

برآورد مدول الاستیسیته دینامیک چوب سرو سیمین با استفاده از سامانه ایرانی آزمون ارتعاش اجباری

مهران روح نیا¹، بهزاد بهنام²، محمدعلی حسین³، سیداحسان علوی تبار⁴، آژنگ تاج دینی⁵، نگین منوچهری⁶

چکیده

سامانه ایرانی ارتعاش اجباری تیر دو سر آزاد با استفاده از تئوری‌های ارتعاش تیرها و روابط برآورد مدول الاستیسیته دینامیک مواد سخت، مندرج در آیین‌نامه شماره C1548-02 استاندارد ASTM، برای اندازه‌گیری مدول الاستیسیته دینامیک چوب، طراحی و ساخته شد. تحقیقات مشابهی قبلاً برای مطالعه تغییرات مدول الاستیسیته چوب سرو سیمین از نزدیک مغز تا نزدیک پوست توسط سیستم‌های مشابه اروپایی آزمون‌های غیرمخرب ارتعاشی با احتساب روابط محاسباتی دیگری به‌انجام رسیده بود که در این مقاله مجدداً با استفاده از سامانه جدید ایرانی مورد تجدید نظر و با آزمون خمش استاتیکی مورد مقایسه و بحث قرار گرفته است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، سامانه ایرانی ارتعاش اجباری و روابط مندرج در استاندارد فوق‌الذکر برای برآورد مدول الاستیسیته دینامیک چوب مناسب بودند.

واژه‌های کلیدی: ارتعاش، استاندارد، تیر، خمش، سرو سیمین، مدول الاستیسیته

1- استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج mehran.roohnia@kiauo.ac.ir

2- مربی گروه مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج

3- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم چوب و کاغذ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج

4- پژوهشگر مدعو گروه علوم چوب و کاغذ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج

5- استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج

6- پژوهشگر مدعو گروه علوم چوب و کاغذ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج

مقدمه

مدول الاستیک مهمترین و کاربردی ترین خاصیت مکانیکی ماده است که در برآورد بسیاری خواص، مقاومت‌ها، پیش‌بینی تغییر شکل‌ها تحت تنش‌های مختلف عمودی و خمشی و حتی درجه‌بندی مواد از جمله چوب [1] مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساده‌ترین تعبیر مدول الاستیک عبارت است از میزان تنش عمودی که می‌تواند در یک ماده کشسان و در محدوده کشسانی آن کرنشی به اندازه واحد ایجاد نماید. البته کمتر ماده‌ای وجود دارد که بتواند تا این حد تنش را پذیرفته و همچنان خاصیت کشسانی خود را حفظ کند.

$$E = \frac{S}{e} \quad (1)$$

که در آن E مدول الاستیک، S تنش عمودی و e تغییر طول نسبی یا کرنش ماده می‌باشد.

برای برآورد این خاصیت مهم مکانیکی روش‌های تئوری و تجربی استاتیک و دینامیک مختلفی معرفی شده‌اند که مرجع تایید همه آنها، روش‌های استاندارد می‌باشند. روش خمش استاتیک برای برآورد مدول الاستیسیته چوب، روشی است که توسط استانداردهای معتبر مختلف تایید شده و بسیار کارآمد می‌باشد ولی علاوه بر اینکه مدت زمان زیادی برای انجام آزمایش می‌طلبد، نمونه پس از انجام آزمون شکسته و تخریب می‌شود. لذا برای اظهار نظر در خصوص پارامترهای الاستیک یک گونه، آن هم به‌طور تقریبی و میانگین، می‌بایست با صرف زمان و هزینه‌های بسیار و با پذیرش خطاهای اجباری، تعداد زیادی آزمون روی نمونه‌های مشابه و هم‌جنس، اعمال نمود.

برای رفع این نقصان تعدادی آزمون دینامیک غیرمخرب از تئوری‌های فیزیکی ارتعاش مواد ابداع شده‌اند که با توجه به پیشرفت‌های اخیر علوم الکترونیک و کامپیوتر روز به روز در حال گسترش هستند.

درخصوص اندازه‌گیری مدول الاستیسیته به روش‌های استاتیک و دینامیک و مقایسه آنها با مراجع استاندارد مطالعات بسیاری به انجام رسیده‌است.

به‌عنوان نمونه، در آیین نامه شماره 3133 استاندارد ISO روش استاندارد اندازه‌گیری مدول الاستیسیته به روش خمش استاتیک ارایه شده است.

بادیگ و جین¹ در سال 1982 روابط و مدل‌های مناسبی برای تعیین مدول الاستیسیته دینامیک به روش ارتعاش تیر دو سر آزاد، دو سر گیردار و یک سر گیردار و همچنین اندازه‌گیری مدول الاستیسیته به روش خمش استاتیک معرفی نموده‌اند [1].

بورردونه² در سال 1989 روش اندازه‌گیری مدول الاستیسیته چوب با روش ارتعاش آزاد در تیر دو سر آزاد را بر پایه تئوری‌های ارتعاش تموشنکو³ و برنولی⁴ تحلیل نموده‌است [6]. کاربرد تئوری تموشنکو در

¹ Bodig and Jane

² Bordonne

³ Timoshenko

⁴ Bernouli

آزمون غیرمخرب ارتعاش توسط ناکائو¹ و همکاران در سال 1985 [15]، گيست² و همکاران در سال‌های 1997 و 1998 [11 و 12] و برانچریاو³ در سال‌های 2002 و 2006 [7 و 9] نیز بیان شده‌است.

نیمز⁴ و همکاران در سال 1997 در آزمون ارتعاش آزاد تیر دو سر آزاد، با تجزیه و تحلیل طیف FFT⁵ مقدار مدول الاستیسیته تخته فیبر با دانسیته متوسط را محاسبه نموده و آن را با نتایج حاصل از آزمون خمش استاتیک مقایسه کردند [16]. آنها در گزارش خود مقادیر مدول الاستیسیته حاصل از آزمون دینامیک را حدود 15 درصد بیشتر از روش آزمون استاتیک عنوان کردند. طی گزارش مشابهی توسط بادیک و همکاران برای چوب ماسیو این تفاوت بین 5 تا 15 درصد اعلام شده‌است [1].

روح نیا و همکاران در سال 1385 مقادیر مدول الاستیسیته را توسط آزمون ارتعاش آزاد در تیر دو سر آزاد در چهار ناحیه از چوب نزدیک مغز تا نزدیک پوست گونه سرو سیمین اندازه‌گیری نموده‌اند [2] که نتایج آن در تحقیق حاضر به روش ارتعاش اجباری در تیر دوسر آزاد مورد تجدید نظر قرار گرفته‌است.

روح نیا و همکاران در سال 1386 سیستم ایرانی ndt-lab را برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی چوب مبتنی بر روش ارتعاش آزاد طراحی و با سیستم مشابه فرانسوی بوردونه و همچنین آزمون استاندارد خمش استاتیک مقایسه نمودند [3].

برانچریاو و همکاران (2002) مقادیر مدول الاستیسیته نمونه‌های چوبی محاسبه‌شده با استفاده از آزمون‌های خمشی 3 و 4 نقطه‌ای را با یکدیگر مورد مقایسه قرار دادند [8].

دیووش⁶ و همکاران (2005) مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی را مقایسه و تاثیر سرعت آزمون را بر مدول الاستیسیته بررسی نمودند. ایشان نشان دادند که به دلیل پدیده خزش، با افزایش سرعت عمل آزمون، مقادیر مدول الاستیسیته بزرگتری برآورد می‌گردد [10].

لیانگ⁷ و همکاران (2007) سه روش متفاوت دینامیک و استاتیک برای برآورد مدول الاستیسیته را بر روی چوب‌آلات سالم و باخته مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که چوب‌آلات دارای باختگی آبی، مدول الاستیک دینامیک بیشتری نسبت به تیر چوبی سالم داشته‌اند [13].

لیو⁸ و همکاران (2006) مدول الاستیسیته دینامیک صفحات چوبی را بر روی سه گونه زبان‌گنجشک، کاج، گردو مورد بررسی و همبستگی معنی‌داری بین مدول الاستیسیته استاتیک و مدول الاستیسیته دینامیک حاصل از ارتعاش عرضی و ارتعاش طولی گزارش نمودند [14].

¹ Nakao

² Geist

³ Berancheriau

⁴ Neimz

⁵ Fast Fourier Transform

⁶ Divos

⁷ Liang

⁸ Liu

مدهوشی و همکاران (1387) تاثیر پوسیدگی بر مدول‌های الاستیسیته دینامیک و استاتیک چوب گونه راش را با استفاده از روش غیرمخرب موج تنشی مورد ارزیابی قرار دادند و مقادیر مدول‌الاستیسیته خمشی و طولی را با مدول‌الاستیسیته استاتیک خمش سه نقطه‌ای مقایسه نمودند [4].

یانگ¹ و همکاران (2003) روابط بین مدول‌الاستیسیته استاتیک و دینامیک را در چوب‌آلات اکالیپتوس سالم و پوسیده مورد بررسی قرار دادند. روابط قوی بین مدول‌الاستیسیته استاتیک و دینامیک گونه‌های چوبی سالم و پوسیده مشاهده گردید [17].

در ادامه تحقیقات اشاره شده و با فقدان تجهیزات مناسب در ایران برای تعیین خواص مکانیکی چوب توسط آزمون‌های غیر مخرب و کارآمد بودن تئوریهای مختلف ارتعاش تیرها که از نظر ریاضی اثبات و امتحان خود را در کشورهای پیشرفته پس داده‌اند، این تیم تحقیقاتی را بر آن داشت تا سیستم‌های مذکور را در ایران پیاده نمایند. پروژه اول که راه اندازی سیستم ارتعاش آزاد بود بسیار موفق انجام شد [3]. لذا در ادامه این ماموریت، سیستم دوم یعنی ارتعاش اجباری نیز در ایران ایجاد و در بوته آزمایش قرار داده شد. این سامانه با توجه به قابلیت کار با نمونه‌های با ابعاد کوچکتر و کنترل‌های دستی بسیار، راه را برای کسب نتایج دقیق‌تر و کامل‌تر با امکان پرهیز از حضور معایب در چوب میسر ساخته است. پیش‌بینی شده‌است که نتایج سیستم معرفی شده با عنایت به قانونمند بودن و روابط ریاضی و تجربی مورد استفاده، دقیق باشند ولی به جهت اطمینان با دو سیستم تایید شده دیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

مواد و روش‌ها

مدول‌الاستیسیته در آزمون خمش استاتیک سه نقطه‌ای تیر با مقطع مستطیل توسط فرمول زیر محاسبه می‌شود [1].

$$E_s = \frac{P_{pl} l^3}{4d_{pl} b h^3} \quad (2)$$

که در آن E_s مدول‌الاستیسیته استاتیک برحسب پاسکال، δ_{pl} خیز تیر در حد تناسب در ناحیه وسط فاصله دو تکیه‌گاه برحسب متر، P_{pl} نیرو در حد تناسب برحسب نیوتن و d ، b و h به ترتیب فاصله بین دو تکیه‌گاه، عرض و ارتفاع تیر بر حسب متر هستند. یکی از بهترین و کارآمدترین اندازه‌گیری‌های مدول-الاستیسیته دینامیک بر اساس تئوری‌های ارتعاش خمشی تیر است که مدول‌الاستیسیته خمشی تیر را از روی فرکانس طبیعی ارتعاش عرضی تیر دو سر آزاد برآورد می‌نماید [1]. برای تحلیل ارتعاش تیر در روش ارتعاش اجباری در تیر دوسر آزاد به شرطی که برآورد مدول‌های برشی مد نظر نباشد، شناسایی یکی از مدهای ارتعاش کافی خواهد بود. با در نظر گرفتن فرکانس مد اول ارتعاش آزاد در تیر دو سر آزاد، برآورد مدول‌الاستیسیته از طریق روابط ارائه شده میسر است که در زیر به دو مورد از آنها اشاره می‌گردد:

¹ Yang

• معادله برنولی، معادله‌ای است که برآوردی از مدول الاستیسیته دینامیک مواد ایزوتروپیک به دست می‌دهد و برای راستاهای ارتوتروپیک موادی چون چوب نیز قابل بهره‌برداری است [7].

$$\left(\frac{E_{db}}{r}\right)_n = \left[\frac{4p^2 l^2 f_n^2}{a \cdot m_n^4}\right] \quad (3)$$

f فرکانس طبیعی n امین مد ارتعاش بر حسب هرتز، m با اندیس شماره مد n امین پاسخ معادله $\cos(m) \cdot \cosh(m) = 1$ یا به عبارتی پاسخ معادله $m_n = \frac{2n+1}{2}p$ می‌باشد [1]. E_{db} مدول الاستیسیته دینامیک برنولی بر حسب پاسکال و r دانسیته تیر مرتعش بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. a پارامتری است که برای جلوگیری از پیچیدگی معادله برنولی از روی I ممان اینرسی، A سطح مقطع و l طول نمونه محاسبه و در معادله قرار گرفته است.

$$a = \frac{I}{Al^2} \quad (4)$$

• در معادله مندرج در آیین‌نامه شماره C1548-02 استاندارد ASTM که برای مواد سخت دیرگداز ایزوتروپیک نوشته شده است نیز مدول الاستیسیته دینامیک از روی فرکانس مد اول ارتعاش آزاد یا اجباری در تیر دو سر آزاد برآورد می‌گردد.

$$E_{da} = \left(\frac{mf_f^2}{b}\right) \left(\frac{L^3}{h^3}\right) T_1 \quad (5)$$

که در آن E_{da} مدول الاستیسیته دینامیک محاسبه شده از فرمول مندرج در آیین‌نامه شماره C1548-02 استاندارد ASTM بر حسب پاسکال، f_f فرکانس طبیعی تشدید تیر در ارتعاش خمشی بر حسب هرتز، m جرم تیر بر حسب کیلوگرم، b ، h و L به ترتیب عرض، ارتفاع و طول تیر بر حسب متر و T_1 فاکتور اصلاحی است که اگر نسبت طول به ارتفاع تیر بزرگتر از 20 باشد (همانند نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق)، از معادله زیر محاسبه می‌گردد.

$$T_1 = \left(1.000 + 6.585 \left(\frac{h}{L}\right)^2\right) \quad (6)$$

در مقادیر کوچکتر نسبت طول به ارتفاع تیر محاسبه مقدار این فاکتور اصلاحی از رابطه دیگری انجام می‌شود که نمونه‌های این تحقیق از شمول آن خارج هستند [5].

همانند معادله برنولی پیشینی شده است با اندکی اغماض معادله مندرج در آیین‌نامه شماره C1548-02 استاندارد ASTM نیز برای راستاهای ارتوتروپیک چوب (ایزوتروپیک محوری) قابل استفاده باشد.

نمونه‌های آزمونی این تحقیق همان یکایک نمونه‌های آزمونی استفاده شده در تحقیق مشابه قبلی بوده‌اند که برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی چوب به روش‌های ارتعاش آزاد و اجباری در تیر دو سر آزاد در دانشگاه مونیخ II فرانسه مورد بهره‌برداری قرار گرفتند و پیشتر در پی انجام آزمون خمش استاتیک برای بررسی کمی و کیفی نتایج سیستم ایرانی ارتعاش آزاد [2] نیز مورد استفاده واقع شدند.

در این سری تحقیقات، تعداد 5 بینه به طول 75 سانتی‌متر از پنج پایه گونه سرو سیمین همسال واقع در دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران از ارتفاع برابر سینه برداشت و از چهار ناحیه نزدیک مغز (ربع اول)، نزدیک پوست (ربع چهارم) و دو ناحیه مابین آنها (ربع دوم و سوم) طبق استاندارد ISO-3129 نمونه‌هایی عاری از هر گونه عیب ظاهری و سالم با ابعاد آزمونی $36 \times 2 \times 2$ سانتی‌متر LRT تهیه شدند. از هریک از 4 ناحیه ذکر شده در هر بینه، دو نمونه مشابه و نزدیک به هم تهیه شد که یکی از آنها برای آزمون ارتعاش آزاد و در پی آن شکست در آزمون خمش استاتیک و نمونه دیگر برای آزمون ارتعاش آزاد و در پی آن با برش به قطعات کوچکتر برای آزمون ارتعاش اجباری مورد استفاده قرار گرفتند. نمونه‌های آزمون ارتعاش اجباری از نمونه‌های شکسته شده در آزمون خمش استاتیک نیز قابل تهیه بودند ولی به جهت پرهیز از تنش‌های باقی‌مانده از آزمون خمش، مورد استفاده قرار نگرفتند. پیش از انجام هر آزمون نمونه‌ها در یک اتاق کليما تیزه تحت دمای 22 درجه سلسیوس و رطوبت نسبی 65% به رطوبت تعادل رسیده و مشروط-سازی شدند.

نتایج آزمون ارتعاش آزاد در گزارشات قبلی ارایه (روح‌نیا 1385) و با نتایج آزمون خمش استاتیک و سیستم فرانسوی ارتعاش اجباری (روح‌نیا 1386) مقایسه شدند. در این تحقیق به منظور اطمینان از کفایت سیستم جدید ایرانی، نتایج مدول الاستیسیته حاصل از آزمون ایرانی ارتعاش اجباری چوب سرو سیمین با نتایج آزمون فرانسوی و همچنین آزمون مرجع خمش استاتیک مورد مقایسه قرار گرفته‌است. بعد از این که رطوبت چوب‌ها به شرایط تعادل آزمایشگاهی (12% اسمی) رسید آزمون خمش استاتیک و تعیین مدول الاستیسیته خمشی طبق معادله (2) برای تیرهای چوبی تهیه شده از 4 مکان مختلف از مغز تا پوست انجام شد.

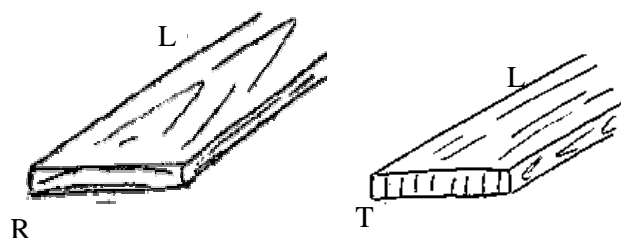
نمونه تیرهای شعاعی کوچکی به ابعاد اسمی $150 \times 14 \times 2$ میلی‌متر (LRT) از تیرهای مشابه اولیه بریده و از آنها برای آزمون ارتعاش اجباری در تیر دو سر آزاد استفاده شد. نظر به این که کنترل و ثابت ماندن نسبت چوب آغاز و پایان در نمونه‌های نازک مماسی میسر نشد، لذا از آزمون تیرهای مماسی اجتناب گردید (شکل 1).

تصویر شماتیک سیستم ارتعاش اجباری که در دانشگاه مونپلیه II فرانسه ساخته شده و مورد بهره برداری قرار دارد، در شکل 2 نشان داده شده‌است که در آن برای تجزیه و تحلیل فرکانس تشدید و برآورد مدول الاستیسیته از مدل برنولی و معادله (3) استفاده می‌شود.

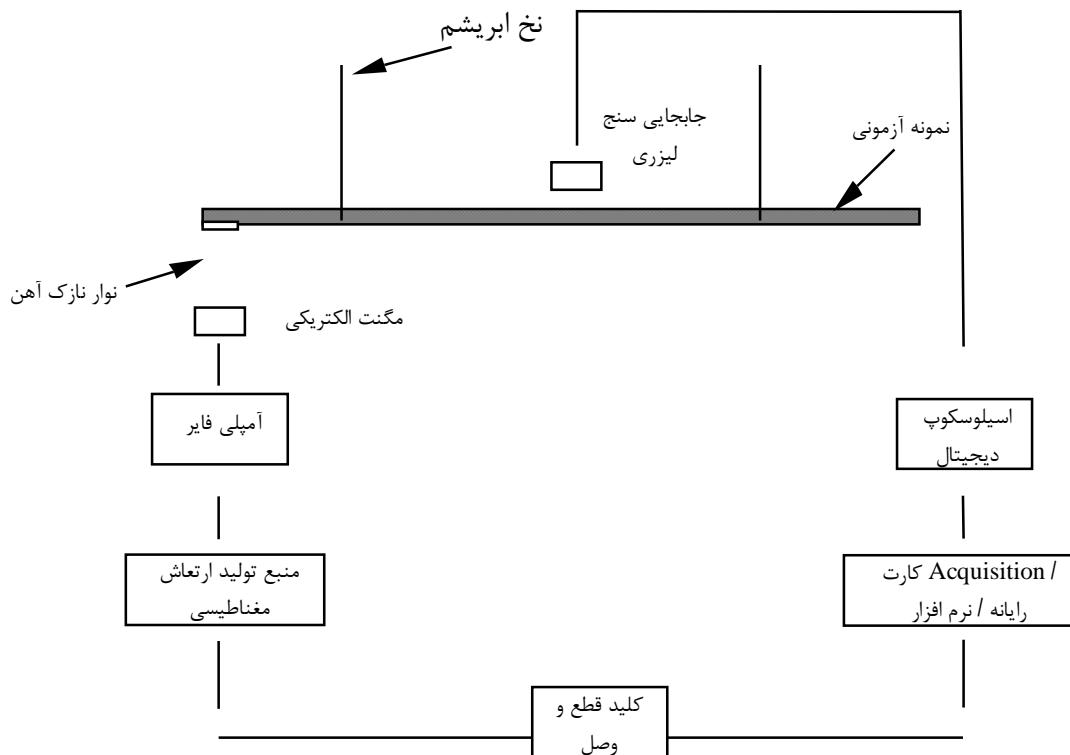
در این آزمون به انتهای هر یک از تیرهای کوچک یک قطعه نوار آهنی نازک مطابق شکل 1 متصل و نمونه روی تکیه‌گاه نازک نخ ابریشم قرار می‌گیرد به طوری که گره‌های ارتعاشی مد اول دقیقاً روی تکیه‌گاه منطبق گردد. مکان تکیه‌گاه با توجه به طول تیر (L) برای مد اول ارتعاش در شکل 3 نشان داده شده‌است. زیر نوار نازک آهنی یک آهنربای الکتریکی قرار دارد که فرکانس قطع و وصل شدن آن تحت کنترل دستی می‌باشد. این فرکانس آنقدر تغییر داده می‌شود تا به فرکانس تشدید مد اول ارتعاش تیر دو سر آزاد مورد

آزمایش برسد. در این حالت جابه‌جایی سنج لیزری بالاترین دامنه ارتعاش را به اسیلوسکوپ متصل به کامپیوتر مخابره می‌کند. این فرکانس همان فرکانس مد اول ارتعاش است که در نمودار طیف فوریه نیز قابل بازیابی و کنترل می‌باشد. با قطع ناگهانی جریان، ارتعاش میرا شده و کاهش لگاریتمی و فاکتور میرایی آن قابل اندازه‌گیری است.

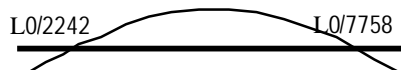
سامانه مشابهی نیز در ایران مطابق شکل 2 مونتاز و مورد استفاده قرار گرفت. با این تفاوت که به دلیل در دسترس نبودن جابه‌جایی سنج لیزری در ایران از ارتعاش سنج میکروفنی و به جای معادله برنولی از معادله مندرج در آیین‌نامه شماره C1548-02 استاندارد *ASTM* برای برآورد مدول الاستیسیته طولی از روی فرکانس تشدید تیر دوسر آزاد بهره‌برداری شد. برای تجزیه و تحلیل فرکانسی ارتعاش و محاسبات مربوطه و برنامه نویسی از نرم افزار *MATLAB* نسخه هفتم و *Microsoft Excel* نسخه 2003 استفاده شد. بسته نرم افزاری حاصله، سیستم ایرانی *Vibra-Force* نام‌گذاری شد که بر پایه فرکانس مد اول ارتعاش قابلیت بهره‌برداری در آزمون ارتعاش اجباری را دارد.



شکل 1- نمونه تیرهای کوچک شعاعی (راست) و مماسی (چپ) قابل استفاده در آزمون ارتعاش اجباری



شکل 2- تصویر شماتیک سیستم آزمون ارتعاش اجباری در تیر دو سر آزاد



شکل شماره 3. مکان گره ارتعاشی در تیر تحت ارتعاش در مد اول

مرجع تمام آزمون‌های تعیین مقاومت مکانیکی، نتایج حاصل از روش‌های استاتیکی می‌باشند [7]. لذا نتایج مدول الاستیسیته حاصل از معادله (5) در سیستم جدید ایرانی آزمون ارتعاش اجباری در تیر دو سر آزاد (E_{da}) با نتایجی که در تحقیقات گذشته از معادله شماره (3) توسط سیستم فرانسوی ارتعاش اجباری (E_{db}) برای یکایک همین نمونه‌ها به دست آمده بود و برای تکمیل اطلاعات با نتایج حاصل از معادله (2) در آزمون خمش استاتیک سه نقطه ای (E_s) تیرهای بزرگتری که از نقاط مجاور تهیه شده بودند، مورد مقایسه قرار گرفتند.

فرایند مقایسه آماری مشاهدات مدول الاستیسیته طولی چوب سروسیمین در قالب یک آزمون تجزیه واریانس شامل دو تیمار به شرح زیر با پنج تکرار (پنج پایه درختی مجزا) انجام شد:

جدول 1- تیمارهای آزمون تجزیه واریانس برای بررسی اثر روش انجام آزمون و مکان نمونه‌گیری از مغز تا

پوست بر مدول الاستیسیته دینامیک چوب سروسیمین

مکان چوب از مغز تا پوست در چهار سطح	روش انجام آزمون در سه سطح
1- نزدیک مغز (ربع اول دیسک)	1- خمش استاتیک سه نقطه ای
2- میانه دیسک مکان اول (ربع دوم دیسک)	2- ارتعاش اجباری سیستم فرانسوی
3- میانه دیسک مکان دوم (ربع سوم دیسک)	3- ارتعاش اجباری سامانه جدید ایرانی
4- نزدیک پوست (ربع چهارم دیسک)	

در ادامه تجزیه واریانس، متفاوت بودن احتمالی نتایج به‌وسیله آزمون دانکن بررسی و توسط یک مدل رگرسیونی نتایج به‌دست آمده از سیستم جدید معرفی شده با آزمون‌های مورد مطالعه دیگر مقایسه شدند.

نتایج

برای مشاهده نتایج مدول الاستیسیته طولی به‌دست آمده از سه آزمون اشاره شده دینامیک و استاتیک و تغییرات آنها از نمودار ابر نقاط استفاده شد. شکل 4 مدول الاستیسیته دینامیک به‌دست آمده از معادله 5 در سامانه آزمون ارتعاش اجباری ایران را نسبت به نتایج معادله 3 در سیستم آزمون ارتعاش اجباری فرانسه نشان می‌دهد. نظر به این‌که نمونه‌های تیری شکل هر تکرار در این دو آزمون ارتعاش اجباری مشابه، به قطعات کوچکتر بریده و آزمایش شده‌اند، لذا هر نقطه از نمودار، میانگین نتایج 5 نمونه کوچک بریده شده از نمونه اصلی هر تکرار می‌باشد. در این نمودار برابری تقریبی نتایج دو آزمون با همبستگی بالا برای کل نمونه‌ها قابل مشاهده است. اضافه بر این، نمونه‌های مربوط به مکان نزدیک مغز مقادیر مدول الاستیک کمتر و نمونه‌های نزدیک پوست مقادیر بزرگتری را نشان می‌دهند. آزمون آماری آنالیز واریانس نیز مشاهدات فوق را تایید نمود. طبق جدول‌های آماری ارائه شده، تفاوت معنی‌داری بین مقادیر مدول الاستیسیته به‌دست آمده از دو آزمون مشابه ارتعاش اجباری ایران و فرانسه (به‌ترتیب محاسبه شده از رابطه مندرج در استاندارد ASTM و رابطه برنولی، با تفاوت‌های تجهیزاتی ذکر شده) مشاهده نشد. ولی اثر مکان نمونه‌برداری بر تغییرات مدول الاستیسیته معنی‌دار بود. هرچه مکان نمونه‌ها از مغز به سمت پوست تغییر می‌کند مدول-الاستیسیته طولی تیرها بزرگتر می‌شود. در عین حال در نتایج نمونه‌های تهیه شده از مکان‌های ربع دوم و سوم تفاوت معنی‌داری وجود نداشت.

شکل 5 نتایج مدول الاستیسیته دینامیک به‌دست آمده از سامانه ایرانی آزمون ارتعاش اجباری را نسبت به نتایج آزمون خمش استاتیک سه نقطه‌ای نشان می‌دهد. همبستگی معنی‌داری بین این دو سری داده وجود دارد. تفاوت معنی‌دار اثر روش آزمون روی نتایج مدول الاستیسیته مندرج در جدول تجزیه واریانس ارائه شده ناشی از همین اختلاف 13 درصدی موجود در این شکل می‌باشد. به‌طوری‌که گروه‌بندی دانکن

نتایج دو آزمون ارتعاش اجباری ایران و فرانسه را در یک گروه و نتایج خمش استاتیک را در گروه مجزایی با مقادیری کوچکتر قرار داده است. در این شکل نیز همانند آنچه در شکل 4 گفته شد مدول الاستیسیته طولی چوب‌های نزدیک به مغز کوچکتر و نزدیک به پوست بزرگتر می‌باشد. شکل 6 نیز برای مقایسه

جدول 2- آنالیز واریانس اثر متغیرهای مستقل مکان نمونه در درخت و روش انجام آزمون بر متغیر وابسته مدول-

الاستیسیته (Pa)

منبع تغییرات (متغیر مستقل)	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی داری
اثر مکان نمونه از مغز تا پوست	$73/7 \times 10^{18}$	3	$24/6 \times 10^{18}$	27/554	0/000
اثر روش انجام آزمون	$9/4 \times 10^{18}$	2	$4/7 \times 10^{18}$	5/256	0/009
اثر متقابل مکان × روش	$2/1 \times 10^{18}$	6	$0/3 \times 10^{18}$	0/389	0/882

جدول 3- گروه‌بندی دانکن برای نتایج مدول الاستیسیته (Pa) به‌دست آمده از مکان‌های متفاوت نمونه‌برداری

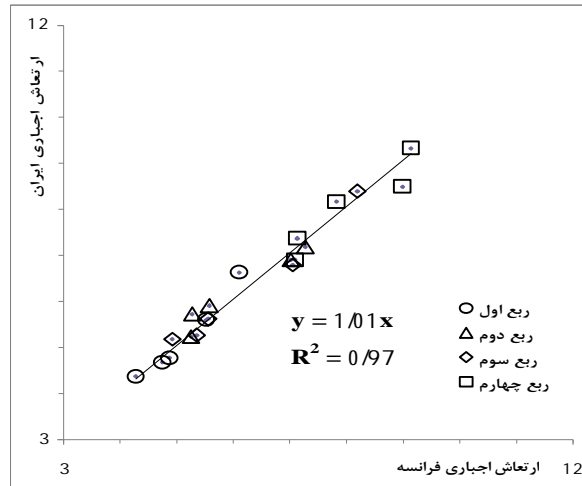
هر عدد، میانگین $3 \times 5 = 15$ مشاهده‌است

زیرگروه‌ها در سطح 0/05			مکان نمونه در درخت
3	2	1	
		$4/95 \times 10^9$	ربع اول (نزدیک مغز)
	$5/7 \times 10^9$		ربع دوم
	$5/91 \times 10^9$		ربع سوم
$7/94 \times 10^9$			ربع چهارم (نزدیک پوست)

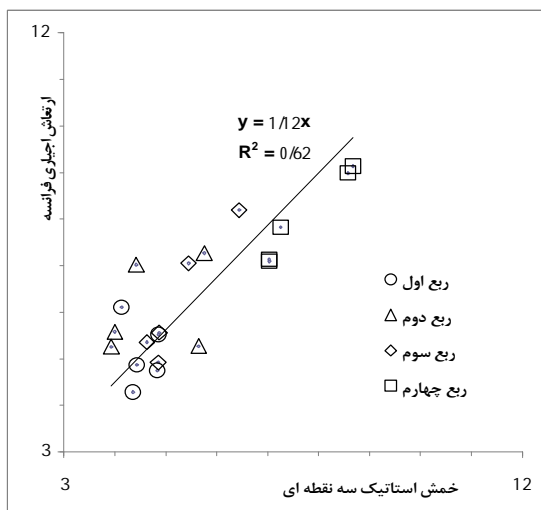
جدول 4- گروه‌بندی دانکن برای نتایج مدول الاستیسیته (Pa) به‌دست آمده از سه آزمون

هر عدد، میانگین $4 \times 5 = 20$ مشاهده‌است

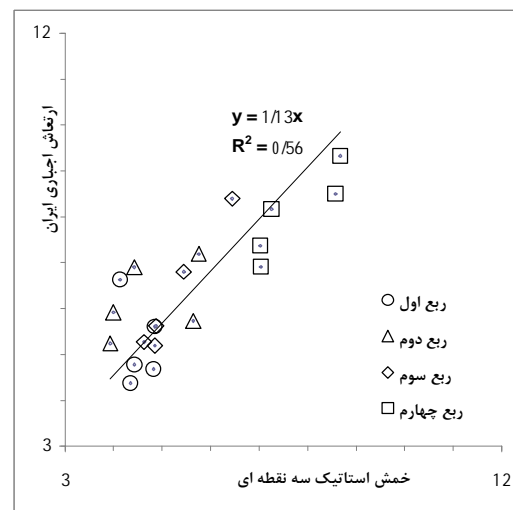
زیرگروه‌ها در سطح 0/05		روش آزمون
2	1	
	$5/56 \times 10^9$	خمش استاتیک
$6/36 \times 10^9$		ارتعاش اجباری فرانسه
$6/42 \times 10^9$		ارتعاش اجباری ایران



شکل 4- مقایسه برآورد مدول الاستیسیته دینامیک با استفاده از سامانه آزمون ارتعاش اجباری ایران E_{db} و سیستم آزمون ارتعاش اجباری فرانسه E_{db} برحسب GPa



شکل 6- مقایسه مدول الاستیسیته دینامیک به دست آمده در سیستم آزمون ارتعاش اجباری فرانسه E_{db} و مدول الاستیسیته آزمون خمش استاتیک سه نقطه ای E_s برحسب GPa



شکل 5- مقایسه مدول الاستیسیته دینامیک به دست آمده در سامانه آزمون ارتعاش اجباری ایران E_{db} و مدول الاستیسیته آزمون خمش استاتیک سه نقطه ای E_s برحسب GPa

نتایج آزمون ارتعاش اجباری فرانسه با خمش استاتیک ارایه شده است. همان گونه که در شکل دیده می شود روند تغییرات و نسبت های به دست آمده آزمون ارتعاش اجباری فرانسه مشابه آنچه که در شکل 5 برای ارتعاش اجباری ایران دیده می شود، بوده است.

بحث و نتیجه گیری

برابری نتایج مدول الاستیسیته به دست آمده از دو آزمون مشابه ارتعاش اجباری در تیر دوسر آزاد ایران و فرانسه با وجود تفاوت های تجهیزاتی و محاسباتی، گامی موفقیت آمیز در توسعه تکنولوژی چوب و فرآورده های جانبی آن در ایران می باشد. تفاوت های جزئی نتایج که از نظر آماری نیز معنی دار نبود، می تواند

به دلیل تفاوت‌های جزئی به وجود آمده در رطوبت تعادل مشروط‌سازی چوب‌آلات مورد آزمون در فرانسه و ایران باشد. هر دو سیستم آزمونی ارتعاش اجباری ایران و فرانسه به طور مشابه نتایجی قابل مقایسه با آزمون استاندارد خمش استاتیک به دست داده‌اند. نظر به این که خیز برشی در آزمون استاندارد خمش استاتیک منظور نمی‌شود، لذا با در نظر گرفتن مجازی خیز کل به عنوان فقط خیز خمشی، مقادیر کوچک‌تری برای مدول الاستیسیته استاتیک به دست می‌آید. در آزمون ارتعاش خمشی تیر دوسر آزاد با توجه به عدم وجود تکیه‌گاه صلب، به هیچ عنوان خیز برشی به وجود نمی‌آید. به همین دلیل مقادیر مدول الاستیسیته دینامیک می‌بایست از مقادیر مدول الاستیسیته استاتیک بزرگتر باشند. از طرف دیگر زمان آزمونهای دینامیک ارتعاشی کوتاه است. در مواد ویسکوالاستیک وجود پدیده خزش و تاخیر فاز خیز نسبت به تنش نیز در برآورد بزرگتر مدول الاستیسیته دینامیک نسبت به خمش استاتیک موثر است (بادیگ و جین 1982 و دیووش 2005). روح‌نیا و همکاران (1386) مقادیر مدول الاستیسیته ارتعاش آزاد را نسبت به خمش استاتیک در همین نمونه‌های چوبی سروسیمین، 12% بزرگتر گزارش کرده‌اند که مشابه نتایج این تحقیق در ارتعاش اجباری آنها است.

همبستگی موجود بین نتایج ارتعاش اجباری و خمش استاتیک با وجود معنی‌دار بودن، نسبت به همبستگی مشاهده شده بین دو سری داده آزمون ارتعاش اجباری ضعیف‌تر است. علت می‌تواند در متفاوت بودن نمونه‌های خمش استاتیک و نمونه‌های ارتعاش اجباری جستجو شود. گرچه دو سری نمونه خمش استاتیک و نمونه ارتعاش اجباری در مکان‌های مختلف نزدیک مغز تا نزدیک پوست، از دو نقطه مجاور و نزدیک به یکدیگر و همگی سالم و بدون هرگونه عیب ظاهری مطابق استاندارد ISO شماره 3129 بریده و تهیه شده بودند ولی تفاوت‌های اجتناب‌ناپذیر خواص ماده چوبی، از یک نقطه تا نقطه مجاور، می‌تواند عاملی برای کاهش همبستگی مذکور گردد. این در حالی است که دو آزمون مشابه ارتعاش اجباری ایران و فرانسه عیناً روی یک سری نمونه یکسان انجام پذیرفتند؛ لذا همبستگی قویتری میان این دو سری داده برآورد شده است.

نتایج نشان داد که مدول الاستیسیته چوب‌ها از مغز به سمت پوست افزایش و تفاوت معنی‌داری بین ربع اول و دوم مشاهده نشده است. این روند عیناً مشابه روندی است که پیشتر روح‌نیا و همکاران (1385) برای چوب سرو سیمین با استفاده از روش ارتعاش آزاد در تیر دوسر آزاد گزارش نموده‌اند. علت افزایش مدول الاستیسیته چوب از مغز به سمت پوست می‌تواند در عبور از جوان چوب به سمت چوب بالغ و در نتیجه کاهش احتمالی زاویه میکروفیبریل و افزایش احتمالی طول الیاف، از چوب جوان به سمت چوب بالغ جستجو گردد.

سپاسگزاری

این مقاله از طرح پژوهشی تحت عنوان "بررسی مقایسه‌ای اندازه‌گیری خواص مکانیکی چوب با استفاده از آزمون‌های غیرمخرب (آزمون ارتعاش اجباری)" استخراج شده است. لذا بدین وسیله از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج که هزینه‌های این تحقیق را تامین نموده است تشکر و قدردانی می‌گردد.

فهرست منابع

1. بادینگ، ژ. و جین، ب. 1982 - مکانیک چوب و فراورده های مرکب آن (ترجمه دکتر قنبر ابراهیمی 1368) - انتشارات دانشگاه تهران - 686 صفحه
2. روح نیا، م.، دوست حسینی، ک.، خادمی اسلام، ح.، گریل، ژ. و برموا، ا. 1385 - بررسی تغییرات مدول-الاستیسیته ویژه و مدولهای برشی چوب سروسیمین به روش آزمون غیر مخرب ارتعاش - مجله منابع طبیعی ایران جلد 59 شماره 4 - ص 921 تا 932
3. روح نیا، م. و تاجدینی، آ. 1386 - بررسی امکان اندازه گیری مدول الاستیسیته و فاکتور میرایی ارتعاش در چوب سروسیمین توسط آزمون غیرمخرب ارتعاش آزاد و مقایسه آن با روشهای استاتیک و ارتعاش اجباری - مجله علوم کشاورزی - جلد 13 شماره 4 - ص 1017 تا 1027
4. مدهوشی، م.، هاشمی، س. م. و بهزاد، م. 1387 - ارزیابی تاثیر پوسیدگی بر مدولهای الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی چوب گونه راش با استفاده از روش غیرمخرب موج تنش - مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی - جلد 15 شماره 3 - 9 صفحه
5. ASTM, 2002, Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio of Refractory Materials by Impulse Excitation of Vibration, Designation C1548. 7p
6. Bordonné, P.A., 1989, Module dynamique et frottement intérieur dans le bois: Mesures sur poutres flottantes en vibrations naturelles Thèse de doctorat de l'INP de Lorraine soutenue à Nancy. 154 p.
7. Brancheriau, L. and Bailleres, H., 2002, Natural vibration analysis of clear wooden beams: a theoretical review, Wood Science and Technology, 36 Pp. 347-365
8. Brancheriau, L. and Bailleres, H., 2002, Comparison between modulus of elasticity values calculated using 3 and 4 point bending tests on wooden samples, Wood Science and Technology, Vol. 36 pp. 367-383
9. Brancheriau, L., 2006, Influence of cross section dimensions on Timoshenko's shear factor - Application to wooden beams in free-free flexural vibration, Annals of Forest Science, Vol. 63 pp. 319-321
10. Divos, F. and Tanaka, T., 2005, Relation Between Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Wood, Acta Silv. Lign. Hung. Vol. 1 pp. 105-110
11. Geist, B. and McLaughlin, J. R., 1997, Double Eigenvalues for the Uniform Timoshenko Beam, Appl. Math. Lett. Vol. 10, No. 3, pp. 129-134
12. Geist, B. and McLaughlin J. R., 1998, Eigen value formulas for the uniform Timoshenko beam: The free-free problem, Electronic Research Announcement of the American Mathematical Society, Vol. 4: 12-17
13. Liang, S. and Fu, F., 2007, Comparative study on three dynamic modulus of elasticity and static modulus of elasticity for Lodgepole pine lumber, Journal of Forestry Research, 18(4): pp. 309-312
14. Liu, Zh., Liu, Y., Yu, H. and Yuan, J., 2006, Measurement of the dynamic modulus of elasticity of wood panels, Front. For. China, Vol. 4 pp. 425-430
15. Nakao, T. Okano, T. and Asano, I., 1985, Theoretical and experimental analysis of flexural vibration of the viscoelastic Timoshenko beam, Journal of Applied Mechanics Vol.52
16. Neimz, L.J., Kucera and E. Pohler 1997, Vergleichende Untersuchungen zur Bestimmung des dynamischen E-modulus mittels Schall-Laufzeit und Resonanzfrequenzmessung. Holzforschung und Holzverwertung, Heft 5.
- Yang, J., Ilic, J. and Wardlaw, T., 2003, Relationships between static and dynamic modulus of elasticity for a mixture of clear and decayed eucalypt wood, Journal of Australian Forestry, Vol. 66 No.3 pp. 193-196