

مقایسه کارایی کوره رادیوفرکانس/خلأ و کوره معمولی برای خشک کردن چوب کاج جنگلی

علیرضا نیکوتدبیر^۱، نوید شریفی^۱، اصغر طارمیان^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۸

چکیده

در این تحقیق، عملکرد فناوری رادیوفرکانس/خلأ در مقایسه با روش جابه‌جایی هوای گرم برای خشک کردن چوب کاج جنگلی (*Pinus sylvestris*) بررسی شد. تخته‌های مماسی با مقدار میانگین چوب‌درون ۷۲/۹ درصد، میانگین رطوبت اولیه ۶۰ درصد و ابعاد ۱۲۰×۲۱×۴/۸ سانتی‌متر بریده شدند. تخته‌ها با سه روش خشک شدند: ۱. کوره صنعتی معمولی به روش جابه‌جایی هوای گرم در دمای کم (حداکثر دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد)؛ ۲. دمای متوسط (حداکثر دمای ۷۱/۳ درجه سانتی‌گراد) مطابق برنامه چوب‌خشک‌کنی اصلاح‌شده در ۲۰ گام؛ ۳. کوره رادیوفرکانس/خلأ. عملیات خشک کردن با فناوری رادیوفرکانس/خلأ در کوره صنعتی با توان ۱۰۰ کیلووات و فرکانس ۵۰ مگاهرتز مطابق برنامه چوب‌خشک‌کنی در شش گام و با حداکثر دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. سپس رطوبت نهایی، گرادیان رطوبت، شدت تغییر رنگ، معایب و تنش‌های چوب‌خشک‌کنی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که افزودن بر کاهش محسوس در مدت زمان خشک شدن تخته‌ها در کوره رادیوفرکانس/خلأ، شدت ترک خوردگی سطحی و مقطعی تخته‌ها در این کوره نسبت به کوره معمولی به طور معنی‌داری کمتر است. ترک‌های داخلی در هیچ یک از تخته‌ها رخ نداد. حداکثر شدت پيچش و ناودانی تخته‌ها به ترتیب ۴/۸ و ۵/۴ میلی‌متر بود و تفاوتی بین عملکرد سه روش چوب‌خشک‌کنی مشاهده نشد. برخلاف تخته‌های خشک‌شده در کوره‌های معمولی، تخته‌های خشک‌شده در کوره رادیوفرکانس/خلأ فاقد برون‌سختی بودند. گرادیان رطوبت در همه تخته‌های خشک‌شده کمتر از ۲ درصد و قابل اغماض بود. شدت تغییر رنگ تخته‌های خشک‌شده با فناوری رادیوفرکانس/خلأ به‌ویژه در ناحیه چوب‌درون کمتر از تخته‌های دیگر بود.

واژه‌های کلیدی: خشک کردن، رادیوفرکانس/خلأ، روش جابه‌جایی هوای گرم، کاج جنگلی، کوره چوب‌خشک‌کنی.

مقدمه

خشک مربوط به عملیات خشک کردن است [۱]. به همین دلیل با هدف افزایش سرعت خشک شدن چوب و بهبود کیفیت چوب خشک‌شده، تاکنون روش‌های متعددی پیشنهاد شده است که در بین آنها در حال حاضر روش خشک کردن در کوره معمولی به روش جابه‌جایی هوای گرم متداول‌ترین روش خشک کردن چوب به شمار می‌آید [۲]. با این حال، این روش خشک کردن به‌ویژه برای خشک کردن الوارهای پهن برگ با ضخامت زیاد و

خشک کردن چوب فرایندی مهم در فراوری اولیه چوب و مستلزم صرف مدت زمان، هزینه و انرژی به نسبت زیاد است. از طرفی استفاده نکردن از روش و شرایط خشک کردن مناسب، موجب بروز معایب و هدر رفتن آن می‌شود. دست‌کم ۳۰ درصد از هزینه کل الوار برش‌خورده

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۲۶۳۲۲۴۹۳۱۱

که سرعت خشک کردن در این روش بسته به نفوذپذیری چوب، هدایت حرارتی آن و روش حرارت‌دهی سه تا هفده برابر خشک کردن به روش معمولی است [۱۰]. گولر و دیلک (۲۰۲۰) چوب‌های گردو و بلوط با ضخامت اسمی به ترتیب ۷/۸ و ۶ سانتی‌متر را در کوره رادیوفرکانس/خلأ در مقایسه با هوای آزاد خشک کردند. مدت زمان خشک شدن تا ۱۰ برابر کاهش یافت، ولی نمونه‌های خشک‌شده با روش رادیوفرکانس/خلأ مقاومت‌های مکانیکی کمتری داشتند [۱۱]. آنانیاس و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که با استفاده از روش رادیوفرکانس/خلأ می‌توان تا حد زیادی از شدت هم‌کشیدگی و چین‌خوردگی سلولی چوب اکالیپتوس (*Eucalyptus nitens*) کاست و چوب خشک‌شده با این روش در مقایسه با کوره معمولی ترک‌های سطحی کمتری داشت [۱۲]. طارمیان و همکاران (۲۰۲۰) کارایی روش رادیوفرکانس/خلأ را برای خشک کردن دیسک‌های چوبی شش‌گونه چوبی (گردوی اروپایی، گیلاس سیاه، آزاد، کاج جنگلی، زبان‌گنجشک، توسکا) به قطر ۳۰ میلی‌متر بررسی کردند و دریافتند که برنامه چوب‌خشک‌کنی برای خشک کردن دیسک‌های گردو موفق‌تر بود و همه دیسک‌های گردو فاقد ترک ۷ شکل بودند [۱۳]. برای خشک کردن سریع چوب همزمان با دستیابی به کیفیت مطلوب چوب خشک‌شده، از فناوری رادیوفرکانس/خلأ می‌توان به‌خوبی بهره برد. چوب کاج جنگلی (*Pinus sylvestris*) یکی از چوب‌های مهم و پرمصرف وارداتی در ایران محسوب می‌شود. افزون‌بر مشخصات گونه چوبی، برنامه چوب‌خشک‌کنی بهینه در یک کوره رادیوفرکانس/خلأ باید متناسب با ویژگی‌های فنی آن مانند توان کوره، فرکانس و ولتاژ الکترودها تدوین شود. بنابراین هدف تحقیق حاضر، بررسی عملکرد کوره رادیوفرکانس/خلأ در توان زیاد (۱۰۰ کیلووات) و فرکانس زیاد (۵۰ مگاهرتز) برای خشک کردن الوارهای کاج جنگلی در مقایسه با کوره معمولی به روش جابه‌جایی هوای گرم بود.

حساس به معایب چوب‌خشک‌کنی، زمان‌بر بوده و احتمال وقوع انواع معایب بیشتر است. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، روش خشک کردن تحت خلأ نخستین بار در سال ۱۹۰۴ در آمریکا پیشنهاد شد و اولین خشک‌کن صنعتی رادیوفرکانس/خلأ (RF/V)^۱ ظاهراً در دهه ۱۹۶۰ توسط آکادمی علوم روسیه در مسکو ساخته شد [۳، ۴]. در بین روش‌های مختلف خشک کردن چوب تحت خلأ، از دهه ۱۹۹۰ روش خشک کردن در کوره رادیوفرکانس/خلأ به عنوان یکی از برترین روش‌های تجاری برای خشک کردن چهارتراش‌ها و الوارهای ضخیم در برخی کشورها توسعه یافته است [۴، ۵].

در روش خشک کردن تحت خلأ، چوب در فشار کمتر از فشار اتمسفر خشک می‌شود؛ شرایطی که در آن آب در دمای کمتر می‌جوشد و سرعت خشک شدن چوب به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد و مزایای خشک کردن چوب در دمای زیاد حاصل می‌شود [۶-۸]. در فرایند خشک کردن تحت رادیوفرکانس/خلأ، چوب تحت تأثیر میدان الکترومغناطیس متناوب قرار می‌گیرد و این مسئله موجب جنبش مولکول‌های قطبی آب و در نتیجه جذب انرژی و تولید گرما می‌شود [۲].

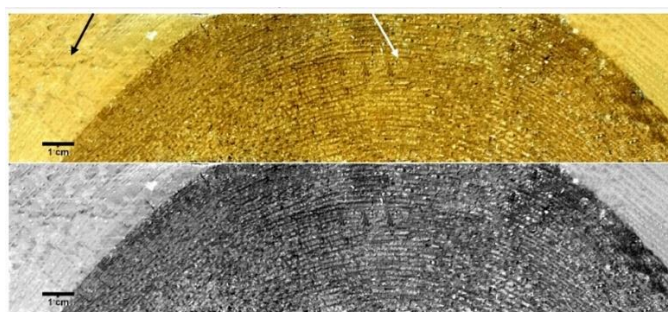
همانند خشک کردن در کوره معمولی، برای خشک کردن چوب در کوره رادیوفرکانس/خلأ نیز باید شرایط خشک کردن متناسب با گونه چوبی بهینه شود تا ضمن افزایش سرعت چوب‌خشک‌کنی بتوان به کیفیت مطلوب چوب خشک‌شده دست یافت. جانگ و همکاران (۲۰۰۳) عملکرد سه روش چوب‌خشک‌کنی تحت خلأ را برای خشک کردن چهارتراش‌های کاج سرخ (*P. densiflora*) به ابعاد ۱۴ و ۱۶/۵ سانتی‌متر مربع بررسی کردند و دریافتند که گرادیان رطوبت در روش رادیوفرکانس/خلأ کمتر بود و در هیچ یک از روش‌ها ترک داخلی رخ نداد [۹]. چن و لم (۲۰۰۷) با بررسی خشک کردن چوب بلوط قرمز تحت خلأ بیان کردند

مواد و روش‌ها

نمونه برداری

تخته‌های کاج جنگلی (*Pinus sylvestris*) با رطوبت اولیه ۶۰ درصد و با الگوی برش تقریباً مماسی و به ابعاد $120 \times 21 \times 4/8$ سانتی‌متر (سانتی متر) به کار گرفته شدند. در ابتدا با استفاده از دوربین عکاسی، تصاویر مقاطع عرضی تخته‌ها تهیه شد و مقدار درون‌چوب آنها با نرم‌افزار Image J و با کمک ابزار Contrast برای تمایز

درون‌چوب و برون‌چوب مطابق شکل ۱ تعیین شد. به این منظور با استفاده از منوی اندازه‌گیری، مساحت سطح مقطع الوار و قسمت درون‌چوب اندازه‌گیری شد. به طور متوسط نسبت درون‌چوب به کل مقطع الوار ۷۲/۹ درصد بود. به منظور جلوگیری از خروج رطوبت و وقوع ترک خوردگی، مقاطع تخته‌ها بلافاصله با رنگ پوششی اندود شد و تخته‌ها با استفاده از نایلون پلاستیکی بسته‌بندی شدند.



شکل ۱. اندازه‌گیری مقدار درون‌چوب تخته‌ها با استفاده از نرم‌افزار Image J؛ پیکان سفید و سیاه به ترتیب نواحی درون‌چوب و برون‌چوب را نشان می‌دهد

شناسایی گونه

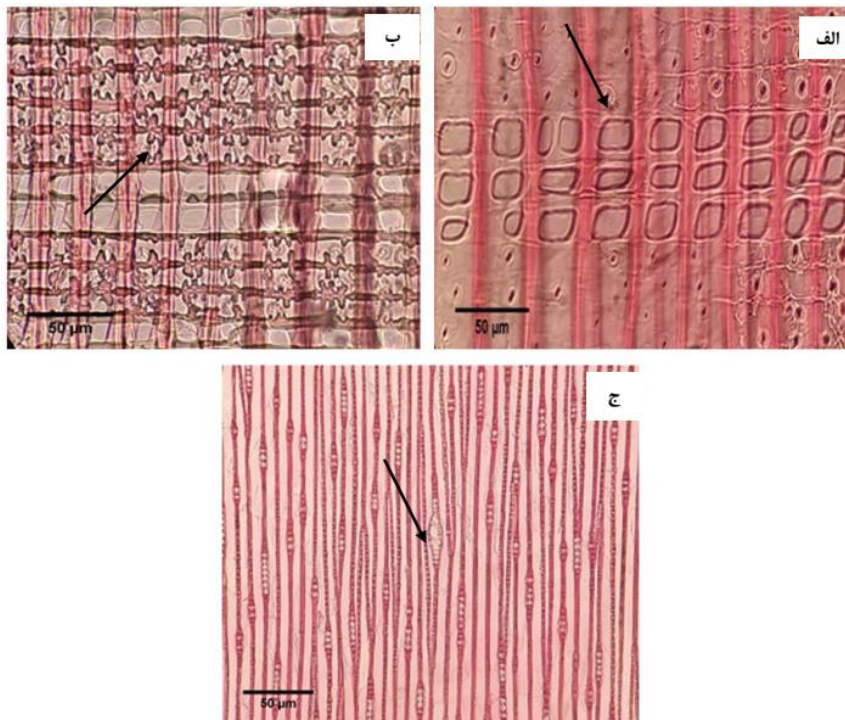
برای اطمینان از اینکه چوب خریداری شده از گونه کاج جنگلی است، شناسایی گونه با استفاده از مطالعات میکروسکوپ نوری و کلید شناسایی IAWA^۱ انجام گرفت. به این منظور با استفاده از میکروتوم لغزشی GSL1، مقاطع میکروسکوپی به ضخامت ۱۵-۱۰ میکرومتر آماده و با محلول سافرانین ۰/۵ درصد رنگ‌آمیزی شده و سپس زیر میکروسکوپ نوری Olympus BH2 بررسی شدند. در این بررسی از پارامترهای آناتومی مانند وجود منافذ میدان تلاقی پنجره‌شکل، تراکئیدهای اشعه‌ای دنداندار و پره‌های چوبی دوک شکل (حاوی کانال رزینی) برای شناسایی گونه چوبی استفاده شد (شکل ۲). نتایج نشان داد که چوب از گونه کاج جنگلی است.

روش خشک کردن

برای خشک کردن تخته‌ها از سه روش استفاده شد: الف) خشک کردن در کوره صنعتی معمولی (جابه جایی هوای گرم) در دمای کم تحت شرایط ثابت و با حداکثر دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد؛ ب) خشک کردن در کوره صنعتی معمولی مطابق برنامه چوب خشک‌کنی ارائه شده در جدول ۱ در بیست گام نزدیک به برنامه چوب خشک‌کنی با کد T3-F1 و با حداکثر دمای ۷۱/۳ درجه سانتی‌گراد؛ ج) خشک کردن در کوره صنعتی رادیوفرکانس/خلأ jyc مدل GJG-14II-50B-JY متعلق به شرکت چوب بهروز واقع در شهرک صنعتی زاویه (شکل ۳) با توان ۱۰۰ کیلووات در فرکانس ۵۰ مگاهرتز مطابق برنامه چوب خشک‌کنی در شش گام و با حداکثر دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد (جدول ۲). مشخصات فنی کوره رادیوفرکانس/خلأ در جدول ۳ ارائه شده است. برای بررسی تأثیر دمای خشک کردن بر

گرفت. پس از خشک کردن، رطوبت نهایی نمونه‌ها با رطوبت‌سنج الکتریکی تماسی اندازه‌گیری شد.

ویژگی‌های کیفی مورد نظر، خشک کردن به روش جابه جایی هوای گرم در دو دمای کم و متوسط انجام



شکل ۲. تصویر میکروسکوپی نوری از مقطع عرضی. مقیاس ۵۰ میکرون (الف) منافذ میدان تلاقی از نوع پنجره‌شکل؛ (ب) تراکئیدهای اشعه‌ای دنداندار؛ و (ج) پره‌های چوبی دوک‌شکل (فلش سیاه)

جدول ۱. برنامه خشک کردن نمونه‌ها در کوره با دمای متوسط

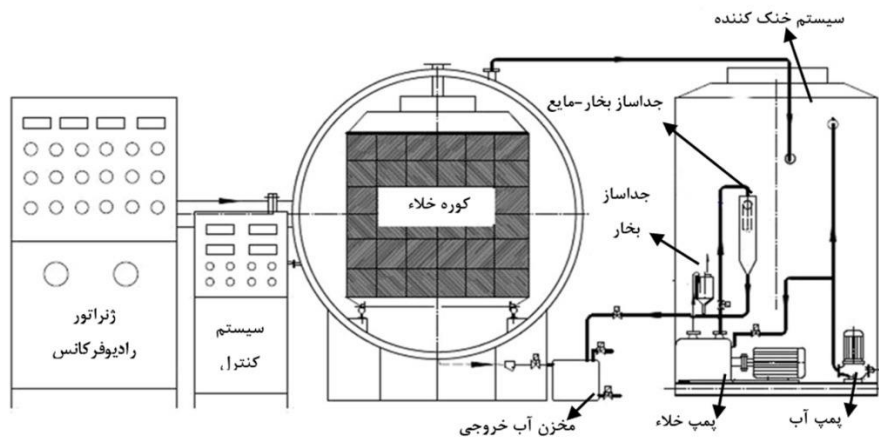
گام	دما (درجه سانتی‌گراد)	رطوبت نسبی کوره (درصد)	رطوبت تعادل (درصد)	گام	دما (درجه سانتی‌گراد)	رطوبت نسبی کوره (درصد)	رطوبت تعادل (درصد)
۱	۲۰/۱	۴۸/۳	۶/۷	۱۱	۵۵/۱	۴۱/۶	۶/۷
۱	۳۲/۳	۴۸/۲	۶/۴	۱۲	۵۸/۷	۴۰/۷	۶/۴
۲	۳۷/۶	۷۱/۵	۶/۱	۱۲	۵۷/۸	۳۷/۱	۶/۱
۳	۴۰/۸	۷۰/۹	۵/۷	۱۳	۶۰/۲	۳۵/۷	۵/۷
۳	۳۹/۰	۷۵/۲	۵/۴	۱۳	۶۱/۶	۳۳/۶	۵/۴
۴	۴۳/۶	۶۷/۶	۴/۴	۱۴	۶۳/۶	۲۷/۰	۴/۴
۵	۴۵/۹	۶۱/۸	۴/۸	۱۴	۶۲/۳	۲۹/۱	۴/۸
۶	۴۵/۶	۵۸/۰	۳/۸	۱۴	۶۲/۲	۲۲/۴	۳/۸
۷	۴۷/۴	۵۶/۵	۳/۶	۱۴	۶۳/۳	۲۱/۰	۳/۶
۸	۴۲/۰	۴۹/۸	۳/۲	۱۵	۶۵/۲	۱۸/۹	۳/۲
۸	۵۰/۲	۵۰/۶	۲/۴	۱۶	۷۰/۳	۱۴/۶	۲/۴
۹	۵۱/۳	۵۸/۸	۲/۷	۱۷	۶۹/۶	۱۶/۵	۲/۷
۱۰	۵۴/۶	۴۰/۱	۲/۴	۱۷	۶۸/۰	۱۴/۶	۲/۴
۱۱	۵۵/۳	۳۹/۲	۲/۴	۱۸	۷۱/۳	۱۵	۲/۴
۱۱	۵۶/۰	۳۹/۵	۱/۷	۱۹	۷۱/۱	۱۰/۷	۱/۷
۱۱	۵۵/۷	۴۶/۱	۲/۲	۲۰	۶۵/۹	۱۳/۱	۲/۲

جدول ۲. برنامه چوب خشک کنی تحت شرایط رادیوفرکانس/خلأ

گام	مقدار پایه جریان آند (kV)	انحراف جریان آند (kV)	بیشترین دما (°C)	انحراف دما (°C)	خلأ مخزن (bar)	گرادیان دما در چوب (°C)
۱	۲/۸	۰/۲	۴۰	۲	۰/۰۲	۵
۲	۲/۸	۰/۲	۴۵	۲	۰/۰۲	۴
۳	۲/۸	۰/۲	۵۰	۲	۰/۰۱۵	۳
۴	۲/۶	۰/۲	۵۵	۲	۰/۰۱۵	۲
۵	۲/۶	۰/۲	۶۰	۲	۰/۰۱۲	۱
۶	۲/۶	۰/۲	۶۵	۲	۰/۰۱۲	۱

جدول ۳. مشخصات فنی کوره رادیوفرکانس/خلأ

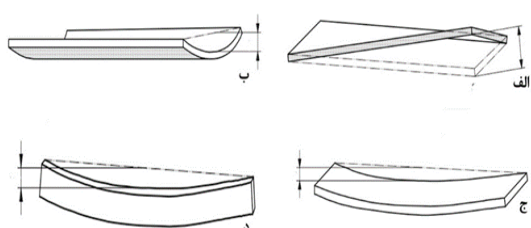
مقدار خلأ	۰/۰۸MPa
توان کوره	۱۰۰ Kw
دمای کار	۵۰-۹۰ °C
فاصله الکترودها	۳۵-۴۰cm
جنس الکترود	صفحات آلومینیومی
ضخامت الکترود	۲ mm
فرکانس	۵۰-MHz
ظرفیت کوره	۱۴ m ³



شکل ۳. کوره رادیوفرکانس/خلأ استفاده شده

شدت ترک خوردگی و تغییر شکل

طول ترک خوردگی سطحی (در پهنا و لبه‌ها) و مقطعی نمونه‌ها با استفاده از خط‌کش میلی‌متری اندازه‌گیری و به صورت کل طول ترک‌ها (مجموع طول ترک‌ها) به‌طور مجزا گزارش شد. انواع تغییر شکل (پیچش، کمائی، خمیدگی و ناودانی) نیز مطابق استاندارد ISO 9709 (۲۰۰۵) (شکل ۴) و بر مبنای حداکثر انحراف اندازه‌گیری شد [۱۴].



شکل ۴. انواع تغییر شکل الوار در اثر خشک کردن و روش اندازه‌گیری آنها. الف) پیچش؛ ب) ناودانی؛ ج) کمائی؛ د) خمیدگی [۱۴]

تجزیه و تحلیل آماری

نمونه برداری در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام گرفت و برای هر روش خشک کردن از شش تخته استفاده شد. مقایسه معنی داری داده‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه دانکن در سطح ۰/۰۵ انجام گرفت.

نتایج و بحث

سرعت خشک شدن

در جدول ۴ ویژگی‌های کیفی تخته‌های خشک‌شده ارائه شده است. مدت زمان خشک شدن تخته‌ها در کوره با دمای کم تا رطوبت نهایی ۷ درصد برابر با ۳۰ روز، در کوره با دمای متوسط تا رطوبت نهایی ۶ درصد برابر با ۲۰ روز و در کوره رادیوفرکانس/خلأ تا رطوبت نهایی ۱۳ درصد برابر با ۳ روز بود. دلیل خروج سریع‌تر رطوبت چوب با استفاده از فناوری رادیوفرکانس/خلأ کاهش دمای تبخیر آب موجود در چوب در نتیجه اعمال خلأ و سازوکار گرمادهی حجمی طی تابش

اندازه‌گیری ویژگی‌های کیفی تخته‌های خشک‌شده

برون‌سختی^۱

با برش نمونه‌های دوشاخه شدت تنش‌های باقی‌مانده (برون‌سختی) با استفاده از معادله ۱ اندازه‌گیری شد. در این معادله PR، واکنش آزمونه برون‌سختی، X و X'، به ترتیب فاصله دو لبه بیرونی آزمونه پیش از برش و پس از برش برحسب میلی متر و l^2 ، مجذور طول هر یک از آزمونه‌هاست.

$$PR = \frac{x - x'}{l^2} \quad (1)$$

گرادیان نهایی رطوبت

برای تعیین گرادیان نهایی رطوبت (تفاوت میانگین رطوبت نهایی در سطح و مغز تخته‌ها)، به فاصله ۳۰ سانتی‌متر از مقاطع تخته‌های خشک‌شده، نمونه‌هایی به ابعاد ۲۱×۲۱ سانتی‌متر بریده شد و سپس هر یک از آنها به سه لایه به ضخامت ۱/۴ سانتی‌متر در راستای ضخامت برش خورد. مقدار رطوبت هر یک از لایه‌ها به روش خشک کردن در آن تعیین شد.

تغییر رنگ

به‌منظور اندازه‌گیری شدت تغییر رنگ سطحی نمونه‌ها در اثر خشک شدن، از دستگاه رنگ سنج پرتابل مدل NR110 پارامترهای رنگ a^* ، b^* ، L^* براساس سیستم CIE-Lab اندازه‌گیری شد. رنگ‌سنجی در دو ناحیه برون‌چوب و درون‌چوب قبل و بعد از خشک شدن انجام گرفت. شاخص تغییر رنگ (ΔE) نیز با استفاده از معادله ۲ محاسبه شد:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2} \quad (2)$$

و $\Delta b = b_2^* - b_1^*$ و $\Delta a = a_2^* - a_1^*$ ، $\Delta L = L_2^* - L_1^*$ و زیرنویس‌های ۱ و ۲ به ترتیب بیانگر پارامتر رنگی قبل و بعد از خشک کردن است.

خشک کردن چهارتراش و الوارهای بسیار ضخیم و حتی گرده‌بینه‌ها فناوری کارآمدی باشد [۵].

گرادیان رطوبت

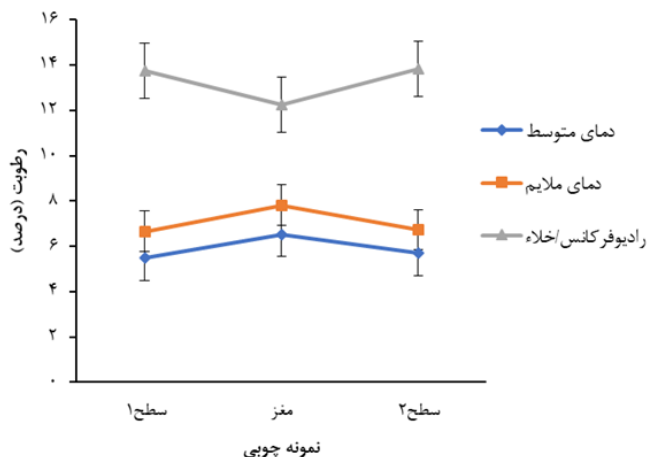
برخلاف روش خشک کردن در کوره معمولی، الگوی گرادیان رطوبت معکوسی در تخته‌های خشک‌شده در کوره رادیوفرکانس/خلأ شکل گرفت، به عبارت دیگر مقدار رطوبت نهایی در مغز تخته‌ها کمتر از رطوبت سطح آنها بود (شکل ۵). این مسئله ممکن است ناشی از شکل‌گیری الگوی معکوس گرادیان دما در تخته‌ها در طی خشک شدن با این فناوری باشد [۲]. در مجموع، گرادیان نهایی رطوبت در تخته‌های خشک‌شده کمتر از ۲ درصد و قابل اغماض بود. لئو و همکاران (۲۰۱۹) نیز گرادیان رطوبت کمی در چهارتراش افرای خشک‌شده به ابعاد $1000 \times 75 \times 75$ میلی‌متر با استفاده از کوره رادیوفرکانس/خلأ گزارش کردند [۱۵].

برون‌سختی

برخلاف گرادیان رطوبت، برش نمونه‌های دوشاخه نشان داد که تخته‌های خشک‌شده به روش جابه‌جایی هوای گرم دارای تنش‌های باقی‌مانده (برون‌سختی) زیادی بودند و شاخه‌ها بلافاصله بعد از برش به سمت هم حرکت کردند، درحالی که تخته‌های خشک‌شده با کوره رادیوفرکانس/خلأ تقریباً فاقد برون‌سختی بودند (شکل ۶-الف). [۲]. عوامل متعددی در بروز برون‌سختی در طی خشک کردن چوب مؤثرند، مانند خشک کردن سریع سطح چوب در اثر رطوبت نسبی کم کوره در گام‌های ابتدایی یا استفاده از دمای زیاد در گام‌های پایانی [۲]. رابیدین و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که شدت برون‌سختی در طی خشک کردن با روش رادیوفرکانس/خلأ در مقایسه با کوره معمولی کمتر بود و علت آن را گرادیان رطوبت کمتر در ضخامت تخته‌های خشک‌شده با این فناوری بیان کردند. گان و همکاران (۲۰۰۸) و لی و همکاران (۲۰۱۰) نیز نتایج مشابهی را

امواج رادیوفرکانس است [۳، ۴، ۱۵، ۱۶]. نتایج تحقیقات گذشته نیز حاکی از افزایش چشمگیر سرعت خشک شدن چوب در کوره رادیوفرکانس/خلأ نسبت به روش جابه‌جایی هوای گرم است [۱۲، ۱۵، ۱۶]. آنانیاس و همکاران (۲۰۲۰) نیز بیان کردند که مدت خشک کردن جوان‌چوب اکالپتوس (*E. nitens*) با ضخامت اسمی ۱۳ میلی‌متر با استفاده از روش رادیوفرکانس/خلأ در مقایسه با کوره معمولی می‌تواند ۴۷ درصد کاهش یابد [۱۲]. همسو با نتایج پژوهش حاضر، لئو و همکاران (۲۰۱۹) نیز گزارش کردند که مدت زمان خشک شدن چهارتراش افرا (*Acer saccharum*) با ضخامت اسمی ۷۵ میلی‌متر و رطوبت اولیه $53/2$ درصد با اجرای دو برنامه مختلف رادیوفرکانس/خلأ به ترتیب ۸۰ و ۹۰ درصد کمتر از کوره معمولی است [۱۵]. کاهش مدت زمان خشک شدن چوب در این نوع کوره‌ها به‌ویژه برای الوارهای بسیار ضخیم محسوس است. در خشک کردن با امواج دی‌الکتریکی (امواج رادیوفرکانس و امواج مایکروویو)، سرعت خشک شدن اغلب تابعی از خواص دی‌الکتریکی گونه چوبی و مقدار رطوبت آن است. در کوره‌های چوب خشک‌کنی معمولی، حرارت به‌آهستگی از سطح چوب به داخل آن انتقال می‌یابد، ولی در خشک کردن با امواج رادیوفرکانس که نوعی روش حرارت‌دهی حجمی است، کل سطح و مغز چوب همزمان گرم می‌شود و مقدار جذب انرژی به مقدار رطوبت چوب بستگی دارد. این مسئله موجب می‌شود که چوب بسیار سریع‌تر از روش‌های معمول خشک شود [۵]. عمق نفوذ امواج دی‌الکتریکی در چوب از دیگر پارامترهای مهم در حرارت‌دهی دی‌الکتریکی است. عمق نفوذ این نوع امواج به صورت خطی با طول موج افزایش می‌یابد، ولی چندان تحت تأثیر افزایش فرکانس نیست [۲]. در مقایسه با امواج مایکروویو، عمق نفوذ امواج رادیوفرکانس در چوب بیشتر است که این مسئله موجب شده روش خشک کردن با امواج مایکروویو منحصراً برای خشک کردن روکش و الوارهای کم ضخامت توصیه شود، درحالی که رادیوفرکانس برای

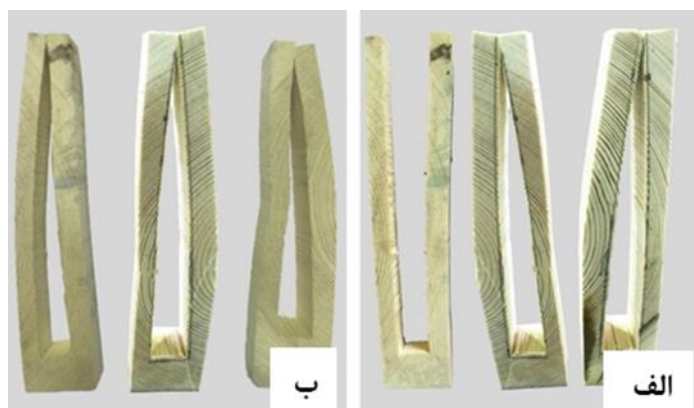
گزارش کردند [۱۷، ۱۸]. نتایج همچنین نشان داد که بعد از ۲۴ ساعت از برش نمونه‌های دوشاخه، در هر سه روش خشک کردن شاخه‌ها به هم نزدیک شدند (شکل ۶-ب). این مسئله می‌تواند ناشی از گرادیان رطوبت باشد [۲].



شکل ۵. گرادیان رطوبت نهایی در تخته‌های کاج جنگلی خشک‌شده با کوره‌های معمولی در دمای کم و متوسط و کوره رادیوفرکانس/خلاء

جدول ۴. ویژگی‌های کیفی تخته‌های خشک‌شده

ویژگی‌های کیفی	کوره معمولی (دمای کم)	کوره معمولی (دمای متوسط)	کوره رادیوفرکانس/خلاء
رطوبت نهایی (درصد)	7 ± 0.76	6 ± 1.72	13 ± 1.54
گرادیان رطوبت (درصد)	0.9 ± 0.4	1.1 ± 0.1	1.6 ± 0.7
میانگین برون‌سختی (mm ⁻¹)	0.00692	0.00686	0.000316
طول کل ترک‌ها (میلی‌متر)	287 ^d	88 ^b	29 ^c
ترک مقطعی	1176 ^a	1339 ^a	699 ^b
میانگین تغییر شکل تخته‌ها (میلی‌متر)	4/66 ± 1/13 ^a	4/84 ± 1/82 ^a	2/75 ± 0/39 ^a
ناودانی	4/39 ± 1/50 ^a	5/37 ± 0/91 ^a	5/11 ± 0/80 ^a



شکل ۶. نمونه دوشاخه بریده‌شده از تخته‌های خشک‌شده با روش رادیوفرکانس/خلاء (سمت چپ)، کوره معمولی در دمای ملایم (وسط) و کوره معمولی در دمای متوسط (راست). الف) بلافاصله بعد از برش؛ ب) ۲۴ ساعت بعد از برش

داد که تفاوت معنی داری در سطح ۵ درصد بین شدت پیچش و ناودانی شدن در بین تخته های خشک شده با هر سه روش وجود ندارد. شدت ناودانی شدن به عوامل متعددی مانند ضخامت و پهنای الوار، میزان ناهمگنی هم کشیدگی (نسبت هم کشیدگی مماسی به شعاعی) و الگوی برش وابسته است و در تخته های مماسی که تفاوت هم کشیدگی بین دو سطح الوار بیشتر است، احتمال ناودانی شدن بیشتر می شود [۲]. با رعایت اصول چوب دستک گذاری و بسیار آهسته خشک نکردن الوار یا بیش از حد خشک کردن آن می توان از شدت ناودانی شدن کاست [۲]. ناودانی شدن به نسبت زیاد تخته ها در تحقیق حاضر ممکن است ناشی از الگوی برش مماسی آنها، رعایت نکردن اصول چوب دستک گذاری در کوره های معمولی یا شرایط نامناسب در برنامه رادیوفرکانس/خلأ استفاده شده باشد. آنانیاس و همکاران (۲۰۲۰) چوب اکالیپتوس را با دو روش رادیوفرکانس/خلأ و کوره معمولی خشک کردند و دریافتند که از لحاظ شدت کمائی شدن بین دو روش تفاوتی وجود ندارد، ولی شدت خمیدگی و پیچش در تخته های خشک شده با فناوری رادیوفرکانس/خلأ کمتر بود [۱۲].

تغییر رنگ

در جدول ۵ نتایج تغییرات پارامترهای رنگ سنجی تخته ها در اثر خشک شدن ارائه شده است. پارامترهای رنگ چوب کاج جنگلی در هر دو ناحیه درون چوب و برون چوب با هر سه روش خشک کردن تغییر کرد. تغییرات a^* و b^* مثبت و L^* منفی بود، به عبارت دیگر تخته ها در اثر خشک شدن تیره تر، قرمز تر و زرد تر شدند. در ناحیه درون چوب کمترین میزان تغییرات روشنایی (ΔL)، قرمزی (Δb)، زردی (Δa) و نیز تغییرات رنگ (ΔE)، در روش رادیوفرکانس/خلأ و بیشترین آن در روش کوره معمولی در دمای متوسط رخ داد (جدول ۵). در مقابل، میزان تغییرات پارامترهای رنگ سنجی در قسمت برون چوب برای روش رادیوفرکانس/خلأ و

ترک خوردگی

شدت ترک خوردگی سطحی در روش خشک کردن با کوره رادیوفرکانس/خلأ در مقایسه با کوره معمولی کمتر بود، ولی در بین دو روش خشک کردن با کوره معمولی تفاوت معناداری وجود نداشت (جدول ۴). در خشک کردن به روش جابه جایی هوای گرم در کوره های معمولی، ترک خوردگی سطحی اغلب در گام های ابتدایی خشک کردن چوب و در اثر استفاده از رطوبت نسبی کم یا سرعت زیاد جریان هوا و به دلیل خشک شدن از سطح به مغز رخ می دهد [۲]. ترک خوردگی کمتر چوب در فرایند رادیوفرکانس/خلأ را می توان به توسعه تنش های کمتر در اثر گرمادهی حجمی نسبت داد [۲]. شدت ترک خوردگی مقطعی در روش رادیوفرکانس/خلأ بسیار جزئی بود، اما در دو روش دیگر به ویژه در کوره معمولی در دمای کم شدت ترک خوردگی زیاد بود. مقاطع تخته ها در تحقیق حاضر اندود شده بودند، ولی باید در نظر داشت که اندود کردن مقاطع فقط از شدت ترک خوردگی آنها می کاهد و به طور کامل نمی تواند از وقوع آن طی خشک شدن چوب ممانعت کند. از علل وقوع ترک های مقطعی می توان به خشک شدن سریع مقاطع چوب، جریان زیاد هوا در مقاطع و مهار نبودن انتهای الوار اشاره کرد [۲]. شایان ذکر است که در مقیاس صنعتی برای خشک کردن الوار با کوره رادیوفرکانس/خلأ به منظور افزایش سرعت خروج رطوبت در اثر گرادیان فشار بخار آب به طور معمول مقاطع الوار اندود نمی شود. ترک داخلی (شان عسلی شدن) در هیچ یک از تخته ها رخ نداد.

تغییر شکل

تخته های خشک شده با هر سه روش دچار عیوب پیچش و ناودانی شدند. میزان پیچش در دامنه ۱/۹۰ تا ۶/۷۱ میلی متر و میزان ناودانی شدن در دامنه ۳/۰۴ تا ۶/۱۸ میلی متر متغیر بود (جدول ۴). نتایج آزمون دانکن نشان

گذشته نیز تغییر رنگ کمتر چوب در طی خشک شدن تحت خلأ گزارش شده است [۶، ۱۶]. چن و لم (۲۰۰۷) تغییر نکردن رنگ را در قطعات چوب بلوط قرمز خشک شده در خلأ گزارش کردند [۱۰]. نتایج همچنین نشان داد که تحت شرایط خشک کردن در کوره معمولی در دمای متوسط، چوب درون به شدت دچار تغییر رنگ شد. چوب درون اغلب گونه‌ها در طی خشک کردن به‌طور یکنواخت تیره‌تر می‌شود و شدت تغییر رنگ تابعی از طبیعت شیمیایی مواد استخراجی چوب و دمای خشک کردن است [۲].

کوره معمولی با دمای کم به نسبت مشابه بود و در کوره معمولی با دمای متوسط بیشترین تغییرات در مؤلفه‌های رنگ‌سنجی آن مشاهده شد. شدت کم تغییر رنگ چوب در روش خشک کردن با رادیوفرکانس/خلأ ناشی از کاهش مدت زمان خشک کردن و استفاده از دماهای کمتر است [۳، ۵]. تشکیل مواد رنگی از یک ترکیب فنولیک اکسیده شده با هوا و تشکیل مواد تیره از هیدرولیز همی سلولزها علل تغییر رنگ در نظر گرفته شده است [۱۹]. به خوبی شناخته شده است که خشک شدن در خلأ زمان خشک شدن و اکسیداسیون را کاهش می‌دهد. در تحقیقات

جدول ۵. تغییرات پارامترهای رنگ‌سنجی تخته‌های کاج جنگلی طی خشک شدن با روش‌های مختلف

ΔE	Δa	Δb	ΔL	روش خشک کردن	نوع چوب
۲/۵۵	-۰/۶۱	۱/۳۲	-۱/۹۸	کوره معمولی/دمای کم	چوب‌درون
۱۰/۴۵	۳/۸۹	۸/۷۹	-۴/۰۳	کوره معمولی/دمای متوسط	
۱/۳۷	۰/۴۰	۰/۶۴	-۰/۸۹	کوره رادیوفرکانس/خلأ	
۲/۶۲	-۰/۵۴	۱/۹۳	-۱/۶۴	کوره معمولی/دمای کم	چوب‌برون
۷/۱۴	۱/۵۵	۶/۶۳	-۱/۹۶	کوره معمولی/دمای متوسط	
۲/۱۱	-۰/۵۳	۱/۱۰	-۱/۶۵	کوره رادیوفرکانس/خلأ	

نتیجه‌گیری

دچار برون سختی شدند، تخته‌های خشک شده با فناوری رادیوفرکانس/خلأ تقریباً فاقد برون سختی بودند. در روش خشک کردن در کوره معمولی، برنامه‌های چوب خشک کنی متناسب با گونه چوبی و ضخامت الوار تدوین می‌شود، درحالی که برنامه‌های چوب خشک کنی در کوره رادیوفرکانس/خلأ افزون بر ویژگی‌های ذاتی گونه چوبی باید متناسب با ویژگی‌های فنی کوره (مانند توان کوره، فرکانس و ولتاژ الکترودها) و شرایط حرارت دهی آن تهیه شود. این مسئله، فرایند خشک کردن انواع چوب را با این فناوری دچار پیچیدگی می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده، برنامه چوب خشک کنی رادیوفرکانس/خلأ به کاررفته برای خشک کردن تخته‌های کاج جنگلی در کوره با مشخصات فنی مورد نظر باید بهینه شود.

خشک کردن تخته‌های کاج جنگلی با ضخامت اسمی ۵ سانتی‌متر با کوره رادیوفرکانس/خلأ مطابق برنامه چوب خشک کنی مورد استفاده ضمن افزایش سرعت خشک شدن چوب، سبب کاهش شدت ترک خوردگی و تغییر رنگ چوب‌ها در مقایسه روش خشک کردن در کوره معمولی شد. با وجود این، تخته‌های خشک شده با این فناوری علی‌رغم دسته‌بندی بدون چوب دستک الوارها و فشردن یکنواخت آنها با صفحات الکتروود دچار عیوب ناودانی و پیچش شدند و در نتیجه از لحاظ کنترل انواع تغییر شکل این فناوری نسبت به روش خشک کردن در کوره معمولی برتری نشان نداد. همچنین برخلاف تخته‌های خشک شده با روش جابه‌جایی هوای گرم که

References

- [1]. Goreshev, M.A., Kazarin, A.N., Lopatin, V.V., Sekisov, F.G., and Smerdov, O.V. (2013). Combined timber drying method. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 86(2): 336-339.
- [2]. Tarmian, A. (2017). *Wood Drying Theories*, University of Tehran Press, Tehran.
- [3]. Espinoza, O., and Bond, B. (2016). Vacuum drying of wood—State of the art. *Current Forestry Reports*, 2(4): 223-235.
- [4]. Resch, H. (2006). High-frequency electric current for drying of wood - Historical perspectives. *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 8(2): 67-82.
- [5]. Tarmian, A. (2019). The Establishment of radio frequency-vacuum wood drying in Iran. *Iran Wood and Paper Industry Magazine*, No. 134: 29-34.
- [6]. Avramidis, S., Liu, F., and Neilson, B. J. (1994). Radio-frequency/vacuum drying of softwoods: drying of thick western red cedar with constant electrode voltage. *Forest Products Journal*, 44(1): 41-47.
- [7]. Liu, H., Yang, L., Cai, Y., Hayashi, K., and Li, K. (2014). Distribution and variation of pressure and temperature in wood cross section during radio-frequency vacuum (RF/V) drying. *Bioresources*, 9(2): 3064-3076.
- [8]. Antti, A.L. (1995). Microwave drying of pine and spruce. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 53(5): 333-338.
- [9]. Jung, H.S., Kang, W., Eom, C.D., and So, B.J. (2003). Comparison of vacuum drying characteristics of red pine square timber using different heating methods. In: 8th International IUFRO Wood Drying Conference. Aug.24-29 Brasov, Romania, pp. 135-142.
- [10]. Chen, Z., and Lamb, F.M. (2007). Analysis of the vacuum drying rate for red oak in a hot water vacuum drying system. *Drying Technology*, 25(3): 497-500.
- [11]. Guler, C., and Dilek, B. (2020). Investigation of high-frequency vacuum drying on physical and mechanical properties of common oak (*Quercus robur*) and common walnut (*Juglans regia*) lumber. *BioResources*, 15(4): 7861-7871.
- [12]. Ananías, R.A., Sepúlveda-Villaruel, V., Pérez-Peña, N., Torres-Mella, J., Salvo-Sepúlveda, L., Castillo-Ulloa, D., and Salinas-Lira, C. (2020). Radio frequency vacuum drying of Eucalyptus nitens juvenile wood. *BioResources*, 15(3): 4886-4897.
- [13]. Tarmian, A., Ciritcioğlu, H.H., Ünsal, Ö., Ahmadi, P., Gholampour, B., and Oladi, R. (2020). Efficiency of radiofrequency-vacuum (RF/V) technology for mixed-species drying of wood disks with inherent defects. *Drying Technology*, 1-11.
- [14]. Standard Test Method for Structural Timber – Visual strength grading - Basic principles, International Standardization Organization, ISO 9709, Geneva, Switzerland, 2005.
- [15]. Liu, H., Zhang, J., Jiang, W., and Cai, Y. (2019). Characteristics of commercial-scale radio-frequency/vacuum (RF/V) drying for hardwood lumber. *BioResources*, 14(3): 6923-6935.
- [16]. Rabidin, Z.A., Seng, G. K., and Wahab, M.J.A. (2017). Characteristics of timbers dried using kiln drying and radio frequency-vacuum drying systems. In: *Proceedings of International Conference on Mechanical, Aeronautical and Automotive Engineering*. Feb.25-27 Malacca, Malaysia, pp. 10001-10006.
- [17]. Gan, K. S., Amin, R. Z., Lim, S. C., and Sim, H. C. (2008). Is RF-vacuum timber drying an option now? In: *Proceedings of National Conference on Forest Products*. Oct. 19-21 Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 41- 48.
- [18]. Lee, N.H., Li, C., Zhao, X.F., and Park, M.J. (2010). Effect of pretreatment with high temperature and low humidity on drying time and prevention of checking during radio-frequency/vacuum drying of Japanese cedar pillar. *Journal of Wood Science*, 56(1): 19-24.
- [19]. Sandoval-Torres, S., Marc, F., Jomaa, W., and Puiggali, J.R. (2009). Colour changes in oakwood during vacuum drying by contact: studies on antioxydant potency and infrared spectras in surfaces. *Wood Research*, 54(1): 1-14.

Comparison of efficiency of radiofrequency/vacuum kiln and conventional kiln for drying Scots pine wood

A. Nikoutadbir; M.Sc, Student, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran.

N. Sharifi; M.Sc, Student, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran.

A. Tarmian*; Assoc., Prof., Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran.

(Received: 16 August 2021, Accepted: 19 November 2021)

ABSTRACT

In this study, the efficiency of radiofrequency/vacuum (RF/V) technology for drying of pine wood (*Pinus sylvestris*) was investigated compared to the hot air convective method. Flat-sawn boards with dimensions of $4.8 \times 21 \times 120$ cm, heartwood percentage of 72.9% and average green moisture content of 60% were cut. The boards were dried using three methods: (1) an industrial conventional kiln at low temperature (maximum temperature of 50 °C) and (2) normal temperature (maximum temperature of 71.3 °C) according to a 20 step-modified drying schedule and (3) RF/V kiln. RF/V drying was performed in an industrial kiln with a power of 100 kW and a frequency of 50 MHz according to a 6 step-drying schedule with a maximum temperature of 65 °C. Then, final moisture content, moisture gradient, discoloration, wood drying defects and stresses were measured. The results showed that in addition to a significant reduction in the drying time of the boards in the RF/V kiln, the intensity of surface and end-checks in RF/V drying was significantly lower than that in conventional drying. All dried boards were free from internal checks. The maximum twist and cup were 4.8 and 5.4 mm, respectively, and no difference was observed in the efficiency of the three wood drying methods. Unlike conventional dried boards, the boards dried in RF/V kiln showed no casehardening. Moisture gradient in all dried boards was negligible (less than 2%). The discoloration of the boards dried by RF/V was lower compared to other dried boards.

Keywords: Drying, Scots pine, wood dry kiln, radiofrequency/vacuum, hot air convective method.

* Corresponding Author, Email: tarmian@ut.ac.ir, Tel: +98 2632249311