نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل
جلد بیست و هفتم، شماره چهارم، ۱۳۹۹
۳۵-۵۱
http://jwfst.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwfst.2021.18637.1902

بهبود خواص صوتی چوب گردو (*Juglans regia*) با استفاده از ارتعاشات مکانیکی مصنوعی و تسریع‌شده

آرش خدادادی[۱] و *کامبیز پورطهماسبی[۲]

[۱]دانشجوی دکتری گروه مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران،
[۲]استاد گروه مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰٤؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۵

چکیده

سابقه و هدف: استفاده از چوب در ساخت سازهای موسیقی قدمتی دیرینه در سرتاسر جهان دارد. سازندگان ساز همواره در تلاش هستند تا با تیمارهای خاص کیفیت چوب‌ها را برای تولید ساز باکیفیت، ارتقاء بخشند. در این بین چوب گردو از دیرباز برای ساخت ساز سنتور که از سازهای ملی ایران است به‌کاررفته است. صدای این ساز به‌شدت به کیفیت چوب و نحوه ساخت ساز بستگی دارد؛ اما در کنار انتخاب چوب مناسب و شیوه ساخت آلات موسیقی، همه نوازندگان اعتقاد دارند که در صورت نگهداری مناسب و نواختن ساز، به‌مرورزمان، صدای آن بهتر یا اصطلاحاً جاافتاده می‌شود. ازآنجایی‌که در طی نواختن ساز، چوب تحت ارتعاش قرار می‌گیرد، در این پژوهش این فرضیه مورد آزمون قرار گرفت که اگر چوب پیش از استفاده در ساخت ساز و به‌منظور شبیه‌سازی نواختن ساز و بهبود ویژگی‌های آکوستیکی چوب، تحت ارتعاشات مصنوعی تسریع شده قرار بگیرند، چه تغییری در خواص صوتی آن پدید می‌آید.

مواد و روش‌ها: ازاین‌رو در این پژوهش، ۱۰ نمونه چوب گردو (*Juglans regia*) با ابعاد ۸×٤۰×۲۰۰ میلی‌متر (۵ عدد با برش شعاعی و ۵ عدد با برش مماسی) تهیه شدند. خواص صوتی آنها با استفاده از روش غیر مخرب بینگ[۱] اندازه‌گیری شد تا از یکسانی نمونه‌ها مطمئن گردد. آن‌گاه به‌مدت یک ماه تحت ارتعاشات ضعیف و بعد دو ماه تحت ارتعاشات قوی‌تر قرار گرفتند. برای این کار دو دستگاه ویبراتور طراحی و ساخته شد که با استفاده از خاصیت مغناطیسی لرزش ضعیف و با استفاده از جرم خارج از مرکز لرزش قوی تولید می‌کردند. خواص آکوستیکی و مکانیکی چوب‌ها مانند مدول یانگ، سرعت صوت، میرایی، ضریب تشعشع صوت و امپدانس، قبل و بعد از ارتعاشات اندازه‌گیری شد. در پایان برای بررسی ماندگاری تغییرات، نمونه‌ها به‌مدت یک ماه در حالت بدون ارتعاش در اتاق کلیما نگهداری شده و خواص صوتی آن‌ها دوباره اندازه‌گیری شد.

* مسئول مکاتبه: pourtahmasi@ut.ac.ir

1- Bing

یافته‌ها: نتایج نشان داد که ارتعاشات ایجادشده بر روی نمونه‌ها اثر مثبتی بر خواص صوتی چوب داشته است. قرارگیری نمونه‌ها در معرض ارتعاش ضعیف اثر چندانی بر میانگین تغییرات نداشته اما اعمال ارتعاش قوی طی یک ماه اول باعث افزایش خواص صوتی شده است؛ اما در ماه دوم اعمال ارتعاشات قوی تغییر چندانی ایجاد نکرد. اگرچه بر اساس تحلیل آماری این تغییرات حتی در ماه اول معنادار نبود اما ارتعاشات اعمال‌شده باعث بهبود ۳ درصدی ویژگی‌های صوتی نمونه‌های مورد آزمایش شد. با گذشت یک ماه از اتمام ارتعاشات تغییر حاصل‌شده در میرایی به حالت اولیه برگشت اما باقی خواص آکوستیکی مانند مدول یانگ، سرعت صوت و غیره بهبود حاصله را تا حدود زیادی حفظ کردند.

نتیجه‌گیری: نتایج به‌دست‌آمده از نظر آماری معنادار نبوده است و مقدار افزایش در حد ۳ درصد بسیار کم بوده است بااین‌حال می‌توان نتیجه گرفت که اگر ارتعاشات مصنوعی به‌طور درازمدت اعمال شوند، احتمال بهبود خواص صوتی چوب وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: ارتعاشات مکانیکی، ارزیابی غیر مخرب، چوب گردو، سنتور، ویژگی‌های صوتی

مقدمه

موسیقی را شاید بتوان به همراه نقاشی اولین هنری دانست که بشر احساسات خود را با آن بیان کرد. اولین ساز کشف‌شده یک فلوت از جنس شاخ معروف به فلوت نئاندرتال[1] مربوط به ٦٠ هزار سال قبل است (۲). هرچند که به مرور و با پیشرفت بشر و کشف مواد جدید استفاده از شاخ کم‌رنگ‌تر شد اما در مقابل استفاده از چوب نقش اساسی‌تری پیدا کرد. به‌طوری‌که امروزه در اکثر سازها از چوب به عنوان یکی از اصلی‌ترین اجزاء ساز استفاده می‌شود. استفاده از چوب برای ساخت سازهای موسیقی سه دلیل عمده دارد (۱۵):

۱) به عنوان عامل تولید صدا
۲) به عنوان عامل تشدید صدا
۳) به عنوان لوله باد در سازهای بادی

که عامل دوم اصلی‌ترین دلیل کاربرد چوب در ساخت سازهای موسیقی است. به این ترتیب که صدای اولیه ایجادشده در یک جعبه تشدید چوبی تقویت‌شده و به گوش ما می‌رسد. درواقع صدایی که از اکثر سازهای موسیقی شنیده می‌شود صدایی است که در جعبه تشدید ایجاد شده است. پژوهش‌های زیادی درباره بهبود خواص صوتی چوب برای استفاده در ساخت سازهای ایرانی و خارجی انجام شده است. اکثر این پژوهش‌ها مربوط به تیمارهای شیمیایی و یا حرارتی بوده است. ازجمله تیمارهای شیمیایی می‌توان به استیلاسیون، تیمار با فرمالدهید و تیمار شیمیایی با تری‌اکسان اشاره کرد که باعث بهبود خواص صوتی چوب شدند (۸، ١٦ و ۱۷). در مورد اثر مثبت تیمارهای حرارتی بر روی ویژگی‌های صوتی چوب نیز تجارب زیادی به‌دست‌آمده است که از آن میان می‌توان تیمار هیگروترمال چوب توت سفید، تیمار حرارتی با دمای بالا و تیمار هیگروترمال بر روی چوب نوئل را نام برد (۵، ۷ و ۱۸). یکی دیگر از انواع تیمارهای مورداستفاده برای بهبود ویژگی‌های صوتی چوب، فرآوری زیستی آن است. برای مثال چوب مورداستفاده در ساخت ساز برای مدتی با نوعی از قارچ پوسیدگی سفید انتخابی تیمار

1- Neanderthal

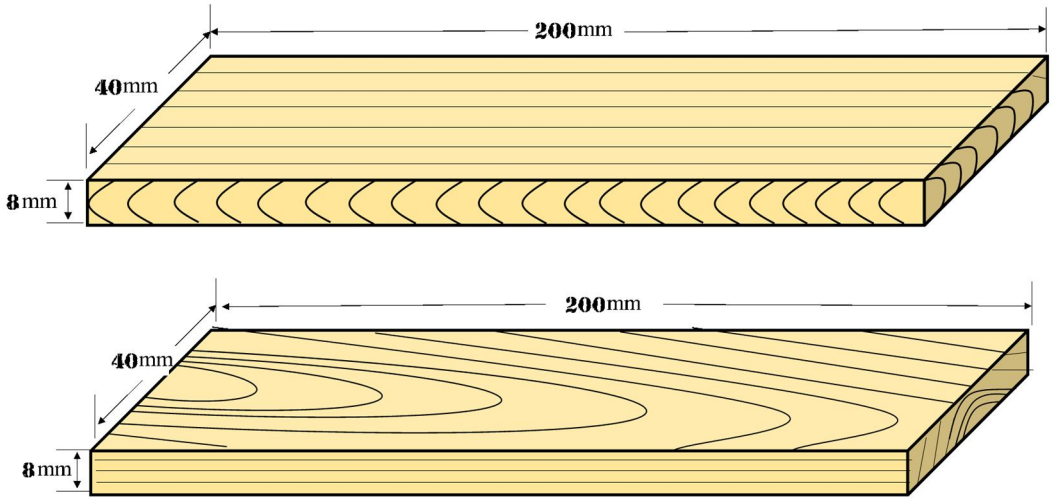
داده می‌شود این قارچ با تجزیه بخشی از چوب باعث افزایش نسبت سرعت صوت به دانسیته چوب می‌شود (۱۱). در ساخت سازهای ایرانی نیز نوعی تیمار سنتی به کار گرفته می‌شود که احتمالاً بی‌ارتباط با تیمار زیستی نیست. بدین‌منظور چوب ساز برای مدت طولانی در زیر فضولات دامی نگهداری می‌شود که باعث بهبود ویژگی‌های صوتی آن چوب می‌شود. در خصوص اثرگذاری این روش اغلب سازندگان مطرح ساز توافق دارند (۱ و ۱۰)؛ اما پژوهش علمی در خصوص چرایی آن صورت نگرفته است. از دیگر پژوهش‌های انجام‌شده در خصوص تیمار چوب به‌منظور بهبود ویژگی‌های صوتی آن، خارج‌سازی مواد استخراجی چوب است (٤، ۹ و ۱۲).

نکته مهمی که در اکثر سازها من‌جمله سنتور صادق است این است که ساز چنانچه در شرایط مناسب نگهداری شود و آسیب نبیند به‌مرورزمان بر اثر نواختن خوش‌صداتر می‌شود یا به اصطلاح صدای آن جا می‌افتد. در این زمینه بین تمام نوازندگان موسیقی اتفاق نظر وجود دارد ولی تاکنون پژوهش علمی در مورد علت و چگونگی آن صورت نگرفته است. هدف از پژوهش حاضر راستی آزمایی این پدیده و بررسی اثر ارتعاشات مکانیکی حاصل از نواختن ساز بر روی شاخص‌های صوتی چوب است. بدین منظور دستگاه خاصی برای شبیه‌سازی ارتعاشات مکانیکی حاصل از نواختن ساز طراحی‌شده و بر روی نمونه‌های چوب گردو اعمال شد. سپس با روش غیرمخرب، تغییرات در ویژگی‌های صوتی چوب بررسی شد.

مواد و روش‌ها

ماده اولیه چوبی و آماده‌سازی نمونه‌ها: نمونه‌های مورداستفاده در این پژوهش از درخت گردو (*Juglans regia*) بود که از استان مرکزی قطع شده و به آزمایشگاه دانشگاه تهران انتقال یافتند. تخته‌های اولیه ابتدا تا رسیدن به رطوبت تعادل در اتاق کلیما با رطوبت نسبی ٦٥ درصد و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. پس از اطمینان از متعادل‌سازی رطوبت عملیات برش و نمونه‌گیری انجام شد.

در این پژوهش دو دسته نمونه آماده‌سازی شد که ابعاد آن‌ها یکسان بود، اما الگوی حلقه‌های سالانه متفاوتی داشتند. در مجموع تعداد ۱۰ عدد نمونه با ابعاد اسمی ۸×٤۰×۲۰۰ میلی‌متر تهیه شدند که نیمی از آن‌ها دارای الگوی برش مماسی (کدهای T1 الی T5) و نیمی دیگر دارای الگوی برش شعاعی (کدهای R1 الی R5) بودند (شکل ۱). نمونه‌ها پس از برش تا رسیدن به وزن ثابت به مدت دو ماه در اتاق کلیما با رطوبت نسبی ٦٥٪ و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا به رطوبت نسبی ۱۲ درصد برسند. شایان‌ذکر است برای عدم اثرگذاری تغییر رطوبت در پارامترهای موردبحث همه اندازه‌گیری‌ها و آزمون‌های مربوط به شبیه‌سازی ارتعاشات مکانیکی در اتاق کلیما انجام شد و نمونه‌ها در این مدت از اتاق خارج نشدند؛ بنابراین تمام اندازه‌گیری‌ها در تمام مراحل در رطوبت تعادل ۱۲ درصد انجام گرفت.



شکل ۱- تصویر شماتیک نمونه‌ها و الگوی برش آن‌ها.

Figure 1. Schematic picture of wood and their cutting pattern.

اندازه‌گیری مشخصه‌های صوتی: در این پژوهش پارامترهای مکانیکی و صوتی به شرح زیر اندازه‌گیری شده و مورد مطالعه قرار گرفتند:

۱- مدول یانگ یا مدول الاستیسیته (E)

۲- مدول ویژه E'

۳- میرایی $\tan\delta$

٤- سرعت صوت

۵- امپدانس

٦- ضریب تشعشع صوتی[1]

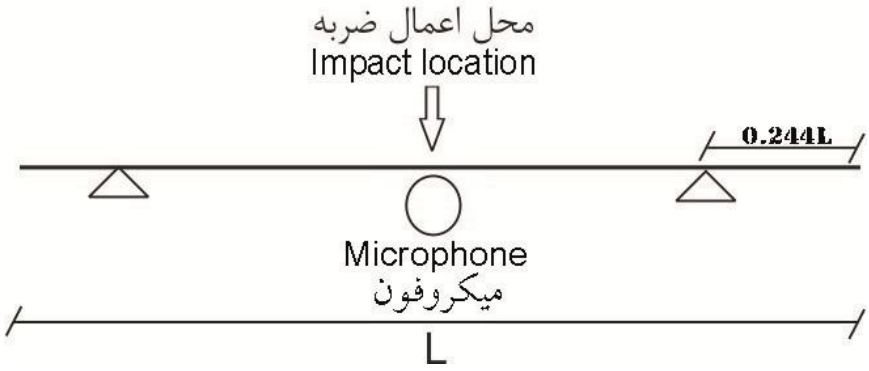
شریفی و همکاران نشان دادند که بهبود این پارامترهای اکوستیکی با آنچه اصطلاحاً خوش‌صدایی ساز نامیده می‌شود همخوانی داشته و می‌توان از آنها به عنوان معیاری برای توصیف اثربخشی تیمارها استفاده کرد (۱۳).

برای اندازه‌گیری مدول یانگ و سایر پارامترها از روش بینگ[2] یا شناسایی غیر مخرب طبقه‌بندی تیرها استفاده شد. به این ترتیب که چوب‌ها را بر روی دو پایه ارتجاعی به صورت آزاد قرار داده (در این پژوهش از کش استفاده شد) و سپس با استفاده از دست و یک مضراب چوبی یک ضربه به آن وارد می‌شود. سپس صدای صوت به وجود آمده را ضبط کرده و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در این پژوهش برای کسب اطمینان از تکرارپذیر بودن آزمایش از یک میکروفن کالیبراسیون با دقت بالا برای ضبط صدا استفاده شد. هر آزمایش با ۳ ضربه تکرار شد که نتایج دقیقاً مشابه بودند. صدای حاصله با استفاده از نرم‌افزار Audacity ضبط‌شده به صورت فایل Wave ذخیره گردید. از ویژگی‌های این نرم‌افزار کم‌حجم بودن آن و قابلیت حذف نویز سفید[3] است؛ که با تعریف آن در هر مرحله اندازه‌گیری، امکان حذف سروصدای اضافه محیط میسر می‌گشت. نحوه قرارگیری چوب و پایه‌های نگهدارنده در شکل ۲ نمایش داده شده است.

1- Sound radiation coefficient

2- Bing (Beam identification by nondestructive grading) https://www.picotech.com/ library/ picoapp/bing-software

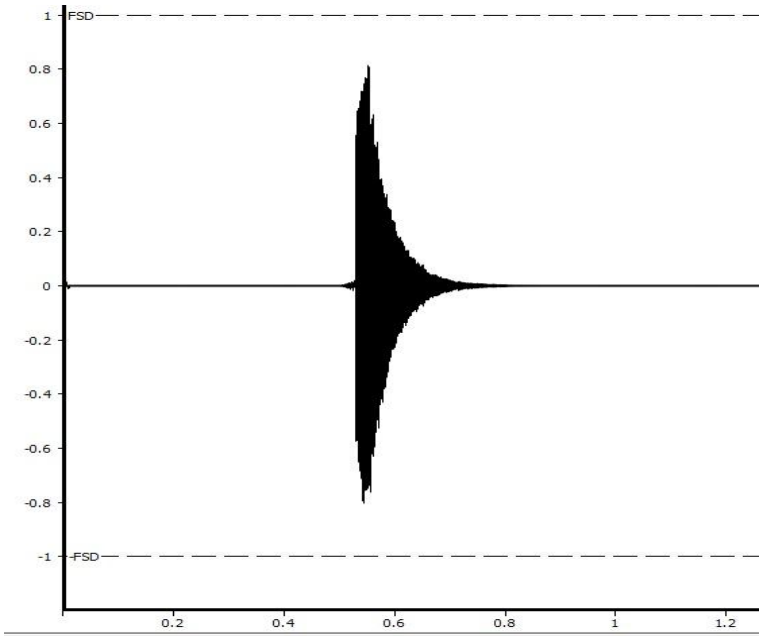
3- White noise



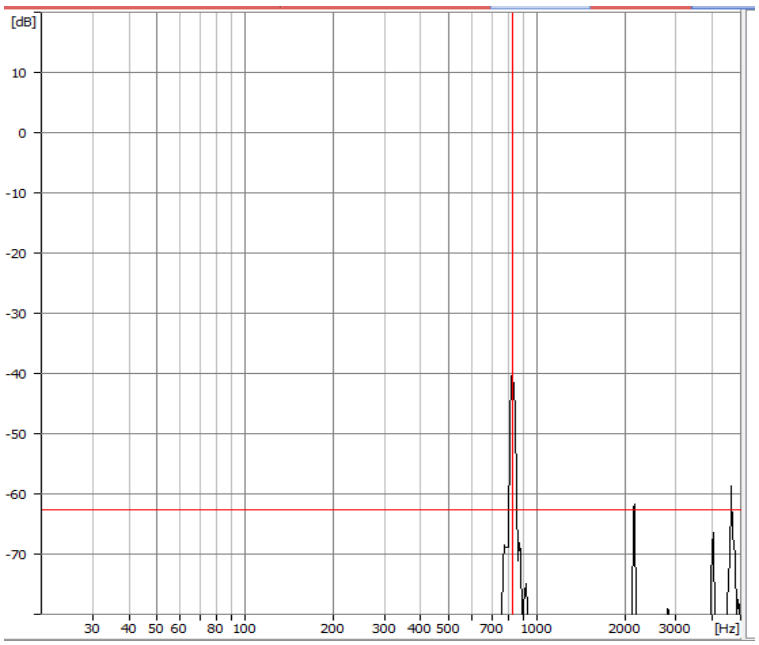
شکل ۲- نحوه قرارگیری چوب و پایه‌های نگه‌دارنده برای اندازه‌گیری فرکانس طبیعی (فاصله تکیه‌گاه از سر نمونه ۰/۲٤٤ طول نمونه معادل ٤٤/۸ میلی‌متر).

Figure 2. Wood position on supports (distance of support from the end of wood is 0.244L).

برای اطمینان از ارتعاش آزاد، محل تکیه‌گاه دقیقاً در محل گره‌های اولین هارمونی ارتعاشی قرار گرفت. بعد از اعمال ضربه به چوب و ضبط صدای ایجادشده موج حاصل توسط نرم‌افزار سوپران[1] تحت تحلیل فرکانسی قرار گرفت. سپس دامنه و فرکانس طبیعی اول و دوم آن اندازه‌گیری شد. در شکل ۳ مثالی از شکل موج و اسپکتروم اندازه‌گیری شده توسط نرم‌افزار سوپران نمایش داده شده است که فرکانس طبیعی اول آن ٦٥۹/۷٤HZ و دامنه آن ٤۷/٦٤dB- است.



1- Sopran



شکل ۳- ثبت موج حاصل از ضربه (بالا) و تحلیل فرکانس آن (پایین) در نرم‌افزار سوپران.

Figure 3. Sound wave (up) and its analysis (down) in Sopran.

در ادامه با داشتن فرکانس طبیعی اول و دوم و دامنه آن‌ها خواص مکانیکی و صوتی چوب با استفاده از رابطه‌های ۱ تا ۷ (جدول ۱) محاسبه شد (۳).

جدول ۱- فرمول‌های خواص صوتی.

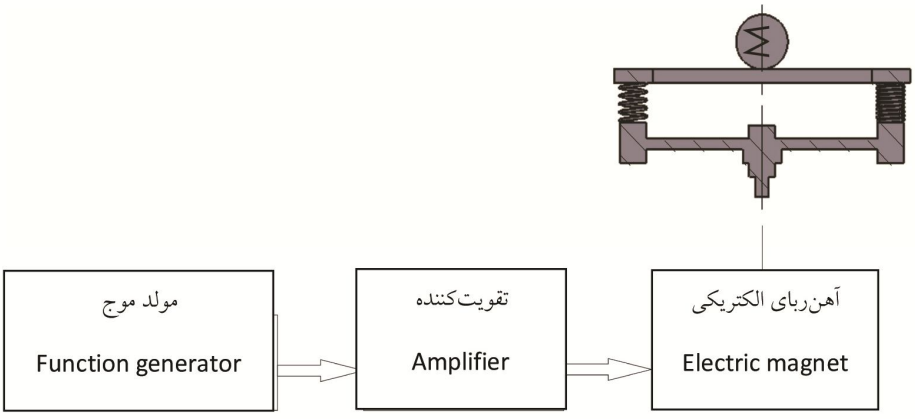
Table 1. Acoustic parameters formulas.

رابطه ۱	مدول یانگ (Young's modulus)	$\boldsymbol{E=\frac{4\pi^2 f^2 L^4 \rho}{I m_n^4}}$
رابطه ۲	ممان اینرسی (Moment of Inertia)	$\mathrm{I}=\frac{bh^3}{12}$
رابطه ۳	مدول ویژه (Specific modulus)	$E'=\frac{E}{\rho}$
رابطه ٤	سرعت صوت (Sound speed)	$\mathrm{c}=\sqrt{\frac{E}{\rho}}$
رابطه ٥	امپدانس (اهم صوتی) (Impedance, acoustic ohm)	$z=c.\rho=\sqrt{E.\rho}$
رابطه ٦	ضریب تشعشع صوتی (Sound radiation coefficient)	$R=\frac{C}{\rho}$
رابطه ۷	میرایی $(tan\delta)$	$tan\delta=\frac{1}{2}\ln\frac{a_1}{a_2}$

که در آن، L نشان‌دهنده طول، f فرکانس طبیعی اول، ρ دانسیته، I ممان اینرسی، b پهنای چوب و h ضخامت چوب، در آن a_1 دامنه فرکانس طبیعی اول، a_2 دامنه فرکانس دوم، n مد ارتعاشی (n=۱)، m_n که m_1 که در اینجا ملاک محاسبه است و برابر ٤/٧٣ است.

نحوه ارتعاش‌دهی به نمونه‌های چوبی: دستگاه ویژه‌ای به‌منظور ارتعاش دهی به نمونه‌های چوبی طراحی و ساخته شد. برای ایجاد ارتعاش در چوب‌ها از دو روش متفاوت استفاده شد که دو نوع لرزش خفیف و قوی ایجاد می‌کردند. در روش اول پس از رسیدن نمونه‌ها به رطوبت و دمای متعادل، تمامی آن‌ها به‌مدت یک ماه تحت ارتعاشات خفیف قرار گرفتند. به این ترتیب که دو سر نمونه‌ها بر روی گیره‌هایی محکم شدند که بر روی پایه‌های فنری قرار داشتند (شکل ٤). این فنرها صرفاً تحمل نیروی وزن چوب‌ها و پایه‌ها را به عهده داشتند و ضریب فنریت آن‌ها به‌قدری پایین بود که دو سر نمونه‌ها به‌صورت آزاد عمل کرده و هیچ‌گونه تنشی به آن‌ها درنتیجه ارتعاش وارد نمی‌شد.

سیگنال ورودی توسط یک مولد موج که قابلیت تنظیم فرکانس را داشت به یک تقویت‌کننده داده می‌شد و برق خروجی از تقویت‌کننده به یک آهنربای الکتریکی انتقال پیدا می‌کرد. نیروی حاصل از جذب و دفع توسط آهنربا به‌وسیله یک نگهدارنده که به وسط چوب‌ها متصل بود به چوب‌ها انتقال داده می‌شد. تمامی چوب‌ها به‌مدت ۱۵ روز با فرکانس ۲۰ Hz و ۱۵ روز یا فرکانس ۳۰Hz تحت ارتعاش قرار گرفتند.



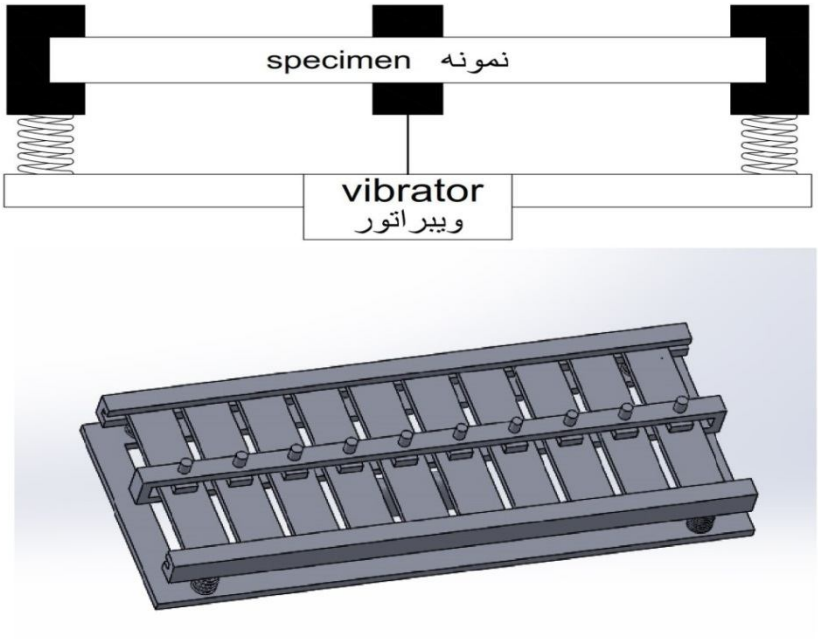
شکل ٤- شماتیک نحوه مرتعش‌سازی چوب‌ها با نیرو و فرکانس خفیف.

Figure 4. Schematic form of imposing light vibrations on woods.

در روش دوم که دو ماه به طول انجامید چوب‌ها در معرض ارتعاشات قوی‌تر قرار گرفته (شکل‌های ٥ و ٦) و پارامترهای صوتی آنها هر یک ماه اندازه‌گیری شد. برای اعمال ارتعاشات قوی‌تر از یک ویبراتور مکانیکی با فرکانس ۱٤۰۰ RPM استفاده شد که نیروی بیشتری را هم ایجاد می‌کرد و دامنه ارتعاشات افزایش یافت. مکانیزم ویبراتورهای مکانیکی به این صورت است که یک جرم خارج از مرکز بر روی شفت یک موتور الکتریکی قرار گرفته و درنتیجه دوران شفت نیروی متناوبی که فرکانس آن برابر فرکانس موتور است ایجاد می‌شود. مکانیزم گیره‌ها و نحوه انتقال نیرو به نمونه‌ها ثابت و مشابه حالت قبل بود با این تفاوت که در این مرحله از فنرهای نگهدارنده با پایه قوی‌تر استفاده شد که توسط پیچ

تنظیم نیروی اولیه نیز روی آنها اعمال می‌شد. به این ترتیب ضمن این‌که نمونه‌ها در حالت ارتعاش آزاد قرار داشتند مقداری تنش نیز به واسطه فشار فنرها روی آنها اعمال شد. این حالت بیش‌تر به شرایط واقعی چوب به‌کاررفته در ساز سنتور شباهت داشت که چوب در حالت دو سر گیردار قرار گرفته است.

برای مقایسه آماری، تیمارهای پژوهش یعنی مدت زمان و نحوه ارتعاش و تکرارها در قالب تجزیه واریانس یک‌طرفه مورد تحلیل قرار گرفتند.



شکل ٥- شماتیک نحوه مرتعش‌سازی چوب‌ها با نیرو و فرکانس قوی.

Figure 5. Schematic form of imposing heavy vibrations on woods.

شکل ٦- دستگاه شبیه‌ساز ارتعاشات مکانیکی.

Figure 6. Mechanical vibrations simulating machine.

نتایج و بحث

همان‌طور که قبلاً گفته شده از فرکانس طبیعی اول برای محاسبه مدول یانگ استفاده شد ابعاد تمامی نمونه‌ها به‌طور دقیق اندازه‌گیری شد تا باعث ایجاد خطا در محاسبات نگردد. در جدول ۱ ابعاد و وزن و سایر پارامترهای نمونه‌ها مانند I، ρ و غیره به تفکیک آمده است.

جدول ۲- مشخصات هندسی و فیزیکی نمونه‌ها.

Table 2. Dimensions and physical properties of specimens.

کد نمونه Code	طول L Length (mm)	پهنا B Width (mm)	ضخامت T Thickness (mm)	وزن W Weight (gr)	حجم V Volume (cm^3)	دانسیته ρ Density (kg/m^3)	سطح مقطع A Area (mm^2)	ممان اینرسی I Moment of inertia (m^4)
T1	200.9	40.2	8.0	48.53	64.6	751.1	321.6	$1.72*10^{-9}$
T2	202.0	40.4	7.9	46.01	64.5	713.7	319.2	$1.66*10^{-9}$
T3	201.6	40.3	8.0	46.41	65.0	714.0	322.4	$1.72*10^{-9}$
T4	202.2	40.1	7.9	48.00	64.1	749.4	316.8	$1.65*10^{-9}$
T5	202.4	40.2	7.9	47.79	64.3	727.9	317.6	$1.65*10^{-9}$
R1	201.1	40.2	7.9	40.02	63.9	626.6	317.6	$1.65*10^{-9}$
R2	202.2	40.4	8.1	48.96	66.2	739.9	327.4	$1.79*10^{-9}$
R3	201.0	40.1	8.0	41.35	64.5	641.3	320.8	$1.71*10^{-9}$
R4	200.8	40.1	8.0	40.71	64.4	632.0	320.8	$1.71*10^{-9}$
R5	201.6	40.2	8.0	41.61	64.8	641.8	321.6	$1.72*10^{-9}$

مقادیر مدول یانگ که در طی تیمار ارتعاش‌دهی اندازه‌گیری شده بود در جدول ۳ آمده است. ستون صفر مربوط به اندازه‌گیری قبل از ارتعاش است. در ستون ۱ نمونه‌ها به‌مدت یک ماه تحت ارتعاش ضعیف قرار گرفتند. در ستون ۲ و ۳ نمونه‌ها به‌ترتیب یک و دو ماه تحت ارتعاش قوی‌تر قرار گرفتند و در ستون چهارم نمونه‌ها در ماه ٤ بدون ارتعاش در اتاق کلیماتیزه ماندند تا اثر برگشت‌پذیری تغییرات ایجاد شده نیز موردبررسی قرار گیرد. مقایسه میانگین مقادیر به‌دست‌آمده برای مدول یانگ نشان داد که قرارگیری نمونه‌ها در معرض ارتعاش ضعیف اثر چندانی بر میانگین مدول یانگ نداشته و مقدار آن تنها ۰/۳٤ درصد افزایش یافته است؛ اما اعمال ارتعاش قوی به‌مدت یک ماه مقدار مدول یانگ را ۳/۰٦ درصد افزایش داد. افزایش مدت زمان ارتعاشات قوی (دو ماه) اثری بر روی مدول یانگ نداشت. درنهایت پس از متعادل‌سازی مجدد نمونه‌ها در اتاق کلیما و حالت بدون ارتعاش‌دهی ۱ درصد از مقدار مدول یانگ نمونه‌ها کاسته شد، اما کماکان مدول یانگ نمونه‌ها نسبت به حالت بدون تیمار ۲ درصد بیش‌تر بود.

این میزان تغییر را می‌توان با نتایجی که سوبو و اکایاسو (۱۹۹۲) در پژوهشی مشابه به‌دست آوردند مقایسه کرد. آزمایش‌های آنان چنین نشان داد که ارتعاشات اعمال‌شده به چوب مدول یانگ را تحت‌تأثیر قرار نمی‌دهد و تنها منجر به کاهش ۵ تا ۱۵ درصدی میرایی می‌شود (١٤). هم‌چنین با مقایسه این نتایج با تیمار هیگروترمال سنتی می‌توان دریافت که اعمال ارتعاشات به چوب تقریباً به همان اندازه در تغییر مدول یانگ مؤثر است (۵).

جدول ۳- تغییرات مدول یانگ در طول تیمار بر حسب گیگاپاسکال.

Table 3. Changes in Young's modulus mean during treatment (GPa).

تیمار Treatment	زمان به ماه Time (month)				
	0	1	2	3	4
T1	7.89	7.89	8.3	8.12	8.06
T2	11.48	11.51	11.79	11.71	11.68
T3	9.78	9.78	10.01	10.02	9.94
T4	8.97	9.03	9.28	9.34	9.17
T5	8.62	8.66	8.86	8.82	8.81
R1	10.23	10.28	10.46	10.48	10.43
R2	6.00	6.02	6.26	6.26	6.16
R3	9.26	9.29	9.51	9.44	9.42
R4	10.5	10.07	10.30	10.26	10.23
R5	10.15	10.19	10.44	10.37	10.33
میانگین Average	9.24	9.27	9.52	9.48	9.42
درصد تغییر Change percentage	0	0.34	3.06	2.62	1.97

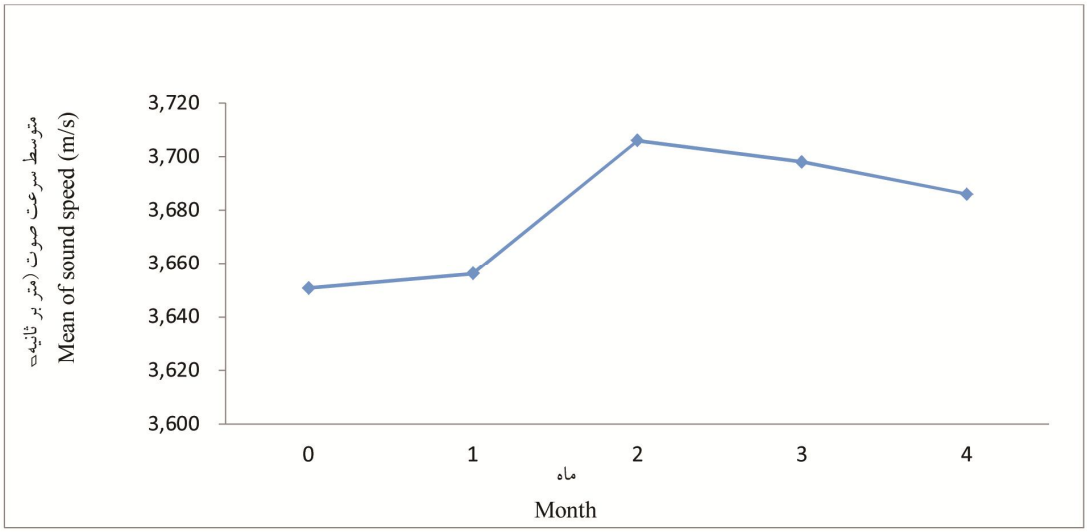
هم‌چنین بررسی جداگانه برای نمونه‌های مماسی و شعاعی نشان می‌دهد که چوب‌های مماسی تغییرات بیش‌تری در مدول یانگ نسبت به چوب‌های شعاعی در واکنش به اعمال ارتعاش پیدا کرده‌اند (جدول ٤).

جدول ٤- تغییرات مدول یانگ در طی ارتعاش‌دهی به تفکیک نمونه‌های شعاعی و مماسی.

Table 4. Young's modulus mean for radial and tangential specimens.

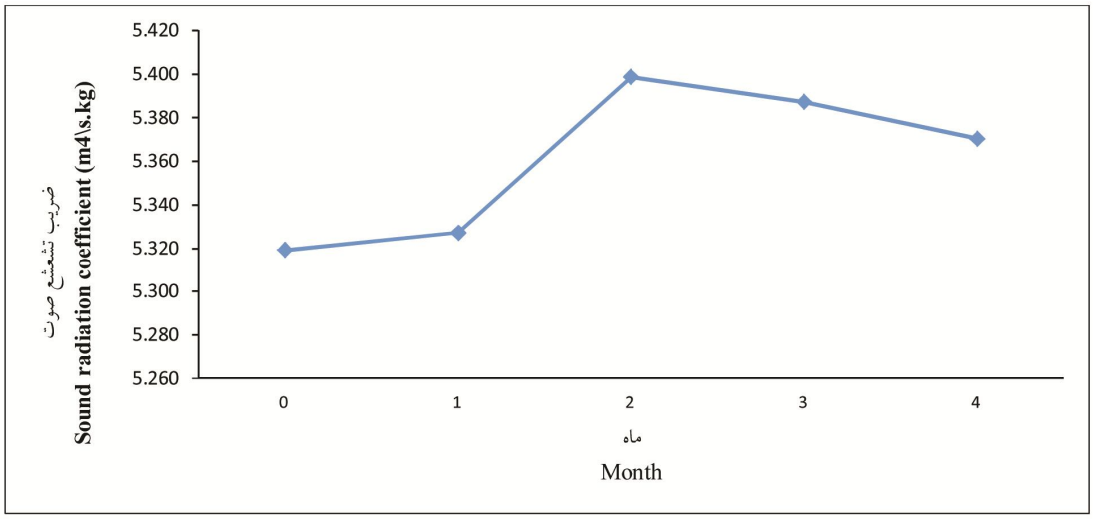
نوع نمونه Specimen type	مدول یانگ (گیگاپاسکال) E (Gpa)	زمان به ماه Time (month)				
		0	1	2	3	4
نمونه‌های شعاعی Radial specimens	میانگین Average	9.14	9.17	9.40	9.36	9.31
	درصد تغییر Change percentage	0	0.31	2.81	2.44	1.89
نمونه‌های مماسی Tangential specimens	میانگین Average	9.35	9.37	9.65	9.60	9.53
	درصد تغییر Change percentage	0	0.25	3.20	2.69	1.93

سایر مشخصات صوتی مانند سرعت صوت، ضریب تشعشع و امپدانس به‌طور مستقیم تحت‌تأثیر مدول یانگ بوده و همان‌طور که در شکل‌های ۷ تا ۹ نشان داده شده است از الگوی تغییرات مشابهی پیروی می‌کنند.



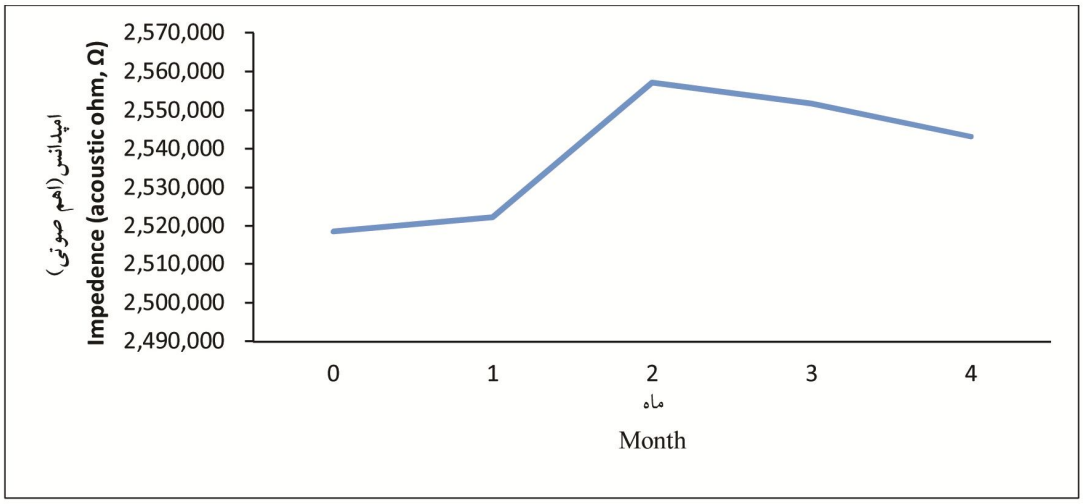
شکل ۷- تغییرات میانگین سرعت صوت در نمونه‌ها طی ارتعاش‌دهی.

Figure 7. Sound speed mean change during treatment.



شکل ۸- تغییرات میانگین ضریب تشعشع صوتی طی ارتعاش‌دهی.

Figure 8. Sound radiation coefficient mean change during treatment.



شکل ۹- تغییرات میانگین امپدانس طی ارتعاش‌دهی.

Figure 9. Impendence mean change during treatment.

اما چرا اعمال ارتعاشات بر مدول یانگ و پارامترهای وابسته تأثیر می‌گذارد را باید با در نظر گرفتن آناتومی چوب تحت بررسی دقیق و مطالعات میکروسکوپی قرار داد. تصور نگارندگان بر این است که اعمال ارتعاشات می‌تواند به آزادسازی الیاف سلولز و درگیری کمتر آنها با لیگنین منجر شود که این امر باعث تسهیل انتقال ارتعاش در الیاف می‌شود که این فرضیه می‌تواند در مطالعات آینده بررسی شود.

آخرین عامل مورد بررسی یعنی میرایی، جزو پارامترهایی است که مستقل از مدول یانگ به‌دست می‌آید (جدول ۱، رابطه ۷). اثر ارتعاش بر میرایی کاملاً متفاوت است. آن‌چه از نتایج این پژوهش‌ها برمی‌آید ارتعاشات ضعیف نه‌تنها به کاهش میرایی منجر نشد بلکه آن را اندکی نیز افزایش داده است؛ اما پس از اعمال ارتعاشات قوی میرایی کاهش یافته و برخلاف سایر مقادیر مثل مدول یانگ روند کاهشی

آن در ماه بعدی که ارتعاشات قوی اعمال‌شده نیز ادامه یافته است؛ اما پس از قطع ارتعاشات میرایی مجدداً روند نزولی پیدا کرده و به مقدار اولیه بازگشته است. ازآن‌جاکه میرایی یکی از عوامل تأثیرگذار بر کیفیت صدای ساز است می‌توان گفت علی‌رغم آن‌که صدای ساز با نواختن‌های متوالی بهبود می‌یابد اما چنان‌چه ساز مدتی به حال خود رها کنیم بخشی از بهبود صدای آن برگشت پیدا می‌کند. این نتیجه ازآن‌جهت قابل‌توجه است که با نتایج پژوهش‌ها و تیمارهای دیگر تفاوت دارد.

به‌عنوان‌مثال کرمی و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که بر اثر تیمار هیگروترمال میزان میرایی تا حدود ۱۰ درصد بهبود یافته و این بهبود به‌صورت ماندگار در چوب باقی می‌ماند (۷). هم‌چنین در دو پژوهش جداگانه توسط سوبو و اکایاسو (۱۹۹۲) و هانت (۱۹۹٦) اثر اعمال ارتعاش بر روی خواص صوتی چوب مطالعه شد و تغییر حاصله در میرایی ماندگار برآورد شد (٦ و ١٤). به عقیده نگارندگان مقوله میرایی هم‌چنان جای آن دارد که تحت آزمایش‌ها و پژوهش‌ها بیش‌تر قرار گیرد.

جدول ۵- تغییرات میرایی نمونه‌ها طی ارتعاش‌دهی.

Table 5. Changes in Tan δ during vibration.

کد نمونه Specimen code	زمان به ماه Time (month)				
	0	1	2	3	4
T1	0.06	0.069	0.045	0.047	0.064
T2	0.089	0.092	0.071	0.086	0.091
T3	0.064	0.079	0.078	0.082	0.066
T4	0.077	0.061	0.088	0.042	0.04
T5	0.055	0.038	0.042	0.026	0.094
R1	0.061	0.096	0.062	0.08	0.062
R2	0.072	0.093	0.069	0.031	0.078
R3	0.079	0.086	0.085	0.079	0.092
R4	0.076	0.085	0.053	0.063	0.061
R5	0.07	0.08	0.081	0.072	0.081
میانگین (Average)	0.07	0.077	0.067	0.061	0.073

تحلیل آماری تجزیه واریانس یک‌طرفه برای تمامی پارامترهای ذکرشده صورت گرفت اما نتایج آن تغییر معناداری را در طی تیمار و پس‌ازآن نشان نداد.

از تحلیل مجموع نتایج به‌دست‌آمده می‌توان دو نکته را متذکر شد. بهبود خواص صوتی چوب را می‌توان به دو گروه برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر

تقسیم کرد. گروه پارامترهای برگشت‌ناپذیر مقادیری هستند که مستقیماً از مدول یانگ تأثیر می‌گیرند. این پارامترها عبارت‌اند از سرعت صوت، امپدانس و ضریب تشعشع صوت که پس از قطع ارتعاشات کاهش اندکی پیدا می‌کنند؛ و گروه دوم که مستقل از مدول یانگ عمل می‌کند میرایی است که بر اثر قطع ارتعاشات به مقدار اولیه باز می‌گردد. نتیجه این تأثیر را می‌توان در نقل‌قول از اساتید و نوازندگان ساز نیز دریافت. بر اساس این تجربیات صدای ساز به مرور زمان بر اثر نواختن بهتر می‌شود (افزایش مدول یانگ و کاهش ضریب میرایی) اما چنانچه مدتی با ساز نواخته نشود صدای آن حالت خفگی پیدا کرده و اصطلاحاً ساز قهر می‌کند (افزایش مجدد ضریب میرایی).

به این ترتیب می‌توان گفت که چنان‌چه قصد بر این باشد که پیش از ساخت ساز چوب، به منظور بهبود خواص صوتی تحت ارتعاش قرار داده شود، می‌توان انتظار داشت که تنها بخشی از خواص آن بهتر شده و پایداری ضریب میرایی تنها منوط به نواختن همیشگی ساز است. این رفتار هم‌چنین توجیه می‌کند که چرا اگر سازی مشابه نزد یک هنرجوی مبتدی یا یک نوازنده متبحر باشد رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. یک هنرجوی مبتدی در طول روز معمولاً زمان کمی را صرف نواختن می‌کند (معمولاً کم‌تر از یک ساعت) و گاه چند روز نیز دست به ساز نمی‌زند؛ اما یک نوازنده حرفه‌ای زمان بیش‌تری را صرف نواختن کرده (معمولاً بیش‌تر از ۳ ساعت) و تمرین او اکثراً مستمر و بدون وقفه است. به همین علت پارامترهای آکوستیکی سریع‌تر و بیشتر بهبود پیدا کرده و به مقدار اولیه نیز باز نمی‌گردد. به همین علت کسانی که ساز گران‌قیمت خریداری می‌کنند حتماً به تاریخچه مالکیت آن ساز نیز توجه نشان می‌دهند. البته ذکر این نکته ضروری است که یک نوازنده حرفه‌ای و چیره‌دست ارزش ساز خود را نیز درک کرده و معمولاً آن را در شرایط بهتری مثلاً از نظر ثبات دمایی و رطوبتی و عدم آسیب در اثر ضربه نگهداری کرده و به همین علت ساز در سلامت بیش‌تری به سر می‌برد. از نتایج این پژوهش می‌توان برای اهداف کاربردی نیز استفاده کرد؛ یعنی در کنار تیمارهای شیمیایی یا هیگروترمال که قبلاً ذکر شد می‌توان چوب‌های بریده‌شده را پیش از استفاده در ساخت ساز، تحت ارتعاش قرار داد تا خواص صوتی آن‌ها بهبود پیدا کند. به این ترتیب ساز ساخته‌شده با این چوب‌ها از همان ابتدا صدای جاافتاده‌تری نسبت به سایر سازها خواهد داشت.

نتیجه‌گیری

آزمایش با دو گونه ارتعاش قوی و ضعیف بر روی نمونه‌ها نشان داد که اعمال ارتعاشات خفیف به طریقی که هیچ‌گونه تنشی به چوب وارد نشود تغییر چندانی در خواص مکانیکی و صوت چوب ایجاد نمی‌کند؛ اما چنان‌که دامنه این ارتعاشات افزایش داده شود و هم‌زمان ارتعاشات به‌گونه‌ای اعمال شود که مقداری تنش خمشی نیز به چوب وارد کنند خواص مکانیکی مانند یانگ و خواص صوتی مانند سرعت صوت، ضریب تشعشع صوتی تا میزان حداکثر حدود ۳ درصد بهبود پیدا می‌کنند. هرچند که نتایج تحلیل آماری تجزیه واریانس تغییر معناداری را در هیچ حالتی نشان نمی‌دهد. ضمناً نتایج بررسی پس از گذشت یک ماه از اتمام اعمال ارتعاشات نشان می‌دهد که بخش اصلی بهبود ایجادشده در پارامترهای صوتی چوب هم‌چنان به قوت خود باقی می‌ماند که شامل سرعت صوت، امپدانس و ضریب تشعشع صوت است.

تنها پارامتری که پس از گذشت یک ماه دوره بدون ارتعاش به شرایط اولیه خود بازگشته مقدار میرایی است. رفتار میرایی در طول زمان تحت اعمال ارتعاش کاملاً متفاوت با سایر پارامترها بود. میرایی با ادامه اعمال ارتعاشات در طول دو ماه روند کاهشی خود را ادامه داد و پس از قطع آن مجدداً به‌طور کامل به مقدار اولیه بازگشت. ازاین‌رو نتایج نشان داد که اگرچه ارتعاشات مصنوعی و تسریع شده تا حدودی باعث بهبود خواص صوتی چوب شده است اما در صورت عدم تداوم یا به عبارتی عدم نواختن ساز این خواص به حالت اولیه برخواهند گشت. در پایان پژوهشگران اذعان دارند که اعمال این روش ارتعاش تسریع شده ازنظر آماری نتوانسته است اختلاف معنی‌داری در تغییرات ایجاد کند ازاین‌رو این امکان وجود دارد که سایر پژوهشگران با روش‌های ابداعی خود این فرضیه‌ها را مجدد ارزیابی نمایند. بررسی ریزساختار چوب به‌منظور بررسی تغییرات آن در اثر ارتعاشات مصنوعی و تسریع شده نیز می‌تواند موضوع مناسبی برای پژوهش‌های آتی باشد.

منابع

1. Atrayee, A. 1999. Santour and Nazemi. Part publications. 43p. (In Persian)
2. D'Errico, F., Villa, P., Llona, A.C.P., and Idarraga, R. R. 2015. A Middle Paleolithic origin of music? Using cave-bear bone accumulations to assess the Divje Babe I bone 'flute'. Antiquity, 72: 275. 65-79.
3. Ebrahimi, G. 1993. Mechanics of wood and wood composites. Tehran Univ. publications. 650p. (In Persian)
4. Farvardin, F., Roohnia, M., and Lashgari, A. 2016. The effect of extractives on acoustical properties of Persian silk wood (*Albizia julibrissin*). Maderas. Ciencia y Tecnología. 17: 4. 749-758.
5. Golpayegani, A.S., Brémaud, I., Thevenon, M.F., Pourtahmasi, K., and Gril, J. 2015. The effect of traditional hygro-thermal pretreatments on the acoustical characteristics of white mulberry wood (*Morus alba*). Maderas. Ciencia y Tecnología. 17: 4. 821-832.
6. Hunt, D., and Balsan, E. 1996. Why old fiddles sound sweeter? Nature. 379: 681-681.
7. Karami, E., Bardet, S., Matsuo, M., Bremaud, I., Gaff, M., and Gril, J. 2020. Effects of mild hygrothermal treatment on the physical and vibrational properties of spruce wood. Composite Structures. 253: 112736.
8. Kumar, S. 1994. Chemical modification of wood. Wood and Fiber Science. 26: 2. 270-280.
9. Roohnia, M., Kohantorabi, M., and Tajdini, A. 2014. Maple wood extraction for a better acoustical performance. European J. of Wood and Wood Products. 73: 1. 139-142.
10. Salari, D., and Mena S. 2014. Thousand and one questions about Santour an approach to history, structure, and making. Sorud Publications. 184p. (In Persian)
11. Schwarze, F.W., and Schleske, M. 2010. U.S. Patent No. 7,700,862. Washington DC. U.S. Patent and Trademark Office.
12. Se Golpayegani, A., Brémaud, I., Gril, J., Thevenon, M.F., Arnould, O., and Pourtahmasi, K. 2012. Effect of extractions on dynamic mechanical properties of white mulberry (*Morus alba*). J. of wood Science. 58: 2. 153-162.
13. Sharifi Sosari, S.Z., Pourtahmasi, K., Se Golpayegani, A., and Brémaud, I. 2013. Comparative study of traditional grading system with acoustical properties of walnut wood for making Santur. Honar haye Ziba: Honar haye Mosighi va Namayeshi. 18: 1. 23-31. (In Persian)
14. Sobue, N., and Okayasu, S. 1992. Effects of continuous vibration on dynamic viscoelasticity of wood. Zairyo. 41: 461. 164-169.

15. Wegst, U.G. 2006. Wood for sound. American J. of Botany. 93: 10. 1439-1448.
16. Yano, H., and Minato, K. 1992. Improvement of the acoustic and hygroscopic properties of wood by a chemical treatment and application to the violin parts. The J. of the Acoustical Society of America. 92: 3. 1222-1227.
17. Yasuda, R., Minato, K., and Yano, H. 1993. Use of tri-oxane for improvement of hygroscopic and acoustic properties of wood for musical instruments. Wood science and technology. 27: 2. 151-160.
18. Zhu, L., Liu, Y., and Liu, Z. 2016. Effect of high-temperature heat treatment on the acoustic-vibration performance of *Picea jezoensis*. BioResources. 11: 2. 4921-4934.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
J. of Wood & Forest Science and Technology, Vol. 27 (4), 2021
http://jwfst.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwfst.2021.18637.1902

Improving acoustic properties of walnut wood (*Juglans regia*) by artificial, speeded up mechanical vibrations

A. Khodadadi[1] and *K. Pourtahmasi[2]
[1]Ph.D. Student, Dept. of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran,
[2]Professor, Dept. of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran
Received: 12.24.2020; Accepted: 03.15.2021

Abstract
Background and Objectives: Wood has been used for making musical instruments for a long time around the world. Manufacturers of these instruments are always trying to improve the quality of wood to make better sound by using special treatments. Santour (Iranian traditional music instrument) is usually made from walnut wood and the quality of its sound is highly dependent on the quality of wood and fabrication methods. Besides choosing the proper wood and manufacturing technics, all performers agree that if an instrument is kept in proper situation, by playing it, the sound quality will become better over the time. As the wood in instruments is under mechanical vibrations during playing, this hypothesis has been investigated that if the wood is imposed to artificial vibrations similar to real music playing, before being used to make the instrument, what changes will occur in its sound characteristics.

Materials and Methods: To do this, 10 specimens of walnut wood *Juglans regia* (5 tangential and 5 radial) with dimensions of 200×40×8 mm^3 has been prepared. In order to be sure about the similarities of specimens, the acoustic properties of them has been measured. Then all the woods were imposed to light vibrations for 1 month and then heavier vibration for next 2 months. Two vibrating machines were designed and built which produced light vibrations by magnetic force and heavy vibrating by eccentric mass. The acoustic and mechanical properties of wood like Young's modulus (E), sound speed, sound radiation coefficient, Tanδ, were measured before and after vibrating using nondestructive Bing method. Then the woods remained without vibration for another month to find out the durability of changes and the acoustical properties of them were measured again.

Results: The results of this research show that these vibrations have improved the acoustic properties of wood. The light vibration had almost no effect on the specimens but the heavier vibration after one month improved the sound quality of wood up to 3% including Young's modulus, sound speed, sound radiation coefficient, and Tanδ. But in the second month of imposing heavy vibrations no significant change was observed. However statistical analysis shows that this changes are not meaningful. One month after finishing the vibrations, Tanδ returned to the previous amount but improvement in E and other acoustic properties looked permanent.

Conclusion: The results were not statistically significant and the 3% improvement was very low but meanwhile it can be concluded that if artificial vibrating is imposed for a long time there is a possibility to improve acoustical propertied of wood.

Keywords: Acoustic properties, Mechanical vibration, Nondestructive tests, Santour, Walnut wood

*Corresponding author: pourtahmasi@ut.ac.ir