

ارزیابی غیرمخرب تأثیر رطوبت و دما بر خواص الاستیک چوب راش با استفاده از آزمون ارتعاش خمشی

مصطفی کهن ترابی^{۱*}، مهران روح نیا^۲ و شادابه فتحی^۳

۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری تخصصی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، گروه مهندسی علوم و صنایع

چوب و کاغذ، تهران، ایران، پست الکترونیک: mostafa.kohantorabi@yahoo.com

۲- استاد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، ایران

تاریخ پذیرش: دی ۱۳۹۵

تاریخ دریافت: شهریور ۱۳۹۵

چکیده

در این تحقیق ۱۰ نمونه چوب راش (*Fagus orientalis* L.) با ابعاد ۱۶×۱۶×۳۶۰ سانتی‌متر (طولی×شعاعی×مماسی) بدون عیب ظاهری انتخاب و پس از قرار گرفتن در شرایط دمایی (۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۶۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد) و رطوبتی متفاوت شامل رطوبت در حالت اشباع از آب (رطوبت تعادل: ۶۵±۵ درصد)، رطوبت تعادل در مجاورت هوا (رطوبت تعادل: ۱۹±۵ درصد) و رطوبت مشروط سازی شده در اتاق کليما تیزه (رطوبت تعادل: ۱۲±۲ درصد) مورد آزمون ارتعاش خمشی آزاد در دو صفحه طولی-مماسی و طولی-شعاعی قرار گرفتند. برخی از ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و آکوستیکی در هر دو صفحه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که ضریب همبستگی سه مد اول ارتعاش خمشی در شرایط کليما تیزه در هر دو صفحه شرایطی مشابه را داشتند اما در زمان غوطه‌ور در آب در دو صفحه رفتاری متمایز و مخالف را نشان دادند. اثر افزایش دمای بالای ۱۰۰ درجه باعث ایجاد تنش‌های هم‌کشیدگی شده که این امر منجر به گسترش ترک‌های ریز و کاهش مدول الاستیسیته دیواره سلولی شده و در نهایت منجر به کاهش قابلیت چوب در انتشار موج شده که به تبع آن باعث افزایش مقادیر میرایی ارتعاش در صفحات ارتعاشی طولی-شعاعی و طولی-مماسی نمونه‌های آزمون گردید. همچنین تغییرات هم‌زمان مدول الاستیسیته و میرایی ارتعاش در هر دو صفحه ارتعاشی می‌تواند گزینه‌ای بسیار مطلوب برای کنترل فرایند از ابتدای استحصال چوب تا قرار گرفتن در پروسه‌هایی مثل چوب خشک‌کنی و تیمارهای گرمایی باشد.

واژه‌های کلیدی: رطوبت، حرارت، ارتعاش، کنترل برخط، تئوری تیر تیموشنکو، آکوستیک.

مقدمه

آزمون‌های غیرمخرب یکی از رایج‌ترین روش‌های بررسی اثر عوامل خارجی بر چوب به‌شمار می‌رود. روش‌های غیرمخرب متفاوتی برای اندازه‌گیری خواص دینامیکی وجود

امروزه تنوع روزافزون مصارف مواد چوبی، نیاز به مشاهدات مربوط به خواص مکانیکی را افزایش داده است.

دینامیک چوب اشباع شده و خشک شده نیز وجود دارد. از طرفی این محققان تیمار حرارتی را به عنوان روشی معرفی کردند که می‌تواند در دوام زیستی در مدت زمان طولانی نیز مؤثر باشد. آنان همچنین کاهش قابلیت جذب و دفع رطوبت، مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و حتی سختی چوب را به عنوان اثرات تیمار حرارتی بیان کردند. Ohasaki و همکاران در سال ۲۰۰۶ نشان دادند که در طی گرم شدن چوب فرکانس رزونانس کاهش یافته که این امر منجر به کاهش مقادیر میرایی ارتعاش نیز می‌گردد. Kubojima و همکاران در سال ۲۰۰۵ ویژگی‌های ارتعاشی چوب سبز نوئل (*Picea sitchensis Carr.*) را در بخار آب با دمای بالا بررسی کردند. آزمون ارتعاش آزاد در مجاورت بخار آب با دمای ۱۱۵ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۷۵ تا ۹۸ درصد انجام شد و با آزمون‌های شاهد در دمای بالا بدون حضور رطوبت مقایسه شدند. در ابتدای پروسه مدول الاستیسیته و میرایی ارتعاش به ترتیب حداقل و حداکثر بودند، در حالی که در انتهای پروسه و هنگام خشک شدن نمونه‌ها مقادیر مدول الاستیسیته و میرایی ارتعاش به ترتیب حداکثر و حداقل بودند. Kohantorabi و همکاران (۲۰۱۵) اثر تغییرات رطوبت و دما را در سه برنامه چوب خشک‌کنی مورد بررسی قرار داده و نتایج حاصل را با نتایج آزمون‌های استاتیک مقایسه کردند. آنان نتیجه گرفتند که تغییرات به وجود آمده در فاکتور کارایی تبدیل آکوستیک، مناسب‌ترین معیار برای ارزیابی کارایی برنامه‌های چوب خشک‌کنی به-کار رفته در این گونه می‌باشد. با توجه به اثر رطوبت و دما بر ویژگی‌های دینامیکی و آکوستیکی چوب از یکسو، و از سوی دیگر با توجه به اعمال دماها و شرایط رطوبتی متغیر در زمان اجرای فرایندهایی مانند چوب خشک‌کنی، هدف از انجام این تحقیق بررسی تغییرات دینامیکی و آکوستیکی گونه راش، در اثر اعمال شرایط رطوبتی و دمایی متغیر در صفحات طولی-شعاعی (LR) و طولی-مماسی (LT) می‌باشد. بررسی تغییرات مذکور می‌تواند گامی در جهت فراهم آوردن شرایط مناسب برای انجام کنترل‌های کیفی غیرمخرب گام به گام از ابتدای استحصال چوب تا زمان

دارد که آزمون غیرمخرب ارتعاش خمشی آزاد در تیر دوسر آزاد^۱ از جمله این روش‌های دینامیکی است. درصدهای رطوبت متفاوت روی ویژگی‌های مکانیکی اثرات فراوانی داشته که الزاماً بر روی تمامی گونه‌ها یکسان نیستند. از طرفی دما نیز در درجه‌های متفاوت اثرات بسزایی روی چوب می‌گذارد، که گاهی می‌تواند باعث ایجاد نقص در چوب شود و گاهی هم به عنوان یک عامل حفاظتی می‌توان از آن استفاده کرد. زیرا چوب یک ماده زیستی ارتوتروپیک بوده و پیش‌بینی رفتار خواص مکانیکی آن ساده نیست و نسبت به تمامی شرایط محیطی نیز از خود واکنش نشان می‌دهد (Matan and Kyokong, 2003; Silva et al., 2012). Green و Kreschmann با بررسی خصوصیات مکانیکی ماده چوبی نشان دادند، مدول الاستیسیته ظاهری در خمش و مقاومت فشاری موازی و عمود بر الیاف با خشک شدن در زیر نقطه اشباع الیاف به صورت خطی افزایش می‌یابند (Green and Kreschmann, 1994). این دو محقق همچنین در سال ۱۹۹۶ دریافتند که مقاومت کششی نهایی در محدوده رطوبتی ۱۰-۱۲ درصد افزایش پیدا می‌کند، همچنین کاهش رطوبت چوب به زیر ۱۰ درصد در زمان خشک شدن آن باعث کاهش مقاومت کششی می‌گردد (Kreschmann and Green, 1996). مؤسسه پژوهش فراورده‌های جنگلی (۱۹۹۹) در طی گزارشی اعلام کرد که با افزایش رطوبت چوب سرعت انتشار صوت نیز کاهش می‌یابد، آنان همچنین اعلام کردند که افزایش رطوبت بر روی مدول الاستیسیته و دانسیته مؤثر بوده و به ترتیب باعث کاهش و افزایش مقادیر به دست آمده برای این ویژگی‌ها می‌شود. Halabe و همکاران (۱۹۹۵) مشاهده کردند که سرعت موج و مدول خمشی در چوب خشک به طور قابل توجهی بیشتر از چوب سبز می‌باشد. Brasha و همکاران (۱۹۹۷) رابطه معنی دار مقادیر مدول الاستیسیته دینامیک چوب تر و چوب تیمار شده را تأیید کردند. همچنین نتایج آنان حکایت از آن دارد که رابطه معنی داری بین مقادیر مدول الاستیسیته

1- Free vibration in free-free bar

- مشروط‌سازی شده در اتاق کليما تيزه با رطوبت نسبي ۶۵ درصد و دمای 20 ± 1 درجه سلسیوس - آزمون در دمای محیط (رطوبت تعادل: 12 ± 2 درصد)
 - خشک شده در اتو با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد - آزمون در دمای محیط (مدت زمان خشک‌کردن: ۲۴ ساعت، رطوبت تعادل: 10 ± 5 درصد)
 - افزایش پلکانی دما از ۶۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد با گام‌های ۲۰ درجه سانتی‌گراد - آزمون در ۷ دمای متغیر و رطوبت اسمی خشک انجام شد (مدت زمان خشک‌کردن در هر گام: ۲۴ ساعت، رطوبت تعادل: 0 ± 5 درصد).
- لازم به ذکر است که نمونه‌ها هنگامی اشباع در نظر گرفته شدند که پس از کنترل وزنی در طی مدت زمان یک هفته (۷ روز)، به حداکثر وزن ثابت رسیده بودند. آزمون ارتعاش خمشی در کلیه گام‌های حرارتی بلافاصله بر روی نمونه‌های اولیه پس از خروج نمونه‌ها از اتو انجام شد. لازم به ذکر است از مجموع ۱۵ آزمون باقی‌مانده در این تحقیق، تعداد ۵ نمونه به دلیل اعمال شرایط رطوبتی و دمایی متغیر، دچار معایبی از جمله ترک‌های ظاهری و اعوجاج و غیره گردیدند که با توجه به هدف تحقیق این آزمون‌ها از مجموعه حذف شده و مقایسه و بررسی‌های نهایی بر روی ۱۰ آزمون باقی‌مانده که منطبق با استاندارد ISO 3129 بودند، انجام شد.

آزمون ارتعاش خمشی

در این آزمون تیر چوبی به نسبت $0/224$ طول تیر از هر طرف بر روی تکیه‌گاه قرار گرفت، اعمال ضربه چکش از یک انتها و برداشت سیگنال‌های صوتی توسط میکروفن از انتهای دیگر تیر انجام شد و تجزیه و تحلیل مدهای اول تا سوم ارتعاش با استفاده از تئوری تیر تیموشنکو در نرم‌افزار [@]NDT.lab در هر یک از شرایط رطوبتی و دمایی انجام شد (Roohnia et al., 2012).

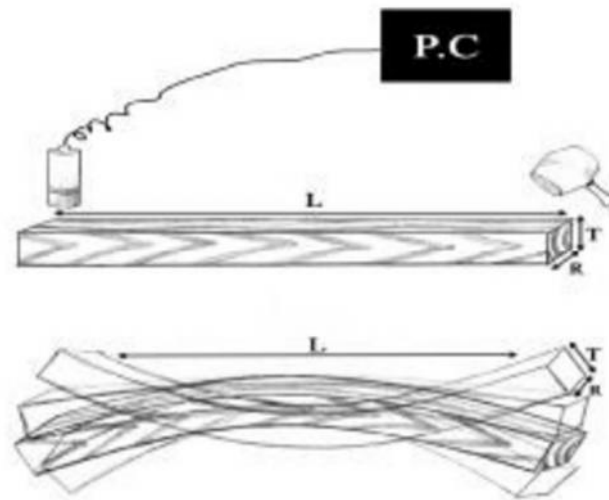
اجرای برنامه‌های چوب خشک‌کنی (کنترل برخط) باشد. از آنجاکه بیشتر روش‌های آزمونی برای کنترل کیفی نهایی برنامه‌های چوب خشک‌کنی، مخرب می‌باشند (Perre and Roger, 2006)، این قبیل بررسی‌ها با تکمیل و انجام تحقیقات بیشتر، می‌توانند با بسیاری از این روش‌های مخرب جایگزین شوند.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق مطابق استاندارد بین‌المللی ISO شماره ۳۱۲۹، از ۲۰ قطعه نمونه چوب راش ایران (*Fagus orientalis*) با سطوح کامل شعاعی و مماسی که راست‌تار و فاقد هرگونه عیب ظاهری بودند به ابعاد $35 \times 16 \times 16$ سانتی‌متر مکعب (شعاعی \times مماسی \times طولی) استفاده شد. نمونه‌های اولیه مورد آزمون ارتعاش خمشی آزاد در تیر دوسر آزاد قرار گرفته و نمونه‌هایی با ضریب همبستگی بالای $0/98$ بین سه مد اول ارتعاش خمشی برای ادامه آزمون انتخاب شدند. از مجموع آزمون‌های منتخب باقی‌مانده از مرحله قبل، آزمون‌هایی انتخاب شدند که در مقادیر مدول الاستیسیته، دانسیته و میرایی ارتعاش در هر دو صفحه طولی-شعاعی و طولی-مماسی دارای کمترین اختلاف بودند. بدین ترتیب تعداد ۱۵ آزمون با ویژگی‌های آکوستیکی بسیار نزدیک به یکدیگر برای ادامه آزمون انتخاب گردید.

ابتدا متغیر مستقل رطوبت در چهار سطح و بعد متغیر مستقل دما، به ترتیب زیر روی چوب‌آلات اعمال و در هر مرحله آزمون ارتعاش خمشی در تیر دو سر آزاد، به‌طور جداگانه در صفحات طولی-شعاعی و طولی-مماسی انجام شد.

- رطوبت در حالت اشباع شده در آب - آزمون در دمای محیط (رطوبت تعادل: 35 ± 5 درصد).
- رطوبت تعادل در مجاورت هوا (یک هفته توقف) - آزمون در دمای محیط (رطوبت تعادل: 19 ± 5 درصد).



شکل ۱- ارتعاش خمشی آزاد در تیر دو سر آزاد

K ضریب شکل است که در اینجا حدود 0.833 می باشد. G مدول برشی و جرم ویژه و f_n فرکانس n امین مد ارتعاش است که از طریق تجزیه و تحلیل طیف فوریه به دست می آید.

میرایی ارتعاش طبق رابطه زیر محاسبه شد:

$$\} = \frac{1}{n} \ln \left| \frac{x_1}{x_{n+1}} \right| \quad (5)$$

که در این رابطه X_1 ، طول اولیه موج در حال کاهش 1 و $n+1$ ، X طول n امین موج پس از موج X_1 است.

به منظور بررسی اثر رطوبت و دما بر مقادیر دانسیته، میرایی ارتعاش، ضریب همبستگی سه مد اول ارتعاش خمشی و مدول الاستیسیته دینامیک حاصل از ارتعاش در صفحات طولی-شعاعی و طولی-مماسی، میانگین مقادیر مذکور در هریک از شرایط رطوبتی و دمایی توسط نمودار خطی مورد بررسی قرار گرفتند.

برای اندازه گیری دانسیته (دانسیته ظاهری) از روش های استاندارد غیرمخرب و مبتنی بر مشاهدات تجربی استفاده شد.

$$\dots = \frac{m}{v} \quad (1)$$

دانسیته (kg/m^3) ، m جرم نمونه (kg) و v حجم (m^3) نمونه می باشد.

انجام محاسبات آزمون ارتعاش خمشی و محاسبه ضریب همبستگی سه مد اول ارتعاش خمشی، بر اساس تئوری تیر تیموشنکو و با روابط ۲ تا ۴ به دست آمد.

$$a_n = \left(\frac{E}{\dots} \right) - \left(\frac{E}{K \times G} \right) b_n \quad (2)$$

$$b_n = \frac{4 f^2 l^2 f_n^2 F_{2n}}{m_n^4} \quad (3)$$

$$a_n = \frac{[4 f^2 l^2 f_n^2 (1 + r F_{1n})]}{r m_n^4} \quad (4)$$

1- Amplitude of a peak n periods away (vibration associated with the first mode)

نتایج

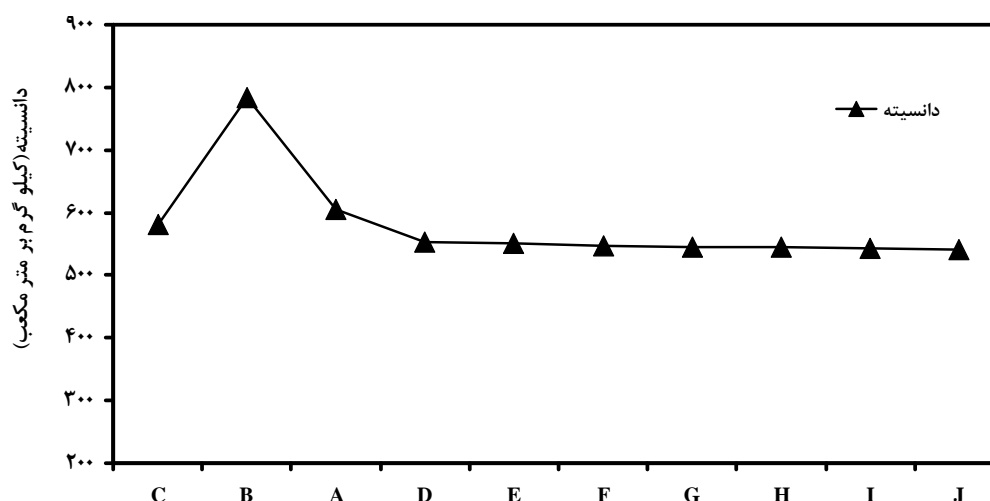
است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد نمونه‌های آزمونی در شرایط رطوبتی غوطه‌ور بیشترین مقادیر دانسیته را به خود اختصاص داده‌اند و با اعمال دما در گام اول (۶۰ درجه سانتی‌گراد) بر روی نمونه‌های آزمونی مقادیر این فاکتور کاهش و از این دما به بعد کاهش به صورت چشمگیر نیست.

مقادیر کمی اندازه‌گیری شده حاصل از ارتعاشات طولی- شعاعی و طولی- مماسی نمونه‌های مورد آزمون در کلیه گام‌های رطوبتی و دمایی اعمال شده در جدول ۱ آمده است. در شکل ۲ تغییرات به وجود آمده در دانسیته تحت تأثیر رطوبت و دماهای اعمال شده متفاوت نشان داده شده

جدول ۱- مقادیر کمی اندازه‌گیری شده حاصل از ارتعاشات طولی-شعاعی و طولی-مماسی و علائم اختصاری به‌کاررفته در نمودار

میانگین مقادیر خصوصیات دینامیکی اندازه‌گیری شده							محیط نگهداری شده/علائم اختصاری هر تیمار در نمودار	
ضریب همبستگی سه مد اول ارتعاش خمشی		میرایی		مدول الاستیسیته (GPa)		دانسیته (kg/m ³)	C	غوطه‌ور در آب (رطوبت تعادل: ۳۵±۵ درصد)
LT	LR	LT	LR	LT ²	LR ¹			
۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۰۳۶	۰/۰۲۴	۷/۳۸	۸/۰۴	۷۸۲/۹۸	C	غوطه‌ور در آب (رطوبت تعادل: ۳۵±۵ درصد)
(۰/۱۰)	(۰/۰۹)	(۰/۰۰۱۰)	(۰/۰۰۱۰)	(۰/۹۴)	(۰/۹۶)	(۱۳/۹۱)		
۰/۷۶	۰/۹۴	۰/۰۳۳	۰/۰۳۲	۹/۱۲	۹/۳۴	۶۰۴/۸۰	B	یک هفته در دمای محیط (رطوبت تعادل: ۱۹±۵ درصد)
(۰/۰۹)	(۰/۰۸)	(۰/۰۰۱۱)	(۰/۰۰۱۱)	(۰/۸۹)	(۰/۹۳)	(۱۱/۰۲)		
۰/۸۴	۰/۸۷	۰/۰۲۷	۰/۰۳۱	۹/۷۰	۱۱/۰۷	۵۸۱/۰۲	A	کلیماتیزه (رطوبت تعادل: ۱۲±۲ درصد)
(۰/۱۳)	(۰/۱۵)	(۰/۰۰۱۵)	(۰/۰۰۱۵)	(۰/۸۸)	(۰/۹۵)	(۹/۹۶)		
۰/۷۹	۰/۸۲	۰/۰۳۱	۰/۰۲۸	۱۱/۲۱	۱۲/۰۸	۵۵۲/۶۹	D	دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد (رطوبت تعادل: ۰±۵ درصد)
(۰/۱۱)	(۰/۱۰)	(۰/۰۰۱۴)	(۰/۰۰۱۱)	(۰/۹۵)	(۰/۸۹)	(۱۰/۸۵)		
۰/۹۲	۰/۹۰	۰/۰۱۱	۰/۰۱۰	۱۰/۹۳	۱۰/۹۹	۵۵۱/۶۶	E	دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد (رطوبت تعادل: ۰±۵ درصد)
(۰/۱۴)	(۰/۱۶)	(۰/۰۰۱۱)	(۰/۰۰۱۰)	(۰/۸۵)	(۰/۸۱)	(۸/۲۱)		
۰/۹۳	۰/۹۲	۰/۰۱۰	۰/۰۱۰	۱۰/۶۷	۱۰/۶۹	۵۴۶/۳۹	F	دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (رطوبت تعادل: ۰±۵ درصد)
(۰/۱۴)	(۰/۱۵)	(۰/۰۰۱۶)	(۰/۰۰۱۳)	(۰/۹۲)	(۰/۹۰)	(۶/۳۱)		
۰/۹۰	۰/۹۱	۰/۰۱۶	۰/۰۱۳	۱۰/۴۸	۱۰/۴۱	۵۴۵/۳۱	G	دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد (رطوبت تعادل: ۰±۵ درصد)
(۰/۱۰)	(۰/۰۸)	(۰/۰۰۱۱)	(۰/۰۰۱۴)	(۰/۸۴)	(۰/۸۷)	(۶/۵۹)		
۰/۹۰	۰/۹۳	۰/۰۱۹	۰/۰۱۹	۱۰/۲۱	۱۰/۱۷	۵۴۴/۸۷	H	دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد (رطوبت تعادل: ۰±۵ درصد)
(۰/۱۱)	(۰/۱۳)	(۰/۰۰۱۳)	(۰/۰۰۱۲)	(۰/۸۷)	(۰/۸۷)	(۷/۷۴)		
۰/۹۰	۰/۹۱	۰/۰۱۹	۰/۰۲۳	۱۰/۰۳	۹/۹۴	۵۴۲/۷۶	I	دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد (رطوبت تعادل: ۰±۵ درصد)
(۰/۱۶)	(۰/۱۸)	(۰/۰۰۱۱)	(۰/۰۰۱۳)	(۰/۸۸)	(۰/۸۹)	(۷/۸۵)		
۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۰۱۸	۰/۰۲۲	۱۰/۰۳	۹/۶۱	۵۴۱/۴۸	J	دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد (رطوبت تعادل: ۰±۵ درصد)
(۰/۱۱)	(۰/۱۳)	(۰/۰۰۱۲)	(۰/۰۰۱۰)	(۰/۷۸)	(۰/۷۸)	(۷/۹۷)		

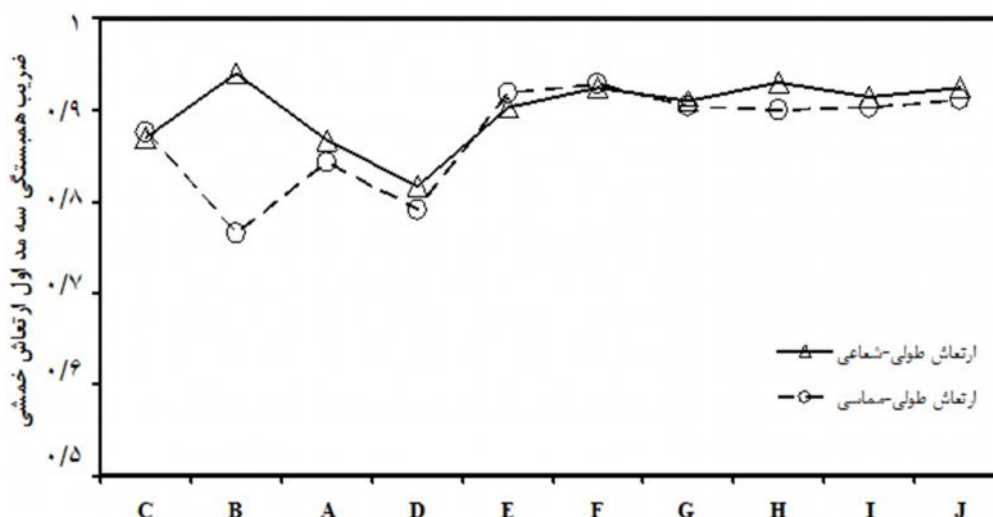
۱، ارتعاش خمشی طولی-شعاعی و ۰،۲، ارتعاش خمشی طولی-مماسی، اعداد داخل پرانتز مقادیر انحراف از معیار



شکل ۲- اثر دما و رطوبت بر روی دانسیته

طولی-شعاعی، افزایش (مقادیر به حداکثر خود رسیده‌اند) و در صفحه طولی-مماسی کاهش مقادیر ضریب همبستگی سه مد اول ارتعاش خمشی را در پی داشته‌اند. در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای محیط مقادیر کاهش یافت و با افزایش پلکانی دما تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد، مقادیر ضریب همبستگی سه مد اول ارتعاش خمشی افزایش یافته و با روندی ثابت ادامه یافت.

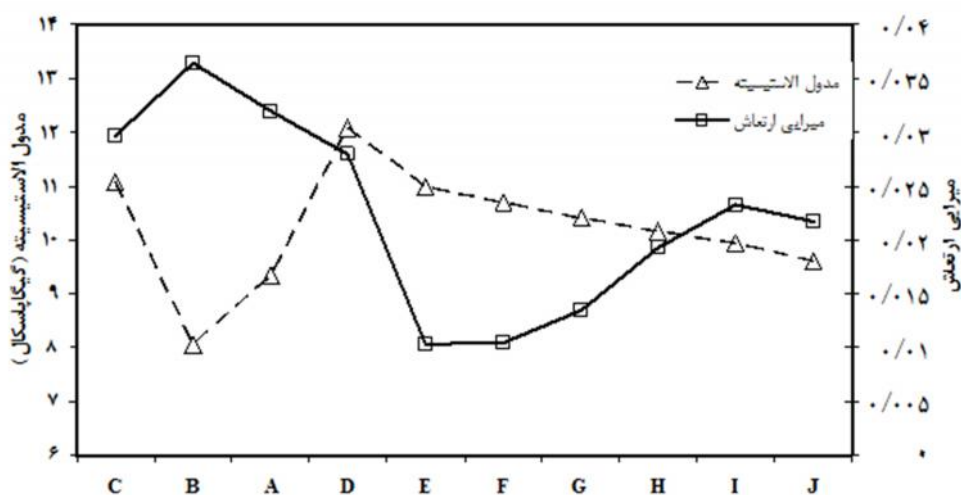
در شکل ۳ تغییرات به وجود آمده در ضریب همبستگی سه مد اول ارتعاش خمشی در دو صفحه طولی-شعاعی و طولی-مماسی نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد در شرایط اقلیماتیزه عامل اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها در هر دو صفحه، مقادیر یکسانی داشتند. اشباع نمونه‌ها بر روی مقادیر به دست آمده از هر صفحه اثر متفاوتی داشت. به طوری که در صفحه



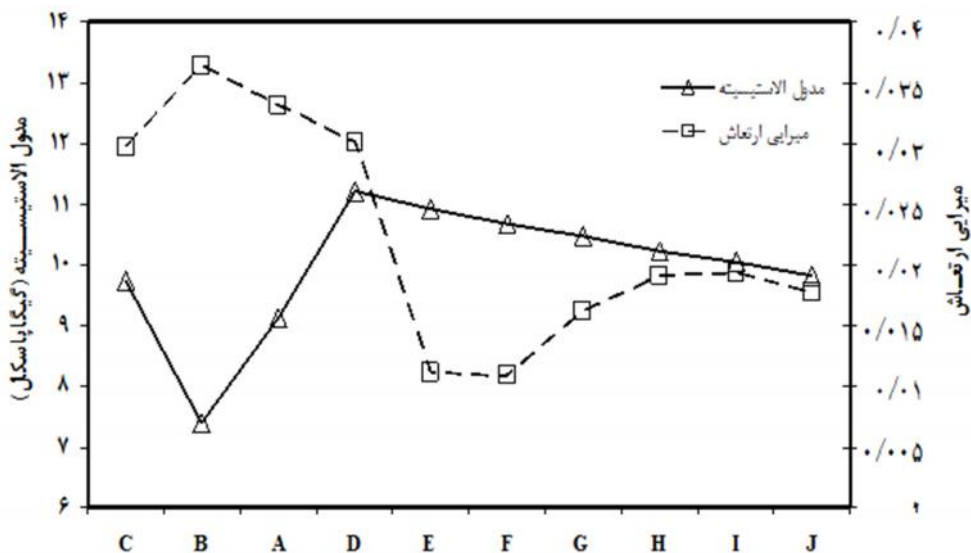
شکل ۳- اثر دما و رطوبت بر روی ضریب همبستگی سه مد اول ارتعاش خمشی صفحات طولی شعاعی و طولی مماسی

شعاعی و طولی-مماسی بیشترین مقادیر را در حالت غوطه‌ور به خود اختصاص دادند. در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد میرایی ارتفاع در هر دو صفحه مورد آزمون کاهش یافت و در ۸۰ درجه سانتی‌گراد به حداقل رسید. افزایش دما از ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد سبب روند صعودی مقادیر میرایی ارتفاع حاصل از دو صفحه طولی-شعاعی و طولی-مماسی گردید. با توجه به این شکل‌ها، مقادیر میرایی ارتفاع صفحه طولی-مماسی تا دمای ۱۴۰ درجه بیش از صفحه طولی-شعاعی می‌باشد (نماد مربعی شکل در شکل‌های ۴ و ۵).

شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب تغییرات مدول الاستیسیته و میرایی ارتفاع را در دو صفحه طولی-شعاعی و طولی-مماسی نشان می‌دهند. همان‌طور که در این دو شکل ملاحظه می‌گردد در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد مقادیر مدول الاستیسیته در هر دو صفحه مورد آزمون حداکثر مقدار را داشته و با افزایش پلکانی دما از ۸۰ درجه سانتی‌گراد مدول الاستیسیته کاهش یافته و در ادامه روندی ثابت در هر دو صفحه مشاهده شد (نماد مثلثی شکل در شکل‌های ۴ و ۵). با توجه به این دو شکل میرایی ارتفاع در نمونه‌ها در هر دو صفحه طولی-



شکل ۴- تأثیر همزمان دما و رطوبت بر روی میرایی ارتفاع و مدول الاستیسیته صفحه طولی شعاعی



شکل ۵- تأثیر همزمان دما و رطوبت بر روی میرایی ارتفاع و مدول الاستیسیته صفحه طولی مماسی

رطوبت بر خواص ارتعاشی هریک از صفحات ارتعاشی با توجه به وضعیت استقرار فیبرها، آوندها و سایر اجزای تشکیل دهنده چوب در هر صفحه مورد آزمون مرتبط دانسته‌اند (and Bekhta, 2003; Jody et al., 2008). البته این موضوع در این تحقیق با توجه به نوع متفاوت گونه نیاز به تحقیقات بیشتر دارد؛ بنابراین با توجه به تأثیر مستقیم مقادیر ضریب همبستگی سه مد اول ارتعاش خمشی بر نتایج حاصل از مدول برشی دینامیک (Bordonné, 1989)، به هنگام کنترل‌های کیفی، بررسی مجزای هر دو صفحه برای بالا بردن اطمینان حاصل از نتایج ضروری به نظر می‌رسد.

تیرهای چوبی ارتوتروپیک تنها یک مدول الاستیسیته طولی داشته و نباید هیچ تفاوتی بین مقادیر مدول الاستیسیته طولی حاصل ارتعاش طولی-شعاعی و طولی-مماسی وجود داشته باشد (Bodig and Jayne, 1993). از سوی دیگر هرچند مقادیر این فاکتور به تهنایی بعد از ایجاد دست‌کاری‌های مصنوعی در تیرهای چوبی نباید تغییر کنند، اما در این مطالعه به‌عنوان پاسخ دینامیکی تیر در شرایط رطوبتی و دمایی متفاوت معرفی شده است. همان‌گونه که پیش‌ازین نیز در تحقیقات انجام شده دست‌کاری‌های مصنوعی باعث دریافت پاسخ دینامیکی ناهمگن از مقادیر حاصل از این فاکتور شده است (Kohantorabi et al., 2009; Roohnia et al., 2014). در این تحقیق نیز ایجاد شرایط رطوبتی و دمایی متفاوت سبب دریافت پاسخ دینامیکی ناهمگن از تیرهای مورد آزمون در هر دو صفحه گردید که در این میان تأثیر رطوبت و دما پلکانی با یکدیگر کاملاً متفاوت می‌باشد. همان‌طور که در نتایج مشاهده شد دانسیته نمونه‌های آزمونی در حالت غوطه‌ور بیشترین مقادیر را به خود اختصاص داده‌اند که با توجه به اشباع نمونه‌ها از آب و افزایش جرمی آنها نتیجه به دست آمده بدیهی بوده که این نتیجه باعث به حداقل رسیدن مقادیر مدول الاستیسیته در شرایط اشباع از رطوبت شده است (Bodig and Jayne, 1993). اعمال دما از ۶۰ درجه سانتی‌گراد باعث کاهش مقادیر دانسیته در نمونه‌های آزمونی گردید که این کاهش از

مقایسه مقادیر مدول الاستیسیته و میرایی ارتعاش در قالب یک نمودار (شکل‌های ۴ و ۵) به بررسی روند معکوس تغییرات مقادیر هر دو فاکتور دینامیکی، در اثر تغییرات رطوبتی در هر دو صفحه نسبت به یکدیگر کمک می‌کند. با توجه به این شکل‌ها، حداکثر مدول الاستیسیته و حداقل میرایی ارتعاش به ترتیب در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در هر دو صفحه تحت ارتعاشی مشاهده شد.

بحث

ضریب همبستگی سه مد اول ارتعاش خمشی در اثر غوطه‌ور شدن نمونه‌ها در آب روندی کاملاً متفاوت از یکدیگر را در صفحات طولی-شعاعی و طولی-مماسی نشان دادند. به طوری که ضریب همبستگی سه مد اول ارتعاش خمشی در صفحه طولی-شعاعی به حداکثر مقدار خود و در صفحه طولی-مماسی به حداقل مقدار خود رسید. اهمیت این ضریب در مواردی مانند تعیین مدول برشی به روش تئوری تیر تیموشنکو (Bordonné, 1989) و نیز تشخیص معایب در تیرهای چوبی (Hosseini et al., 2009) و حتی میزان پیشرفت معایب احتمالی موجود در اثر دست‌کاری‌های ایجادشده در تیرهای چوبی می‌باشد (Kohantorabi and Roohnia, 2013). تاکنون تحقیقی در مورد اثر رطوبت بر مقادیر حاصل از ضریب همبستگی انجام نشده است. نتایج حاصل از این تحقیق مبین آن می‌باشد که در گونه راش این فاکتور در اثر اعمال رطوبت در صفحات طولی-شعاعی و طولی-مماسی نتایج کاملاً متفاوت را دربر خواهند داشت. دلیل این امر را می‌توان به ساختار و آرایش متفاوت اجزای گونه راش و نحوه متفاوت استقرار رطوبت در صفحات ارتعاشی مورد تحقیق در گونه مورد بررسی مرتبط دانست. به طوری که در تحقیقات پیشین نیز اثر متفاوت رطوبت بر فاکتور مکانیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته بود و پاسخ دینامیکی و استاتیکی دریافت شده در هریک از صفحات طولی-شعاعی و طولی-مماسی نسبت به یکدیگر متغیر گزارش شده بود (Korkut et al., 2008; Dundar et al., 2012). دلیل این تفاوت را به اثر متفاوت

می‌تواند موجب گسترش ترک‌های ریز در دیوار سلولی شده و به موجب آن باعث کاهش سفتی و مدول الاستیسیته دیوار سلولی شده که این امر موجب کاهش قابلیت چوب در انتشار موج شده که به تبع آن باعث افزایش مقادیر میرایی ارتعاش می‌گردد (Ohasaki et al., 2006). به علاوه با توجه به نتایج حاصل از سایر تحقیقات به نظر می‌رسد می‌توان ایجاد ترک‌های ریز داخلی را به عنوان مهمترین عامل افزایش مقادیر میرایی ارتعاش در گونه مورد تحقیق معرفی کرد (Kohantorabi et al., 2015; Shahverdi et al., 2012). بنابراین در فرایندهایی همانند چوب خشک‌کنی و تیمارهای حرارتی در نظر گرفتن رفتار دینامیکی این گونه در مجموعه حرارت‌های اعمال شده ضروری می‌باشد. هر چند تغییرات به وجود آمده در مقادیر مدول الاستیسیته و میرایی ارتعاش در هر دو صفحه ارتعاشی به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفت اما همان‌طور که پیش‌ازین نیز تأکید شد بررسی همزمان اثر رطوبت و دما بر رفتار دینامیکی دو پارامتر ذکر شده با توجه به اهمیت مقادیر حاصل در مواردی مانند چوب خشک‌کنی و تیمارهای گرمایی از یکسو، و تأثیر معایب حاصل از این‌گونه عملیات بر مقادیر حاصل شده از دو فاکتور مذکور، در هر دو صفحه مورد ارتعاش ضروری به نظر می‌رسید. این امر از آن لحاظ حائز اهمیت می‌باشد که نتایج برخی از تحقیقات حکایت از پاسخ دینامیکی کاملاً متفاوت در مقادیر مدول الاستیسیته و میرایی ارتعاش نسبت به معایب و یا دست‌کاری‌های مصنوعی در آزمون دینامیکی تیرهای چوبی شده دارد. به طوری که در برخی موارد وجود معایب بر مقادیر حاصل از مدول الاستیسیته بدون تأثیر بوده ولی بر مقادیر میرایی ارتعاش تأثیر قابل توجهی داشته است، همچنین نتایجی بعکس این موضوع نیز در این مطالعات گزارش شده است (Yang et al., 2003; Kohantorabi et al., 2014; Roohnia et al., 2012). با توجه به بررسی همزمان این دو فاکتور، به نظر می‌رسد دما بین ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد مطلوب‌ترین اثر دینامیکی را در هر دو صفحه در پی داشته است. بنابراین مدول الاستیسیته بالا و در مقابل مقادیر کمتر میرایی ارتعاش کیفیت بالا و عاری از

مرحله اول رخ داده و با روندی کندتر در مراحل بعدی حرارت‌دهی پیش می‌رود. بنابراین به نظر می‌رسد بخش اعظم آب آزاد موجود در نمونه‌های آزمون در همان دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد از چوب خارج شده است (Bucur 1988; Skaar 2006). با توجه به نتایج حاصل شده از دانسیته می‌توان ادعان داشت که تیرهای مورد آزمون در ۶۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر رطوبت خود را که به صورت آب آزاد در بافت چوب بوده از دست داده‌اند و به این ترتیب به حداکثر مقادیر مدول الاستیسیته رسیده‌اند. همچنین با نتایج حاصل شده از این تحقیق و تحقیقات پیشین، لزوم کنترل رطوبتی در نمونه‌های مورد آزمون و به ویژه آزمون‌های کنترل کیفی به منظور عدم حصول نتایج با ضریب خطای بالا بار دیگر بیش از پیش اهمیت خود را نشان می‌دهد (Jody et al., 2008).

بعکس مدول الاستیسیته، مقادیر حاصل از میرایی ارتعاش وابسته به عواملی مانند: نوع گونه (جرم ویژه، میزان مواد استخراجی، بافت چوب و غیره)، رطوبت چوب (با افزایش میزان رطوبت میرایی افزایش می‌یابد)، جهت ارتعاش (طولی، مماسی و شعاعی) و مد ارتعاش می‌باشد (Obataya et al., 1999; Brémaud et al., 2010; Segolpayegani et al., 2012). همان‌طور که در نتایج مشاهده شد، در هر دو صفحه بیشترین مقادیر میرایی ارتعاش در حالت غوطه‌وری نمونه‌ها حاصل گردید که دلیل این امر مطابق با تئوری به دلیل تأثیر منفی رطوبت که منجر به تغییر در فرکانس طبیعی آزمون‌ها می‌گردد، می‌باشد (Aizawa et al., 1998; Perre and Roger, 2006; Bucur 2006). هر چند مطالعه تغییرات ریزساختاری جزو گستره تحقیقاتی این مطالعه نیست ولی با توجه به روند افزایشی مقادیر میرایی از ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد (دمای بالاتر از دمای جوش آب) و با توجه به تحقیقات پیشین، به نظر می‌رسد که افزایش میرایی ارتعاش به تنش یاخته‌های سلولی و انحراف الیاف در زمان خروج آب آزاد از بافت داخلی چوب می‌باشد (Hill, 2006; Chan, 2007; Llana et al., 2013). همچنین اثر افزایش دمای بالای ۱۰۰ درجه تنش‌های حاصل از هم‌کشیدگی نیز

- WI: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 28p.
- Halabe, U., Bidgalu, G., Hota, G., Ross, R. 1995., Nondestructive evaluation of green wood using stress wave and transverse vibration techniques. *Materials Evaluation*, 55(9): 1013-1018.
- Hill, C., 2006. Wood modification chemical, thermal and other process. Chichester, England, 260 pp.
- Hossein. M.A, Roohnia, M, Shahverdi. M, 2009. Some footprints of wood internal defects on three first mode-shapes of free vibration 16th international symposium on nondestructive testing and evaluation of wood, 2-14 October, Beijing ,China: 23-32.
- Jody, D., Gray, Shawn T., Grushecky, A., Armstrong, J.P., 2008. Stress wave velocity and dynamic modulus of elasticity of yellow poplar ranging from 100 to 10 percent moisture .Proceedings, 16th central hardwood forest conference. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. IN April 8-9, 2008.pp:139-142.
- Kamdem, D. P., Pizzi, A., Jermannaud, A., 2002. Durability of heat-treated wood, *Holz als Roh-und Werkstoff*, 60: 1-6.
- Kohantorabi, M., Roohnia, M., 2013. Detection of defects in joints using the variations in dynamic shear modulus and Correlation Coefficient factor in Beech Wood. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 28(2): 238-257.
- Kohantorabi, M., Roohnia, M., Haji Rafeiha, E., and Asgari, A., 2014. Nondestructive evaluation of defects (face to face and end to end joints) with polyvinyl acetate applied adhesive using vibration method. *Iranian Journal of Renewable Natural Resources Research*, 4(3): 21-34.
- Kohantorabi, M., Hossein, M.A, Shahverdi, M., Roohnia, M., 2015. Vibration Based NDT Methods to Verify Wood Drying Efficiency. *DRVNA INDUSTRIJA*, 66 (3): 221-228.
- Korkut, S., Akgul, M., Dundar, T. 2008. The effect of heat treatment on some technological properties of scots pine (*pinus sylvestries L.*) wood, *BioResource*. 99:1861-1868.
- Kretschmann, D., Green, D., 1996. Modeling Moisture content-mechanical property relationships for clear southern pine. *Wood and Fiber Science*, 28(3): 320-337.
- Kubojima, Y., Suzuki, Y., Tonosaki, M., 2005. Vibrational Properties of Green Wood in High Temperature Water Vapor; *Holzforschung*. 59: 446-450.
- Llana, D.F., Gonzalez, G.I., Francisco, A., Niemz, P. 2013. Influence of Temperature and Moisture

عیب بودن تیر چوبی را نشان می‌دهد، بنابراین از این روش می‌توان به نقطه‌ای بهینه در چوب خشک‌کنی و تیمارهای گرمایی در دماهای گوناگون استفاده کرد و از میزان تغییرات به وجود آمده در زمان برنامه‌های چوب خشک‌کنی به‌عنوان فاکتورهایی مؤثر برای کنترل‌های برخط، استفاده نمود.

منابع مورد استفاده

- Aizawa, H., Eiichi, O., Ono, T., and Norimato, M., 1998. Acoustic converting efficiency and anisotropic nature of wood. *Wood Research*, 85: 81-83.
- Bekhta, P., and Neimz, P., 2003. Effect of high temperature on the change in color dimensional stability and mechanical properties of spruce wood, *Holz forschung*. 57(5): 539-546.
- Bodig, J., Jayne, B.A., 1993. Mechanics of wood and wood composites. Krieger Publishing Co, Malabar Florida. 712 pp.
- 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.
- Brasha, B., Ross, R., Pellerin, R., 1997. Stress wave nondestructive evaluation of green veneer: Southern yellow pine and Douglas fir. *International Society for Optical Engineering*, 2994: 296-306.
- Brémaud. I., Cabrolier, P., Gril, J., Clair, B., Gérard, J., Minato, K., Thibaut, B., 2010. Identification of anisotropic vibrational properties of Padauk wood with interlocked grain, *Wood Science and Technology*, 44:355-367.
- Bucur V (2006) Acoustics of wood. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.393pp.
- Chan, J.M., 2007. Moisture content in radiata pine wood: Implications for wood quality and water-stress response. PhD Thesis. School of Forestry College of Engineering. University of Canterbury Riccarton, Christchurch, New Zealand. 210pp.
- Dündar, T., Kurt, S., As, Nusret., Uysal, B., 2012. Nondestructive evaluation of wood strength using thermal conductivity. *BioResources*. 7(3): 3306-3316.
- Forest Products Laboratory., 1999. Wood Handbook: wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL-113. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory. 463p.
- Green, D., Kreschmann, D., 1994. Moisture content and the properties of clear southern pine. Madison,

- Parameters of Poplar Wood with End-Cracks. *Annals of Forest Science*, 26 (2): 141-153.
- Roohnia, M., Kohantorabi, M., Jahan-Latibari, A., Tajdini, A. and Ghaznavi, M., 2012. Nondestructive assessment of glued joints in timber applying vibration-based methods. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70: 791-799.
- Segolpayegani, A., Brémaud, I., Gril, J., Thevenon, M.F. and Pourtahmasi, K., 2012. Effect of extractions on dynamic mechanical properties of white mulberry (*Morus alba*). *Journal of Wood Science*, 58(2):153-162
- Silva, D.A.L., Lahr, F.A.R., Faria, O.B., Eduardo, C., 2012. Influence of Wood Moisture Content on the Modulus of Elasticity in Compression Parallel to the Grain. *Materials Research*, 15(2): 300-304
- Skaar, C., 1998. *Wood-Water Relations*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 291pp.
- Yang, X., Ishimaru, Y., Iida, I. Urakami, H., 2002. Application of modal analysis by transfer function to nondestructive testing of wood I: Determination of localized defects in wood by shape of the flexural vibration wave. *Journal of Wood Science*, 48: 283-288.
- Content in Non-destructive values of Scots pine (*Pinus sylvestris* L). *Proceedings 18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*. Madison, Wisconsin, USA. September 24-27. 2013. Pp: 451-457.
- Matan, M., Buhnum, K. 2003. Effect of moisture content on some physical and mechanical properties of juvenile rubberwood (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg). *Songklanakarinn Journal Science Technology*, 25(3):328-340.
- Obataya, E., Norimoto, M., 1999. Acoustic properties of a reed (*Arundo donax* L.) used for the vibrating plate of a clarinet, *Journal of Acoustical Society of America*, 106 (2): 1106-1110.
- Ohsaki, H., Kubojima Y., Tonosaki M. & Ohta M., 2006. Vibrational Properties of wetwood of todomatsu (*Abies sachalinensis*) at high temperature. *Journal of Wood Science*. 53(2): 134-138
- Perré, P.; Roger, B. K., 2006. *Drying of Wood: Principles and Practices*. Taylor and Fransis group, LLC, 57 p.
- Roohnia, M., Yavari, A. Tajdini, A., 2009. Elastic

Nondestructive evaluation of the effects of moisture content and temperature on the elastic properties of beech wood using flexural vibration test

M. Kohantorabi^{1*}, M. Roohnia² and S. Fathi³

1*-Corresponding Author, PhD., Student, Department of Wood and Paper Science and Technology College of Agriculture and Natural Resources, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran-Iran, Email: Mostafa.Kohantorabi@yahoo.com

2-Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj-Iran

3-M.Sc., student, Department of Wood and Paper Science and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj-Iran.

Received: Sep., 2016

Accepted: Jan, 2017

Abstract

In this study, 10 samples of beech wood, without apparent defects, and the dimensions of $360 \times 16 \times 16$ cm (length \times radial \times tangential) were selected, and exposed to variable temperatures (60, 80, 100, 120, 140, 160, and 180°C) and moisture (moisture content at: saturated with water (EMC=65±5%), equilibrium moisture content exposed to air (EMC=19±5%), and conditioning moisture content in controlled climatic chamber (EMC=12±2%). All samples after reaching the equilibrium, were tested under free flexural vibration in two longitudinal-tangential and longitudinal-radial planes, and some of the physical, mechanical, and acoustical properties in both planes were measured. The results showed that the correlation coefficient of the first three modes of flexural vibration in both planes of samples treated under climatic chamber had a similar behavior, but when the samples were treated in the water-saturated condition, they showed an adverse behavior in each plane. The effect of increasing the temperature above 100°C initiated stresses resulting from shrinkage leading to the development of micro-cracks in cell walls and reduction in the modulus of elasticity and ultimately reduction in wave propagation ability of wood. Thus, in the damping vibration values in both longitudinal-tangential and longitudinal-radial planes of the samples were increased. The concurrent changes in modulus of elasticity and damping vibration in both vibration planes are a desirable indicator for monitoring the process from the primary logging process stages to processes such as wood drying and heat treatment.

Keywords: Moisture, temperature, vibration, online control, timoshenko beam theory, acoustic.