

## بررسی فرایند انتشار حرارت و توسعه گرادیان دما در چوب طی خشک شدن؛ مطالعه موردی: راش (*Fagus orientalis*) و نوئل (*Picea abies*)

اصغر طارمیان<sup>۱\*</sup> و امیر سپهر<sup>۲</sup>

\*۱- مسئول مکاتبات، استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، پست الکترونیک: tarmian@ut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: اردیبهشت ۱۳۸۹

تاریخ دریافت: مرداد ۱۳۸۸

### چکیده

فرایند انتشار حرارت در سه جهت ارتوتروپ و توسعه گرادیان دما در گونه‌های چوبی راش (*Fagus orientalis*) و نوئل (*Picea abies*) طی خشک شدن بررسی شد. برای این منظور و با توجه به کم بودن ظرفیت خشک‌کن از تخته‌های مماسی کوچک به ابعاد  $۴۰ \times ۲۵ \times ۸۰$  (L×R×T) میلی‌متر استفاده شد. سپس، تخته‌ها در در دمای خشک ۶۰ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد خشک شدند. برای محدود کردن انتشار حرارت در یک راستا و اندازه‌گیری انتقال حرارت در یک جهت تخته، پنج سطح از شش سطح تخته‌ها با فویل آلومینیومی آغشته با رزین پلی‌اورتان اندود شد و سپس از یک پلاستوفوم با ضخامت ۵۰ میلی‌متر به عنوان عایق حرارت بر روی تخته‌ها استفاده شد. برای اندازه‌گیری دما با ترموکوپل، سوراخ‌هایی به قطر یک میلی‌متر در فواصل معین در تخته‌ها ایجاد شد. نتایج نشان داد که دمای هر دو گونه چوبی طی خشک شدن به تدریج افزایش یافته تا وقتی که به دمای تر برسد. سپس، در این دما باقی می‌ماند تا وقتی که رطوبت چوب وارد دامنه هیگروسکوپیک شود. همچنین، گرادیان دما در هر دو گونه چوب الگوی مشابهی داشت، به این ترتیب که دمای لایه سطحی تخته‌ها تا دمای خشک ۶۰ درجه سانتیگراد افزایش یافت، ولی دمای مغز تخته‌ها تا پایان عملیات خشک شدن در حد دمای تر (۴۸-۵۲ درجه سانتیگراد) باقی ماند.

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت، گرادیان دما، خشک کردن، نوئل، راش.

### مقدمه

است. بر این اساس، الگوی توزیع دما در چوب طی خشک شدن به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است (Tremblay و همکاران، ۲۰۰۰؛ Keey و همکاران، ۲۰۰۰) و مدل‌های ریاضی متعددی نیز برای پیش‌بینی گرادیان دما و فرایند انتقال حرارت در آن ارائه شده است (Plumb و همکاران، ۱۹۸۵؛ Dedic و همکاران، ۲۰۰۳؛ Antti و Perré، ۱۹۹۹). شناخت سازوکارهای انتقال حرارت در چوب علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف انرژی

چوب خشک‌کنی مشتمل بر فرایند انتقال هم‌زمان رطوبت و حرارت تحت شرایط ناپایدار<sup>۱</sup> و غیر هم‌دما<sup>۲</sup> است. بنابراین مطالعه سازوکارهای انتقال حرارت همانند مطالعه سازوکارهای انتقال رطوبت طی خشک شدن چوب از اهمیت بسزایی به‌ویژه در مدل‌سازی برخورداری

1 - Unsteady-state

2 - Non-isothermal

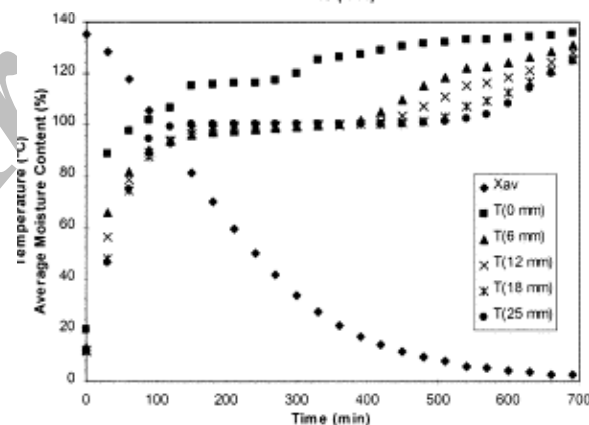
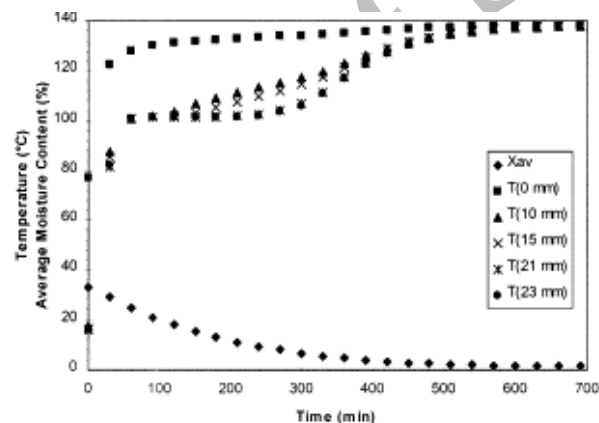
دو روش چوب خشک‌کنی مذکور متفاوت است. در روش مایکروویو، منحنی توزیع دما به شکل محدب بوده و یک نقطه اوج دمایی در چند میلیمتری زیر سطح چوب توسعه پیدا می‌کند. در روش جابجایی هوای گرم، منحنی توزیع دما به شکل مقعر بوده و نقطه اوج دما در سطحی از چوب که در معرض هوای گرم است، توسعه پیدا می‌کند. Li و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند که به هنگام خشک کردن تخته‌های با ضخامت ۶۰ میلی‌متر به روش ترکیبی خلاء-مایکروویو توزیع دما در ضخامت تخته‌ها یکنواخت بوده و گرادیان دمای مشخصی توسعه پیدا نمی‌کند. Li و Plumb (۱۹۹۴) نشان دادند که توزیع دما در دو جهت مماسی و شعاعی متفاوت است و Keey و Nijdam (۲۰۰۲) گزارش کردند که تفاوت معنی‌داری بین گرادیان دما در چوب‌درون و چوب‌برون طی خشک‌شدن وجود دارد. Pang (۱۹۹۴) پروفیل دما را در ضخامت تخته‌های چوب‌برون و چوب‌درون کاج رادیاتا تحت شرایط چوب خشک‌کنی در دمای بالا (دمای خشک  $140^{\circ}\text{C}$  و دمای تر  $65^{\circ}\text{C}$ ) و در تخته‌های ۵۰mm مطالعه کرد. نتایج مطالعه وی نشان داد که شیب گرادیان دما چه در برون-چوب و چه در درون‌چوب در مرحله آب آزاد کم است و دما در ضخامت‌های مختلف تخته تا دمای نزدیک به ۱۰۰ درجه سانتیگراد (دمای بیشتر از دمای تر کوره) افزایش می‌یابد و در این دما ثابت می‌ماند تا وقتی که رطوبت چوب وارد مرحله آب آغشتگی شود. بعد از این که رطوبت چوب وارد مرحله آب آغشتگی می‌شود دما در ضخامت‌های مختلف تخته تا رسیدن به دمای خشک کوره (۱۴۰ درجه سانتیگراد) افزایش پیدا می‌کند و گرادیان دما با شیب زیاد در ضخامت تخته توسعه پیدا می‌کند (شکل ۱). Moren و Sehlstedt-Persson (۱۹۹۹) روند

به سهولت دفع رطوبت از چوب نیز کمک می‌کند. همچنین، با توجه به رابطه تنگاتنگی که بین فرآیند انتقال رطوبت و حرارت در چوب وجود دارد (Keey و همکاران، ۲۰۰۰)، فرآیند انتقال رطوبت در چوب را می‌توان با کمک سازوکار انتقال حرارت در آن پیش‌بینی کرد. حرارت در چوب عمدتاً با روش هدایت از مسیر جدارهای سلولی و به مقدار کم با روش جابجایی از مسیر حفرات سلولی و منافذ دیواره‌ای ناشی از گرادیان دما به صورت نیروی رانش<sup>۱</sup> انتقال می‌یابد. با توجه به این که چوب مرطوب از سه حالت مایع، گاز (هوا) و جامد تشکیل شده است، فرآیند انتقال حرارت در آن پیچیده است. به عبارت دیگر، در چوب مرطوب طی خشک‌شدن ترکیبی از دو فرآیند انتقال حرارت به روش جابجایی و هدایت رخ می‌دهد. Tremblay و همکاران (۱۹۹۹) توسعه گرادیان دما را در چوب‌برون کاج قرمز طی خشک‌شدن در رطوبت‌های مختلف، اشباع کامل، ۱۵۰، ۱۲۰، ۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد و در دماهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد که منحنی توسعه دما در چوب در دماهای مختلف شکل مشابهی دارد. در ابتدا، شیب گرادیان دما زیاد است و در رطوبت‌های بالاتر از رطوبت اشباع الیاف، وقتی که دمای چوب به دمای تر کوره می‌رسد، شیب گرادیان دما کاهش می‌یابد. Zielonka و Gierlik (۱۹۹۹) منحنی توزیع دما را در چوب نوئل به ابعاد  $300 \times 170 \times 60$  mm و با رطوبت ۲٪ + ۱۲٪ در راستای طول تخته و تحت شرایط چوب خشک‌کنی به روش جابجایی هوای گرم و مایکروویو در فواصل زمانی مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد که شکل منحنی توزیع دما در

1 - Driving force

برگ و پهن برگ) در دو مرحله رطوبتی بالاتر و کمتر از رطوبت FSP طی خشک شدن مورد مطالعه قرار گرفت. در تحقیقات گذشته، اغلب فرایند انتقال حرارت فقط در راستای ضخامت تخته طی خشک شدن بررسی شده است، ولی در این تحقیق، علاوه بر ضخامت، انتشار حرارت در راستای طول و پهنای تخته‌ها نیز بررسی شد. همچنین، الگوی انتقال حرارت و توسعه گرادیان دما در گونه سوزنی‌برگ نوئل با رطوبت سبز بالا و گونه پهن‌برگ راش با رطوبت سبز کم به طور همزمان مطالعه شد تا دقیق‌تر به تفاوت‌های موجود در رفتار انتشار حرارت گونه‌های سوزنی‌برگ و پهن‌برگ طی خشک شدن پی‌برد.

افزایش دما را در نمونه‌های کوچک چوب کاج در رطوبت بالاتر از رطوبت FSP با دامنه  $80-60^{\circ}\text{C}$  دما مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که دما در مغز تخته مشابه مقدار آن در عمق ۲ میلی‌متری از سطح چوب است و در هر دو قسمت، دما در مقایسه با دمای سطح چوب کم‌تر است تا وقتی که چوب خشک شود. براساس اظهارنظر Perré (۲۰۰۷) در دوره سرعت خشک شدن ثابت که به طور معمول به هنگام خشک کردن چوب‌آلات تازه قطع شده تحت شرایط ملایم رخ می‌دهد، دمای سطح چوب در حد دمای تر باقی می‌ماند. در تحقیق حاضر، فرایند انتقال حرارت در دو گونه چوبی (سوزنی-



شکل ۱- توسعه گرادیان دما در ضخامت تخته‌های چوب برون و چوب درون کاج رادیاتا تحت شرایط چوب خشک کنی در دمای بالا (دمای خشک  $140^{\circ}\text{C}$  و دمای تر  $65^{\circ}\text{C}$ )، (Pang, ۱۹۹۴).

## مواد و روشها

### نمونه برداری

یک گونه پهن برگ ( راش ایران، *Fagus orientalis*) و یک گونه سوزنی برگ ( نوئل، *Picea abies*) برای این مطالعه انتخاب شد. درختان مورد نظر از محل جنگل آموزشی و پژوهشی خیرودکنار (متعلق به دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران) واقع در ۷ کیلومتری نوشهر تهیه شدند. از هر گونه یک پایه درخت قطع شد. درخت نوئل از بخش پاتم، قطعه ۱۱۴ تیپ راشستان قطع شد و درخت نوئل در این قطعه به صورت دست کاشت بود. برای جلوگیری از افت رطوبت از گرده‌بینه‌ها، مقاطع آنها با پارافین اندود شد.

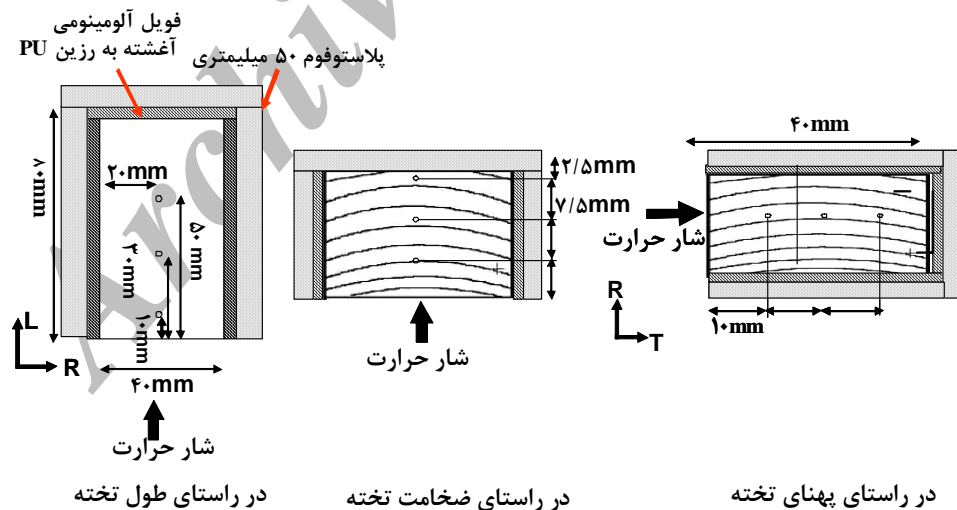
### برش نمونه‌ها

برای همه مطالعات، تخته‌های مماسی به ابعاد mm  $40 \times 25 \times 8$  (L×R×T) بریده شدند و برای هر آزمایش، از

سه تخته (سه تکرار) استفاده شد. با توجه به تفاوت چوب برون و چوب درون، همه نمونه‌های مذکور از ناحیه چوب برون تهیه شدند. پس از برش نمونه‌ها، جرم ویژه آنها اندازه‌گیری شد.

### آماده سازی نمونه‌ها

برای محدود کردن انتشار حرارت در یک راستا، پنج سطح از شش سطح تخته‌ها در سه فرم متفاوت با فویل آلومینیومی آغشته با رزین پلی‌اورتان اندود شد. سه نمونه برای هر سطح اندود استفاده شد. بعد، از یک پلاستوفوم با ضخامت ۵۰ mm به عنوان عایق حرارت بر روی تخته‌ها استفاده شد. قبل از اندازه‌گیری دما، سوراخهایی به قطر ۱ mm به منظور نصب ترموکوپل‌ها در فواصل معین در تخته‌ها ایجاد شد. محل سوراخ‌ها و روش آماده‌سازی نمونه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- روش آماده‌سازی نمونه‌ها برای اندازه‌گیری سرعت انتشار حرارت در آنها طی خشک شدن

## اندازه‌گیری سرعت انتشار حرارت

نمونه‌های آماده شده در یک خشک‌کن آزمایشگاهی با دمای خشک ۶۰ درجه سانتیگراد، دمای تر ۴۸ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد خشک شدند. خشک‌کن آزمایشگاهی مذکور به ابعاد  $50 \times 80 \times 50$  سانتی‌متر بوده و مجهز به رطوبت‌ساز فراصوت و فن سانتریفوژ مقاوم به حرارت با قابلیت تنظیم دور موتور است. در این خشک‌کن، کنترل رطوبت نسبی و دمای خشک‌کن به صورت خودکار انجام شده و از سنسور رطوبت‌سنج برای کنترل رطوبت و از چهار ترموکوپل برای اندازه‌گیری دمای تخته‌ها استفاده می‌شود (شکل ۳). دمای تخته‌ها در دو دامنه رطوبتی اندازه‌گیری شد: رطوبت سبز (مرحله خروج آب آزاد) و میانگین رطوبت کمتر از رطوبت اشباع فیبر (مرحله خروج آب آغشتگی). میانگین رطوبت اولیه تخته‌ها به هنگام خشک کردن به ترتیب برای گونه‌های راش و نوئل برابر با ۸۰ و ۱۲۰ درصد بود. در هر دامنه رطوبتی، تخته‌ها تا رسیدن به شرایط دمای پایدار خشک شدند. زمان استقرار نمونه‌ها در خشک‌کن قبل از روشن کردن خشک‌کن بود و بلافاصله بعد از نصب ترموکوپل‌ها، عملیات خشک‌کردن آغاز شد. به عبارت دیگر، الگوی ارائه شده انتشار دما برای همه تخته‌ها مرحله پیش گرم کردن آن‌ها را نیز شامل می‌شود. دمای تخته در جهت پهنا در فاصله ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلیمتری، در جهت طول در فاصله ۱۰، ۳۰ و ۵۰ میلیمتری و در جهت ضخامت در فاصله ۷/۵، ۱۵ و ۲۲ میلیمتر اندازه‌گیری شد (شکل ۲). برای اندازه‌گیری دما از ترموکوپل با قطر حدود یک میلی‌متر استفاده شد. قبل از اندازه‌گیری دما، مدخل سوراخ‌ها که در آن ترموکوپل گذاشته شده، با خمیر سیلیکون مسدود شد تا فقط دمای چوب در محل

منفذ تعبیه شده اندازه‌گیری شود. سرعت انتشار دما در هر یک از نمونه‌ها در فواصل زمانی معین تا رسیدن به شرایط پایدار اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری و ثبت دما به صورت دیجیتالی انجام شد.

## اندازه‌گیری گرادیان دما

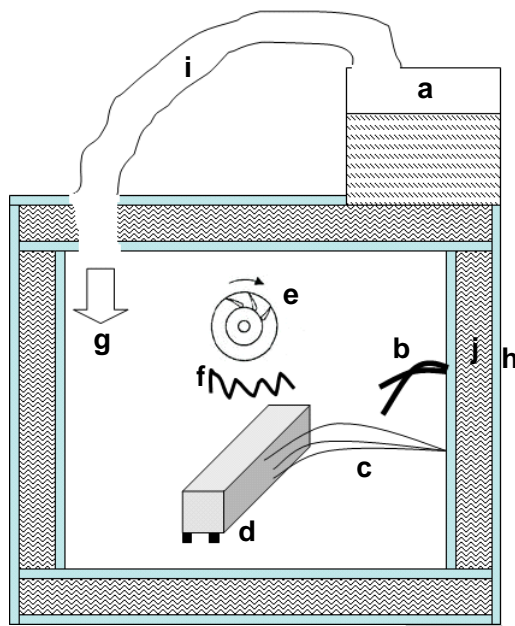
آزمایش‌های مشابه نیز برای بررسی توسعه گرادیان دما در ضخامت تخته‌ها طی خشک‌شدن از رطوبت سبز تا رسیدن به رطوبت نهایی حدود ۸ درصد انجام شد. به طوری که در این آزمایش‌ها، چهار سطح از شش سطح تخته‌ها با رزین اپوکسی اندود شد تا رطوبت فقط در راستای ضخامت منتقل شود. تخته‌ها بدون استفاده از عایق حرارتی بر روی آن‌ها خشک شدند. دما با کمک ترموکوپل در ضخامت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلیمتر اندازه‌گیری شد.

## نتایج

### الگوی انتشار حرارت

#### مرحله خروج آب آزاد ( $MC > FSP$ )

نتایج نشان داد که در مرحله آب آزاد تفاوت محسوسی بین چوب سوزنی‌برگ (نوئل) و چوب پهن‌برگ (راش) از لحاظ انتقال حرارت وجود ندارد و هر دو چوب رفتار مشابهی نشان دادند که مطابق با رفتار یک ماده هیگروسکوپیک و متخلخل است؛ به این معنی که در دامنه آب آزاد، هنگامی که رطوبت چوب بالاتر از رطوبت اشباع الیاف است، دمای چوب به تدریج افزایش می‌یابد تا وقتی که به دمای تر برسد. سپس، در این دما باقی می‌ماند تا وقتی که رطوبت چوب وارد دامنه هیگروسکوپیک شود، چون با برهم خوردن فشارنسبی بخار آب ارتباطی ندارد.

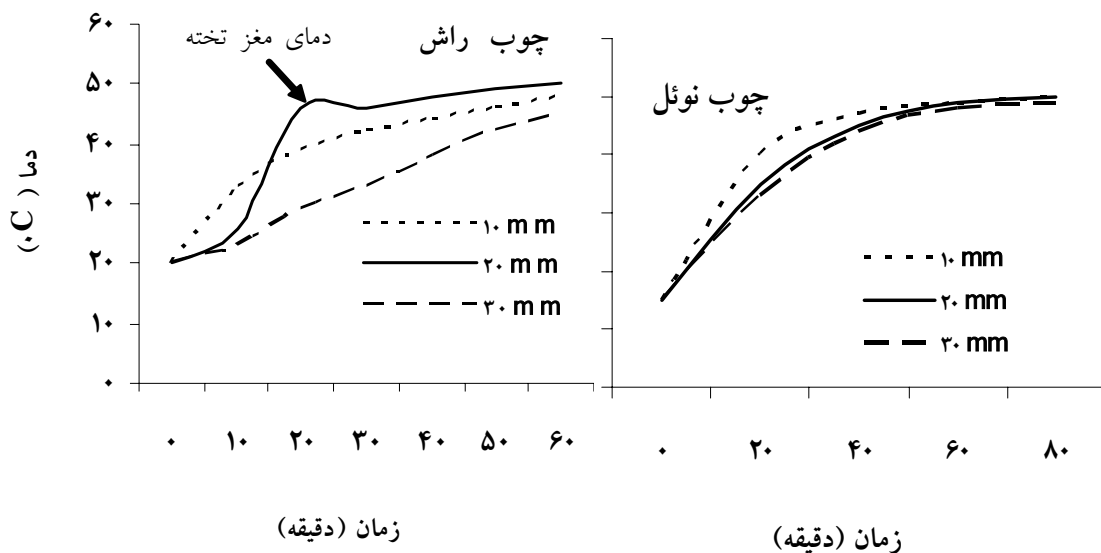


شکل ۳- شمایی از خشک کن آزمایشگاهی مورد استفاده و نحوه نصب ترموکوپل ها بر روی نمونه. a: رطوبت ساز اولتراسوند؛ b: سنسور کنترل دما و رطوبت نسبی؛ c: ترموکوپل ها؛ d: نمونه چوبی؛ e: فن سانتریفوژ؛ f: المنت برقی؛ g: محل تزریق رطوبت؛ h: ورق گالوانیزه؛ i: مجرای عبور بخار؛ j: عایق پلاستوفوم

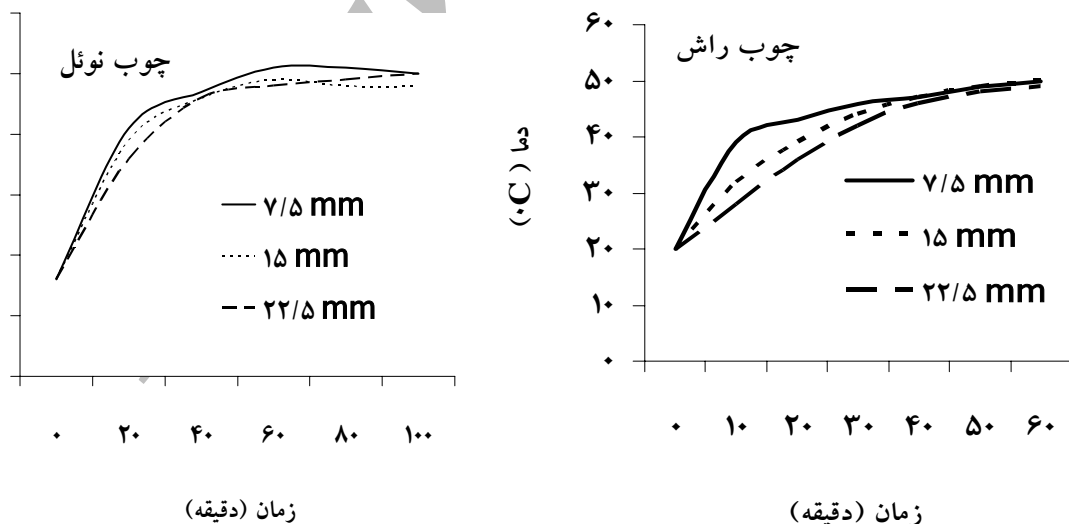
مغز بیشتر بود. علت وقوع این پدیده و افزایش غیر منتظره دمای مغز تخته‌ها در راستای پهنا و طول شاید ناشی از دو علت است: ۱- تشکیل لایه خشک و ۲- انتقال آهسته آب آزاد و محصور شدن آن و در نتیجه افزایش دمای آن. در ابتدای عملیات چوب خشک‌کنی و به هنگام خروج آب آزاد، چنانچه سرعت جریان توده‌ای آب آزاد بالا باشد و سرعت انتقال آن به سطح چوب با سرعت تبخیر برابر باشد، سطح چوب در حالت اشباع باقی می‌ماند. به محض این که سرعت انتقال توده‌ای آب آزاد کاهش یافته و کم‌تر از سرعت تبخیر در سطح چوب باشد، لایه خشک با ضخامت یک میلی‌متر و کم‌تر و با رطوبت کم‌تر از رطوبت اشباع فیبر در سطح چوب تشکیل می‌شود. این لایه خشک به‌عنوان لایه عایق حرارت عمل کرده و بر فرایند انتقال حرارت در چوب

به عبارت دیگر، الگوی انتشار حرارت در دامنه آب آزاد چندان تحت تاثیر ویژگی‌های چوب نیست و تغییر دما مربوط به آب آزاد موجود در حفره‌های سلولی است که تقریباً رفتاری شبیه به آب خالص دارد. فرایند انتشار حرارت در دامنه آب آزاد در سه جهت پهنا، ضخامت و طول هر یک از تخته‌های نوئل و راش در شکل‌های ۴ تا ۶ ارائه شده است. در این مرحله، سرعت انتشار حرارت در هر دو چوب به‌ویژه چوب نوئل یکنواخت نبود و متغیر بودن سرعت انتشار حرارت در هر سه جهت تخته‌ها مشاهده شد. بنابراین، در چوب راش، الگوی توسعه گرادیان دما در دو جهت پهنا و طول تخته‌ها نسبت به جهت ضخامت متفاوت بود. در جهت ضخامت، دما در فاصله نزدیک به سطح تخته (در معرض جریان هوای گرم) با سرعت بیشتری افزایش یافت؛ در حالی که در راستای پهنا و طول تخته میزان افزایش دمای

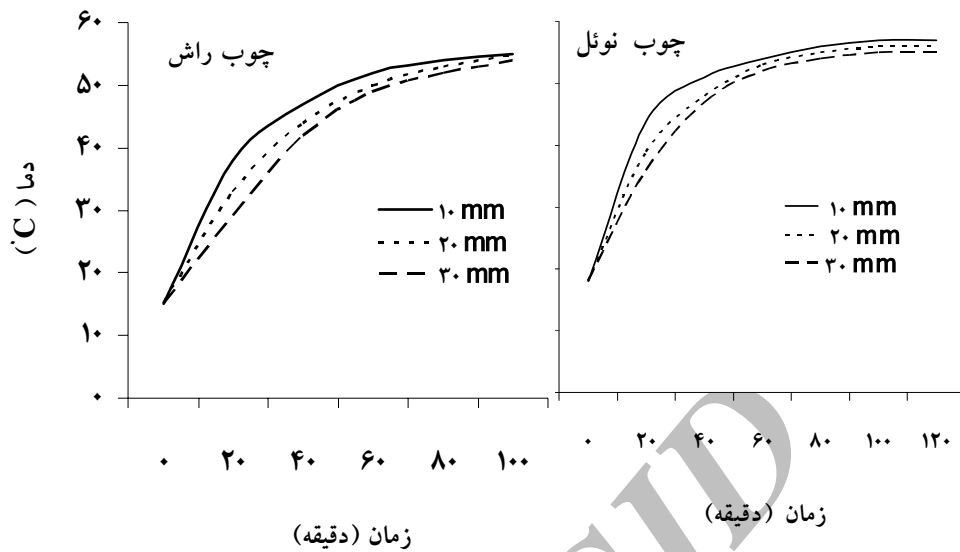
تاثیر می‌گذارد. در حقیقت، ساختار آناتومی متفاوت دو گونه و در نتیجه متفاوت بودن جریان توده‌ای آب آزاد در آنها از دلایل وقوع این پدیده محسوب می‌شود.



شکل ۴- الگوی انتشار دما در راستای پهنا (جهت مماسی) چوب راش و نوئل در مرحله خروج آب آزاد (MC>FSP) در فواصل ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلیمتری



شکل ۵- الگوی انتشار دما در راستای ضخامت (جهت شعاعی) چوب راش و نوئل در مرحله خروج آب آزاد (MC>FSP) در فواصل ۷/۵، ۱۵ و ۲۲/۵ میلیمتری



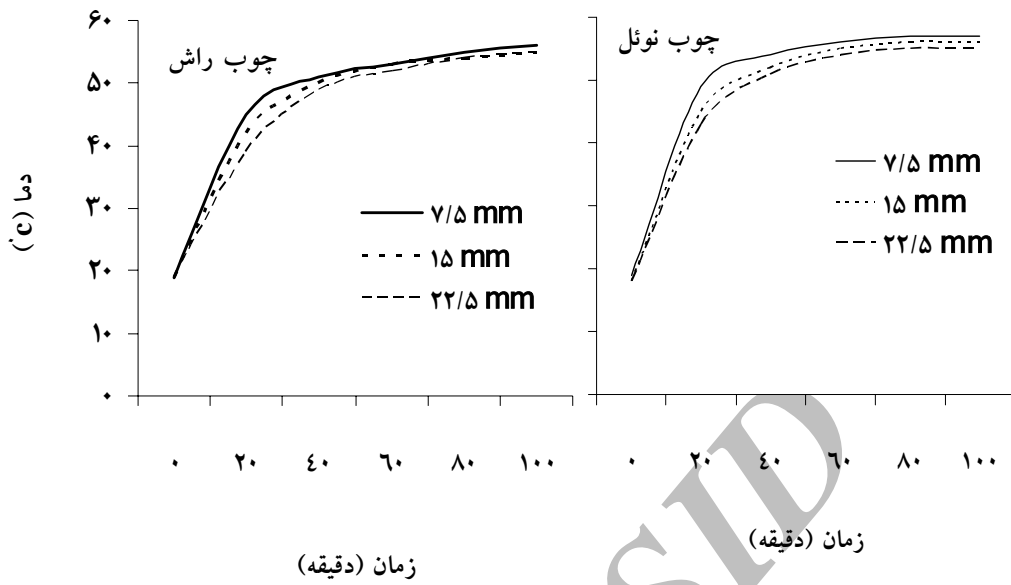
شکل ۶- الگوی انتشار دما در راستای طول (جهت طولی) چوب راش و نوئل در مرحله خروج آب آزاد (MC > FSP) در فواصل ۱۰، ۳۰ و ۵۰ میلیمتری

به شکل‌های ۶ و ۷ حاکی از وجود تفاوت جزئی در شیب انتشار حرارتی در دو گونه به ویژه در راستای پهنا (جهت مماسی) است. این تفاوت شاید ناشی از تفاوت ساختار آناتومی و جرم ویژه این دو گونه باشد که انتشار حرارت را در آنها تحت تاثیر قرار می‌دهد. به عبارت دیگر، بعد از مرحله خروج آب آزاد که تاثیر ویژگی‌های چوب بر فرایند انتشار حرارت کم‌تر است، در مرحله انتشار آب آغشتگی از جدارهای سلولی، ساختار آناتومی و به ویژه ضخامت جدار سلول‌ها بر فرایند انتشار حرارت در چوب تاثیر می‌گذارد.

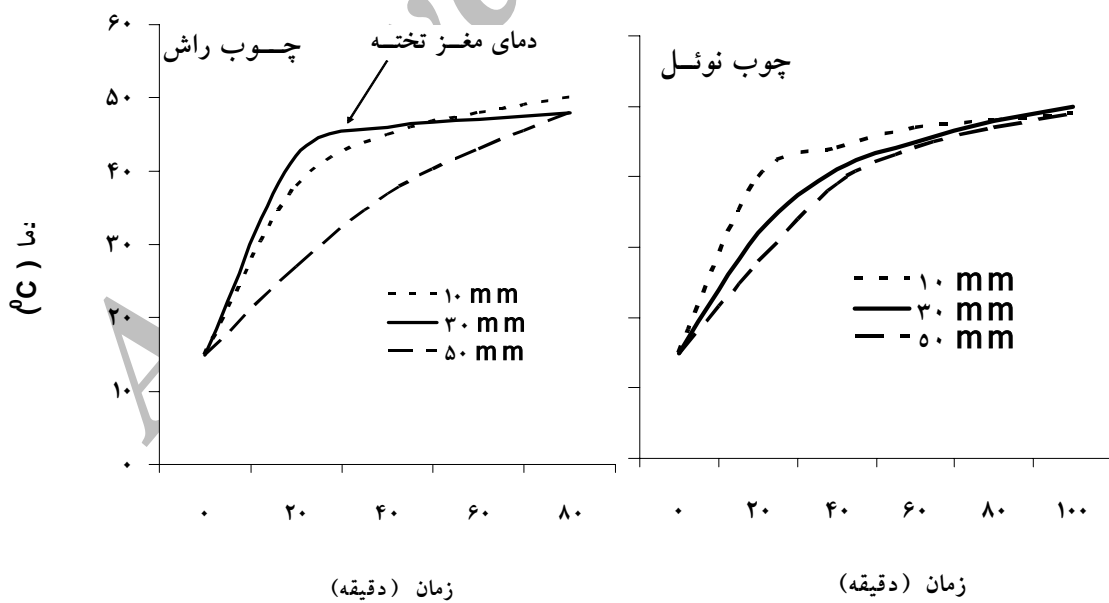
#### مرحله خروج آب آغشتگی (دامنه هیگروسکپیک، (MC < FSP

منحنی انتشار حرارت در سه راستای طول، پهنا و ضخامت تخته‌های نوئل و راش در دامنه آب آغشتگی در شکل‌های ۷ تا ۹ نشان داده شده است. در هر دو نوع چوب و در هر سه جهت ارتوتروپ آن، دما در فاصله نزدیک به فصل مشترک چوب و هوا با سرعت بیشتری افزایش یافت. در دامنه هیگروسکپیک، دمای هر دو نوع چوب به تدریج افزایش یافت تا وقتی که دمای آن به دمای خشک کوره رسید. بعد از این مرحله، دمای چوب نزدیک به دمای خشک کوره ثابت باقی‌ماند. نگاه دقیق‌تر

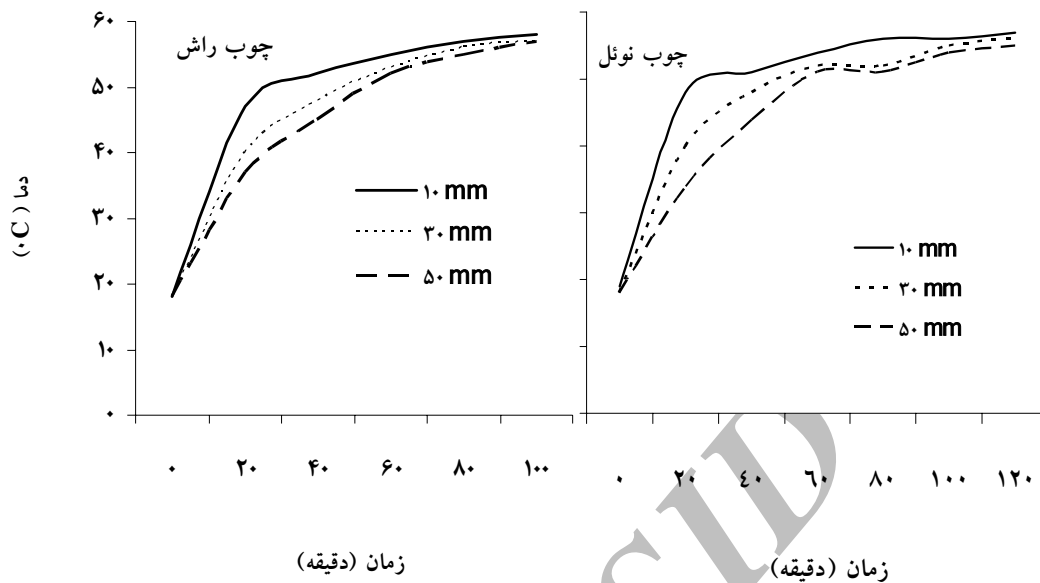




شکل ۷- الگوی انتشار دما در راستای پهنا (جهت مماسی) چوب راش و نوئل در دامنه هیگروسکپیک در فواصل ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلیمتری ( $MC < FSP$ )



شکل ۸- الگوی انتشار دما در راستای ضخامت (جهت شعاعی) چوب راش و نوئل در دامنه هیگروسکپیک در فواصل ۷/۵، ۱۵ و ۲۲/۵ میلیمتری ( $MC < FSP$ )

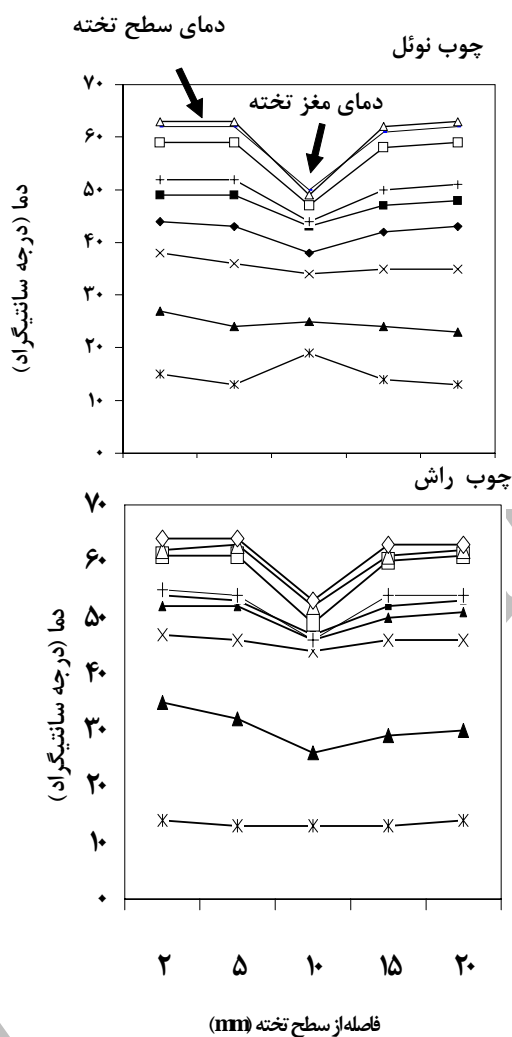


شکل ۹- الگوی انتشار دما در راستای طول (جهت طولی) چوب راش و نونل در دامنه هیگروسکوپیک (MC<FSP) در فواصل ۱۰، ۳۰ و ۵۰ میلیمتری

#### گرادیان دما

سانتیگراد بود. نتایج مطالعات Pang (۱۹۹۴) بر روی توسعه گرادیان دما در ضخامت تخته‌های چوب برون کاج رادیاتا با نتایج این تحقیق مطابقت دارد. درحقیقت الگوی گرادیان دما در ضخامت تخته‌ها بر عکس الگوی گرادیان رطوبت است. درحالی که در مقایسه با چوب نونل سرعت توسعه گرادیان دما در چوب راش بیشتر بود. همچنین، در همه تخته‌ها گرادیان دما در مراحل ابتدایی عملیات خشک کردن با سرعت بیشتری توسعه پیدا کرد. البته به دلیل سرعت آهسته انتشار حرارت در چوب نونل که ناشی از جرم ویژه کم تر آن (۰/۳۲) و در حقیقت هدایت حرارتی کم تر در این گونه (Siau، ۱۹۸۴) می باشد، شیب گرادیان دما در این چوب نسبت به مقدار این شیب در چوب راش (جرم ویژه ۰/۵۶) اندکی بیشتر بود. متوسط شیب گرادیان دما بین سطح و مغز تخته‌ها، در گونه‌های راش و نونل به ترتیب برابر با ۱۳ و ۱۱ درجه سانتیگراد بود.

منحنی گرادیان دما در ضخامت تخته‌های نونل و راش طی خشک شدن از رطوبت سبز تا رطوبت نهایی حدود ۸ درصد در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که الگوی توسعه گرادیان دما در همه تخته‌ها مشابه بود. به طوری که، در هر دو نوع چوب، با شروع خشک شدن، دما در سطح و مغز تخته افزایش یافت تا وقتی که دمای مغز تخته به دمای تر کوره رسید؛ در این هنگام، دمای مغز تخته تقریباً در حد دمای تر کوره ثابت باقی ماند ولی دمای لایه سطحی تخته تا دمای خشک کوره افزایش یافت. در پایان عملیات خشک کردن، گرادیان دما با شیب زیاد در ضخامت تخته‌ها توسعه پیدا کرد و دمای مغز تخته‌ها در حد دمای تر (۵۲ °C) و دمای لایه‌های سطحی آن در حد دمای خشک (۴۸-۶۴) °C بود. در گونه نونل، میانگین دمای مغز تخته برابر با ۵۰ درجه سانتیگراد و در گونه راش برابر با ۵۳ درجه



شکل ۱۰- منحنی گرادیان دما در ضخامت تخته‌های راش و نوئل طی خشک شدن از رطوبت سبز تا رطوبت نهایی حدود ۸ درصد

### بحث

در چوب راش با سرعت بیشتری رخ می‌دهد که می‌تواند ناشی از جرم ویژه بیشتر این چوب در مقایسه با چوب نوئل باشد (Siau, ۱۹۸۴). همین مسئله منجر به بروز شیب گرادیان حرارتی کم در چوب راش شد. حرارت

یکی از فاکتورهای کنترل کننده سرعت انتشار حرارت در چوب ضخامت دیواره سلولی است. نتایج این مطالعه نشان داد که انتشار حرارت در مرحله خروج آب آغشتگی

دمای مغز تخته‌های راش به صورت غیرمنتظره از دمای سطح چوب تجاوز کرد که به نظر می‌رسد ناشی از سرعت آهسته جریان آب آزاد در چوب راش نسبت به چوب نوئل باشد. همچنین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که تشکیل سریع لایه خشک سطحی که به‌عنوان لایه عایق حرارت عمل می‌کند، یکی از دلایل اصلی باقی ماندن دمای مغز تخته‌ها در حد دمای تر کوره حتی در پایان عملیات خشک‌کردن باشد.

### منابع مورد استفاده:

- Antti, A.L. and Perré, P., 1999. A microwave Applicator for on Line Wood Drying: Temperature and Moisture Distribution in Wood. *Wood Science Technology*, 33: 123-138.
- Baettig, R., Remond, R. and Perré, P., 2006. Measuring moisture content profiles in board during drying: a polychromatic X-Ray system interfaced with a vacuum/Pressure laboratory kiln *Wood Science and Technology*, 4:261-274.
- Dedic, A., Mujumdar, A.S. and Voronjcek, D.K., 2003. A Three Dimensional Model for Heat and Mass Transfer in Convective Wood Drying. *Drying Technology*, 21: 1-15.
- Keey, R.B., Langrish, T.A.G. and Walker J.C.F., 2000. *Kiln-Drying of Lumber*, Springer Series, 312 p.
- Keey, R.B. and Nijdam, J.J., 2002. Moisture movement on drying softwood boards and kiln design. *Drying Technology*, 20 (10):1955-1974.
- Li, G. and Plumb, O.A., 1994. Effect of heterogeneity on wood drying, part II: experimental results. *Drying Technology*, 12: 2003-2026.
- Li, X.J., Zhang, B.G., Li, W.J. and Li, Y.J., 2006. Temperature distribution inside wood during microwave-vacuum drying, *Journal of Beijing Forestry University*, 28: 128-131.
- Moren, T. and Sehlstedt-Persson, S.M.B., 1999. Heat and mass transfer during sapwood drying above the FSP: Consequences for kiln drying. . Proceeding of the 6<sup>th</sup> IUFRO Wood Drying Conference: Stellenbosch, South Africa, 205-212.
- Pang, S., 1994. High-temperature drying of Pinus radiata boards in a batch kiln. Ph.D. Thesis, University of Canterbury, New Zealand.
- Perré, P., 2003. The role of wood anatomy in the drying of wood: "great oaks from little acorns grow. Proceeding of the 8<sup>th</sup> International Conference of

همواره در جهت کاهش دما انتقال می‌یابد ولی در صورت حضور جریان سیال، در جهت جریان سیال نیز رخ می‌دهد. درحقیقت ممکن است در چوب در اثر انتقال جرم (رطوبت)، انتقال گرما نیز رخ دهد که به این پدیده اثر دوفور<sup>۱</sup> گفته می‌شود (Keey و همکاران، ۲۰۰۰). در هر دو نوع چوب به‌ویژه چوب نوئل به دلیل جریان سریع‌تر آب آزاد و بروز انتشار حرارتی در جهت جریان آب آزاد شرایط پایداری در گرادیان دما در این مرحله مشاهده نشد. جریان سریع‌تر آب آزاد در چوب نوئل ناشی از رطوبت سبز بیشتر این گونه و ضریب نفوذپذیری عرضی بالاتر آن در مقایسه با چوب راش است (Tarmian و Perré، ۲۰۰۹). نتایج این مطالعه نشان داد که انتشار حرارت در سه جهت طولی، شعاعی و مماسی در هر دو چوب راش و نوئل متفاوت است. بنابراین، انتقال حرارت در چوب طی خشک‌شدن باید در یک سیستم سه بعدی بررسی شود، چون سه راستای ارتوتروپیک چوب تفاوت آناتومیکی دارند. براساس یک اظهار نظر رایج در چوب خشک‌کنی، در مرحله خروج آزاد، دمای چوب به تدریج تا رسیدن به دمای تر کوره افزایش یافته و در دمای نزدیک به این دما ثابت می‌ماند؛ مادامی که رطوبت چوب وارد دامنه هیگروسکوپیک شود. با وجود این، بعضی از تحقیقات جدید نشان می‌دهد که دمای چوب در دامنه خروج آب آزاد ممکن است از دمای تر کوره تجاوز کرده و به دمای خشک کوره نزدیک شود (Baettig و همکاران، ۲۰۰۶؛ Perré، ۲۰۰۳). بروز این پدیده ناشی از تشکیل لایه خشک (لایه عایق سطحی) در اثر جریان توده‌ای آهسته آب آزاد است. در این تحقیق نیز در آزمایش انتقال یک‌طرفه (یک سویه) حرارت در دامنه خروج آب آزاد،

1 Dufuor effect

- Tremblay, C., Cloutier, A. and Grandjean, B., 1999. Experimental determination of the ratio of vapor diffusion to the total water movement in wood during drying. *Wood and Fiber Science*, 31(3): 235-248.
- Tremblay, C., Cloutier, A. and Fortin, Y. 2000. Experimental determination of the convective heat and mass transfer coefficients for wood drying. *Wood Science and Technology*, 34: 253-276.
- Zielonka, P. and Gierlik, E., 1999. Temperature distribution during conventional and microwave wood heating. *Holz als Roh -und Werkstoff*, 57 (4): 247-249.
- IUFRO Wood Drying, Brasov-Romania, August 24-29.
- Perré, P., 2007. *Fundamental of Wood Drying*. A.R.Bo.LOR., ENGREF, France, 366p.
- Plumb, O.A., Spolek, G.A. and Olmstead, B.A., 1985. Heat and mass transfer in wood during drying. *Journal of Heat and Mass Transfer*, 28: 1669-1678.
- Siau., J.F., 1984. *Transport processes in wood*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 245 p.
- Tarmian, A. and Perré, P., 2009. Air permeability in longitudinal and radial directions of compression wood of *Picea abies* L. and tension wood of *Fagus sylvatica* L., *Holzforschung*, 63: 352-356.

Archive of SID

## Heat transfer and evolution of temperature gradient through wood during drying phase; a case study: beech (*Fagus orientalis*) and spruce (*Picea abies*)

Tarmian, A.<sup>1\*</sup> and Sepehr, A.<sup>2</sup>

1\*- Corresponding author, Assist. Prof., Dept. of Wood and Paper Science & Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Email: tarmian@ut.ac.ir

2- M.S., Dept. of Wood and Paper Science & Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Received: July 2009

Accepted: April, 2010

### Abstract

The heat transfer through three orthotropic directions and the evolution of temperature gradient in beech (*Fagus orientalis*) and spruce (*Picea abies*) during drying were investigated. Due to low capacity of dryer, small flat-sawn boards with dimensions of 80 × 25 × 40 mm (L×R×T) were used. Then, the boards were dried at the dry-bulb temperature of 60 °C and relative humidity of 50%. Four surfaces of the boards were coated by polyurethane-coated aluminum foil to confine the heat flux along one direction. Then, the boards were thermally insulated by 50 mm-thick styrofoam. Holes of 1mm diameter were made on the board specific distances to measure the temperature using thermocouple. The results showed that the temperature of each wood increased as heat up progressed until it reached the wet-bulb temperature. Then, it remained at an almost constant value as the wet bulb temperature until the wood moisture content reached the hygroscopic range. Furthermore, the pattern of the temperature profile for both wood species was almost identical. The surface temperature of the boards increased until it reached the dry-bulb temperature of 60 °C, while the core temperature remained as the wet-bulb temperature (48-52 °C) throughout the rest of drying period.

**Keywords:** Heat transfer, temperature profile, drying, spruce, beech.