

بررسی کارایی کوره خورشیدی برای خشک کردن چوب در فصول مختلف سال در شهر کرج

اصغر طارمیان^{۱*}، سید علیرضا دهقان^۲، الناز طریق نور^۲، محمدرضا پیرامون^۲، راضیه شمسی^۲ و محمد لایقی^۲
*۱- نویسنده مسئول، دانشیار، 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
۳- استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: مرداد ۱۳۹۴ تاریخ پذیرش: خرداد ۱۳۹۵

چکیده

در این تحقیق، کارایی یک کوره خورشیدی آزمایشگاهی برای خشک کردن گونه‌های چوبی مختلف در فصول مختلف سال در شهر کرج بررسی شد. مطالعات این تحقیق در دو بخش مجزا انجام شد. در بخش اول، تخته‌های مماسی بلوط و نراد با ضخامت اسمی ۵ سانتی‌متر در فصل تابستان سال ۹۱ و در بخش دوم تخته‌های مماسی راش و صنوبر با همین ضخامت اسمی در فصل‌های پاییز سال ۹۳ و بهار سال ۹۴ در این کوره خشک شدند. در هر دو مجموعه، عملیات خشک کردن تخته‌ها همزمان در هوای آزاد نیز انجام شد. نتایج نشان داد که به‌طور متوسط دمای داخل کوره طی روز در فصل تابستان حداکثر ۳۵ درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای محیط است و دمای آن در ساعت ۱۰ تا ۱۴ در دامنه ۵۵-۷۵ درجه سانتی‌گراد متغیر بود. در هر دو مجموعه تحقیق، همه گونه‌های چوبی با سرعت و کیفیت مطلوب‌تری در کوره خورشیدی در مقایسه با هوای آزاد خشک شدند. شدت برون‌سختی و ترک‌های سطحی در تخته‌های خشک شده در کوره خورشیدی کمتر بود و تخته‌های خشک شده از شیب گرادپان نهایی رطوبت کمتری برخوردار بودند. همچنین، در مقایسه با هوای آزاد، تخته‌ها تا رطوبت نهایی کمتری در کوره خورشیدی خشک شدند.

واژه‌های کلیدی: کوره خورشیدی نیمه گلخانه‌ای، چوب، خشک کردن، فصل

مقدمه

های خورشیدی اشاره کرد. هرچند خشک کردن چوب در کوره‌های معمولی از متداول‌ترین روش‌های خشک کردن چوب محسوب می‌شود ولی به‌منظور کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های خشک کردن چوب، روش خشک کردن در کوره‌های خورشیدی به‌ویژه در کشورهای آفتاب‌خیز توسعه پیدا کرده است. با توجه به نوع گونه چوبی و ضخامت آن، میزان مصرف انرژی برای خشک کردن چوب در کوره‌های معمولی در دامنه ۱۸۷۰ تا ۳۱۱۶ کج/کیلوگرم می‌باشد (Bentayeb et al., 2008).

چوب پس از قطع و استحصال حاوی مقدار زیادی رطوبت است. برای استفاده از چوب در صنایع مبلمان، باید آن را تا رطوبت تعادل شرایط سرویس خشک کرد. خشک کردن چوب یک فرایند هزینه‌بردار است و برای خروج رطوبت از چوب نیاز به مصرف انرژی قابل توجه است. در حال حاضر، از روش‌های متعددی برای خشک کردن چوب در مقیاس صنعتی استفاده می‌شود که می‌توان به خشک کردن در کوره‌های معمولی، کوره‌های خلأ-رادایوفراکانس و کوره-

ایران کشوری است که چهارپنجم مساحت آن از تابش روزانه خوبی برخوردار می‌باشد. این انرژی رایگان را نباید از دست داد. طول مدت تابش آفتاب برای برخی از شهرهای ایران در جدول یک ارائه شده است (Haj Saghti, 2009). از لحاظ نوع عایق‌بندی، کوره‌های خورشیدی شامل انواع گلخانه‌ای^۱، نیمه‌گلخانه‌ای و با دیوارهای مات هستند. در کوره گلخانه‌ای همه قسمت‌های کوره از لایه شفاف تشکیل می‌شود. در کوره نیمه‌گلخانه‌ای فقط سقف و یا فقط سقف و دیوار جنوبی از لایه شفاف است. در کوره با دیوارهای مات، سقف و همه دیوارها مات هستند و جمع‌کننده^۲ در قسمت بیرونی کوره قرار می‌گیرد (Brodie, 2009). علاوه بر رعایت اصول طراحی و ساخت یک کوره چوب خشک‌کنی مناسب، اجرای روش و برنامه چوب خشک‌کنی مطلوب متناسب با نوع گونه چوبی و ضخامت الوار تأثیر زیادی بر کیفیت و سرعت چوب خشک‌کنی دارد. براین اساس، تاکنون برنامه‌های چوب خشک‌کنی متعددی در کشور برای خشک کردن انواع چوب‌ها ارائه شده است (Hoseinpour & Tazakor rezaee, 2011; Rahimi et al., 2011) در حال حاضر در بسیاری از کشورها مانند آمریکا، برزیل، استرالیا و آفریقای جنوبی از کوره‌های خورشیدی در مقیاس صنعتی برای خشک کردن چوب استفاده می‌شود. کوره‌های خورشیدی در مقایسه با کوره‌های معمولی هزینه عملیاتی کمتری داشته و به مهارت کمتری نیز نیاز دارند

در این کوره‌ها می‌توان چوب را با سرعت بیشتر و تا رطوبت نهایی کمتری در مقایسه با هوای آزاد خشک کرد (Ong, 1997; Haque & Langrish, 2004). همچنین، کیفیت خشک شدن چوب در کوره خورشیدی در مقایسه با هوای آزاد بهتر است (Haque & Langrish, 2004). نتایج تحقیقات Naves & Seco (۱۹۹۴) نشان داد که عملکرد کوره خورشیدی نیمه‌گلخانه‌ای از لحاظ وقوع ترک‌ها و شکاف‌ها و رطوبت نهایی در مقایسه با روش خشک کردن در هوای آزاد مطلوب‌تر است. نوع طراحی کوره خورشیدی تأثیر بسزایی بر سرعت و کیفیت خشک کردن چوب دارد (Brodie, 2009) ولی صرف نظر از نوع طراحی، مدت زمان خشک شدن چوب در کوره خورشیدی در فصل زمستان بیشتر از تابستان است (Hasan & Langrish, 2015). در جدول ۲ فهرستی از انواع کوره‌های خورشیدی ساخته شده توسط محققان متعدد و کارایی آنها ارائه شده است (Sattar, 1993). با وجود اهمیت استفاده از انرژی پاک و ارزان خورشید، متأسفانه تاکنون تحقیقی در ارتباط با خشک کردن چوب در کوره‌های خورشیدی در ایران انجام نشده است. هدف از این تحقیق، ارزیابی کارایی یک کوره خورشیدی آزمایشگاهی برای خشک کردن گونه‌های چوبی مختلف در فصول مختلف سال در شهر کرج است.

جدول ۱- طول مدت تابش آفتاب (ساعت) در شهرهای مختلف ایران و در فصل‌های مختلف (Haj Saghti, 2009)

شهر	فصل	پاییز
تهران	بهار	تابستان
تهران	۶۵۹	۱۰۱۴
تبریز	۷۰۰	۱۰۰۷
اهواز	۶۹۷	۹۳۷
یزد	۷۲۳	۹۷۴
مشهد	۶۴۰	۱۰۶۴
کرمان	۶۹۶	۹۶۲

1-Greenhouse kiln
2-Collector

جدول ۲- برخی از انواع کوره‌های خورشیدی ساخته شده توسط محققان مختلف و کارایی آنها (Sattar, 1993)

کارایی خشک‌کن	تجهیزات خشک‌کن	نوع کالکتور	نوع خشک‌کن	کشور	مرجع
بدون معایب در چوب‌های خشک شده رطوبت نهایی چوب	۲ درجه تهویه و ۲ فن	ورقه سیاه و شیشه	گلخانه‌ای	آمریکا	Johnson (1961)
خشک شده کمتر از هوای آزاد	دودکش	ورقه آهن سیاه و شیشه	گلخانه‌ای	هند	&Rehman, Chawla (1961)
سرعت خشک‌شدن ۴-۵ برابر سریع‌تر از هوای آزاد	۴ درجه تهویه و ۲ فن	ورقه فلزی سیاه و دو ورقه پلاستیک	گلخانه‌ای	تایوان	Hsia&Tao (1964)
-	۴ درجه تهویه و ۲ فن	ورقه آلومینیوم سیاه‌رنگ و پلی‌استر	گلخانه‌ای	اوگاندا	Plumptre (1984)
خشک کردن با موفقیت، غیر اقتصادی	-	ورق فلزی سیاه و شیشه	کالکتور خارجی با امکان ذخیره انرژی	استرالیا	Read (1973)
کوره رطوبت‌گیر کارآمدتر از کوره به تنهایی بود	-	دو فایبرگلاس	کوره با کالکتور خارجی	آمریکا	Chen & Helmer (1986)
-	دو درجه و یک فن	صفحه فلزی شیاردار و شیشه	نیمه گلخانه‌ای	بنگلادش	Sattar (1987)
چوب تا رطوبت نهایی با کیفیت مطلوب خشک شد	۶ درجه تهویه و ۴ فن	صفحه فلزی سیاه و پلاستیک	گلخانه‌ای	تایلند	Excel (1990)
چوب تا رطوبت نهایی با کیفیت مطلوب خشک شد	۲ درجه و ۲ فن	ورقه آلومینیومی سیاه و شیشه	نیمه گلخانه‌ای	اسپانیا	Naves &Seco (1994)
-	۴ لوله و ۲ فن	۲ لایه چوب	کوره با کالکتور خارجی	آفریقای جنوبی	Steinmann, &Vermaas (1990)
چوب سریع‌تر و با کیفیت‌تر از هوای آزاد خشک شد	-	ورقه فلزی سیاه و پلی-اتیلن	نیمه گلخانه‌ای	آمریکا	Lumley, &Choong (1979)
چوب تا رطوبت ۱۵- درصد با کیفیت خشک شد	۳ فن	دیوار سیاه و شیشه	نیمه گلخانه‌ای	چین	Guo (1981)
چوب تا رطوبت ۱۶- درصد با کیفیت خشک شد	-	ورقه فلزی سیاه شیشه و دو ورقه پلاستیک	گلخانه‌ای	برزیل	Vital (1978)

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و برش تخته‌ها

از گونه‌های راش (*Fagus orientalis*)، صنوبر (*Populus nigra*)، بلوط (*Quercus castanifolia*) و نراد (*Abies alba*) در این تحقیق استفاده شد. نمونه‌های راش و صنوبر مورد مطالعه از جنگل خیرود در منطقه نوشهر تهیه شد. نمونه‌های تهیه شده به صورت گرده‌بینه و دارای پوست و رطوبت بالای نقطه اشباع فیبر بودند. از ناحیه برون‌چوب این گرده‌بینه‌ها، تخته‌های مماسی با ضخامت اسمی ۵ سانتی‌متر، پهنای ۱۰ سانتی‌متر و طول ۲۰ سانتی‌متر تهیه شد. تخته‌های بلوط و نراد نیز از الوارهای خیس موجود در شرکت گروه چوب افشار در کرج با الگوی برش مماسی و به ابعاد فوق بریده شدند. پس از برش تخته‌ها، مقاطع آنها با رزین اپوکسی پوشش داده شد تا از خروج رطوبت از مقاطع آنها تا قبل از شروع خشک‌شدن جلوگیری شود.

روش خشک کردن

در مورد همه گونه‌های چوبی، عملیات خشک‌کردن در کوره‌خوردیدی و هوای آزاد به‌طور همزمان انجام شد. برای جلوگیری از اثرات بارندگی، تخته‌ها در هوای آزاد در محل

مسقف (هانگار) خشک شدند. این تحقیق در دو بخش مجزا انجام شد (جدول ۳). در بخش اول، تخته‌های بلوط و نراد در فصل تابستان و از اول مردادماه سال ۱۳۹۱ و در بخش دوم، تخته‌های راش و صنوبر در دو فصل پاییز و بهار خشک شدند. عملیات خشک کردن در فصل پاییز از ۵ مهرماه سال ۱۳۹۳ و در فصل بهار از ۱۵ فروردین سال ۱۳۹۴ آغاز شد. هر دو روش خشک کردن در محل گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران در کرج انجام شد. دمای داخل خشک‌کن خوردیدی توسط ترموکوپل نصب شده در داخل کوره کنترل شد و دمای هوا نیز در ساعت و تاریخ‌های مشخص شده از سایت هواشناسی استان البرز تهیه شد. علاوه بر آن، در بخش اول تحقیق، دمای محیط در ساعت معین با استفاده از یک دماسنج جیوه‌ای اندازه‌گیری و ثبت شد. جریان هوا در داخل کوره به صورت طبیعی و بدون استفاده از فن بود. کوره مذکور مجهز به رطوبت‌ساز نبود؛ بنابراین کنترل و تنظیم رطوبت نسبی در داخل کوره و در نتیجه اجرای برنامه چوب‌خشک‌کنی امکان‌پذیر نبود. لازم به ذکر است که کوره خوردیدی مورد استفاده در این تحقیق به علت سادگی در طراحی و ساخت، از رایج‌ترین انواع کوره‌های خوردیدی برای خشک کردن چوب در دنیا محسوب می‌شود.

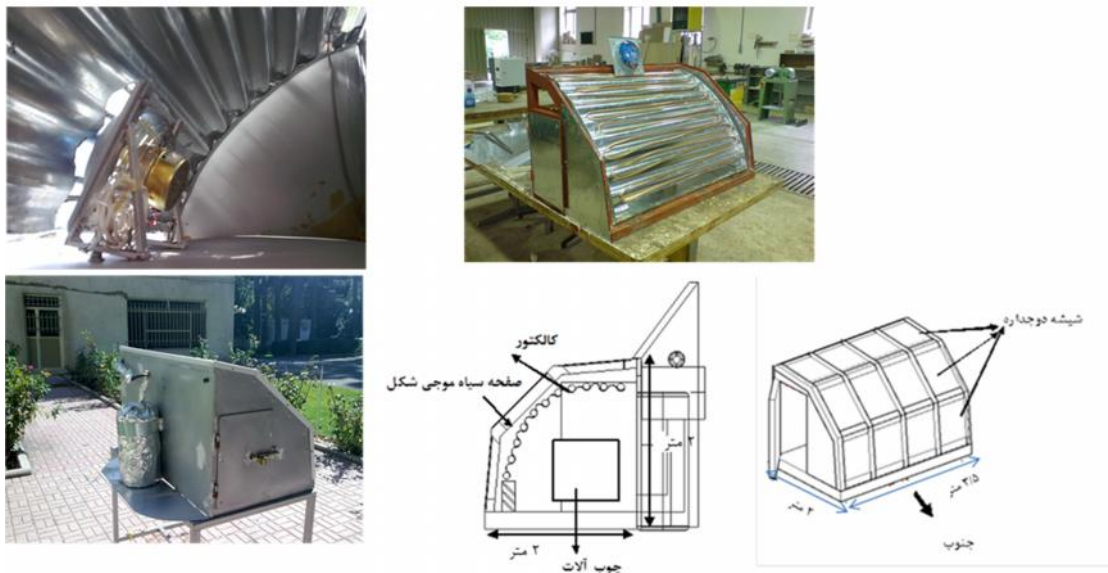
جدول ۳- مراحل انجام تحقیق و شرایط آن

مراحل تحقیق	گونه‌های مورد مطالعه	فصل و زمان خشک کردن	روش خشک کردن
۱	نراد و بلوط	تابستان، اول مرداد ۱۳۹۱	کوره خوردیدی و هوای آزاد (هانگار)
۲	صنوبر و راش	پاییز، ۵ مهرماه ۱۳۹۳ و بهار، ۱۵ فروردین ۱۳۹۴	کوره خوردیدی و هوای آزاد (هانگار)

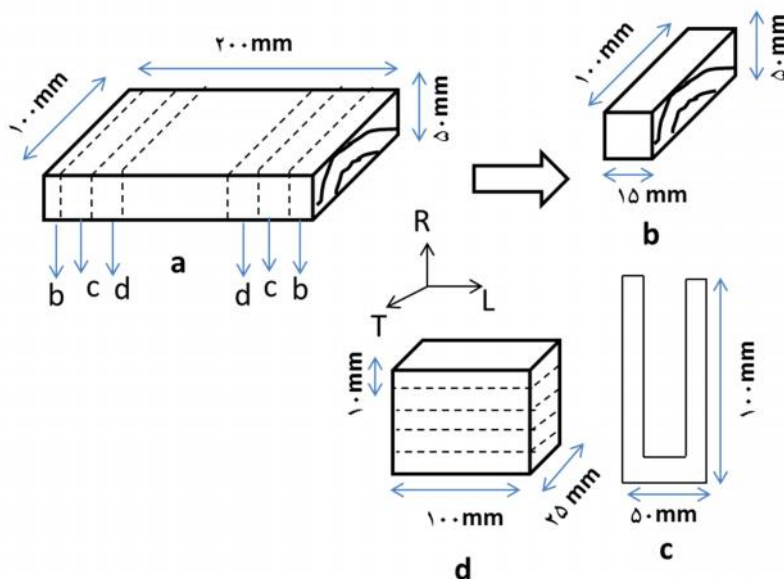
درجه طراحی شد. شیب ۱۰ درجه تحتانی کوره نیز برای جذب انرژی حداکثر به هنگام طلوع و غروب خورشید و تسهیل در گردش هوا در نظر گرفته شد. در دیوار غربی کوره، درب کاملاً عایق تعبیه شد. بدنه کوره متشکل از دو لایه ورق گالوانیزه و فوم پلی‌اورتان در بین این لایه‌ها برای عایق‌بندی

طرح و ساختمان کوره خوردیدی مورد استفاده کوره خوردیدی مورد استفاده از نوع نیمه‌گلخانه‌ای و به ابعاد داخلی برابر با $۳/۵ \times ۲ \times ۲$ متر بود (شکل ۱). به‌منظور حداکثر جذب انرژی خورشید، شیب سقف کوره متناسب با عرض جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (شهر کرج) و برابر با ۳۶

بود. شیشه به‌عنوان لایه شفاف در سقف کوره به‌کار رفت. شیشه به‌عنوان لایه شفاف، از شیشه دوجداره استفاده شد. در قسمت تحتانی شیشه برای جذب بیشتر انرژی خورشید، یک صفحه فلزی موجی و سیاه قرار گرفت.



شکل ۱- شمایی از طرح کوره خورشیدی نیمه‌گلخانه‌ای مورد استفاده



شکل ۲- (a) تخته مماسی مورد مطالعه؛ (b) الگوی برش نمونه‌های تعیین رطوبت تخته؛ (c) الگوی برش نمونه‌های اندازه‌گیری برون‌سختی؛ (d) الگوی برش نمونه‌ها برای تعیین گرادیان نهایی رطوبت

روش چیدن و دسته‌بندی نمونه‌ها

در هر روش خشک کردن از پنج تخته (پنج تکرار) استفاده شد و چیدن آنها به صورت تصادفی و در دو طبقه انجام شد، به طوری که طول نمونه‌ها در راستای طول خشک‌کن بود. اصول صحیح دسته‌بندی تخته‌ها با چوبدستک در هر دو روش خشک کردن رعایت شد. از چوبدستک‌های خشک صنوبر با ضخامت اسمی یک سانتی‌متر برای دسته‌بندی استفاده شد. عملیات خشک کردن با یکبار کوره انجام شد.

اندازه‌گیری رطوبت جاری تخته‌ها

عملیات خشک کردن از رطوبت سبز تا متوسط رطوبت نهایی کمتر از ۱۰ درصد انجام شد. قبل از خشک کردن تخته‌ها و به منظور تعیین رطوبت جاری آنها به روش توزین، آزمون‌هایی به طول ۱/۵ سانتی‌متر از هر دو مقطع نمونه‌ها بریده شد (شکل ۲b). در بخش اول تحقیق، عملیات توزین تخته‌ها برای تعیین رطوبت جاری آنها، به صورت روزانه و در بخش دوم نیز به صورت منظم و در زمان‌های مشابه، هفته‌ای دو بار انجام شد.

اندازه‌گیری پارامترهای خشک کردن

منحنی و سرعت خشک شدن

در پایان عملیات خشک کردن و با توجه به داده‌های ثبت شده توزین نمونه‌ها و رطوبت جاری آنها، منحنی خشک کردن (رطوبت در مقابل زمان) رسم شد و سرعت خشک شدن محاسبه شد.

برون سختی و شدت تنش‌های باقی‌مانده

به منظور اندازه‌گیری برون سختی (شدت تنش باقی‌مانده)، از دو مقطع تخته‌های خشک شده، نمونه‌هایی به طول ۲۵ میلی‌متر بریده شد و آزمون‌های دو شاخه تهیه شد (شکل ۲c). سپس، با استفاده از رابطه زیر برون سختی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

$$PR = (X - X') / L^2$$

در این رابطه:

PR (Prong response) = برون سختی نمونه‌ها (mm^{-1})

X = فاصله دو لبه خارجی پیش از برش (mm)

X' = فاصله دو لبه بیرونی پس از برش (mm)

L² = مجذور طول هریک از شاخه‌های آزمون (mm^2)

گرادیان نهایی رطوبت

پس از خشک کردن تخته‌ها، گرادیان رطوبت نهایی آنها به روش برش لایه‌های نازک تعیین شد (شکل ۲d). برای این منظور، ۵ لایه در راستای ضخامت تخته‌ها برش داده شد. سپس، با روش توزین و خشک کردن آنها در آون، رطوبت هریک از لایه‌ها اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری ترک‌های سطحی

پس از خشک کردن تخته‌ها، طول و فراوانی ترک‌های سطحی در سطح و لبه تخته‌ها اندازه‌گیری شد.

نتایج

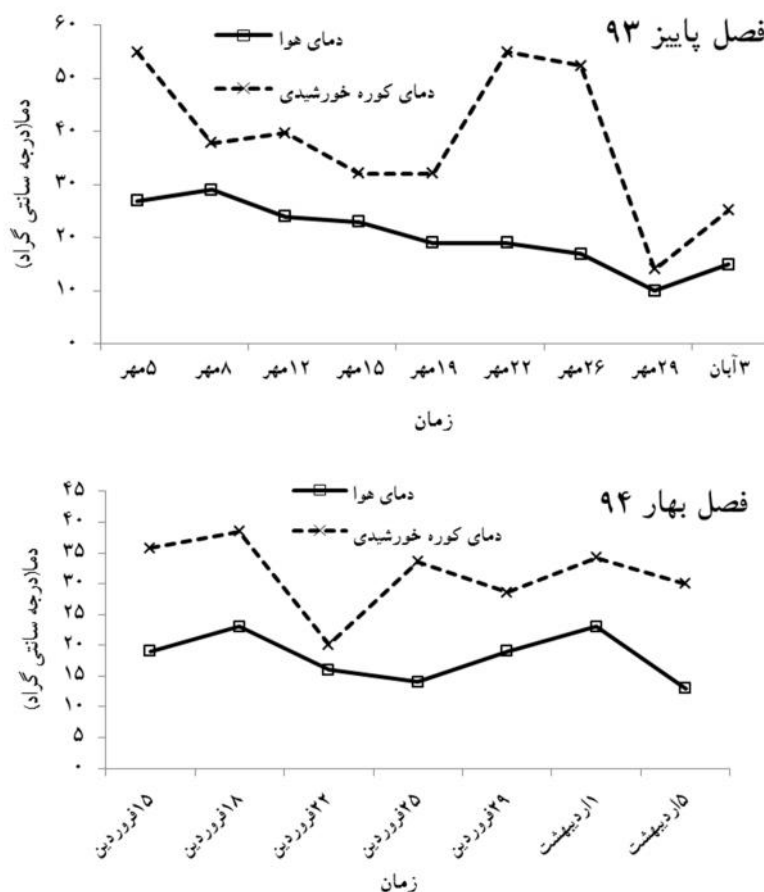
تغییرات دمای داخل کوره خورشیدی

نتایج اندازه‌گیری دما در بخش اول تحقیق نشان داد که به‌طور کلی طی روز در فصل تابستان دمای داخل کوره به-طور متوسط ۳۵ درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای بیرون کوره (دمای محیط) است. دمای داخل کوره طی روز در ساعت‌های بین ۱۰ صبح تا ۱۴ در دامنه ۵۵ تا ۷۵ درجه سانتی‌گراد متغیر بود. طی این مدت دمای محیط در دامنه ۲۵ تا ۳۴ درجه سانتی‌گراد متغیر بود. در مجموع، دمای داخل کوره طی این مدت حداقل ۳۰ درجه سانتی‌گراد و حداکثر ۴۱ درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای محیط بود. البته حداکثر دمای کوره در ساعت‌های بین ۱۲ تا ۱۴ ظهر مشاهده شد.

در شکل ۳ تغییرات دمایی در هوای آزاد و کوره خورشیدی طی دوره خشک کردن در فصل پاییز و بهار در

خورشیدی در فصل پاییز و بهار به ترتیب به طور میانگین ۱۷/۸ و ۱۳/۴ درجه سانتی‌گراد بالاتر از دمای هوای آزاد بود. لازم به ذکر است که این اندازه‌گیری‌ها در ساعت ۱۰ صبح انجام شده است.

بخش دوم تحقیق، با استفاده از اطلاعات به دست آمده از ایستگاه هواشناسی کرج (مربوط به ایستگاه دانشکده منابع طبیعی) ارائه شده است. حداکثر دمای خشک‌کن خورشیدی در فصل پاییز در دامنه ۴۰ تا ۵۵ درجه متغیر بود و در فصل بهار نیز در دامنه ۳۵ تا ۳۸ درجه متغیر بود. دمای خشک‌کن



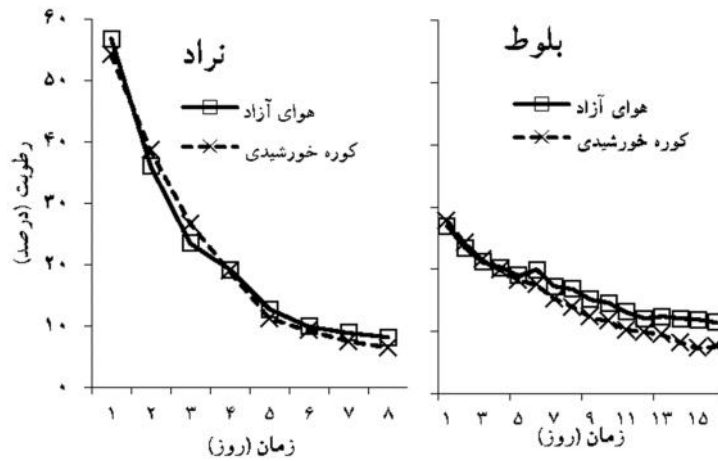
شکل ۳- تغییرات دما در هوای آزاد و کوره خورشیدی در پاییز ۹۳ و بهار ۹۴ در محل دانشکده منابع طبیعی کرج

راش در هر دو فصل بهار و پاییز در کوره خورشیدی بیشتر از هوای آزاد است ولی افزایش سرعت خشک شدن چوب در کوره خورشیدی در گونه راش محسوس‌تر از گونه صنوبر بود (شکل ۵). سرعت خشک شدن تخته‌ها در هر دو گونه در فصل بهار سریع‌تر از فصل پاییز بود. همچنین نتایج نشان داد که رطوبت نهایی تخته‌ها در کوره خورشیدی کمتر از میزان رطوبت نهایی تخته‌های خشک‌شده در هوای آزاد

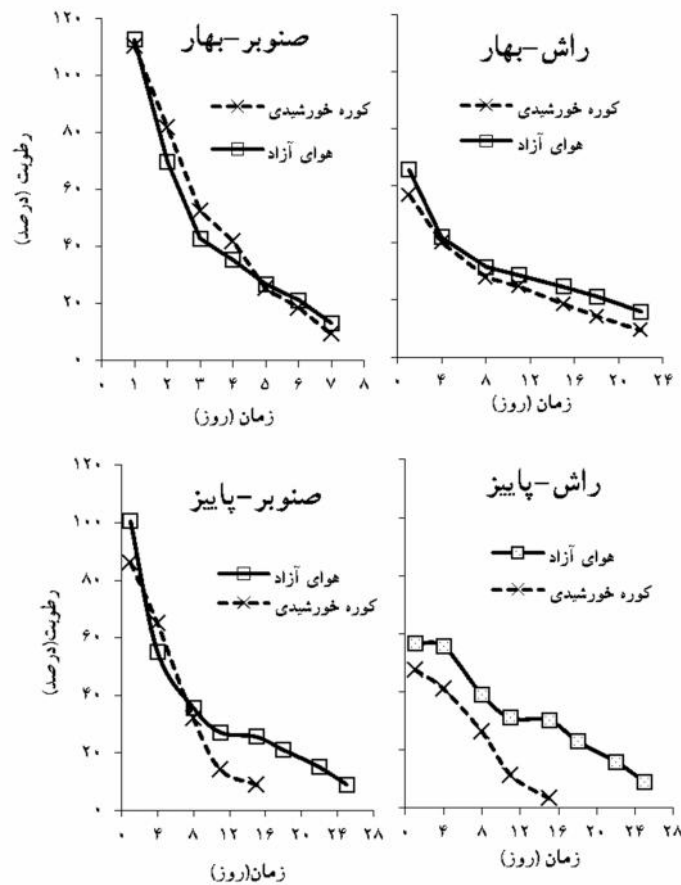
سرعت خشک شدن نتایج بخش اول تحقیق نشان داد که تفاوت محسوسی بین سرعت خشک شدن چوب نراد در کوره خورشیدی و هوای آزاد وجود ندارد؛ در مقابل، سرعت خشک شدن چوب بلوط به‌ویژه در رطوبت‌های کمتر در کوره خورشیدی بیشتر از هوای آزاد بود (شکل ۴). نتایج مرحله دوم تحقیق نیز نشان داد که سرعت خشک شدن هر دو گونه صنوبر و

معمولی سرعت خروج رطوبت در دامنه آب آزاد بیشتر از دامنه آب پیوندی بود.

است. الگوی منحنی خشک شدن هر دو نوع چوب حکایت از آن داشت که در کوره خورشیدی نیز همانند کوره‌های



شکل ۴- منحنی خشک شدن تخته‌های نراد و بلوط در فصل تابستان

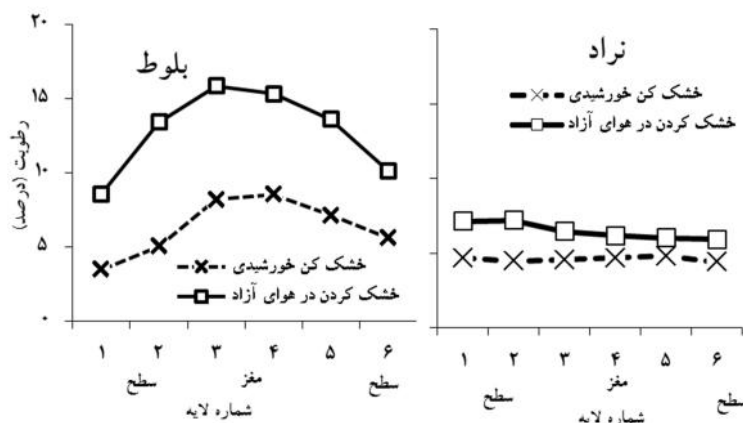


شکل ۵- منحنی خشک کردن تخته‌های راش و صنوبر در فصل‌های بهار و پاییز

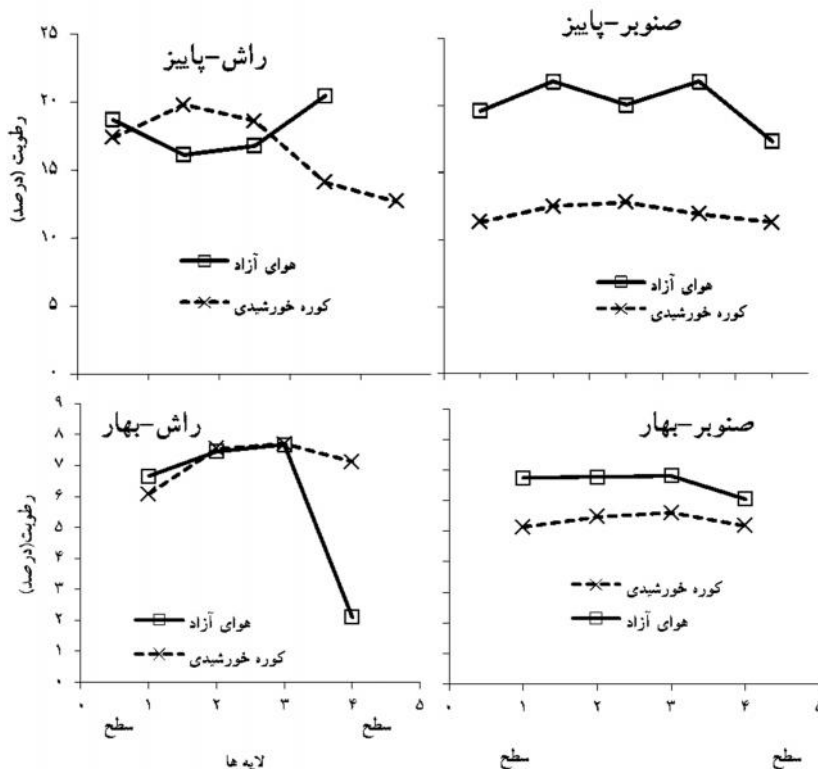
گرادیان نهایی رطوبت

نتایج هر دو مرحله تحقیق نشان داد که تخته‌های خشک شده در کوره خورشیدی از گرادیان نهایی رطوبت کمتری برخوردار هستند (شکل‌های ۶ و ۷). گرادیان رطوبت در ضخامت تخته‌های نراد در مقایسه با تخته‌های

بلوط و در تخته‌های صنوبر در مقایسه با تخته‌های راش از همگنی بیشتری برخوردار بودند. به‌طورکلی، گرادیان رطوبت نهایی در ضخامت چوب‌های با دانسیته کم در مقایسه با چوب‌های با دانسیته بالا از همگنی بیشتری برخوردار است.



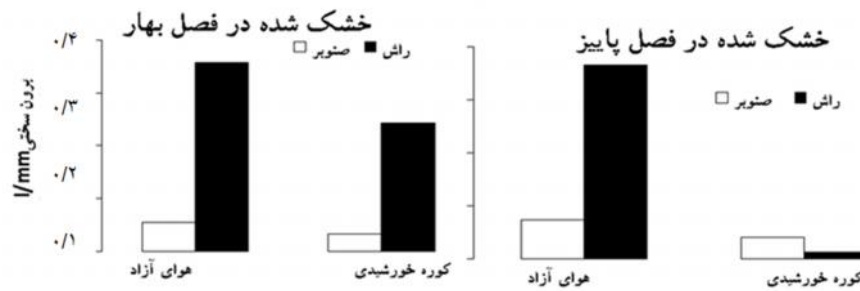
شکل ۶- گرادیان رطوبت نهایی در ضخامت تخته‌های نراد و بلوط خشک‌شده در هوای آزاد و کوره خورشیدی در فصل تابستان



شکل ۷- گرادیان رطوبت نهایی در ضخامت تخته‌های راش و صنوبر خشک‌شده در هوای آزاد و کوره خورشیدی در فصل‌های بهار و پاییز

بود. البته در همه تخته‌های خشک شده انحراف جزئی نمونه‌های دو شاخه به داخل مشاهده شد. نتایج مربوط به اندازه‌گیری برون سختی نمونه‌ها در مرحله دوم تحقیق در شکل ۸ ارائه شده است.

برون سختی
نتایج اندازه‌گیری برون سختی نشان داد که میزان برون سختی نمونه‌های خشک شده در کوره خورشیدی نسبت به نمونه‌های خشک شده در هوای آزاد به‌طور معنی‌داری کمتر



شکل ۸- برون سختی تخته‌های صنوبر و راش خشک شده در فصول پاییز و بهار

کوره خورشیدی کمتر از هوای آزاد بود و تخته‌های خشک شده در کوره خورشیدی از کیفیت مطلوب‌تری برخوردار بودند (جدول‌های ۴ تا ۷). همان‌طور که انتظار می‌رفت در هر دو روش خشک کردن، ترک‌خوردگی سطحی در تخته‌های راش بیشتر از تخته‌های صنوبر بود.

ترک‌های سطحی
در تخته‌های نراد خشک‌شده با هر دو روش آثاری از ترک‌های سطحی مشاهده نشد ولی در تخته‌های بلوط ترک‌های سطحی جدی رخ داد. در هر دو فصل بهار و پاییز شدت ترک‌خوردگی سطحی در تخته‌های خشک شده در

جدول ۴- شدت ترک‌خوردگی در لبه و سطح تخته‌های خشک شده راش در کوره خورشیدی و هوای آزاد در فصل پاییز

فرآوانی ترک‌ها (هواي آزاد)	فرآوانی ترک‌ها (کوره)	دامنه طول ترک در سطح (میلی‌متر)	فرآوانی ترک‌ها (هواي آزاد)	فرآوانی ترک‌ها (کوره)	دامنه طول ترک در لبه (میلی‌متر)
۱		۰-۱۰			۰-۱۰
	۱	۱۰-۲۰	۳	۱	۱۰-۲۰
	۲	۲۰-۳۰	۲		۲۰-۳۰
۲	۲	۳۰-۴۰			۳۰-۴۰
۳		۴۰-۵۰		۲	۴۰-۵۰
۲		۵۰-۶۰			۵۰-۶۰
۲		۶۰-۷۰	۱		۶۰-۷۰
۳		۷۰-۸۰	۱		۷۰-۸۰

جدول ۵- شدت ترک خوردگی در لبه و سطح تخته‌های خشک شده صنوبر در کوره خورشیدی و هوای آزاد در فصل پاییز

طول ترک در لبه (میلی متر)	فراوانی ترک‌ها (کوره)	فراوانی ترک‌ها (هوای آزاد)	طول ترک در سطح (میلی متر)	فراوانی ترک‌ها (کوره)	فراوانی ترک‌ها (هوای آزاد)
۰-۱۰	۱	۱	۰-۱۰	۲	۱
۱۰-۲۰	۲	۲	۱۰-۲۰	۱	۲
۲۰-۳۰	۲	۱	۲۰-۳۰	۲	۲
۳۰-۴۰			۳۰-۴۰		۲
۴۰-۵۰			۴۰-۵۰		۵
۵۰-۶۰			۵۰-۶۰		۳
۶۰-۷۰			۶۰-۷۰		
۷۰-۸۰			۷۰-۸۰		۲

جدول ۶- شدت ترک خوردگی در لبه و سطح تخته‌های خشک شده راش در کوره خورشیدی و هوای آزاد در فصل بهار

طول ترک در لبه (میلی متر)	فراوانی ترک‌ها (کوره)	فراوانی ترک‌ها (هوای آزاد)	طول ترک در سطح (میلی متر)	فراوانی ترک‌ها (کوره)	فراوانی ترک‌ها (هوای آزاد)
۰-۱۰			۰-۱۰		
۱۰-۲۰	۲	۶	۱۰-۲۰	۱	
۲۰-۳۰	۱	۵	۲۰-۳۰	۵	
۳۰-۴۰			۳۰-۴۰	۲	۱
۴۰-۵۰			۴۰-۵۰		۵
۵۰-۶۰			۵۰-۶۰	۱	۲
۶۰-۷۰			۶۰-۷۰	۱	۲
۷۰-۸۰			۷۰-۸۰		۳

جدول ۷- شدت ترک خوردگی در لبه و سطح تخته‌های خشک شده صنوبر در کوره خورشیدی و هوای آزاد در فصل بهار

طول ترک در لبه (میلی متر)	فراوانی ترک‌ها (کوره)	فراوانی ترک‌ها (هوای آزاد)	طول ترک در سطح (میلی متر)	فراوانی ترک‌ها (کوره)	فراوانی ترک‌ها (هوای آزاد)
۰-۱۰	۱		۰-۱۰	۱	۳
۱۰-۲۰	۲	۱	۱۰-۲۰	۳	۳
۲۰-۳۰		۲	۲۰-۳۰	۲	۳
۳۰-۴۰			۳۰-۴۰		۲
۴۰-۵۰		۳	۴۰-۵۰		۵
۵۰-۶۰			۵۰-۶۰		۱
۶۰-۷۰			۶۰-۷۰		
۷۰-۸۰			۷۰-۸۰	۱	۳

بحث

نتایج اندازه‌گیری تغییرات دما نشان داد که دمای کوره خورشیدی به‌ویژه در فصل تابستان بیشتر از دمای محیط است. با توجه به اینکه روش جمع‌آوری انرژی خورشید در کوره خورشیدی این تحقیق به صورت مستقیم و بدون امکان ذخیره انرژی بود، دمای کوره طی شب تقریباً برابر با دمای محیط بود. کاهش دما طی شب در این نوع کوره‌های خورشیدی و در ادامه افزایش رطوبت نسبی داخل کوره مطلوب بوده و به آزاد شدن تنش‌های باقی‌مانده چوب‌خشک‌کنی کمک می‌کند (Brodie, 2009). به علت دمای بالاتر کوره خورشیدی در مقایسه با هوای آزاد، سرعت خشک کردن هر چهار گونه چوبی مورد مطالعه (راش، بلوط، صنوبر و نراد) در کوره خورشیدی بیشتر بوده و تفاوت سرعت خشک شدن به‌ویژه برای گونه‌های با دانسیته بالا محسوس‌تر بود. به عبارت دیگر شاید بتوان نتیجه‌گیری کرد که عملکرد کوره خورشیدی برای خشک کردن گونه‌های چوبی با دانسیته بالا مطلوب‌تر است. به طوری که با افزایش دانسیته چوب، نقش انتشار آب پیوندی در مقایسه با جریان توده‌ای آب آزاد در تعیین سرعت خشک شدن چوب مهم‌تر می‌شود. تحقیقات گذشته نیز حکایت از آن دارد که در رطوبت‌های بالا تفاوت محسوسی بین دو روش خشک کردن در هوای آزاد و کوره خورشیدی وجود ندارد ولی در رطوبت‌های کمتر سرعت خشک شدن چوب در کوره خورشیدی قابل توجه است (Naoual, 2009). از طرفی، سرعت خشک شدن تخته‌های راش و صنوبر در کوره خورشیدی در فصل بهار بیشتر از پاییز بود که مؤید تفاوت عملکرد کوره خورشیدی در فصول مختلف سال می‌باشد (Hasan & Langrish, 2015).

البته تخته‌های خشک شده در کوره خورشیدی رطوبت نهایی کمتری در مقایسه با تخته‌های خشک شده در هوای آزاد داشتند و گرادیان نهایی رطوبت در آنها نیز همگن‌تر بود. سایر محققان نیز نتیجه‌گیری کردند که یکی از مزایای خشک کردن چوب در کوره خورشیدی علاوه بر سرعت بالای خشک شدن آن، این است که چوب را می‌توان تا رطوبت نهایی کمتری خشک کرد (Ong, 1997; Haque & Langrish, 2004;

Brodie, 2009). شیب کم گرادیان رطوبت در تخته‌های خشک شده در کوره خورشیدی مؤید مزیت این روش خشک کردن در خشک کردن لایه‌های مغزی چوب تا رطوبت نهایی مطلوب است.

شدت ترک‌های سطحی و برون سختی در تخته‌های خشک شده در کوره خورشیدی کمتر از تخته‌های خشک شده در هوای آزاد بود. با وجود این، شدت و فراوانی ترک‌های سطحی در تخته‌های راش و بلوط خشک شده در کوره خورشیدی قابل توجه بود. البته در بسیاری از تحقیقات، کیفیت بالای چوب‌آلات خشک شده در کوره خورشیدی گزارش شده است (Excell, 1990; Vermass & Steinmann, 1990; Haque & Langrish, 2004; Brodie, 2009). در تحقیقات بسیار محدودی، به بروز معایب جدی در چوب‌های خشک شده در کوره خورشیدی اشاره شده است (Sattar, 1993). بنابراین به نظر می‌رسد که طراحی کوره خورشیدی و نوع گونه چوبی در وقوع معایب چوب‌خشک‌کنی در این نوع کوره‌ها تعیین‌کننده باشد. یکی از دلایل وقوع ترک‌های سطحی در چوب بلوط افزایش بیش‌ازحد دمای کوره در مراحل ابتدایی خشک کردن این چوب است. بر اساس برنامه‌های چوب‌خشک‌کنی پیشنهادی برای گونه بلوط، به‌طور کلی حداکثر دما در گام‌های ابتدایی باید در حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد باشد (Salehpour & Tarmian, 2014)؛ در حالی که در کوره خورشیدی مذکور دما در شروع عملیات خشک کردن برابر با ۵۵-۷۵ درجه سانتی‌گراد بود. نتایج تحقیقات گذشته حکایت از آن دارد که پیش خشک کردن تخته‌های بلوط در هوای آزاد تا رطوبت اشباع فیر از شدت وقوع انواع ترک‌های سطحی و داخلی طی خشک شدن آن در کوره می‌کاهد (Salehpour & Tarmian, 2014).

با توجه به میانگین رطوبت نهایی مطلوب و گرادیان رطوبت همگن در ضخامت تخته‌ها، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بر خلاف چوب‌خشک‌کنی در هوای آزاد، از کوره خورشیدی می‌توان برای خشک کردن چوب‌آلات مورد مصرف مبلمان چوبی منزل استفاده کرد. در کوره خورشیدی ساخته شده، امکان ذخیره انرژی خورشید و استفاده از آن طی شب وجود نداشت، بنابراین پیشنهاد می‌شود که برای بهبود کارایی کوره

- timber: Literature review. Journal of the Institute of Wood Science, 16(4): 230-240.
- Hoseinpour, Y. and Tazakor rezaee, V., 2011. Evaluation the effect of kiln schedule on warp and surface checking in beech (*Fagus orientalis* Lipsky) at 5 cm thickness. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 26: 352-370.
- Johnson, C.L., 1961. Wind powered solar heated lumber dryer. Southern Lumberman, 203: 41-44.
- Lumley, T.G. and Choong, E.T., 1979. Technical and economical characteristics for two solar kiln designs. Forest Product Journal, 29(7): 49-56.
- Naoual, B., 2009. Modelling of a Solar Wood Dryer with Glazed Walls. Maderas. Ciencia y tecnología, 11(3): 191-205.
- Noves, H.A. and Seco, J.I.E., 1990. Solar drying of sawn timber in Spain. HolzRoh-werkstoff, 48: 173-178.
- Ong, K.S., 1997. Comparison between drying of timber in a solar dryer and in an electrically heated kiln. Drying Technology, 15(3-4): 1231-1237.
- Plumptre, R.A., Akachuku, A.E. and Sanwo, S.K., 1980. Is there a place for low cost solar heated timber dryers in Nigeria. In: Proceedings of 10th Annual Conference of Forestry Association of Nigeria. Nov. 23-28, Sokoto, Nigeria, pp. 9
- Rahimi, S., Ebrahimi, G., Parsapajouh, D., Tarmian, A. and Mansouryar, I., 2011. Preparation of a Kiln Drying Schedule for Poplar (*Populus nigra*) Lumber of 5 cm Thickness. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 1(2): 13-25.
- Read, W.R., Choda, A. and Cooper, P.I., 1973. A solar timber kiln. In: Proceedings of the sun in the service of mankind. Jul. 2-6, Paris, France, pp. 10
- Rehman, M.A. and Chawla, O.P., 1961. Seasoning of timber using solar energy, Forest Research Institute, India.
- Salehpour, S. and Tarmian, A., 2014. Effect of Drying Method on the Permeability Coefficient of Oak Wood (*Quercus infectoria*). Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 5(1): 1-9.
- Sattar, M.A., 1987. Comparative studies of wood seasoning with a special reference to solar drying. BanoBiggyan Patrika, 15: 30-42.
- Sattar, M.A., 1993. Solar drying of timber—a review. Holz als Roh- und Werkstoff, 51(6): 409-416.
- Steinmann, D.E. and Vermaas, H.F. 1990. Solar drying of sawn timber in Spain. HolzRoh-werkstoff, 48: 173-178.
- Tao, Y. and Hsia, S., 1964. Lumber solar drying experiment at Taichung, National Chung Hsing University, Taiwan.
- Vital, B.R., 1978. Use of solar energy for drying wood. Revista Ceres, 23(125): 1-10.

نسبت به طراحی سیستم ذخیره انرژی خورشید در آن اقدام شود. همچنین، نصب سلول فتوولتائیک بر روی کوره به منظور تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز فن‌ها با هدف افزایش سرعت خروج رطوبت به ویژه در دامنه آب آزاد پیشنهاد می‌شود. برای کاهش وقوع ترک‌های سطحی چوب‌های مورد مطالعه به ویژه گونه‌های راش و بلوط می‌توان در مراحل ابتدایی خشک شدن، با پوشاندن بخشی از سطح کالکتور از افزایش بیش از حد دمای کوره جلوگیری کرد و یا نسبت به راه‌اندازی رطوبت‌ساز اقدام کرد. در مجموع، با توجه به توانمندی بالا در بسیاری از مناطق کشور و موفقیت‌آمیز بودن عملکرد کوره خورشیدی ساخته شده، تحقیق و پژوهش در راستای توسعه کوره‌های خورشیدی در کشور با هدف کاهش هزینه‌های خشک کردن چوب و در نتیجه قیمت تمام شده آن توصیه می‌شود.

سپاسگزاری

این تحقیق در قالب یک طرح پژوهشی با حمایت مالی معاونت علمی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران انجام شده است که بدین وسیله سپاسگزاری می‌گردد.

منابع مورد استفاده

- Bentayeb, F., Bekkioui, N. and Zeghmami, B., 2008. Modelling and simulation of a wood solar dryer in a Moroccan climate. Renewable Energy, 33(3): 501-506.
- Brodie, G., 2009. Innovative wood drying: Applying Microwave and solar technologies to wood drying, VDM Verlag Dr. Muller, USA, 120 p.
- Bux, M., Bauer, K., Muhlbauer, W. and Kohler, B., 2001. Solar-assisted drying of timber in industrial scale. South African Forestry Journal. 192: 73-78.
- Chen, P.Y.S. and Helmer, W.A., 1986. Drying red oak in an improved solar dehumidifier Kiln. US Department of Agriculture, USA.
- Excell, R.H.B., 1990. Solar timber seasoning in Asia. In: Proceedings of the first world Renewable Energy. Sept. 22-28, UK, pp. 983-985.
- Guo, Z., 1981. Drying lumber with solar energy, Industry of Forestry Products, 1: 7-8
- Haj Saghti, A., 2009. Solar energy: Fundamental and Application, University of Science & Technology Press, Tehran, 324 p.
- Haque, M.N. and Langrish, T.A.G., 2004. Mathematical modelling of solar kilns for drying

Investigation on the performance of solar kiln for wood drying in different seasons in Karaj

A. Tarmian^{*1}, S. A. Dehghan², E. Tarighnoor², M. Pyramoon²
R. Shamsi² and M. Layeghi³

1*- Corresponding author, Associate prof., Department of Wood and Paper Science & Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran, E-mail: tarmian@ut.ac.ir

2-M.Sc, graduated, Department of Wood and Paper Science & Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Assistant prof., Department of Wood and Paper Science & Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: Aug., 2015

Accepted: June, 2016

Abstract

In this research, the performance of a semi-greenhouse solar kiln was evaluated for drying different wood species in different season in Karaj. This study was carried out in two separate parts. In the first part, the flat-sawn boards of oak and fir wood with a nominal thickness of 50 mm were dried during summer of the year 2012. In the second part, the flat-sawn boards of beech and poplar wood with the same thickness were dried in autumn, 2014 and spring, 2015. For both parts, the boards were also air-dried. The temperature measured inside the solar kiln was 35 °C greater than that outside during daytime and the kiln temperature ranged from 55 to 75°C during 10 a.m. to 2 p.m. In both parts of research, all wood species dried in the solar kiln faster with better quality compared to those air-dried. The severity of casehardening and surface checking in the boards dried in the solar kiln was lower and more homogenous moisture profile was observed. In addition, the final moisture content was lower for the boards dried in the solar kiln.

Key words: Semi-green house; wood, drying, season.