

## روش غیرمخرب ترموگرافی در ارزیابی دانسیته گونه‌های بلوط بلند مازو و راش

پرستو مجدآبادی فراهانی<sup>۱</sup>، مهران روح‌نیا<sup>۲\*</sup> و امیر لشگری<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد، گروه علوم صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

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

پست الکترونیک: mehran.roohnia@kiau.ac.ir

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

تاریخ پذیرش: اسفند ۱۳۹۷

تاریخ دریافت: آذر ۱۳۹۷

### چکیده

در این تحقیق به بازمینی و امکان تخمین و ارزیابی دانسیته در دو گونه بلوط بلند مازو (*Quercus castaneifolia*) و راش (*Fagus orientalis*) پرداخته شده است. ابتدا از هرگونه آزمون‌هایی با ابعاد  $4 \times 20 \times 30$  سانتی‌متر (طول، عرض، ضخامت) تهیه گردید. سپس به مدت ۷۲ ساعت در اتو در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و پس از مدت مذکور از اتو خارج شده و دانسیته آنها اندازه‌گیری شد. در آزمون ترموگرافی طی مدت یک ساعت، در دقایق ۱، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ (تحت عنوان پله‌های ثبت دما) دمای لحظه‌ای نمونه ثبت گردید. پس از آن به منظور بررسی تأثیر فاکتور شکل و ابعاد بر مقادیر اشتباهات دانسیته حاصل از روش ترموگرافی، نمونه‌های اولیه در دو مرحله به ابعاد  $3 \times 20 \times 30$  و  $2 \times 15 \times 20$  سانتی‌متر تبدیل شدند و دوباره آزمون اندازه‌گیری دانسیته و ترموگرافی با کیفیت ذکر شده بر روی نمونه‌ها انجام شد. روابط بین فاکتور شکل، دانسیته و نسبت دانسیته بر فاکتور شکل با سرعت لگاریتمی افت دما به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حکایت از آن بود که تغییرات دانسیته بدون نظر گرفتن فاکتور شکل، همبستگی خوبی با نتایج افت دما نداشت؛ اما هر دو گونه نتایج قابل اطمینانی از دانسیته، توسط روش‌های بررسی نسبت دانسیته بر فاکتور شکل با سرعت افت دما از دمای بیشینه از خود به نمایش گذاشتند. با این حال پیشنهاد می‌گردد در تخمین و یا ارزیابی غیر مخرب به روش ترموگرافی برای تمامی گونه‌های تجاری، توسط شیوه ترموگرافی بررسی شوند.

واژه‌های کلیدی: آزمون غیر مخرب، ترموگرافی، افت دما، فاکتور شکل، دانسیته، دمای بیشینه

### مقدمه

آزمون‌های غیر مخرب (NDT<sup>۱</sup>) روش‌های آزمونی غیرتهاجمی در تشخیص ویژگی‌های اجزاء و ساختار یک ماده یا اندازه‌گیری برخی کمیت‌های فیزیکی و مکانیکی از یک ماده است. در مقایسه با آزمون‌های مخرب، روش‌های غیر مخرب بدون واردکردن آسیب، تنش یا خرابی در

آزمایش مواد اطلاعات زیادی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد (Ross & Pellerin, 1994). معمولاً در آزمایش‌های مخرب، نمونه‌گیری سبب آسیب به نمونه آزمونی و در نتیجه بلااستفاده ماندن نمونه پس از آزمون می‌گردد که این امر علاوه بر اینکه هزینه‌های زیادی در پی دارد، زمان‌بر نیز بوده، درحالی‌که آزمون‌های غیر مخرب عاری از این‌گونه

اختلاف دمایی حاصل شده در سرتاسر یک ماده می باشد که خصوصیات حرارتی چوب و محصولات چوبی استفاده از این روش را برای اخذ اطلاعات بسیار مفیدی در تخمین و یا حتی ارزیابی و تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن فراهم آورده است.

دانسیتته چوب یکی از عوامل فیزیکی مهم در ارزیابی مقاومت و پیش بینی ویژگی های مکانیکی چوب می باشد (Bodig & Jayne, 1989). معمولاً اندازه گیری دانسیته چوب با اندازه گیری ابعاد و جرم قطعه و تقسیم جرم به حجم بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب بر اساس استانداردهایی همانند استاندارد ملی ۱۳۹۴ - (۲) ۲۰۲۸۴ و یا استاندارد بین المللی ISO-13061 محاسبه می شود. در بسیاری موارد مثل قطعات نصب شده در سازه های چوبی، امکان جداسازی از شرایط سرویس نداشته و کاهش دانسیته آنها (طی فرایند هوازگی یا آسیب های بیولوژیکی) در شرایط سرویس قابل پایش نیست. پیدا کردن روش های غیرمستقیم و مستقیم اندازه گیری دانسیته قطعات چوبی در شرایط سرویس و بدون خروج آنها از سازه می تواند کمک بزرگی به تحقیقات و مطالعاتی که تغییرات و پایش دانسیته برایشان مهم است، باشد. در سال های اخیر روش های به روز و نوینی برای تخمین و حتی ارزیابی این ویژگی از چوب در زمان سرویس ارائه گردیده است (Wu et al., 1997). عملکرد ماکروویو بر چوب کاج در فرکانس ۲۴۵ هرتز در سطوح مختلف توسط Rinn و همکاران در سال ۱۹۹۶ مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته و نتایج آن وجود رابطه بین دو عامل شدت و زمان تابش انجام شده بر نمونه مورد نظر بیانگر وجود رابطه مستقیم می باشد. به عبارتی ساده تر، شدت و زمان تابش بر جذب مواد نگه دارنده و نفوذپذیری آن تأثیر مستقیم دارد. در ادامه مطالب فوق به بررسی اشعه X و دستگاه رزیستوگراف و کاربرد آن در صنعت چوب می پردازد. Wu و همکاران در سال ۱۹۹۷ با استفاده از تکنیک ترموگرافی در خط تولید تخته خرده چوب موفق به طراحی موفقیت آمیز کیفی در تولید این محصول گردیدند. Bodnar و همکاران در سال ۲۰۰۰ با

کاستی ها می باشند (Ayarkwa et al., 2000).

امروزه روش های متنوعی از جمله روش های مافوق صوت، ارتعاش، موج تنش، مایع نافذ و غیره در آزمون های غیرمخرب ارزیابی کمی و کیفی مواد مورد استفاده می گیرد (Obataya et al., 1999). یکی از روش هایی که به تازگی در این قبیل آزمون ها می تواند از جایگاه ویژه ای برخوردار گردد، روش ترموگرافی مادون قرمز (Infrared thermography) می باشد. در دوربین ترموگرافی از هزاران حسگر استفاده شده که هر یک از حسگرها دمای بخش کوچکی از میدان دید عدسی دوربین را اندازه گیری می کند. این حسگرها روی صفحه ای که به آن گیرنده می گویند به صورت سطری/ستونی در کنار هم چیده شده اند. بدین ترتیب دوربین ترموگرافی دمای میدان ساطع شده از ماده را در میدان دید خود وابسته به تعداد حسگرهای به کاررفته در دوربین و در هزاران هزار نقطه (نه فقط در یک نقطه) و در کسری از ثانیه ثبت می کند. نتیجه اندازه گیری در جدولی با تعداد خانه های برابر تعداد حسگرها، مثلاً ۲۴۰×۳۲۰ خانه (پیکسل) ثبت می شود. دوربین بعد از قرائت دما، به هر دما رنگی را اختصاص می دهد و بدین ترتیب به هر یک از خانه های جدول دمای فوق، رنگ ویژه ای اختصاص می یابد. در نهایت جدول رنگ ها به صفحه نمایش ارسال می شود و آنچه ما در دوربین می بینیم در واقع یک جدول دماست که هر یک از خانه های آن به جای دمای اندازه گیری شده توسط حسگر مربوطه، رنگ اختصاص داده شده به آن را روشن می کند. دوربین های امروزی با کیفیت بالا معمولاً به اختلاف دما در حد صدم تا یک دهم درجه حساس اند. مورد دیگری که تأثیر بالایی در کیفیت تصویر ایفا می کند همان تعداد حسگرهاست که هر چه بیشتر باشد شفافیت تصویر بیشتر می شود (Tanaka & Divós, 2001). از این روش غیرمخرب، در عیب یابی، ارزیابی و تخمین دانسیته و غیره در صنعت چوب و محصولات چوبی استفاده شده است (Reynolds & Wells., 1984; Diener, 1995; Tanaka & Divós, 2001; Farra et al., 2011; López et al., 2013) اساس کار این روش همان طور که بیان گردید از روی

چوب می‌گردد استفاده نمودند. Dumoulin و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از سیستم ترموگرافی مادون قرمز به تشخیص معایبی همانند ترک در چوب‌آلات قدیمی پی بردند. آنان با این روش و مقایسه با شبیه‌سازی عددی FLUENT اعلام کردند روش مذکور روشی دقیق برای جای‌یابی معایب در چوب می‌باشد. Weston و همکاران در سال ۲۰۱۲ تأثیر غلظت مواد افزودنی مختلف را بر روی برخی خواص فیزیکی مکانیکی چوب پلاستیک با روش ترموگرافی مورد بررسی قرار دادند. آنان اعلام کردند استفاده از روش ترموگرافی در تشخیص سائیدگی سطحی و تا حدودی زیرسطحی کامپوزیت‌ها مفید می‌باشد. در سال ۲۰۱۳ Lopez و همکاران نتیجه خوبی از تحقیق خود روی همبستگی سرعت خنک شدن نمونه چوبی و دانسیته به دست آوردند. فناوری نوین ترموگرافی و معرفی تجهیزات پیشرفته دوربین‌های حرارتی مادون قرمز در چوب روشی به روی این‌گونه تحقیقات باز نموده است. Lopez در تحقیق خود از کم بودن تحقیقات قبلی روی این موضوع با ارزش شکایت می‌نماید. Jo و همکاران در سال ۲۰۱۴ به ویژه بناهایی که بیشتر در قرن ۲۰ و ۱۹ ساخته شده‌اند بیشتر از قاب‌های چوبی ساخته شده و همچنین بناهای سنگی مانند معبد سنگی کلیسا ماگنسیا<sup>۲</sup> در کره که متعلق به قرن ۱۳ می‌باشد، با کمک ترموگرافی به معایبی مانند وجود تاول‌هایی که بین سنگ‌ها وجود داشت و قابل دسترسی نبودند قابل‌رؤیت و دسترسی گردید.

بنابراین پیرو تحقیقات جهانی، این تحقیق بر آن است تا با استفاده از فناوری غیرمخرب ترموگرافی در ابعاد و دماهای متفاوت به برآورد دانسیته چوب گونه‌های بلوط بلند مازو (*Quercus castaneifolia*) و راش (*Fagus orientalis*) در شرایط مختلف آزمون‌ی پیردازد تا با آزمون‌های به‌هنگام محصولات چوبی در شرایط مصرف، از میزان خسارتهای احتمالی موجود در سازه‌ها مطلع شده و پیشگیری‌های لازم را به‌عمل آوریم.

استفاده از روش ترموگرافی به بررسی تابلوی نقاشی هنری تاریخی در سنای فرانسه پرداختند. نتایج تحقیق حاصل از این بود که روش مذکور قابلیت تعیین ریزترک‌های موجود در رنگ تابلوی نقاشی را دارد. Tanaka و Divos در سال ۲۰۰۱ با کاربرد روش ترموگرافی موفق شدند دانسیته چوب را تشخیص دهند. آنان همچنین توانستند حفره‌ها و گره‌های زیرسطحی را توسط این تکنیک در چوب‌آلات مورد استفاده در سازه‌های قدیمی کشف نمایند. Giovanni Meola در سال ۲۰۰۲ به بررسی اثر ترک‌های مصنوعی بر روی سنگ مرمر و آجر پوشش داده‌شده با گچ با روش ترموگرافی مادون قرمز و تکنیک‌های متنوع ترموگرافی پالس، ترموگرافی حرارتی جانبی، ترموگرافی مدولاسیون و ترموگرافی فاز پالس پرداختند. آنان مزایا و معایب هر یک از تکنیک‌ها را مورد مقایسه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که روش ترموگرافی پالس، روشی آسان‌تر و سریع‌تر برای شناسایی نقص‌های موجود در سازه‌های مذکور می‌باشد. Berglind & Dillenz (۲۰۰۳) به بررسی مشکلات چسبندگی در تولید محصولات روکش‌دار دو گونه (*Pinus silvestris*) و (*Intsia bijuga*) پرداختند. آنان موفق شدند با استفاده از روش ترموگرافی پالس علاوه بر شناسایی نواحی چسب نخورده، اندازه و عمق نواحی نقص‌دار را تعیین کنند. Orhan و Schajer در سال ۲۰۰۵ تحقیقاتی بر روی اندازه‌گیری دانسیته با کمک امواج ماکروویو انجام دادند. آنان با تابش اشعه ماکروویو به چوب و اندازه‌گیری تضعیف موج، شیف‌ت یا تغییر فرکانس موج و دپلاریزاسیون<sup>۱</sup> و همبستگی آنها با دانسیته چوب به مطالعه پرداختند و همچنین با توجه به این نکته که نفوذپذیری پایین بسیاری از گونه‌های چوب باعث بروز مشکلاتی در فرایند خشک‌کردن، اشباع و رزینی کردن می‌گردد، با توجه به تأثیرگذاری اشعه میکروویو (MW) بر نفوذپذیری مغزی چوب، از این اشعه در جذب و توزیع مواد نگهدارنده از جمله اسید کرومیت مس (ACC) که باعث بهبود خواص

آن  $V$  فاکتور شکل (SP) اطلاق می‌شود (López *et al.*, 2013) (رابطه ۲).

$$SP = \frac{A_{total}}{V} \quad (2)$$

به‌طور عملی و تئوری نشان داده‌شده است که با بزرگ شدن فاکتور شکل، سرعت انتقال حرارت در این فرایند بیشتر می‌شود (Isachenko *et al.*, 2000) که این مقادیر در این تحقیق در ابعاد  $4 \times 20 \times 30$ ،  $3 \times 20 \times 30$  و  $2 \times 15 \times 20$  سانتی‌متر به ترتیب  $0.7$ ،  $0.9$  و  $1/24$  می‌باشد. همچنین، مطالعه اجسام متفاوت با ابعاد هندسی متنوع نشان داده است که حرارت جسم در طول مدت سرد شدن یا گرم شدن، به‌صورت توانی تغییر می‌کند (López *et al.*, 2013). در این فرایند، سه مرحله قابل تشخیص است.

الف) مرحله وابستگی به توزیع حرارت اولیه که طی آن دما با سرعت بی‌قاعده تغییر می‌کند. اگر در نقطه شروع سرتاسر جسم، دمای یکنواختی داشته باشد، این مرحله نامنظم و بی‌قاعده قابل صرف‌نظر خواهد بود.

ب) مرحله تغییرات منظم حرارت که به‌طور عمده وابسته به ضریب انتقال حرارت سطح و به ابعاد و شکل جسم و خواص فیزیکی آن بستگی دارد. در این مرحله، سرد شدن و گرم شدن طی یک تابع نمایی و منظم تغییر می‌کند که تعبیر لگاریتمی آن به‌صورت یک تابع خطی دارای شیب منظم و یک عدد ثابت به‌عنوان عرض از مبدأ است.

$$\Omega = Ce^{-V.t}$$

$$\ln \Omega = -V.t + D \quad (3)$$

$$D = \ln(C)$$

که در آن  $C$  و  $D$  عرض از مبدأ در تابع به‌ترتیب نمایی و خطی،  $\Omega$  افت حرارت (اضافه حرارت) برحسب کلونین،  $t$  زمان برحسب ثانیه و  $V$  سرعت گرم شدن یا سرد شدن برحسب کلونین بر ثانیه می‌باشد. نظر به اینکه سرعت افت دما خطی نیست، از این‌رو برداشت سرعت صوت از روی تابع لگاریتمی فوق فرایندی مهم و دقیق تلقی می‌شود. ج) سومین مرحله زمانی اتفاق می‌افتد که دمای جسم به

## مواد و روش‌ها

این تحقیق بر روی دو گونه بلوط بلند مازو (*Quercus castaneifolia*) و راش (*Fagus orientalis*) و در سه مرحله ابعادی (فاکتور شکل ( $SP^1$ )) انجام شد. بدین ترتیب که ابتدا از هر دو گونه مورد آزمون تعداد ۵ نمونه بدون هرگونه عیب و ایراد ظاهری با ابعاد اسمی  $4 \times 20 \times 30$  سانتی‌متر (طول، شعاعی، مماسی) تهیه گردید و مرحله اول آزمون‌ها (اندازه‌گیری دانسیته براساس استاندارد ملی ۱۳۹۴-۲)  $20284$  و ارزیابی دانسیته با روش غیر مخرب ترموگرافی) روی آزمون‌ها انجام گردید و پس‌از آن با کاهش ابعاد و تغییر فاکتور شکل به ابعاد  $3 \times 20 \times 30$  و  $2 \times 15 \times 20$  سانتی‌متر در مرحله دوم و سوم، آزمون‌های اندازه‌گیری و ارزیابی دانسیته در هر یک از مراحل ابعادی شکل گرفت.

اندازه‌گیری دانسیته نمونه‌ها مطابق استاندارد شماره ۱۳۹۴-۲)  $20284$

دانسیته نمونه‌های هرگونه در هر مرحله ابعادی از آزمون پیش از آزمون ترموگرافی، ابتدا مطابق با روش استاندارد ملی ۱۳۹۴-۲)  $20284$  مورد اندازه‌گیری و ثبت قرار گرفت (رابطه ۱).

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

که در آن  $m$  جرم قطعه برحسب کیلوگرم،  $L$  و  $h$  و  $b$  به‌ترتیب عرض، ارتفاع و طول قطعه منطبق بر جهت‌های مختصات هندسی قطعه برحسب متر می‌باشد.

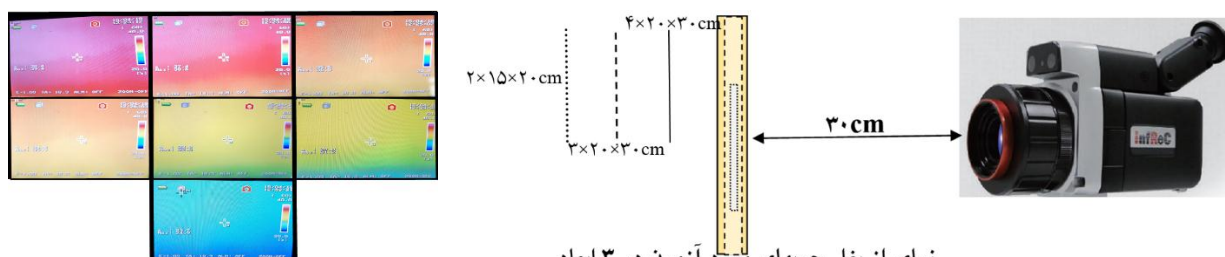
## آزمون ترموگرافی

گرم شدن و سرد شدن یک جسم توسط ایجاد تغییرات در دما، بیانگر فرایند نایکنواخت انتقال حرارت می‌باشد. میزان سرد شدن یا گرم شدن، به ابعاد و شکل هندسی جسم به‌ویژه به نسبت سطح تماس با محیط و حجم آن بستگی دارد. به نسبت مجموع سطوح خارجی جسم  $A_{Total}$  بر حجم

پرواضح است که دمای لحظه صفر همان دمای اتو یعنی ۶۰ درجه سلسیوس بود. با توجه به مشخصات دوربین، فاصله دوربین تا مرکز نمونه، در فاصله ۳۰ سانتی متری بهینه شده و به طور ثابت و یکسان برای تمام اندازه گیری ها تنظیم گردید. برای کاهش خطاهای آزمونی هر نمونه آزمونی دو بار از دو وجه متقابل مورد ترموگرافی قرار گرفت و هر بار دماهای بیشینه و نقطه مرکز سطح تخته برداشت گردید. لازم به ذکر است در این تحقیق رابطه بین افت پلکانی دما از دمای بیشینه با دانسیته و سایر پارامترها مورد بررسی قرار گرفت. تعداد آزمونه‌ها عبارت است از ۲ گونه چوبی ۲× جهت چوب ۵× تکرار ۳ فاکتور شکل متنوع برابر با ۶۰ آزمونه بود که با احتساب اندازه گیری و میانگین گیری در دو وجه متقابل، تعداد آزمون‌ها در کل ۱۲۰ بار آزمون بود.

دمای محیط نزدیک شده و با آن به تعادل می‌رسد. از این مرحله به عنوان مرحله عبور از تغییرات و رسیدن به ثبات یاد می‌شود (López et al., 2013).

برای اجرای عملی این آزمون ابتدا نمونه‌ها (در هر سه مرحله ابعادی) در هر مرحله در اتو با دمای ۶۰ درجه سلسیوس تا ۷۲ ساعت خشک شدند. پس از طی مدت مذکور و خشک شدن کامل نمونه‌ها، به وسیله دوربین ترموگرافی NEC مدل InfRec R300SR (۲۴۰×۳۲۰ پیکسلی) افت دما با پلکان ۰/۱ درجه کلوین (حساسیت حرارتی این دوربین تا ۰/۰۳ درجه کلوین می‌باشد)، طی مدت یک ساعت در دقایق ۰، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ (تحت عنوان پله‌های ثبت دما) و بلافاصله در دمای آزمایشگاه که ۲۱ درجه سانتی‌گراد بود تحت آزمون ترموگرافی قرار گرفتند و نتایج یادداشت گردید (شکل ۱).



نمای از بغل چوبهای مورد آزمون در ۳ ابعاد

شکل ۱- نمای شماتیک از آزمون ترموگرافی در نمونه‌های مورد آزمون و تغییرات رنگی دوربین ترموگرافی در پی از دست رفتن حرارت نمونه‌های آزمونی در پله‌های دمایی مورد آزمون

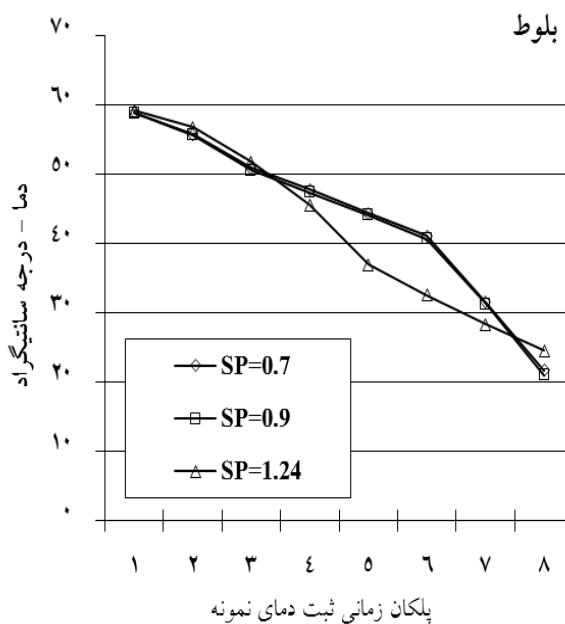
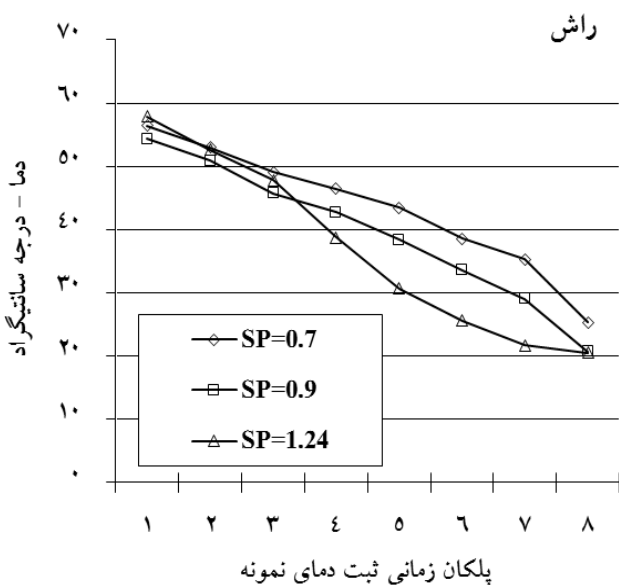
ثبت دما) دمای به دست آمده یادداشت و ثبت گردید. در ادامه میانگین مقادیر عددی کاهش پلکانی دما در گونه‌های مورد تحقیق در ۳ ابعاد مورد آزمون در نمودارهای نقطه به نقطه آورده شده است. شکل ۲ تغییرات افت دما در زمان‌های ۰، ۱، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه (پله ۸) را در گونه بلوط و راش به نمایش در آورده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد تغییرات ابعاد و یا همان فاکتور شکل بلوط (تصویر راست) در دو ابعاد ۴×۲۰×۳۰ و ۳×۲۰×۳۰ سانتی متر تفاوت چندانی بر روی روند افت دمای این گونه نداشته است. تغییرات شکل در

## نتایج

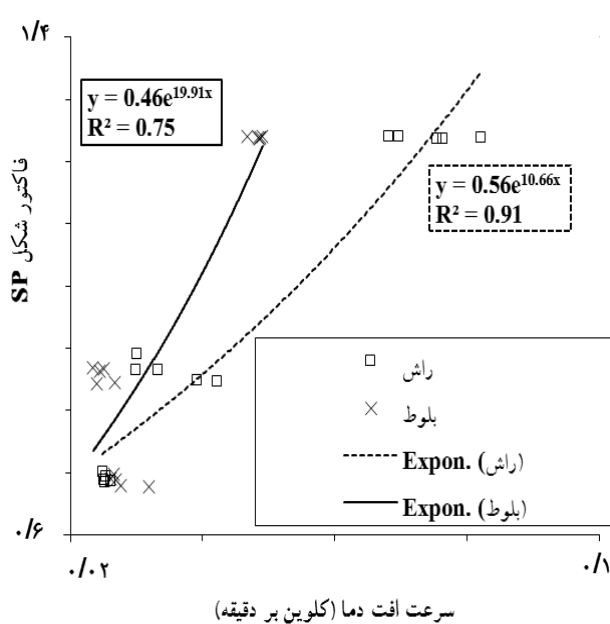
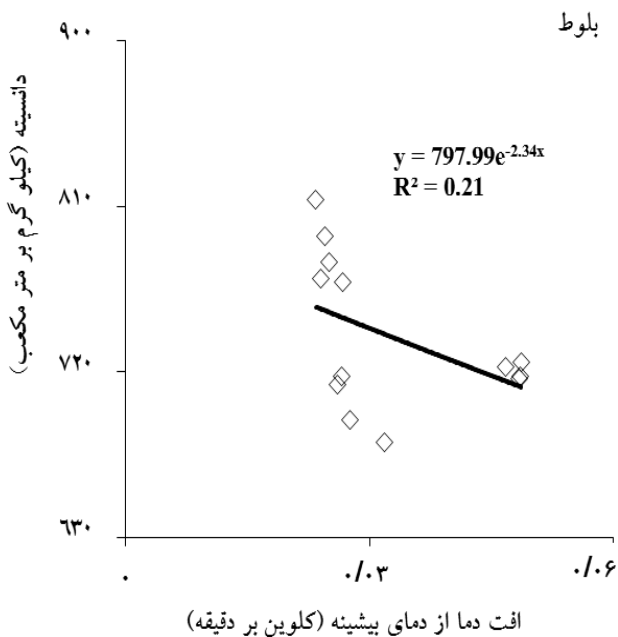
در شکل ۱ تصاویر برداشت شده توسط دوربین ترموگرافی تغییرات رنگ نمونه به ترتیب خنک شدن را نشان داده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد نمونه‌های آزمونی در گرم‌ترین حالت رنگ سرخ را از خود به نمایش گذاشته‌اند و پس از آن و طی زمان، با از دست دادن دما در نمونه‌ها به تدریج رنگ تصاویر کم‌رنگ و کم‌رنگ‌تر شده است تا در نهایت در شرایط آزمایشگاهی در دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد به رنگ آبی درآمده‌اند. لازم به ذکر است در دقایق ۱، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ (تحت عنوان پله‌های

روزنه‌ای بودن این گونه، میزان تخلخل، آرایش آوندها، طول الیاف و غیره این گونه در سطح تماس با محیط) در انتقال حرارت نیز نسبت داد (Basterra et al., 2009; Enayati, 2010; López et al., 2013).

ابعاد  $20 \times 15 \times 2$  سانتی‌متر تا دقایق ۱، ۵، ۱۰، ۴۵ و ۶۰ نیز نسبت به دو شکل دیگر اثر چندانی بر روی میزان افت دما نداشته است، اما در دقایق ۲۰ و ۳۰ میزان افت دما کاهش محسوسی نسبت به دو ابعاد دیگر داشته است. این موضوع را می‌توان به نقش خواص آناتومیکی این چوب (از قبیل بخش



شکل ۲- ثبت پلکانی افت دما (۸ پله) در زمان‌های مورد ثبت و در ۳ ابعاد مورد اندازه‌گیری

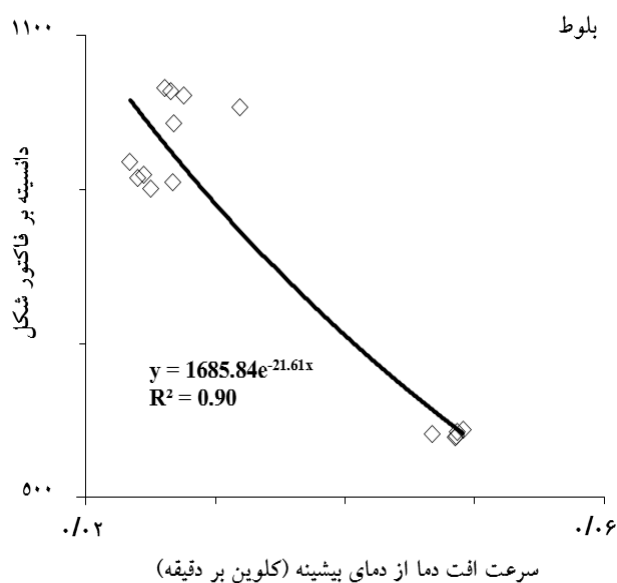


شکل ۴- رابطه مستقل بین دانسیته با سرعت افت دما در گونه بلوط

شکل ۳- رابطه مستقل بین فاکتور شکل با سرعت افت دما

نقش خواص آناتومیکی این چوب را در سطح تماس با هوا در انتقال حرارت تقویت می نماید (Basterra et al., 2009; Enayati, 2010; Weston et al., 2012; López et al., 2013).

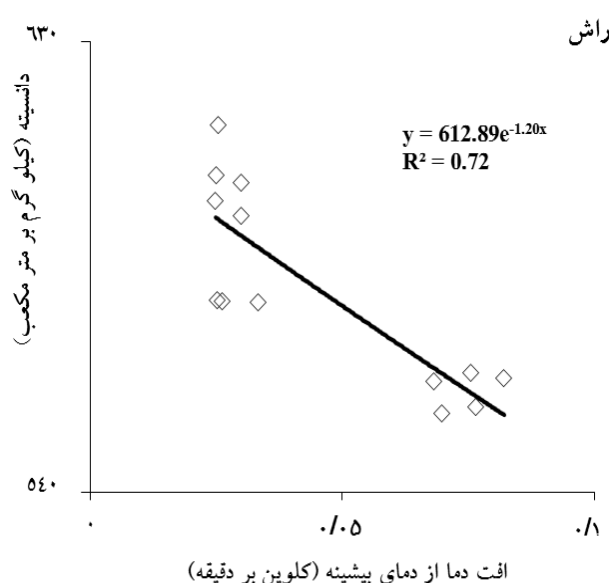
در شکل ۳ رابطه بین فاکتور شکل و سرعت افت دما در گونه بلوط و راش مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که در این شکل ملاحظه می گردد همبستگی بسیار مطلوبی بین فاکتور شکل و افت دما از دمای بیشینه ملاحظه می گردد؛ بنابراین مؤثر بودن فاکتور مذکور در هر دو گونه بلوط و راش با صراحت تأیید می گردد (Kandemir et al., 2007; López et al., 2013).



شکل ۶- رابطه بین نسبت دانسیته به فاکتور شکل با سرعت افت دما در گونه بلوط

شکل و نوع گونه (به لحاظ انتقال حرارتی متفاوت بین گونه‌های مختلف) مهم تلقی می شود (Lundgren et al., 2006; Wyckhuyse et al., 2011; López et al., 2013). در شکل‌های ۶ و ۷ رابطه بین نسبت دانسیته فاکتور شکل با مقادیر افت دما از دمای بیشینه به صورت تابع‌نمایی در گونه‌های بلوط و راش به صورت جداگانه به صورت کلی

در نمودار تغییرات افت دما در زمان‌های ۱، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه مربوط به گونه راش (تصویر چپ) ملاحظه می‌گردد که تغییرات ابعاد و یا همان فاکتور شکل در دو ابعاد  $3 \times 20 \times 30$  و  $4 \times 20 \times 30$  سانتی‌متر هرچند تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند اما مانند گونه بلوط منطبق بر یکدیگر نمی‌باشند و فاکتور شکل در این تغییر جزئی ابعاد نیز از خود حساسیت به نمایش گذاشته است. تغییرات شکل در ابعاد  $2 \times 15 \times 20$  سانتی‌متر در دقایق ۱، ۵ و ۶۰ افت دمایی منطبق با ابعاد  $3 \times 20 \times 30$  سانتی‌متر داشته است ولی در سایر دقایق افت دما در این ابعاد با کاهش محسوس‌تری نسبت به دو ابعاد دیگر همراه بوده است. این موضوع نیز

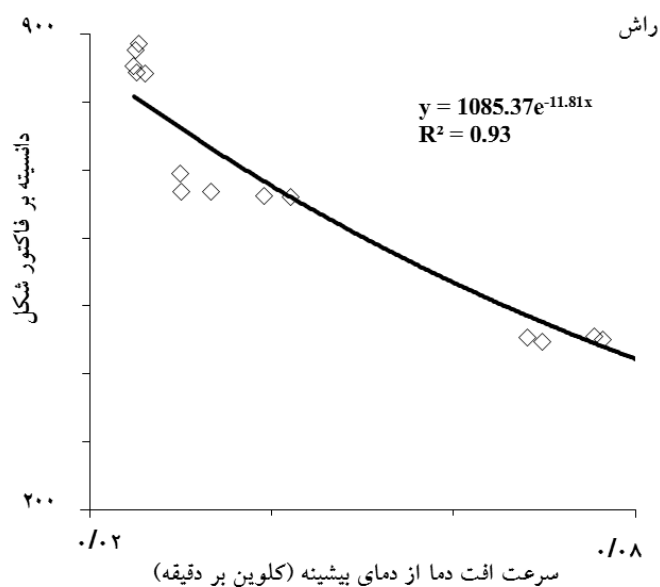


شکل ۵- رابطه مستقل بین دانسیته با سرعت افت دما در گونه راش

در شکل‌های ۴ و ۵ رابطه بین دانسیته و سرعت افت دما به صورت تابع‌نمایی در گونه‌های بلوط و راش مشاهده می‌گردد. فاکتور شکل‌های مختلف همبستگی مناسبی را بین دانسیته و افت دما در این گونه راش برقرار نموده است ولی در گونه بلوط همبستگی مناسبی بین دانسیته و افت دما در این گونه برقرار نمی‌باشد؛ بنابراین تأثیر دانسیته و فاکتور

یا حتی ارزیابی دانسیته با این روش در گونه‌های بلوط و راش در تمامی ابعاد مناسب خواهد بود (Dumoulin *et al.*, 2011; Keo *et al.*, 2013; López *et al.*, 2013)

و در تمامی ابعاد مشاهده می‌گردد. مقایسه جزئی و کلی این فاکتور حکایت از آن دارد که همبستگی بسیار مطلوبی بین مقادیر مورد بررسی و مقایسه شده برقرار می‌باشد؛ بنابراین نتایج این مقایسه و بررسی حکایت از آن دارد که تخمین و



شکل ۷- رابطه بین نسبت دانسیته به فاکتور شکل با سرعت افت دما در گونه راش

## بحث

شکل در گونه راش با تغییرات دمایی نامنظم‌تری نسبت به گونه بلوط در پله‌های زمانی مورد آزمون برخوردار بود که این مورد می‌تواند به پراکنده آوند بودن این گونه و خواص حرارتی متغیر این گونه نسبت به گونه بخش روزنه‌ای بلوط مرتبط باشد (Basterra *et al.*, 2009; Enayati, 2010; Weston *et al.*, 2012; López *et al.*, 2013). در هر سه فاکتور شکل‌های ۰/۷، ۰/۹ و ۱/۲۴ تغییرات دمایی در گونه بلوط بسیار منظم‌تر و با همپوشانی بیشتری نسبت به گونه راش بود ولی با این حال در فاکتور شکل ۱/۲۴ تغییرات دمایی در گونه بلوط نیز همانند گونه راش با تغییراتی هرچند جزئی همراه گردید که این موضوع از یکسو اهمیت نوع گونه و از سوی دیگر اهمیت تغییرات ابعادی را در ارزیابی دانسیته با روش ترموگرافی را روشن می‌کند که شکل‌های ۸ و ۷ نیز

این مطالعه باهدف ارزیابی دانسیته در دو گونه بلوط بلند مازو (*Quercus castaneifolia*) و راش (*Fagus orientalis*) و در سه مرحله ابعادی با ابعاد اسمی ۳۰×۲۰×۴، ۲۰×۲۰×۳ و ۲۰×۱۵×۲ سانتی‌متر (فاکتور شکل) و در پله‌های زمانی ۱، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه با روش غیر مخرب ترموگرافی انجام شد. شرایط حرارتی اولیه نمونه‌ها از دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و در دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد آزمایشگاه بود. در گونه بلوط به دلیل دانسیته بیشتر نسبت به گونه راش میزان خنک شدن نمونه‌ها کندتر بود که نتیجه حاصل در تحقیقات پیشین نیز آن را تأیید می‌کند (Basterra *et al.*, 2009; Dumoulin *et al.*, 2011; Keo *et al.*, 2013; López *et al.*, 2013).



این تحقیق فراتر از یک پایان‌نامه کارشناسی ارشد بر روی گونه‌های دیگر نیز آزموده شود و همچنین نتایج با مقایسه فاکتورهای حاصل با افت دما از دمای متوسط نیز انجام شود.

#### سپاسگزاری

این مقاله حاصل پایان‌نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان "بازبینی دانسیته گونه‌های مختلف ایرانی از طریق آزمون غیرمخرب ترموگرافی" می‌باشد. بدین وسیله از کارکنان دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج که امکان انجام این تحقیق را میسر نمودند تشکر و قدردانی می‌گردد.

#### منابع مورد استفاده

- Ayarkwa, J., Hirashima, Y. and Sasak, Y., 2000. Predicting Modulus of Rupture of Solid and Finger-Jointed Tropical African Hardwoods Using Longitudinal Vibration. *Forest Products Journal*. Vol. 51(1): 85-92.
- Basterra, LA., Acuña, L., Casado, M., Ramón-Cueto, G. and López, G., 2009. Diagnosis and assessment of timber structures using nondestructive techniques: application to the Plaza Mayor in Chinchón (Madrid). *Inform Construcción*. 61(516):21-36.
- Berglund, H. and Dillenz, A., 2003. Detection of glue deficiency in laminated wood with pulse thermography. *Journal of Wood Science*. 49(3), 216-220.
- Bodig, J. and Jayne, B.A., 1989. *Mechanics of wood and wood composites*. Krieger Publishing Co, Malabar Florida. 712 pp.
- Bodnar, JL., Mouhoubi, G. and Szatanik-Perrier, JM., 2012. Photothermal Thermography Applied to the Non-destructive Testing of Different Types of Works of Art. *International Journal of Thermophysics*. 33(1)1996-2000.
- Diener, L., 1995. Microwave Near-Field Imaging with Open-Ended Waveguide-Comparison with Other Techniques of Nondestructive Testing. *Research in Nondestructive Evaluation*. 7:137-152.
- Dumoulin, J., Ibos, L., Marchetti, M. and Mazioud, A., 2011. Detection of non emergent defects in asphalt pavement samples by long pulse and pulse phase infrared thermography. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 3(1), 557-574.

این موضوع را در هر دو گونه به صورت مجزا و همچنین کلی در هر یک از گونه‌ها به صورت تابع نمایی به نمایش درآورده است؛ نتایج این دو شکل نیز حکایت از همبستگی بالای بین فاکتور شکل و افت دما از دمای بیشینه در فاکتور شکل‌های ۰/۷، ۰/۹ و همبستگی قابل قبول در فاکتور شکل ۱/۲۴ در هر دو گونه دارد که این موضوع زمینه ارزیابی دقیق دانسیته را میسر می‌نماید.

رابطه بین مستقل دانسیته و سرعت افت دما در مجموع برای گونه‌های بلوط و راش فارغ از همبستگی‌های موجود کافی به نظر نمی‌رسد و تلفیق آن با فاکتور شکل، نتایج دقیق‌تری را در پی داشت. هر چند تحقیقات بسیار اندکی بر روی پارامترهای مورد بررسی انجام شده است اما نتیجه حاصل با توجه به تحقیقات Lopez و همکاران در سال ۲۰۱۳ که برای هرگونه و هر ابعاد نتایج مجزا و متفاوتی (ولی با همبستگی مطلوب) را محاسبه نموده بود قابل توجه می‌باشد و مبین این موضوع می‌باشد که هرگونه در هر فاکتور شکل نیاز به محاسبه جداگانه ضریب اصلاحی منحصر به خود را برای ارزیابی دقیق دانسیته دارد.

بنابراین با توجه به نتیجه‌های این تحقیق، می‌توان گفت بهترین راه ارزیابی دقیق دانسیته به روش ترموگرافی بررسی رابطه بین نسبت دانسیته بر فاکتور شکل با سرعت افت دما در دو گونه مورد آزمون می‌باشد. یادآوری می‌شود که سرعت افت دما باید در مقیاس لگاریتمی یا نمایی توصیف شده مورد توجه قرار گیرد. همان‌طور که ملاحظه شد در نمای کلی، در همه حالات آزمونی در این دو گونه در فاکتورهای حاصل همبستگی قابل قبولی برقرار می‌باشد که این موضوع می‌تواند بهترین گزینه برای بررسی غیرمخرب دانسیته در سازه‌های در شرایط مصرف (به صورت برخط) و سازه‌هایی که خروج قطعه از آن امکان‌پذیر نمی‌باشد، به روش ترموگرافی باشد. با این حال با توجه به اینکه هرگونه و هر ابعاد نتایج مختلف و در پی آن نیاز به محاسبه ضریب اصلاحی متفاوت با توجه به تابع نمایی مربوط به خود را دارد و از سوی دیگر کمبود تحقیقات در مورد تخمین و ارزیابی دانسیته با روش ترموگرافی، پیشنهاد می‌گردد نتایج

- II: Evaluation of models generated on a pixel level. *J Wood Sci.* 52:39–43.
- Obataya, E. and 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.
- Reynolds, WN. and Wells, GM., 1984. Video-compatible thermography. *Br J. Non-Destruct Test.* 26(1):40–4.
- Rinn, F., Schweingruber, FH. and Schar, E., 1996. Resistograph and X-Ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. *Holzforschung*, 50: 303-311.
- Ross, RJ. and Pellerin, R.F., 1994. Nondestructive Testing Assessing Wood Members in Structures. *USDA Society Review.*
- Schajer, G. and Orhan, F., 2005. Microwave non-destructive testing of wood and similar orthotropic materials. *Sensing and Imaging: An International Journal* 6(4):293-313.
- Tanaka, T. and Divós, F., 2001. Wood inspection by thermography. 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, March 2001, 6: (3): 1-6.
- Weston, TL., Brooks, WBL. and Zhong, WH., 2012. Effect of reinforcement on wear debris of carbon nanofiber/high density polyethylene composites: Morphological study and quantitative analysis. *Wear.* 294: 326-335.
- Wu, AS., Sembach, J., Xavier, P.T. and Rantala, T., 1997. Lock-in thermographic inspection of wood particle boards-Datong. *An International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications.* Orlando, FL, United States. doi: 10.1117/12.271647
- Wyckhuysse, A. and Maldague, X., 2011. A study of wood inspection by infrared thermography, Part I: Wood pole inspection by infrared thermography. *Res Nondestr Eval.* 13(1):1–12.
- Enayati, A.A., 2010. *Wood Physics.* University of Tehran. Tehran. Iran. 314pp.
- Farra, SC., Ibarra, Castanedo, L., Ambrosini, D., Paoletti, Bendada, A., Maldague, X., 2011. Integrated Approach between Pulsed Thermography, Near-Infrared Reflectography and Sandwich Holography for Wooden Panel Paintings Advanced Monitoring, *RUSSIAN JOURNAL OF NONDESTRUCTIVE TESTING.* 47, 4, 80–92.
- Giovanni, M.C. and Meola, C., 2002. Comparison between thermographic techniques for frescoes NDT. *NDT & E International.* 35(8): 559-565.
- ISIRI20284 (2), 2015. Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests, 1st edition. Iranian National Standardization Organization.
- ISO 13061(2), 2014. Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. International Standardization Organization.
- Jo, YH. and Lee, CH., 2014. Quantitative modeling and mapping of blistering zone of the Magoksa Temple stone pagoda (13th century, Republic of Korea) by graduated heating thermography. *Infrared Physics & Technology,* 65: 43-50.
- Keo, A.A., Brachelet, F., Breaban, F. and Defer, D., 2013. Development of an Infrared Thermography Method with CO2 Laser Excitation, Applied to Defect Detection in CFRP. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering,* 7(8): 580-584.
- Kandemir-Yucel, A., Tavukcuoglu, A. and Caner-Saltik, EN., 2007. In situ assessment of structural timber elements of a historic building by infrared thermography and ultrasonic velocity. *Infrared Phys Technol.* 49:243–8.
- Lopez, G., Basterra, LA. and Acu, L., 2013. Estimation of wood density using infrared thermography, *Construction and Building Materials,* 42(2): 29-32.
- Lundgren, N., Hagman, O. and Johansson, J., 2006. Predicting moisture content and density distribution of Scots pine by microwave scanning of sawn timber

## Thermography as a non-Destructive method in the evaluation of Oak and Beech wood density

P. Majdabadi Farahani<sup>1</sup>, M. Roohnia<sup>2\*</sup> and A. Lashgari<sup>3</sup>

1- M.Sc., Wood and Paper Science and Technology, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

2\*- Corresponding author, Professor., Wood and Paper Science and Technology, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran,  
Email: mehran.roohnia@kiaou.ac.ir

3- Associate Professor, Wood and Paper Science and Technology, Karaj Branch, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

Received: Dec., 2018

Accepted: Feb., 2019

### Abstract

This study deals with the possibility of evaluation and estimation of the wood density of Oak (*Quercus castaneifolia*) and Beech (*Fagus orientalis*) wood. First, wood samples were prepared and cut in 4×20×30 cm (thickness×width×length). Then their density was calculated after 72 hours conditioning in an oven at 60°C temperature. In thermography process, the temporal temperature was monitored in 1<sup>st</sup>, 5<sup>th</sup>, 10, 20, 30, 45 and 60<sup>th</sup> minutes of cooling (monitoring steps). For investigating the effects of shape factor and dimension on thermographic density evaluation errors, the specimens were cut down two more steps to 3×20×30 cm and 2×15×20 cm and the course of thermography experiments was repeated. The relationships of shape factor, density and the ratio of density to the shape factor with the logarithmic cooling rate were evaluated separately. Results showed that density without considering the shape factor variations was not sufficiently correlated to the cooling rate. However, the ratios of the density to their proper shape factors were promising for the density evaluations from the cooling rates. Finally, it is suggested to revise this non-destructive method using a larger variety of the wood specimens and species.

**Keywords:** Non-destructive testing, thermography, temperature dropping, shape factor, density, maximum temperature.