ۱۶ میلی‌متر بودند. تعداد تخته‌خرده‌چوب‌های ساخته شده در هر تیمار (ریز و درشت)، ۵ تخته با ابعاد ۱/۶×۳۵×۳۵ سانتی‌متر بود. شرایط پرس گرم شامل زمان پرس، ۵ دقیقه، دمای پرس ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و فشار پرس ۲۰۰ بار، در نظر گرفته شد. از هر تخته ۴ نمونه ۱/۶×۵×۵ سانتی‌متر برای چسبندگی داخلی و ۳ نمونه ۱/۶×۵×۳۵ برای خمش استاتیک تهیه گردید. شکل‌های ۱ و ۲ قسمتی از مراحل تحقیق را نشان می‌دهند.

جدول۲- میانگین ابعاد خرده چوب‌های ریز و درشت

میانگین	طول (میلی‌متر)	عرض (میلی‌متر)	ضخامت (میلی‌متر)
خرده چوب ریز	۱۷/۴۲ ±۴/۷۳	۴/۲۸ ±۱/۱۶	۰/۷۹ ±۰/۲۹
خرده چوب درشت	۲۷/۴۳ ±۴/۸۶	۸/۴۱ ±۲/۷۸	۰/۹۴ ±۰/۲۵

شکل ۱- خرده چوب‌های ریز (چپ) و درشت (راست) تولید شده

شکل ۲- کیک تخته خرده چوب پس از پیش پرس (چپ) و در پرس گرم (راست)

اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوت

بعد از دو هفته قرارگیری در شرایط آزمایشگاه، سرعت امواج فراصوت با فرکانس۴۰ هرتز و قدرت تفکیک ۰/۱ میکروثانیه در جهات طولی، عرضی و ضخامت نمونه‌ها با استفاده از دستگاه تعیین سرعت امواج فراصوت اندازه-گیری شد (شکل ۳). از روش عبوری امواج فراصوت برای اندازه‌گیری سرعت امواج در جهات طولی، عرضی و ضخامتی نمونه‌ها استفاده گردید. بدین منظور از یک مبدل فرستنده و یک مبدل گیرنده که در مقابل هم در راستای محور مورد آزمون نمونه‌ها قرار می‌گرفتند، استفاده گردید تا زمان عبور امواج تعیین گردد و سپس سرعت امواج فراصوت محاسبه شد. این روش در ارزیابی غیر مخرب کاربرد زیادی دارد، به‌خصوص برای موادی که تضعیف‌کننده قوی امواج فراصوت هستند. این آزمون در دانشگاه آزاد اسلامی واحد چالوس انجام گردید. دستگاه مورد استفاده Ultrasonic Timer ساخت شرکت Fakopp کشور مجارستان بود.

شکل ۳- دستگاه محاسبه زمان عبور امواج فراصوت

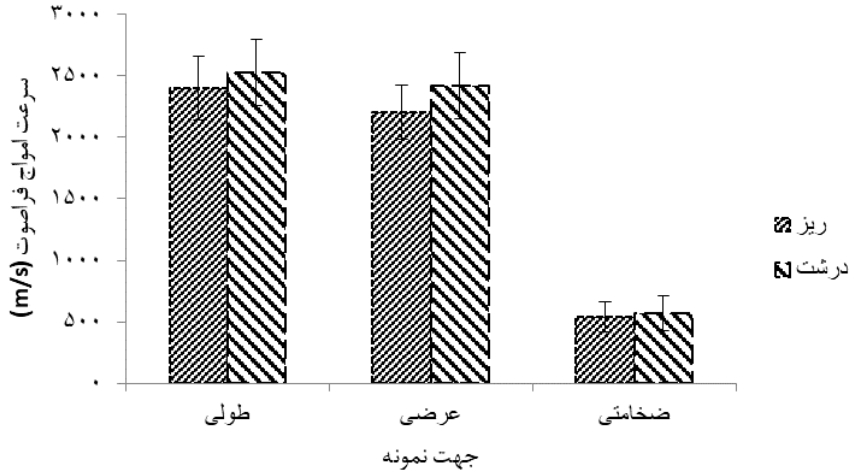
اندازه‌گیری خواص مکانیکی

پس از اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوت، مدول-الاستیسیته، مدول‌گسیختگی و چسبندگی داخلی نمونه‌ها از طریق آزمون خمش ۳ نقطه‌ای مطابق استاندارد ASTM D-1037اندازه‌گیری شد. سرعت بارگذاری برای آزمون خمش استاتیک،۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و برای چسبندگی داخلی ۲ میلی‌متر بر دقیقه بود. تجزیه‌وتحلیل آماری توسط نرم‌افزار SPSS انجام شد. بدین منظور از آزمون دانکن برای تعیین معنی‌داری سرعت امواج فراصوت در جهات مختلف نمونه‌های مورد آزمون استفاده شد و برای تشخیص همبستگی سرعت اموج فراصوت با خواص مکانیکی در جهات مختلف نمونه‌ها نیز رگرسیون گرفته شد.

نتایج و بحث

سرعت امواج فراصوت در نمونه‌های خمش استاتیک

میانگین سرعت امواج فراصوت در جهات مختلف نمونه‌های خمش استاتیک حاصل از تخته خرده چوب‌های ساخته شده از ذرات ریز و درشت در شکل ۴ ارائه شده است. به طوری‌که ملاحظه می‌شود، میانگین سرعت امواج فراصوت در جهت طولی و عرضی نمونه‌ها به‌طور معنی-داری از جهت ضخامتی آن‌ها بیشتر بوده است. علت بیشتر بودن سرعت امواج فراصوت در جهت طولی را می‌توان در نحوه قرارگیری خرده چوب‌ها در امتداد یکدیگر و هم‌راستا بودن الیاف با طول نمونه دانست. ضمن آن‌که در جهت ضخامتی نمونه‌ها، عمود بودن جهت امواج فراصوت با مواد تشکیل دهنده بافت چوبی تخته‌ها، می‌تواند باعث تضعیف سرعت امواج گردد که با نتایج سایر محققین مطابقت دارد [۵، ۶]. تأثیر متغیرهای ابعاد خرده چوب و نیز جهت عبور امواج فراصوت بر سرعت عبور امواج نیز در جدول ۳ ارائه گردیده است. به طوری که ملاحظه می‌شود تأثیر مستقل جهت نمونه‌های خرده چوب ریز و درشت (طولی، عرضی و ضخامتی) بر سرعت امواج فراصوت معنی‌دار بوده است، اگرچه تأثیر مستقل ابعاد خرده چوب (ریز و درشت) بر این ویژگی معنی‌دار نیست ولی میانگین سرعت امواج فراصوت در تخته‌خرده‌چوب درشت، بیشتر از تخته‌خرده-چوب ریز است. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر متقابل جهت و ریز یا درشت بودن خرده چوب بر سرعت امواج فراصوت معنی‌دار نیست.



شکل ۴- میانگین سرعت امواج فراصوت در جهات مختلف نمونه‌های خمش استاتیک

جدول۳- تأثیر مستقل و متقابل جهت و ابعاد نمونه خرده چوب بر سرعت امواج صوت نمونه‌های خمش استاتیک

منابع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی‌داری
جهت	۶۸۰۶۱۱۶۱/۸۶	۲	۳۴۰۳۰۵۸۰/۹۴	۷۵۹/۳۷	۰/۰۰۱
ریز و درشت	۱۰۵۶۶/۶۱	۱	۱۰۵۶۶/۶۱	۰/۲۳	۰/۶۲
جهت×ریز و درشت	۲۴۱۴۵۵/۹۹	۲	۱۲۰۷۲۷/۹۹	۲/۶۹	۰/۰۷

مقادیر مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی

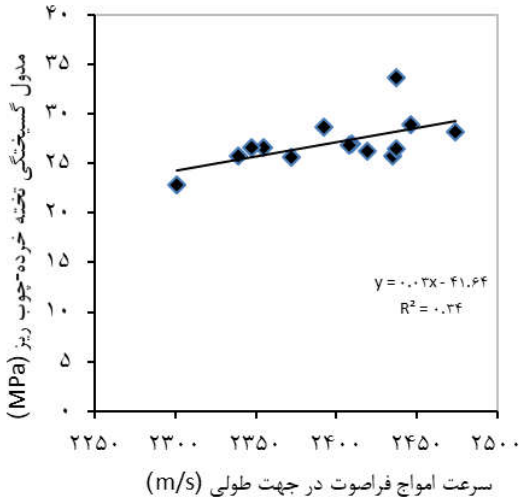
نتایج مقادیر مدول‌الاستیسیته و مدول‌گسیختگی خمشی تخته‌خرده‌چوب‌های ریز و درشت در جدول ۴ نشان داده شده است. مدول‌الاستیسیته و مدول‌گسیختگی تخته‌خرده‌چوب درشت بیشتر از تخته‌خرده‌چوب ریز بوده است که البته این اختلاف از لحاظ آماری معنی‌دار نبود؛ اما می‌توان علت افزایش مدول‌الاستیسیته تخته‌خرده‌چوب درشت نسبت به تخته‌خرده‌چوب ریز را در بیشتر بودن ضریب کشیدگی خرده چوب‌های درشت (با ضریب کشیدگی ۲۹/۱۸) نسبت به خرده چوب‌های ریز (با ضریب کشیدگی ۲۲/۰۵) و افزایش حجم ماده چوبی یکپارچه در خرده چوب‌های درشت نسبت به ریز مربوط دانست که با ثابت بودن میزان دانسیته تخته‌ها و چسب مصرفی در هر دو نوع تخته‌خرده‌چوب ، این امر قابل توجیه است. این مشاهدات با نتایج Arabi (۲۰۱۱) که افزایش ضریب کشیدگی خرده چوب‌ها را و نیز با گزارش Engehausen (۲۰۲۴) که افزایش ابعاد خرده چوب‌ها را منجر به بیشتر شدن مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی تخته خرده چوب تولیدی دانسته‌اند، مطابقت دارد [۷ و ۱۱].

جدول۴- میانگین مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی تخته خرده چوب‌های ریز و درشت

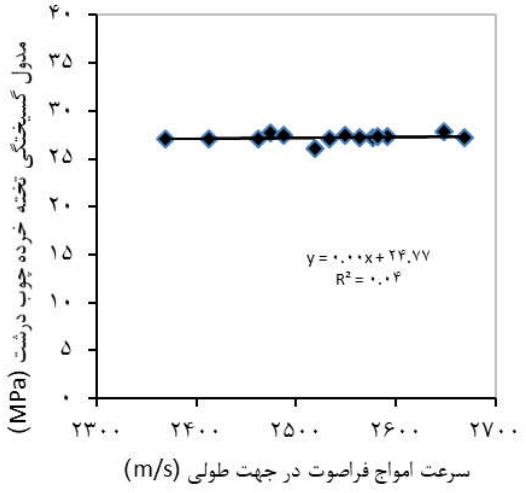
تخته خرده چوب	مدول الاستیسیته (MPa)	مدول گسیختگی (MPa)
خرده چوب درشت	**۳۷۷۲/۴۳ ±۳۶۱/۶**	**۲۶/۶۳ ±۵/۴**
خرده چوب ریز	**۳۳۶۸/۷۰ ±۵۳۹/۷**	**۲۶/۶۱ ±۳/۸**

همبستگی مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی تخته‌خرده‌چوب ریز و درشت با سرعت امواج فراصوت

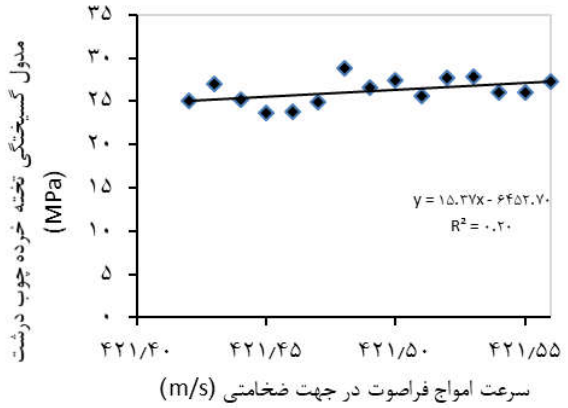
نتایج نشان داد که همبستگی معنی‌داری بین مدول-الاستیسیته و سرعت امواج فراصوت برقرار نیست، زیرا مدول الاستیسیته کیفیتی است که به مقدار زیادی به وضعیت سطح تخته‌ها بستگی دارد و سرعت امواج فراصوت قابلیت ارزیابی این کیفیت را ندارد و بیشتر به وضعیت داخلی تخته‌ها بستگی دارد. البته تحقیقات سایر محققین دلالت بر معنی‌دار بودن سرعت امواج فراصوت و مدول‌الاستیسیته در فراورده‌های چوبی موردبررسی دارد، اما جهت خرده چوب‌ها نیز عامل مهمی در کیفیت تخته-های تولیدی و نیز ارتباط سرعت امواج فراصوت با ویژگی-های مکانیکی آن است [۵]. نظر به این که در این تحقیق خرده چوب‌های مورد استفاده، جهت‌دهی نشدند و توزیع آنان در کیک خرده چوب تصادفی بوده است، این امر می-تواند دلیل معنی‌دار نبودن ارتباط سرعت امواج فراصوت و مدول‌الاستیسیته باشد. ضمناً Van Duong (۲۰۱۹) بیان داشت که استفاده از روش موج تنشی، ضریب همبستگی مدول الاستیسیته دینامیک و مدول الاستیسیته استاتیک را بهتر از روش فراصوت نشان می‌دهد [۹]؛ اما نتایج تحقیق حاضر، بر همبستگی بین سرعت امواج فراصوت و مدول گسیختگی در جهات مختلف تخته‌خرده‌چوب‌های ریز و درشت دلالت دارد. به‌طوری‌که در جهت طولی تخته‌خرده‌چوب ریز با سطح اطمینان ۹۵٪ (شکل ۵) و در جهت طولی و ضخامتی تخته‌خرده‌چوب درشت با سطح اطمینان ۹۹٪، همبستگی معنی‌داری مشاهده شد (شکل-های ۶ و ۷). این نتیجه با مشاهدات Kazemi Najafi و همکاران که همبستگی بین سرعت امواج فراصوت و مدول گسیختگی تخته‌خرده‌چوب تولید شده در کارخانه را گزارش کردند، همخوانی دارد [۶].



شکل ۵: همبستگی مدول گسیختگی با سرعت امواج فراصوت در جهت طولی تخته خرده چوب ریز



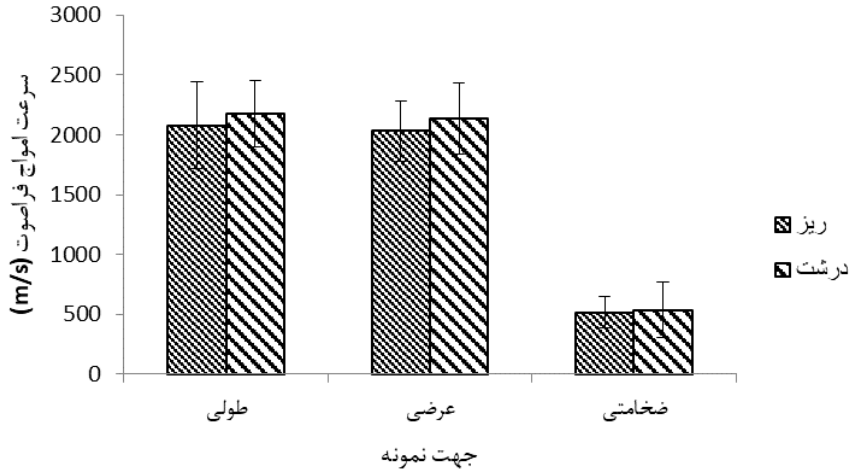
شکل ۶: همبستگی مدول گسیختگی با سرعت امواج فراصوت در جهت طولی تخته خرده چوب درشت



شکل ۷- همبستگی مدول گسیختگی با سرعت امواج فراصوت در جهت ضخامتی تخته خرده چوب درشت

سرعت امواج فراصوت در نمونه‌های چسبندگی داخلی

میانگین سرعت امواج فراصوت در جهات مختلف نمونه‌های چسبندگی داخلی حاصل از تخته‌خرده‌چوب‌های ساخته شده از ذرات ریز و درشت در شکل ۸ ارائه‌شده است. به‌طوری‌که ملاحظه می‌شود، در این نمونه‌ها نیز مانند نمونه‌های خمش استاتیک، بیشترین میانگین سرعت امواج فراصوت در جهت طولی و عرضی و کمترین آن، در جهت ضخامتی مشاهده شد و این اختلاف با سطح اطمینان ۹۹٪ معنی‌دار بوده است. با توجه به این که نمونه‌های چسبندگی داخلی نیز از تخته‌خرده‌چوب‌های آزمایشگاهی ساخته شده، تهیه شدند، لذا تغییرات سرعت امواج فراصوت در جهات مختلف این نمونه‌ها مانند تغییر سرعت امواج فراصوت در نمونه‌های خمش استاتیک تحلیل می‌گردد. ضمناً بر اساس آنالیز آماری، اثر مستقل جهت عبور امواج فراصوت (طولی، عرضی و ضخامتی) در نمونه‌های حاصل از تخته‌خرده‌چوب‌های ریز و درشت بر سرعت امواج فراصوت معنی‌دار بوده است. همچنین اثر مستقل ابعاد خرده چوب‌ها نیز بر چسبندگی داخلی تخته‌خرده‌چوب معنی‌دار شده است. به‌طوری‌که میانگین سرعت امواج فراصوت در تخته‌خرده‌چوب درشت، بیشتر از تخته‌خرده‌چوب ریز است. تأثیر متقابل جهت و ابعاد خرده چوب‌ها بر سرعت امواج فراصوت در نمونه‌های چسبندگی داخلی معنی‌دار نبوده است (جدول ۵).



شکل ۸: میانگین سرعت امواج فراصوت در جهات مختلف نمونه‌های چسبندگی داخلی

جدول۵- تأثیر مستقل و متقابل جهت نمونه و ریز و درشت بودن خرده چوب بر سرعت امواج صوت نمونه‌های چسبندگی داخلی

منابع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی‌داری
جهت	۶۶۱۸۶۴۵۹/۷۷	۲	۳۳۰۹۳۲۲۹/۸۸	۱۴۷۵/۷۶	۰/۰۰۱
ریز و درشت	۲۲۸۰۹۷/۷۶	۱	۲۲۸۰۹۷/۷۶	۱۰/۱۷	۰/۰۰۲
جهت×ریز و درشت	۱۲۶۲۸۷/۱۲	۲	۶۳۱۴۳/۵۶	۲/۸۱	۰/۶۴

مقادیر چسبندگی داخلی

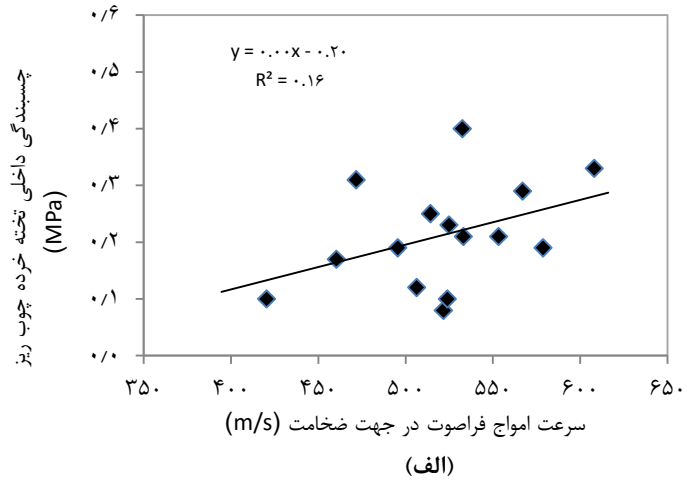
میانگین چسبندگی داخلی تخته‌خرده‌چوب‌های ریز و درشت ساخته شده در جدول ۶ ارائه‌شده است. به طوری که ملاحظه می‌گردد چسبندگی داخلی تخته‌خرده‌چوب حاصل از ذرات درشت کمی بیشتر از چسبندگی داخلی تخته‌خرده‌چوب ساخته شده از ذرات ریز است که البته این اختلاف از لحاظ آماری معنی‌دار نیست. Engehausen و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کردند که با افزایش ابعاد خرده چوب، چسبندگی داخلی تخته خرده چوب ساخته شده، کاهش می یابد. البته آنها عنوان کردند که استفاده از مقدار کمی خرده چوب درشت در لایه مغزی، چسبندگی داخلی را بهبود می‌بخشد. آنان همچنین عوامل دیگری نظیر شکل ذرات و نیز جهت‌دهی خرده چوب‌ها را نیز بر تغییر چسبندگی داخلی مؤثر دانستند [۱۱].

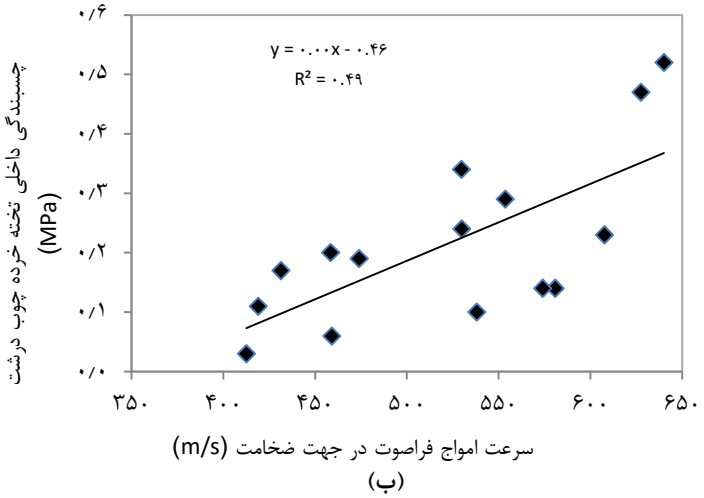
جدول۶- میانگین چسبندگی داخلی در تخته خرده چوب‌های ریز و درشت

تخته خرده چوب	چسبندگی داخلی (MPa)
خرده چوب درشت	**۰/۲۲۶ ±۰/۱۳**
خرده چوب ریز	**۰/۲۲۱ ±۰/۸**

همبستگی چسبندگی داخلی تخته‌خرده‌چوب ریز و درشت با سرعت امواج فراصوت

نتایج به‌دست آمده از بررسی همبستگی بین سرعت امواج فراصوت و چسبندگی داخلی، بر معنی‌دار بودن آن در جهت ضخامتی تخته‌خرده‌چوب‌های ریز و درشت در سطح اطمینان ۹۵٪ حکایت دارد (شکل‌های ۹ الف و ب). چون تکنیک امواج فراصوت توانایی خوبی در ارزیابی وضعیت داخلی تخته‌ها دارد، معنی‌دار بودن همبستگی آن با چسبندگی داخلی در جهت ضخامتی تخته‌خرده‌چوب-های ریز و درشت را می‌توان تفسیر نمود [۵]. همچنین این معنی‌داری در تخته‌خرده‌چوب‌های ساخته شده از ذرات ریز و نیز ذرات درشت، می‌تواند نشان‌دهنده چسب-زنی مناسب ذرات ریز و نیز ذرات درشت و اعمال فشردگی مناسب در پرس گرم باشد. همبستگی بین سرعت امواج فراصوت و چسبندگی داخلی، توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است [۸].





شکل ۹- الف) همبستگی چسبندگی داخلی با سرعت امواج فراصوت در جهت ضخامت تخته خرده چوب ریز، ب) همبستگی چسبندگی داخلی با سرعت امواج فراصوت در جهت ضخامت تخته خرده چوب درشت

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج، تأثیر مستقل جهت نمونه‌ها (طولی، عرضی و ضخامتی) هم در تخته‌خرده‌چوب ریز و هم در تخته‌خرده‌چوب درشت، بر سرعت امواج فراصوت همه نمونه‌ها (خمش استاتیک و چسبندگی داخلی) معنی‌دار بود، به‌طوری‌که بیشترین میانگین سرعت امواج فراصوت در جهت طولی و کمترین در جهت ضخامتی مشاهده شد. تأثیر مستقل ابعاد خرده چوب (ریز و درشت) بر سرعت امواج فراصوت فقط در نمونه‌های چسبندگی داخلی معنی‌دار بود. در بررسی ارتباط سرعت امواج فراصوت و خواص مکانیکی موردمطالعه، بین سرعت امواج فراصوت و مدول گسیختگی در جهت طولی همه تخته‌خرده‌چوب‌ها (هم ساخته شده از ذرات ریز و هم درشت) و نیز در جهت ضخامتی تخته‌خرده‌چوب درشت همبستگی معنی‌دار مشاهده شد. ضمن آن‌که بین سرعت امواج فراصوت و چسبندگی داخلی در جهت ضخامتی تخته خرده چوب‌های ریز و درشت نیز همبستگی معنی‌دار بود. بنا-براین پیشنهاد می‌گردد که در خطوط تولید، برای پایش مدول گسیختگی و چسبندگی داخلی تخته‌خرده‌چوب تولیدی با ذرات ریز و درشت، می‌توان از تکنیک فراصوت،

در جهت ضخامتی تخته‌خرده‌چوب تولید شده استفاده نمود.

منابع

[1] Ross, R.J., Zerbe, J.I., Wang Xiping, Green, D.W., and Pellerin, R.F., 2005. Stress wave nondestructive evaluation of Douglas-fir peeler cores. Forest Products Journal, 55(3), pp. 90–94.

[2] Kazemi Najafi, S., 2011. Introduction on wood nondestructive test. NDT workshop, Tarbiat Modares University.

[3] Bucur, V., and Feeney, F.,1992. Attenuation of Ultrasound in solid Wood. Ultrasonics, 30(2), pp. 76-81.

[4] Sun, Y.G., Arima, T., 1999. Structural mechanics of wood composite materials II: Ultrasonic propagation mechanism and internal bondin of particleboard. Journal of Wood Science 45(3), pp.221–226.

[5] Bekhta, P.A., Niemz, P., Kucera, L., 2000. The study of sound propagation in the wood-based composite materials. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood University of Western Hungary, Sopron, 13-15 September 2000.

[6] Kazemi Najafi, S., Abbasi Marasht, A., Ebrahimi, Gh., 2006. An Investigation of Ultrasonic Velocity and Mechanical Prperties along Different Angles in Particlebard, Iranian journal Natural Resources, 58(4), pp.899-908. (In Persian).

[7] Arabi, M., Faezipour, M., Layeghi, M., Enayati, A.A., 2011. Interaction analysis between slenderness ratio and resin content on mechanical properties of particleboard. Journal of Forestry Research, 22(3), pp.461-464.

[8] Saffari, M., Ranjbar, M.R., Ghavidel, M.A. and Hosseinzadeh, A., 2015. Evaluation of mechanical properties of homogeneous and layered particleboards using ultrasonic technique. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 30(2), pp.341-349. (In Persian).

[9] Van Duong, D., Hasegawa, M., 2024. Relationship between acoustic wave velocity and mechanical properties in Acacia mangium wood. Maderas, Ciencia y tecnologia, 26(33), pp.1-10.

[10] Guntekin, E., 2023. Determination of Elastic Constants for Scots Pine Wood Using Ultrasound. Turkish Journal of Forestry, 24(4), pp.399-402.

[11] Engehausen, N., Benthien, J. T., Ludtke, J., 2024. Influence of Particle Size on the Mechanical Properties of Single-Layer Particleboards. Fibers, 12(4):32.

[2] Saba, N., Jawaid, M., Alothman, O.Y., Inuwa, I.M. and Hassan, A., 2017. A review on potential development of flame retardant kenaf fibers reinforced polymer composites. Polymers for Advanced Technologies, 28(4), pp.424-434.