

## بررسی فرآیند انتقال حرارت دو بعدی در چوب راش (*Fagus orientalis*) و صنوبر (*Populus deltoides*) با استفاده از مدل سازی ریاضی

امبرهومن حمصی<sup>۱</sup>، مهدی ملکانی<sup>۱\*</sup> و تقی طبرسا<sup>۲</sup>

۱) دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه صنایع چوب و کاغذ، تهران، ایران. \* رایانامه نویسنده مسئول: mehdi\_malakani@yahoo.com

۲) گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

تاریخ پذیرش: ۹۱/۲/۱۵

تاریخ دریافت: ۹۰/۰۵/۳۰

### چکیده

این پژوهش به منظور مدل سازی دوبعدی ریاضی انتقال حرارت در عمق ها و دانسیته های مختلف چوب در حین حرارت دهی با استفاده از معادلات دیفرانسیل پاره ای و مقایسه آن با اندازه گیری آزمایشگاهی طراحی گردیده است. برای ارزیابی اثر دانسیته چوب بر انتقال حرارت از گونه های راش (*Fagus orientalis*) و صنوبر (*Populus deltoides*) با دانسیته ۰/۶۷ و ۰/۴۳ گرم بر سانتی متر و رطوبت ۱۲ درصد استفاده شده است. گره هایی به عمق ۵ میلی متر در فواصل معین تخته ها برای اندازه گیری دما با ترموکوپل ایجاد شد. نتایج نشان داد که مطابقت خوبی بین نمودارهای حاصل از پیش بینی های مدل ریاضی و نمودارهای حاصل از اندازه گیری مستقیم درجه حرارت در گره های مختلف شبکه وجود دارد. تلفات حرارتی لبه های قطعه چوبی تحت تاثیر شرایط محیطی نیز توسط مدل شناسایی گردید. اگر چه هنوز برای افزایش مدل اصلاحاتی در آن ایجاد گردد، مدل طراحی شده در این مرحله از توانایی خوبی برای پیشگویی درجه حرارت در عمق های مختلف چوب برخوردار خواهد بود. با افزایش دقت مدل در کاربردهایی مثل چوب خشک کنی و تیمارهای حرارتی اصلاحی چوب می توان از مدل اصلاح شده استفاده نمود.

واژه های کلیدی: مدل ریاضی، معادلات دیفرانسیل، انتقال حرارت، چوب راش، چوب صنوبر.

### مقدمه

بررسی عوامل اثرگذار بر انتقال حرارت همانند رطوبت و دانسیته چوب طی خشک شدن آن از اهمیت به سزایی در مدل سازی روند انتقال حرارت در چوب برخوردار است (امام، ۱۳۷۶) به طوری که شناخت ساز و کارهای انتقال حرارت در چوب علاوه بر صرفه جویی در مصرف انرژی به سهولت دفع رطوبت از چوب نیز کمک می نماید (Bazant, 1985). همچنین با توجه به ارتباط تنگاتنگ بین فاکتورهایی

انتقال حرارت در چوب مشخص کننده قدرت رسانایی و انتقال انرژی حرارتی این جسم می باشد که در عین حال درجه عایق بودن و مقاومت آن را در برابر حرارت بیان می کند. این خاصیت فیزیکی چوب وابستگی شدیدی به ساختمان، رطوبت، مواد استخراجی و وزن مخصوص گونه چوبی دارد به طوری که هدایت حرارتی آن با کاهش میزان دانسیته و رطوبت چوب کاهش می یابد (ابراهیمی، ۱۳۷۵).

خردچوب یا تخته فیبر از فضایی عبور می‌نماید که ممکن است هوا، آب یا بخار باشد. این تغییر فازها سناریوی جدیدی در انتقال حرارت ایجاد می‌کند.

همچنین در تیمارهای اصلاحی حرارتی چوب دانستن روابط انتقال حرارت چوب مورد نظر و فاکتورهای اثرگذار بر آن از جمله دانسیته چوب منجر به بهبود کیفیت روند اصلاح چوب با کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌گردد (امام، ۱۳۷۶). اطلاعات دقیق از نحوه انتقال حرارت در خشک کردن چوب راهنمای بسیار خوبی در تنظیم حرارت خشک‌کن و زمان خشک شدن چوب خواهد بود. در زمان کوتاه‌تر به معنی صرف هزینه و انرژی کمتر همراه با کمترین خسارت به چوب مورد نظر خواهد بود.

مدل‌سازی یکی از علوم توسعه یافته در دنیای امروزی است که ابزاری پیشرفته برای تحلیل و درک دنیای پیرامون و روشی سریع و کم‌هزینه برای درک اثر سیستم‌های مختلف می‌باشد (Gu & Hunt, 2004). هدف از این تحقیق بررسی و مطالعه فرآیند انتقال حرارت دوبعدی در دو گونه چوب راش و صنوبر با دانسیته‌های ۰/۶۷ و ۰/۴۳ گرم بر سانتی مترکعب به کمک مدل‌سازی ریاضی ساختمان چوب در یک شبکه ماتریسی و مقایسه این نتایج با اندازه‌گیری مستقیم درجه حرارت در گره‌های مختلف شبکه می‌باشد. در تحقیقات گذشته اغلب فرآیند انتقال حرارت فقط در ضخامت چوب و به صورت تجربی اندازه‌گیری شده است، ولی در تحقیق حاضر علاوه بر ضخامت، اندازه‌گیری انتقال حرارت در پهنای تخته به صورت مستقیم و پیش‌بینی آن با استفاده از مدل ریاضی بررسی شد. همچنین الگوی انتقال حرارت در گونه راش با دانسیته نیمه‌سنگین و گونه صنوبر با دانسیته سبک به طور همزمان مطالعه شد تا دقیق‌تر به تفاوت‌های موجود در روند انتقال حرارت گونه‌هایی با دانسیته متفاوت پی برده شود.

مانند رطوبت، حرارت و دانسیته در چوب می‌توان فرآیند انتقال حرارت را در چوب پیش‌بینی کرد (Gu & Hunt, 2004).

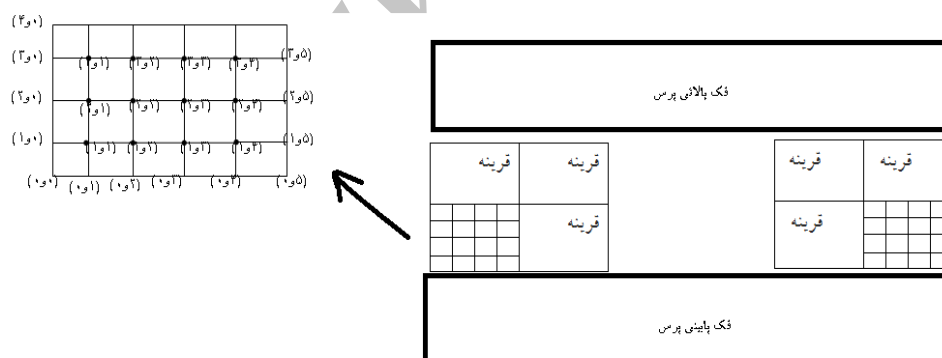
با توجه به اینکه چوب از فازهای مایع، گاز (هوا) و جامد تشکیل شده، فرآیند انتقال حرارت در آن پیچیده است. به عبارت دیگر در چوب مرطوب طی فرآیند خشک شدن ترکیبی از دو فرآیند انتقال حرارت به روش جابجایی و هدایت رخ می‌دهد (طارمیان و سپهر، ۱۳۸۹). شناخت جامع پروسه انتقال حرارت در چوب و فراورده‌های چوبی با توجه به ساختمان ناهمگن آن دارای اهمیت فراوانی است که در کاربردهایی نظیر افزایش سرعت خشک نمودن و رسیدن به رطوبت یکنواخت، پیش‌بینی زمان مناسب جهت نرم شدن بافت چوب و پخت گرده‌بینه در فرآیند روکش‌گیری و نیز تولید اوراق فشرده چوبی با استفاده از پرس گرم کاربرد دارد (Kehr & Scholzel, 1996). عدم حرارت کافی در روند تولید اوراق فشرده چوبی با کمک رزین‌های گرماسخت منجر به عدم اتصال مناسب شده و تخته‌های حاصل جزء تخته‌های ضایعاتی قرار می‌گیرند. بدین ترتیب هزینه‌های تولید افزایش یافته و مواد اولیه چوبی با بهره‌وری پایین از دسترس خارج می‌گردند.

نوربخش و کارگرفر (۱۳۸۵) در تحقیقات خود نشان دادند که با افزایش دانسیته تخته خرده‌چوب فشردگی و تماس بین خرده‌چوب‌ها بیشتر شده و اتصالات قوی‌تری ایجاد می‌گردد. بنابراین بدون نیاز به مصرف چسب بیشتر عملکرد بهتری در تخته خرده‌چوب تولیدی ایجاد خواهد شد. لازم به یادآوری است که مسئله انتقال حرارت در چوب ماسیو و فراورده‌های مرکب چندسازه یا اوراق فشرده چوبی متفاوت می‌باشد زیرا حرارت در چوب ماسیو از سطح چوب مستقیماً وارد چوب می‌گردد اما حرارت در ساخت اوراق فشرده چوبی نظیر تخته لایه، تخته

## مواد و روش‌ها

روی نی‌مرخ عمود بر صفحات پرس و عمود بر الیاف به فاصله‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر از منبع حرارت (صفحه گرم پرس) در فاصله زمانی حرارت‌دهی ۳۰ دقیقه انجام شد. چهار نیم‌رخ از مغز قطعه چوب در فاصله‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر از سطح صفحه پرس به منظور لحاظ کردن اثر حرارت محیط در هر قطعه چوبی تعیین گردید. در این آزمایش از روش انتقال حرارت یک طرفه استفاده شد. بدین منظور صفحه پرس پائینی با گرمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد منبع گرما در نظر گرفته شد و صفحه بالایی پرس در حالت دمای محیط تنظیم گردید. جریان انتقال حرارت با ایجاد شیب حرارت در فاصله دو صفحه از صفحه گرم پائینی پرس به سمت صفحه سرد بالایی صورت گرفت. نیم‌رخ‌ها از مغز تخته در راستای قائم به طرف لبه‌ها انتخاب شدند تا اثر احتمالی حرارت محیط نیز منظور گردد.

بلوک‌هایی از گونه راش ایرانی (*Fagus Orientalis*) با دانسیته نیمه‌سنگین و صنوبر (*Populus deltoides*) با دانسیته سبک با ابعاد پهنای ۴۰ میلی‌متر، ضخامت ۴۰ میلی‌متر و طول ۴۰۰ میلی‌متر برای این مطالعه انتخاب شدند. درختان راش مورد نظر از طرح جنگل‌داری وطن‌بندرز و از سری دو دانه‌زاد عقرب چشمه آن تهیه و درختان صنوبر از جنگل‌های شصت کلاته گرگان قطع گردیدند. با توجه به تفاوت چوب برون و چوب درون همه نمونه‌های مذکور از ناحیه چوب برون تهیه شدند و پس از برش نمونه‌ها جرم ویژه آنها اندازه‌گیری شد. مقطع نمونه به شبکه از مربعات کوچک به ابعاد ۵×۵ میلی‌متر تبدیل گردید. اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی با توجه به قرینه بودن مربعات در چهار گوشه فقط در یک گوشه انجام گرفت (شکل ۱). مدل‌ها و آزمایش‌ها به منظور لحاظ کردن زمان حرارت‌دهی و فاصله از منبع حرارتی در چهار نقطه



**شکل ۱.** سطح مقطع نمونه و ایجادگره‌هایی به فاصله ۵ میلی‌متر در یک چهارم از ضخامت نمونه‌های چوبی راش و صنوبر (اعداد روی شکل نشان‌دهنده سطر و ستون شبکه ماتریسی می‌باشند که توسط آن روند انتقال حرارت به صورت تجربی و مدل ریاضی مورد بررسی قرار گرفت).

محل گره‌ها برای اندازه‌گیری مستقیم درجه حرارت در بلوک‌های چوبی با مته تا عمق ۵ میلی‌متر سوراخ گردید تا سوزن ترموکوپل در آن جای گیرد. اندازه‌گیری‌ها با توجه به محدودیت خروجی‌های

ترموکوپل برای هر گروه روی بلوک جداگانه صورت گرفت. بلوک‌های چوبی برای اندازه‌گیری انتقال حرارت در پرس آزمایشگاه قرار گرفته و حرارت با بسته شدن دهانه پرس در نقطه صفر اندازه‌گیری شد.

$$f''(x) \approx \frac{1}{h^2} [f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)] \quad \text{رابطه (۳)}$$

با بکار بردن فرمول ۳ برای توابع دو متغیره U (X,Y) برای صفحه ۵ نقطه‌ای (شکل ۲) به رابطه ۴ می‌رسیم:

$$\nabla^2 u \approx \frac{1}{h^2} [u(x+h,y) + u(x-h,y) + u(x,y+h) + u(x,y-h) - 4u(x,y)] \quad \text{رابطه (۴)}$$

خطای محلی که بر اثر این فرمول در هر نقطه به جا می‌ماند در روابط ۵ و ۶ نشان داده شده است:

$$-\frac{h^2}{12} \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^4}(\xi) + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}(x, \eta) \right] \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{i,n} = \alpha \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن برابر ضریب پخش حرارت، = برابر ضریب هدایت حرارتی چوب،  $\alpha = \frac{k}{c.d}$ ، C برابر گرمای ویژه چوب با فرمول  $c = \frac{0.324+u}{1+u}$ ، d برابر دانسیته چوب با فرمول  $k = 0.168d + 0.022$  و u برابر درصد رطوبت چوب بود. شکل مربعی مورد تحقیق در رابطه ۶ به صورت شکل ۳ شبکه‌بندی می‌شود. به این ترتیب رابطه ۶ با فرض تعریف  $\Delta T$  به عنوان زمان حرارت‌دهی بر تعداد تقسیمات شبکه و  $\Delta X$  به عنوان ضخامت به سانتی‌متر برای گره (i,j) به رابطه ۷ تبدیل گردید (شکل ۳). در این معادلات j, i به ترتیب سطر و ستون‌های شبکه ماتریسی می‌باشند.

$$\frac{T_{i-1,j} - T_{i,j}}{\Delta t} = \alpha \frac{T_{i,j-1} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1}}{\Delta x^2} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$T_{i-1,j} - T_{i,j} = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{i,j-1} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1})$$

$$T_{i-1,j} - T_{i,j} = \lambda (T_{i,j-1} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1})$$

رابطه فوق با فرض  $\lambda = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2}$  به رابطه ۸ تغییر یافته و سپس معادلات فوق را به یک ماتریس ۱۶ × ۱۶ تبدیل شد (شکل ۳).

$$\lambda T_{i,j+1} + (1-2\lambda)T_{i,j} + \lambda T_{i,j-1} = T_{i-1,j} \quad \text{رابطه (۸)}$$

دمای چوب بعد از ۳۰ دقیقه حرارت‌دهی در نقاط مختلف شبکه ماتریسی در دو بعد پهنا و ضخامت اندازه‌گیری شده و برای هر آزمایش ۵ تخته (۵ تکرار) استفاده گردید. اطلاعات جمع‌آوری شده به صورت نمودار ترسیم گردید و تایید نهایی مدل به وسیله مقایسه پروفیل‌های دمای پیش‌بینی شده توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت.

بسیاری از پدیده‌های فیزیکی به وسیله معادلات دیفرانسیل پاره‌ای مدل‌سازی می‌گردند. توسعه مدل ریاضی برای توصیف الگوی انتقال حرارت در یک ماده جامد می‌تواند با استفاده از معادلات دیفرانسیل مدل‌سازی گردد. مراحل اصلی مدل‌سازی در این روش عبارتند از مش‌بندی و تقسیم سیستم مورد نظر (جسم مورد نظر) به گره‌های متعدد که این کار با تقسیم جسم مورد نظر به چند ناحیه کوچک‌تر و تعیین یک نقطه به عنوان مبنای اندازه‌گیری پارامتر مورد بررسی در هر ناحیه صورت می‌گیرد. نقطه مرجع را معمولاً گره و مجموعه نقاط را شبکه گره می‌نامند. یکی از معادلات دیفرانسیل مهم که پدیده فیزیکی هدایت حرارتی توسط آن مدل‌سازی می‌شود معادله بیضیگون لاپلاس (رابطه ۱) و پواسون (رابطه ۲) هستند که شباهت بسیاری به یکدیگر دارند:

$$\nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = g(x,y,z) \quad \text{رابطه (۲)}$$

روش‌های تفاضلی یا اختلاف محدود از جمله روش‌های حل عددی رابطه‌های یاد شده می‌باشند که مشتقات جزئی در این روش بر حسب اختلاف مقادیر نقاط شبکه تقریب‌زده می‌شوند. به عنوان مثال مشتق دوم یک تابع با استفاده از فرمول زیر تخمین زده می‌شود (رابطه ۳):

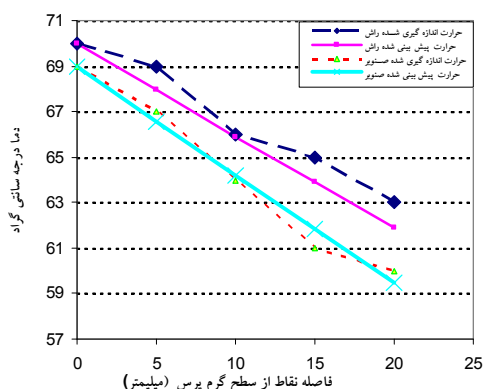


نمودارها مشابه اما فاصله درجه حرارت پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده در گره‌های دورتر از صفحه پرس بیشتر از نمودار قبلی است که می‌تواند نشانه‌ای از اثر حرارت محیط از لبه‌ها باشد.

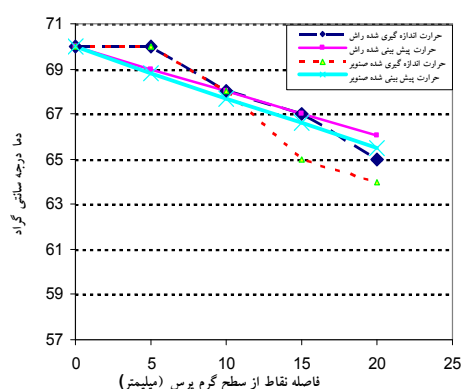
اثر لبه‌ها در شکل ۵ به خوبی نشان داده شده است به طوری که فاصله نقاط مرزی از هم بیشتر گردیده و در نیم‌رخ قائم به فاصله ۲۰ میلی‌متر از مغز قطعات چوبی و سطح داغ پرس دمای اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل در دو گونه راش و صنوبر به ترتیب برابر با ۶۲ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد و ۶۰/۷ و ۵۷/۴۱ درجه سانتی‌گراد بود (شکل ۵).

نمودارهای مربوط به پیش‌بینی مدل ریاضی و درجه حرارت‌های اندازه‌گیری شده در جهت پهنای (نیم‌رخ افقی) بلوک‌های چوبی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد بین پیش‌بینی‌ها و مقادیر اندازه‌گیری شده تفاوت وجود دارد که البته این تفاوت‌ها در فاصله بیشتر از منبع حرارتی شدت بیشتری یافته است. به نظر می‌رسد این تفاوت‌ها مربوط به عایق بودن چوب در مقابل حرارت و تفاوت در ضریب هدایت حرارتی دو گونه و نیز تاثیر دمای محیط و شرایط مرزی (لبه‌ها) و پرت حرارتی در لبه‌های قطعه چوبی باشد.

که انتقال حرارت در محدوده رطوبت ۱۲ درصد در دو گونه چوبی راش و صنوبر متفاوت است. البته هر دو چوب رفتار مشابهی از خود نشان دادند که مطابق با یک ماده هیگروسکوپیک و متخلخل است. نمودار پیش‌بینی مدل و ودار حاصل از اندازه‌گیری حرارت نشان داد که به طور منطقی با دور شدن از منبع حرارتی از میزان حرارت کاسته می‌شود (شکل ۴). به رغم این شباهت میزان کاهش در نمودار حاصل از اندازه‌گیری بیشتر است به طوری که فاصله نمودار پیش‌بینی از نمودار اندازه‌گیری با دور شدن از منبع حرارتی بیشتر می‌گردند. در شکل ۵ الف اندازه‌گیری‌های مربوط به نیم‌رخ قائم به فاصله‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر از صفحات داغ پرس و به فاصله ۵ میلی‌متر از مغز قطعه چوبی نشان داده شده است. دمای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل در دو گونه راش و صنوبر به ترتیب برابر با ۷۰، ۷۰، ۶۸، ۶۷ و ۶۵ درجه سانتی‌گراد و ۷۰، ۶۹، ۶۸، ۶۵ و ۶۴ درجه سانتی‌گراد بود. دمای پیش‌بینی شده با مدل ریاضی برای دو گونه فوق در فواصل ذکر شده به ترتیب برابر با ۷۰، ۶۸/۹۹، ۶۸/۰۱، ۶۷/۰۳ و ۶۶/۰۷ درجه سانتی‌گراد و ۷۰، ۶۸/۸۴، ۶۷/۷۱، ۶۶/۶ و ۶۵/۵۱ درجه سانتی‌گراد حاصل شد. با توجه به این که فاصله عمودی گره‌ها از صفحه پرس مشابه نیم‌رخ قبلی بود،

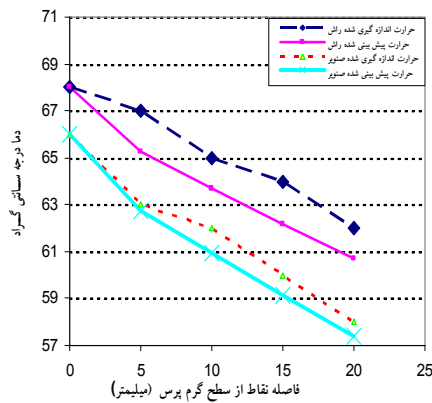


(ب)

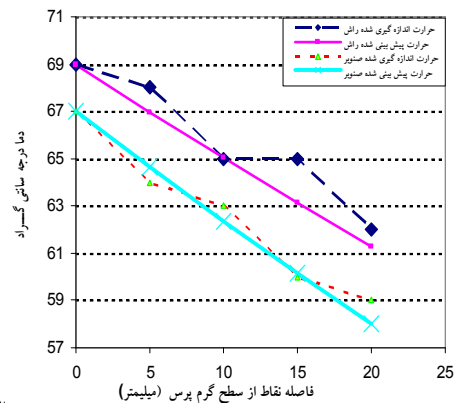


(الف)

**شکل ۴.** مقایسه درجه حرارت پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده راش و صنوبر در (الف) نیم‌رخ قائم (ضخامت) به فاصله ۵ میلی‌متر از مغز قطعات چوبی و (ب) در نیم‌رخ قائم (ضخامت) به فاصله ۱۰ میلی‌متر از مغز قطعات چوبی مورد آزمایش.

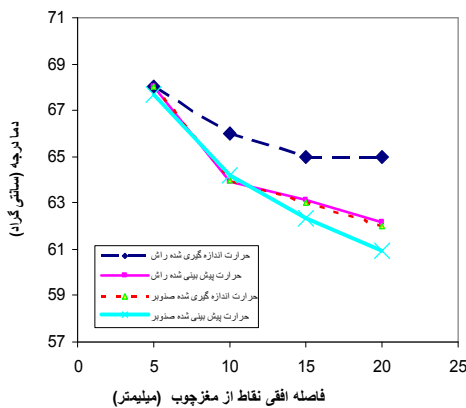


(ب)

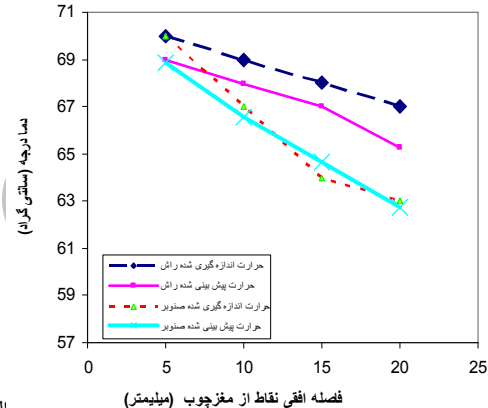


(الف)

**شکل ۵.** مقایسه درجه حرارت پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده راش و صنوبر در **(الف)** نیم‌رخ قائم (ضخامت) به فاصله ۱۵ میلی‌متر از مغز قطعات چوبی و **(ب)** در نیم‌رخ قائم (ضخامت) به فاصله ۲۰ میلی‌متر از مغز قطعات چوبی مورد آزمایش.

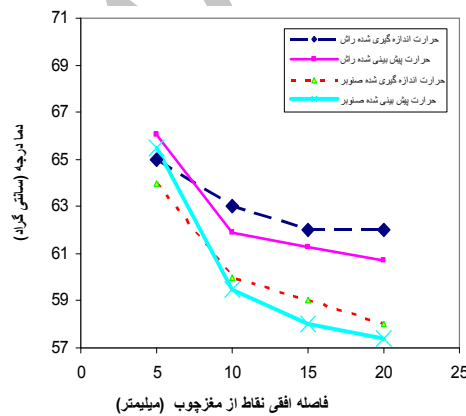


(ب)

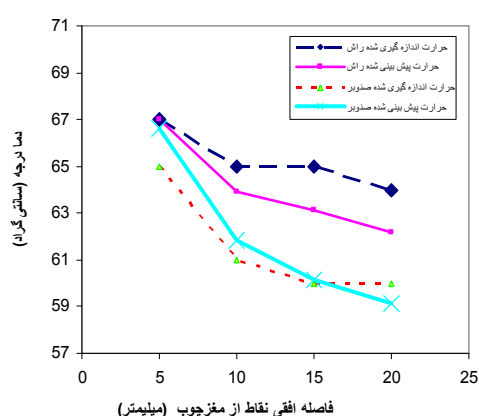


(الف)

**شکل ۶.** مقایسه درجه حرارت پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده راش و صنوبر در **(الف)** نیم‌رخ افقی (پهنای چوب) به فاصله ۵ میلی‌متر از صفحات گرم و **(ب)** نیم‌رخ افقی (پهنای چوب) به فاصله ۱۰ میلی‌متر از صفحات گرم.



(ب)



(الف)

**شکل ۷.** مقایسه درجه حرارت پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده راش و صنوبر در **(الف)** نیم‌رخ افقی (پهنای چوب) به فاصله ۱۵ میلی‌متر از صفحات گرم و **(ب)** نیم‌رخ افقی (پهنای چوب) به فاصله ۲۰ میلی‌متر از صفحات گرم.

ویژه بیشتر این چوب در مقایسه با چوب صنوبر باشد که همین مسئله باعث بروز ضریب هدایت حرارتی بیشتر در چوب راش شد.

نتایج مطالعات طارمیان و سپهر (۱۳۸۹) بر توسعه شیب دما در چوب راش و نوئل با نتایج این تحقیق مطابقت دارد به طوری که نتایج تحقیقات ایشان نشان داد الگوی انتشار حرارت در دامنه آب آغشتگی تحت تاثیر ویژگی‌های چوب و ضخامت دیواره سلولی چوب و دانسیته چوب قرار دارد و روند انتقال حرارت با تغییر در مقدار این فاکتورها در چوب نیز تغییر می‌یابد به طوری که در گونه نوئل با دانسیته سبک میانگین دمای مغز تخته پس از ۳۰ دقیقه حرارت‌دهی برابر ۵۰ درجه سانتی‌گراد و در گونه راش با دانسیته نیمه سنگین برابر ۵۴ درجه سانتی‌گراد بود.

نوربخش و کارگرفر (۱۳۸۵) با بررسی اثر دانسیته بر انتقال حرارت و خواص مکانیکی تخته خرده چوب حاصله نشان دادند که با افزایش دانسیته خرده چوب از ۰/۳ تا ۰/۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب، افزایش انتقال حرارت و چسبندگی داخلی را حاصل می‌گردد. افزایش بیشتر دانسیته تخته خرده چوب سبب آغشتگی بیشتر سطوح ذرات خرده چوب و چسب و ایجاد اتصالات قوی تر و کاهش واکشیدگی را بدنبال داشته شده است.

نتیجه این تحقیق نشان می‌دهد که مدل ریاضی معرفی شده از توانایی مطلوبی برای پیش‌بینی درجه حرارت در قطعات چوبی با دانسیته‌های متفاوت در جریان انتقال حرارت دوبعدی را دارا است هرچند مدل برای افزایش دقت هنوز به اصلاحاتی نیاز دارد. اثر ضخامت یا فاصله از منبع گرما توسط مدل شناسایی شد و با افزایش فاصله از منبع حرارت کاهش درجه حرارت در گره‌های مختلف در پیش‌بینی‌های مدل کاملاً مشهود بود اگر چه با افزایش

منحنی‌های شیب دما در ضخامت و پهنای تخته‌های صنوبر و راش طی انتقال حرارت نشان داد که الگوی توسعه شیب دما در همه تخته‌ها مشابه بود، به طوری که دما در هر دو نوع چوب با دانسیته‌های متفاوت با شروع فرآیند حرارت‌دهی در سطح تخته‌ها حداکثر و در مغز تخته‌ها حداقل بود. با مقایسه اشکال ۴ تا ۷ نتایج مشخص شد که شیب دما در جهت پهنای تخته بیشتر از ضخامت آن بود که علت این امر فاصله بیشتر از منبع حرارتی و اثر پرت حرارتی در لبه‌های قطعه چوبی بود. با توجه به بالاتر بودن دانسیته گونه چوبی راش نسبت به صنوبر نتایج حاکی از این امر بود که انتشار حرارت از سطح به مغز تخته با سرعت بیشتری انجام گرفته است. انتشار سریع‌تر حرارت در چوب و فرآورده‌های چوبی موجب کاهش شیب دما بین سطح و مغز تخته می‌گردد.

### بحث و نتیجه‌گیری

بررسی اثر دانسیته بر انتقال حرارت در این مطالعه نشان داد که تفاوت محسوسی از لحاظ انتقال حرارت بین چوب راش با دانسیته نیمه‌سنگین و چوب صنوبر با دانسیته سبک وجود دارد که این موضوع در پیش‌بینی مدل و اندازه‌گیری مستقیم حرارت مشهود بود، به شکلی که سرعت انتقال حرارت در چوب راش در مقایسه با چوب صنوبر بیشتر بود. علت این امر را می‌توان در سرعت انتقال آهسته حرارت چوب صنوبر دانست که ناشی از جرم ویژه کمتر و در حقیقت هدایت حرارتی کمتر در این گونه است (Siau, 1984). ضخامت دیواره سلولی یکی از عوامل اثرگذار بر روی انتقال حرارت در چوب است. نتایج این مطالعه نشان داد که انتقال حرارت در چوب راش از صفحات گرم پرس یا منبع حرارتی به مغز چوب در مقایسه با صنوبر بهتر صورت می‌گیرد که این امر می‌تواند ناشی از جرم



- Wood Science and Technology, 19(2): 159-177.
- Gu, H. and Hunt, J. (2004) Two dimensional Finite element heat and mass transfer Model for softwood. Proceedings of the 7th Pacific Rim bio composite symposium. China. Oct: 344-354.
- Kehr, E., and Scholzel, S. (1996) The investigation of pressing conditions in the manufacturing of particle board. USDC Trans. FPL Report, 687 p.
- Pang, S. and Gu, L. (2006) Opportunity and challenge in wood drying: quality control and energy saving. Science and Technology, 8(1): 57-58.
- Siau, J.F. (1984) Transport processes in wood. Springer, Berlin, Heidelberg. New York, 245 p.
- فاصله از دقت مدل کاسته شد. اثر حرارت محیطی بر انتقال حرارت به وسیله مدل توضیح داده شد به طوری که گره‌های نزدیک به لبه‌های قطعه چوبی از حرارت کمتری برخوردار می‌شدند که علت آن تلفات حرارتی از لبه‌ها در اثر تماس با هوای سرد محیط بود. همان طور که نتایج این مطالعه نشان می‌دهد مدل‌های ریاضی می‌توانند ابزار بسیار مفیدی برای پیش‌بینی انتقال حرارت باشند البته در طراحی این مدل‌ها باید شرایط فیزیکی چوب کاملاً لحاظ گردد تا دقت مدل افزایش یابد. مدلی که در این تحقیق طراحی گردید فقط برای چوب‌های ماسیو گونه‌های راش و صنوبر با رطوبت استاندارد ۱۲ درصد و دانسیته‌های ۰/۶۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۰/۴۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب ضرایب هدایت حرارتی به ترتیب برابر با ۰/۱۳۴ و ۰/۰۹۴ کاربرد دارد در غیر این صورت مدل باید برای شرایط جدید اصلاح گردد.

## منابع

- ابراهیمی، ق. و فائزی‌پور، م. (۱۳۷۵) چوب خشک کنی در کوره. انتشارات دانشگاه تهران. ۶۰۰ صفحه.
- امام، م. (۱۳۷۶) بررسی انتقال حرارت در کیک خرده چوب. پایان نامه کارشناسی ارشد صنایع چوب و کاغذ. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. گرگان، ۱۶۵ صفحه.
- طارمیان، ا. و سپهر، ا. (۱۳۸۹) بررسی انتشار حرارت و توسعه گرادیان دما در چوب در طی خشک شدن: مطالعه موردی راش و نوئل. دوفصلنامه علمی و پژوهشی تحقیقات چوب و کاغذ ایران، ۲۵ (۲): ۲۲۴-۲۴۷.
- نوربخش، ا. و کارگرفر، ا. (۱۳۸۵) اثر دانسیته و زمان پرس بر ویژگیهای تخته خرده چوب عایقی از گونه صنوبر. مجله علمی و پژوهشی تحقیقات چوب و کاغذ ایران، ۲۱(۲): ۱۱۵-۱۲۲.
- Bazant, Z.P. (1985) Constitutive equation of wood at variable humidity and temperature.

## Two dimensional heat transfers in wood using mathematic model; a case study: Beech (*Fagus orientalis*) and Poplar wood (*Populus deltoides*)

Amir Houman Hemmasi<sup>1</sup>, Mehdi Malekani<sup>1\*</sup> and Taghi Tabarsa<sup>2</sup>

- 1) Department of Wood and Paper Science and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. \*Corresponding Author Email Address: mehdi\_malakani@yahoo.com
- 2) Department of Wood and Paper Science and Technology, College of Natural Resources, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

### Abstract

In this study, two dimensional mathematic models were developed for predicting wood temperature at different depth and density of wood during heating process. Fractional differential equations were applied for development of the model. For evaluating effect of wood density on heat transfer, Beech wood (*Fagus orientalis*) and poplar wood (*Populus deltoides*) with densities of 0.67 g cm<sup>-3</sup> and 0.43 g cm<sup>-3</sup> and moisture content of 12% was applied. Holes of 5 mm diameter were made on the board specific distances to measure the temperature using thermocouple. Good agreement was found between model predictions and experimental data. Heat loss from edges of wood block under effect of environmental conditions was identified by model. However, model has to be modified for increasing its accuracy. It had high ability for temperature prediction at different depth of wood during heating by increase of model accuracy, it can be used for wood drying and heat treatment applications.

**Keywords:** mathematical model; differential equation; Heat transfer; beech wood; poplar wood.