



## Effects of wood drying in a radio frequency/vacuum kiln in comparison with a conventional kiln on the properties of thermowood

Navid Sharifi<sup>1</sup>, Alireza Nikoutadbir<sup>2</sup>, Asghar Tarmian<sup>3\*</sup>

1- M.Sc. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2- Ph.D. Student, Department of Wood and Paper Sciences and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

3- Corresponding author, Professor, Department of Wood and Paper Sciences and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: [tarmian@ut.ac.ir](mailto:tarmian@ut.ac.ir)

Received: May 2024

Accepted: July 2024

### Abstract

**Problem definition and objectives:** Among the various methods of thermal modification of wood, the modification process in the steam environment under the trade name "Thermowood" is the most common method. Dry wood or wet wood can be used as a raw material to produce Thermowood, but due to economic and technical reasons such as the occurrence of surface cracks during drying at high temperature, dried wood is usually used as consumable wood. In the Thermowood production process, the method adopted to dry the used wood is often not considered and only the moisture content of the dried wood is controlled before loading the wood into the Thermowood kiln, while the quality characteristics of the Thermowood may be affected by the drying method.

**Methodology:** In this research, Scots pine wood (*Pinus sylvestris*) dried by different methods was used to produce Thermowood. Scots pine is the most commonly used wood for Thermowood production in Iran. The drying operation was carried out in three ways: 1- Radio frequency/vacuum kiln with a capacity of 14 cubic meters and a frequency of 50 MHz, a power of 100 kW and a maximum temperature of 65 °C; 2-Conventional kiln at low temperature (50°C) and relative humidity of about 50% and 3- Conventional kiln according to a drying schedule in 20 steps with a maximum temperature of 71°C. Thermal modification was performed at 212°C for 3 hours and Thermowood type D was produced. The wood samples were subjected to various tests after thermal modification and conditioning in a climate room (temperature 20°C and relative humidity 65%). The physical properties (color, equilibrium moisture content and dimensional swelling), mechanical and weathering resistance of Thermowood samples were measured. Colorimetry of samples was done based on CIE-Lab system. The equilibrium moisture content and volumetric swelling of the samples were measured in two ranges of relative humidity 60% and 90% and temperature 20°C. Mechanical tests including compression strength parallel to the grain, impact resistance and modulus of rupture of the samples were measured. Accelerated weathering test was performed using Gardner weathering machine for 750 hours and after weathering, the intensity of color change of the samples and surface cracking were measured.

**Results:** The results showed that the impact resistance of Thermowood produced from wood dried in a conventional kiln at low temperature compared to the other two methods showed an average increase of 60%, but its modulus of elasticity was 22% lower. Usually, incorrect Thermowood production process leads to a reduction in impact resistance beyond the permissible limit; therefore, measuring this type of resistance is an important parameter for quality control of the thermally modified wood. No significant difference was observed in the physical characteristics, resistance to weathering, bending strength and compression strength parallel to the grain, among Thermowood samples.

**Conclusion:** In general, it can be concluded that the equilibrium moisture content and dimensional stability of Scots pine Thermowood type D are not affected by the method of drying the wood before loading it in the Thermowood kiln, but some its mechanical properties such as impact resistance and modulus of elasticity depend on the applied drying method. Considering the different drying behavior of wood species, it is suggested to investigate the effect of the drying method of each wood species on the quality characteristics of thermally modified wood, separately.

**Keywords:** Wood drying, Thermowood, Radiofrequency/vacuum kiln, physical and mechanical properties, weathering resistance.

## اثرات خشک کردن چوب در کوره رادیو فرکانس/خلاً در مقایسه با کوره هوای گرم بر ویژگی‌های ترموود

نوید شریفی<sup>۱</sup>، علیرضا نیکوتدبیر<sup>۲</sup>، اصغر طارمیان<sup>۳\*</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران  
 ۲- دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران  
 ۳- نویسنده مسئول، استاد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران.  
 پست الکترونیک: [tarmian@ut.ac.ir](mailto:tarmian@ut.ac.ir)

تاریخ پذیرش: تیر ۱۴۰۳

تاریخ دریافت: اردیبهشت ۱۴۰۳

### چکیده

**بیان مساله و اهداف:** در بین روش‌های مختلف اصلاح حرارتی چوب، فرایند اصلاح در محیط بخار آب تحت عنوان تجاری "ترموود" رایج‌ترین روش محسوب می‌شود. برای تولید ترموود می‌توان از چوب خشک یا چوب خیس به عنوان ماده اولیه استفاده کرد ولی به دلایل اقتصادی و فنی مانند وقوع ترک‌های سطحی طی خشک‌کردن در دمای بالا، معمولاً از چوب خشک‌شده به عنوان چوب مصرفی استفاده می‌شود. در فرایند تولید ترموود، اغلب به روش اتخاذ شده برای خشک‌کردن چوب مصرفی توجه نمی‌شود و صرفاً رطوبت چوب خشک‌شده، قبل از بارگذاری چوب در کوره ترموود کنترل می‌شود، در حالی که ویژگی‌های کیفی ترموود ممکن است متأثر از روش خشک کردن چوب مصرفی باشد.

**مواد و روشها:** در این پژوهش، از الوارهای کاج جنگلی (*Pinus sylvestris*) خشک شده با روش‌های مختلف برای تولید ترموود استفاده شد. گونه کاج جنگلی متداول‌ترین چوب مصرفی برای تولید ترموود در ایران است. عملیات خشک‌کردن به سه روش انجام شد: ۱- کوره رادیو فرکانس/خلاء به ظرفیت ۱۴ مترمکعب و با فرکانس ۵۰ مگاهرتز، توان ۱۰۰ کیلووات و حداکثر دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد؛ ۲- کوره هوای گرم در دمای کم (۵۰ درجه سانتی‌گراد) و رطوبت نسبی حدوداً ۵۰ درصد و ۳- کوره هوای گرم مطابق یک برنامه در ۲۰ گام با حداکثر دمای ۷۱ درجه سانتی‌گراد. عملیات اصلاح حرارتی در دمای ۲۱۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت انجام شد و ترموود نوع D تولید شد. نمونه‌های چوب پس از اصلاح حرارتی و متعادل‌سازی در شرایط کلیما (دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۵ درصد) مورد آزمون‌های مختلف قرار گرفتند. ویژگی‌های فیزیکی (رنگ، رطوبت تعادل و واکنشیدگی ابعاد)، مکانیکی و مقاومت به هوازدهگی نمونه‌های ترموود اندازه‌گیری شد. رنگ‌سنجی نمونه‌ها بر اساس سیستم CIE-Lab انجام شد. رطوبت تعادل و واکنشیدگی حجمی نمونه‌ها در اتاق کلیما در دو دامنه رطوبت نسبی ۶۰ و ۹۰ درصد و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. آزمون‌های مکانیکی شامل مقاومت فشار موازی الیاف، مقاومت به ضربه و مقاومت خمشی استاتیکی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. آزمون هوازدهگی تسریع شده با استفاده از دستگاه هوازدهگی گاردنر برای مدت ۷۵۰ ساعت انجام شد و پس از هوازدهگی شدت تغییر رنگ نمونه‌ها و ترک خوردگی سطحی اندازه‌گیری شد.

**نتایج:** نتایج نشان داد که مقاومت به ضربه ترموود تولید شده از چوب خشک‌شده در کوره هوای گرم در دمای کم در مقایسه با دو روش دیگر به طور متوسط ۶۰ درصد افزایش نشان داد ولی مدول الاستیسیته آن ۲۲ درصد کمتر بود. معمولاً عدم رعایت اصول صحیح فرآیند تولید ترموود منجر به تنزل بیش‌ازحد مجاز در مقاومت به ضربه شود؛ بنابراین، اندازه‌گیری این نوع مقاومت، پارامتر مهمی برای کنترل کیفیت چوب اصلاح حرارتی شده محسوب می‌شود. تفاوت معنی-

داری در ویژگی‌های فیزیکی، مقاومت به هوازدگی، مقاومت خمشی و فشار موازی الیاف بین نمونه‌های ترمووود مشاهده نشد.

**نتیجه‌گیری:** در مجموع می‌توان نتیجه‌گیری کرد که رطوبت تعادل و پایداری ابعاد ترمووود نوع D کاج جنگلی متأثر از روش خشک‌کردن چوب قبل از بارگذاری آن در کوره ترمووود نیست ولی مقدار برخی مقاومت‌های مکانیکی آن مانند مقاومت به ضربه و مدول الاستیسیته بسته به روش خشک‌کردن چوب متفاوت بود. با توجه به رفتار خشک‌شدن متفاوت گونه‌های چوب، پیشنهاد می‌شود اثرگذاری روش خشک‌کردن هر گونه چوبی بر ویژگی‌های کیفی چوب اصلاح حرارتی شده به طور مجزا بررسی شود.

**واژه‌های کلیدی:** خشک‌کردن چوب، ترمووود، کوره رادیو فرکانس / خلاء، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، مقاومت هوازدگی.

## مقدمه

در بین روش‌های اصلاح خواص چوب، اصلاح حرارتی به عنوان یک روش دوست‌دار محیط‌زیست در دنیا بیشتر توسعه یافته است و در ایران نیز در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۱]. در بین روش‌های تجاری مختلف اصلاح حرارتی مانند ترمووود، پلاتو، اصلاح حرارتی در روغن داغ، روش‌های بوا، پردو و ریکتیفیکاسیون و اصلاح حرارتی در محیط خلاء، اصلاح حرارتی با فرایند ترمووود (در محیط بخار آب) موفق‌ترین فرآیند اصلاح حرارتی چوب در دنیا محسوب می‌شود [۲]. برای تولید انواع چوب‌های اصلاح حرارتی شده، بسته به نوع فرایند می‌توان از چوب خشک یا چوب خیس و یا هر دو استفاده کرد (جدول ۱). گرچه برای تولید ترمووود امکان بارگذاری چوب سبز در داخل کوره ترمووود وجود دارد ولی به دلایل اقتصادی و فنی مانند وقوع ترک‌های سطحی به‌ویژه در چوب‌های پهن‌برگ طی خشک‌کردن در دمای بالا، معمولاً از چوب خشک‌شده با میانگین رطوبت ۱۵ درصد و کمتر به عنوان ماده اولیه استفاده می‌شود [۴].

خشک‌کردن چوب یک مرحله مهم و هزینه‌بردار در فرآوری و تولید محصولات چوبی محسوب می‌شود و عدم اتخاذ روش و شرایط مناسب خشک‌کردن چوب موجب هدر رفتن آن و تنزل کیفی محصولات چوبی می‌شود. خشک‌کردن در کوره‌های معمولی در دماهای متوسط به روش جابجایی هوای گرم، متداول‌ترین روش خشک‌کردن چوب در دنیا محسوب می‌شود. برای غلبه بر برخی محدودیت‌های کوره‌های معمولی مانند مدت زمان طولانی خشک‌شدن الوارها و چهار تراش‌های ضخیم و تنزل کیفی آن‌ها، خشک‌کردن به روش رادیو فرکانس / خلاء (RF/V) به عنوان یک روش تجاری برای خشک‌کردن سریع و با کیفیت چوب به ویژه چوب‌های ضخیم با ارزش و گران‌قیمت در برخی کشورها رواج پیدا کرده است [۶، ۷]. در ایران نیز یک شرکت چوب خشک‌کنی واقع در شهرک صنعتی پرنده برای خشک‌کردن انواع چوب با این فناوری فعال است. ارزیابی تأثیر روش خشک‌کردن بر ویژگی‌های مختلف چوب برای توسعه برنامه‌های مناسب خشک‌کردن ضروری است به‌طوری که خشک‌کردن نباید منجر به کاهش قابل‌توجهی در ویژگی‌های چوب شود. تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که روش

- 1 Thermowood
- 2 Bato
- 3 OHT-Oil Heat Treatment
- 4 Bis Perdure
- 5 Rectification
- 6 Thermo-vacuum modification

به ضخامت اسمی ۳ سانتی‌متر پرداختند. آن‌ها دریافتند که برنامه اتخاذ شده در این کوره برای خشک کردن دیسک‌های گردو موفق‌تر بود و همه دیسک‌های گردو فاقد ترک‌های V شکل بودند [۱۰]. Ananías و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند خشک کردن چوب اکالیپتوس (*Eucalyptus nitens*) با استفاده از کوره رادیو فرکانس/خلأ در مقایسه با کوره معمولی کیفیت چوب را برای تولید انواع فراورده‌های چوب ماسیو بهبود می‌بخشد [۱۱].

و شرایط خشک کردن چوب در فراوری‌های بعدی آن و کیفیت محصولات چوبی تولید شده از آن مانند تخته‌لایه تأثیرگذار است [۸، ۹].

طارمیان و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی عملکرد کوره رادیو فرکانس/خلأ برای خشک کردن دیسک‌های شش‌گونه چوبی شامل کاج جنگلی (*Pinus sylvestris*)، گردوی اروپایی (*Juglans nigra*)، توسکا (*Alnus glutinosa*)، گیلاس سیاه (*Prunus avium*)، ون (*Fraxinus angustifolia*) و آزاد (*Zelkova carpinifolia*)

جدول ۱- شرایط تولید در روش‌های تجاری اصلاح حرارتی چوب [۵]

روش اصلاح	محیط اصلاح	رطوبت چوب مصرفی	دمای تیمار (سانتی‌گراد)
ترمووود	بخار	۱۰ درصد تا رطوبت سبز	۲۱۵-۱۸۵
پلاتو	بخار یا هوا	۱۴-۱۸ درصد	۱۸۰-۱۵۰/۱۹۰-۱۷۰
اصلاح حرارتی در روغن داغ	روغن داغ	۱۰ درصد تا رطوبت سبز	۲۲۰-۱۸۰
ریکتیفیکاسیون	نیتروژن	۱۲ درصد	۲۴۰-۱۶۰
بوآ پردو	بخار	چوب سبز	۲۳۰-۲۰۰
اصلاح حرارتی در محیط خلأ	خلأ	صفر درصد	۲۲۰-۱۶۰

از الوار وارداتی کاج جنگلی خیس (*Pinus sylvestris*) با رطوبت ۶۰ درصد و الگوی برش تقریباً مماسی و حاوی چوب درون و به ابعاد  $۴/۸ \times ۲۱ \times ۴۰$  سانتی‌متر استفاده شد. به منظور جلوگیری از خروج رطوبت، مقاطع الوارها بعد از برش بلافاصله با یکرنگ پوششی اندود شد و الوارها با استفاده از یک نایلون پلاستیکی به طور کامل بسته‌بندی شد.

### روش خشک کردن

برای خشک کردن به روش جابجایی هوای گرم از دو برنامه مختلف در کوره صنعتی استفاده شد: الف- دمای کم (دمای ثابت ۵۰ درجه سانتی‌گراد) با رطوبت نسبی حدوداً ۵۰ درصد؛ ب- برنامه چوب خشک‌کنی با کد T3-F1 در ۲۰ گام و حداکثر دمای  $۷۱/۳$  درجه سانتی‌گراد (برنامه با دمای متوسط-جدول ۲). برای خشک کردن به روش رادیو فرکانس/خلأ نیز از یک کوره صنعتی رادیو فرکانس/خلأ متعلق به شرکت JYC چین مدل GJG-14H50B-JY در فرکانس ۵۰ مگاهرتز با توان ۱۰۰ کیلووات در ۶ گام و حداکثر دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد

در مقابل، برخی تحقیقات گذشته کاهش مقاومت فشاری، مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته نمونه‌های خشک‌شده با روش رادیو فرکانس/خلأ در مقایسه با کوره معمولی را گزارش کردند [۱۲، ۱۳]. انتظار می‌رود روش خشک کردن چوب قبل از فرایند تولید ترمووود نیز بر ویژگی‌های کاربردی آن تأثیرگذار باشد. تحقیقات اخیر حاکی از آن است نوع و میزان انتشار مواد فرار از ترمووود تحت تأثیر روش خشک کردن چوب قبل از شروع فرایند اصلاح حرارتی است [۴]. در فرایند تولید ترمووود، اغلب به روش اتخاذ شده برای خشک کردن چوب مصرفی توجه نمی‌شود و صرفاً رطوبت چوب خشک‌شده، قبل از بارگذاری چوب در کوره ترمووود کنترل می‌شود. تاکنون، گزارشی از اثرات روش خشک کردن چوب قبل از شروع فرایند اصلاح حرارتی بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ترمووود ارائه نشده است.

### مواد و روش‌ها

#### چوب مصرفی

استفاده شد. مشخصات فنی کوره رادیو فرکانس/خلأ و ارائه شده است. برنامه چوب خشک‌کنی مورد استفاده در جدول‌های ۳ و ۴

جدول ۲- برنامه چوب خشک‌کنی مورد استفاده در کوره هوای گرم با دمای متوسط [۱۴].

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

جدول ۳- مشخصات فنی کوره رادیو فرکانس/خلأ مورد استفاده [۱۴].

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

جدول ۴- برنامه چوب خشک‌کنی مورد استفاده در کوره رادیو فرکانس/خلأ [۱۴].

گام	مقدار پایه جریان آند (kV))	انحراف جریان آند (kV))	حداکثر 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

ساعت بود. نمونه‌ها در این دستگاه بر روی یک چرخ دوار تثبیت شدند و سپس با چرخش آن به‌طور پی‌درپی در چرخه‌های مشخص در معرض لامپ‌های شبیه‌ساز نور خورشید (در قسمت فوقانی دستگاه) و آب (قسمت تحتانی دستگاه) قرار گرفتند. مدت زمان هر چرخش کامل دستگاه ۹۰ دقیقه بود. رنگ‌سنجی نمونه‌ها بر اساس سیستم CIE-Lab انجام شد. محل اندازه‌گیری رنگ، دایره‌ای به قطر ۵ سانتی‌متر در سطح مماسی نمونه‌های تحت آزمایش بود. برای انجام این کار از دستگاه رنگ‌سنجی مدل NRF145 ساخت کشور چین استفاده شد. با تابش رنگ بر روی نمونه‌ها و بر اساس نور منعکس شده، پارامترهای  $a^*$ ،  $b^*$ ،  $L^*$  قبل و پس از هوازدگی و شاخص تغییر رنگ ( $\Delta E^*$ ) اندازه‌گیری شد. بعد از هوازدگی، طول و فراوانی ترک‌های سطحی نیز اندازه‌گیری شد. برای این منظور از یک ذره‌بین با بزرگنمایی ۵ برابر استفاده شد. میانگین طول ترک‌ها در سطح در معرض هوازدگی و نیز مجموع کل ترک‌ها گزارش شد. همچنین، فراوانی ترک‌ها در واحد سطح ( $n/mm^2$ ) اندازه‌گیری شد.

### تجزیه و تحلیل آماری

داده‌های به‌دست‌آمده در نرم‌افزار اکسل وارد شده و پس از تهیه گزاره‌های توصیفی (میانگین و انحراف معیار)، با استفاده از نرم افزار SPSS آزمون‌های آماری شامل تجزیه واریانس و آزمون گروه‌بندی دانکن در سطح اعتماد ۹۹ درصد انجام شد.

### نتایج و بحث

#### رطوبت تعادل و واکنش‌دهی ابعاد

نتایج تجزیه و تحلیل آماری در سطح اعتماد ۹۵ درصد نشان داد که رطوبت تعادل و واکنش‌دهی ابعاد ترمووود مستقل از روش خشک‌کردن چوب مصرفی است (شکل ۲) و آزمون دانکن، میانگین داده‌های هر سه روش خشک‌کردن را در یک گروه طبقه‌بندی کرد. در خصوص اثرات روش خشک‌کردن چوب بر رطوبت تعادل و پایداری ابعاد چوب نتایج ضد و نقیضی گزارش شده است. Blanchet و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که خشک‌کردن چوب توس زرد (*Betula alleghaniensis* Brit.) تحت خلاء در

### اصلاح حرارتی

پس از خشک‌کردن تخته‌ها با سه روش مختلف، عملیات اصلاح حرارتی در محیط بخار آب مطابق با استاندارد تولید ترمووود نوع D در دمای ۲۱۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت با استفاده از کوره ترمووود صنعتی شرکت مازندچوب آریا انجام شد. نمونه‌های چوب پس از اصلاح حرارتی و متعادل‌سازی در شرایط کلیما (دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۵ درصد) مورد آزمون قرار گرفتند.

### آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی

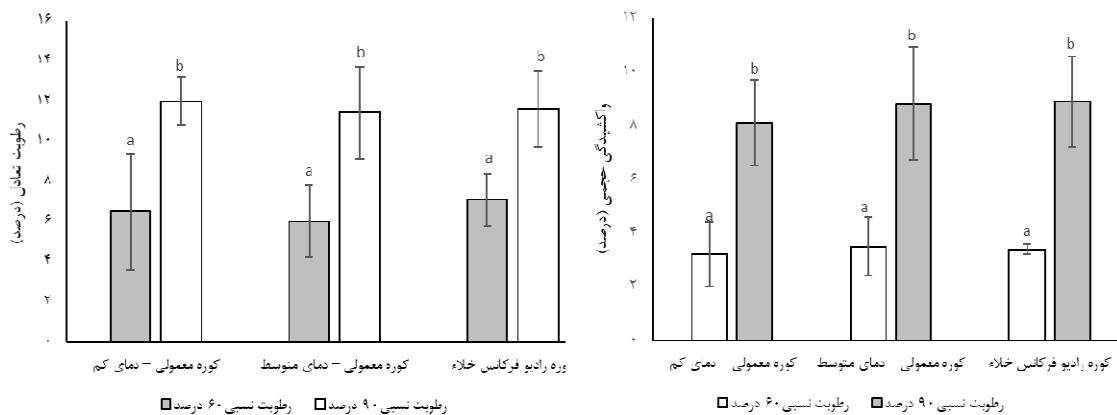
رطوبت تعادل نمونه‌ها و واکنش‌دهی حجمی آن‌ها در اتاق کلیما در دو دامنه رطوبت نسبی ۶۰ و ۹۰ درصد و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد مطابق استاندارد ISO 13061 اندازه‌گیری شد [۱۵]. آزمون‌های مکانیکی شامل مقاومت فشار موازی الیاف، مقاومت به ضربه و مقاومت خمشی استاتیکی نیز مطابق استاندارد ISO 13061 اندازه‌گیری شد. برای انجام آزمون مقاومت به فشار موازی الیاف از نمونه‌هایی به ابعاد  $20 \times 20 \times 60$  میلی‌متر و آزمون مقاومت به ضربه و مقاومت خمشی به ابعاد  $20 \times 20 \times 300$  میلی‌متر استفاده شد. سرعت بارگذاری برای خمشی استاتیکی و فشار موازی الیاف ۲۵ mm/min بود. آزمون مقاومت به ضربه توسط پاندول ۲۰ ژول (AMSLER) انجام شد.

### آزمون هوازدگی تسریع شده

چوب اصلاح حرارتی شده مشابه چوب معمولی مقاوم به هوازدگی نیست. به منظور بررسی عملکرد هر یک از روش‌های خشک‌کردن بر مقاومت به هوازدگی ترمووود، آزمون هوازدگی تسریع شده با استفاده از دستگاه هوازدگی گاردنر واقع در آزمایشگاه حفاظت چوب گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشگاه تهران انجام شد. برای این منظور از نمونه‌هایی به ابعاد  $18 \times 74 \times 150$  میلی‌متر استفاده شد. مدت زمان هوازدگی نمونه‌ها برابر با ۷۵۰

کننده رطوبت تعادل و پایداری ابعاد ترمووود مرحله دوم فرایند تولید (مرحله اصلاح) است و این مرحله از تولید و نیز مرحله قبلی یعنی خشک کردن چوب در دمای بالا، اثرات ناشی از روش خشک کردن چوب مصرفی را از بین می‌برد.

مقایسه با کوره معمولی منجر به مقادیر بیشتر رطوبت تعادل چوب می‌شود [۱۶]. در مقابل Guler و Dilek (۲۰۲۰) گزارش کردند که خشک کردن با روش رادیو فرکانس/خلاء چوب‌های بلوط و گردو در مقایسه با خشک کردن در هوای آزاد تغییر معنی‌داری در خواص فیزیکی آن ندارد [۱۷]. به نظر می‌رسد عامل کنترل



شکل ۲- مقادیر رطوبت تعادل و واکسیدگی حجمی نمونه‌های ترمووودهای تولید شده با روش‌های مختلف خشک کردن

در کوره رایوفرکانس خلأ تنها ۳ درصد کمتر از نمونه‌های خشک‌شده در کوره معمولی بود [۱۳].

بر خلاف مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته (MOE) نمونه‌های ترمووود متأثر از روش خشک کردن چوب بود و آزمون گروه‌بندی دانکن داده‌ها را در دو گروه طبقه‌بندی کرد (sig. = ۰/۰۰۴). میانگین مدول الاستیسیته نمونه‌ها در دامنه ۱۱۶۶۵ الی ۱۵۱۱۱ مگا پاسکال متغیر بود. مدول الاستیسیته در نمونه‌های خشک‌شده در کوره معمولی در دمای کم به طور میانگین ۲۲ درصد کمتر از مدول الاستیسیته نمونه‌های خشک‌شده در کوره با دمای متوسط و کوره رادیو فرکانس/خلأ بود. بین میانگین داده‌ها در روش خشک کردن با کوره معمولی در دمای متوسط و رادیو فرکانس/خلأ اختلاف معنی‌داری دیده نشد و گروه‌بندی دانکن آن‌ها را در یک گروه دسته‌بندی می‌کند. تحقیقات Mohd-Jamil و Zairul (۲۰۱۷) نشان داد که MOE نمونه‌های چوب ککاتنگ خشک‌شده در کوره رایوفرکانس خلأ ۲ درصد کمتر از نمونه‌های خشک‌شده در کوره معمولی بود ولی سختی جانکا نمونه‌های RFV کمی بالاتر بود [۱۳]. همچنین نتایج تحقیقات Guler و Dilek

### مقاومت‌های مکانیکی

نتایج اثرگذاری روش خشک کردن چوب بر مقاومت‌های مکانیکی ترمووود در شکل ۳ ارائه شده است. خشک کردن چوب می‌تواند به صورت مستقیم بر روی خواص مکانیکی چوب تأثیر داشته باشد و برنامه‌های چوب خشک‌کنی تسریع شده در دمای بالا منجر به تنزل اغلب مقاومت‌های مکانیکی چوب به‌ویژه در گونه‌های پهن‌برگ می‌شود [۱۸]. همچنین طبق تحقیقات گذشته، اصلاح حرارتی چوب موجب کاهش اغلب مقاومت‌های مکانیکی آن می‌شود و هر چه مدت زمان و دمای اصلاح حرارتی زیاد باشد، تأثیرگذاری آن بیشتر است [۱، ۲]. نتایج نشان داد مدول گسیختگی (MOR) نمونه‌های ترمووود وابسته به روش خشک کردن چوب مصرفی نیست. نتایج آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه نشان داد که میانگین داده‌های مدول گسیختگی در سطح اعتماد ۹۹ درصد معنی‌دار نیست (sig = ۰/۶۸۱) و آزمون گروه‌بندی دانکن نیز میانگین داده‌ها را در یک گروه طبقه‌بندی کرد. تحقیقات Mohd-Jamil و Zairul (۲۰۱۷) نیز نشان داد که MOR نمونه‌های چوب ککاتنگ (*Cynometra spp.*) خشک‌شده

(۲۰۲۰) نشان داد مدول الاستیسیته چوب‌های بلوط و گردو خشک‌شده به روش HF + V کاهش معنی‌داری را نسبت به نمونه‌های شاهد نشان داد و در مقایسه با نمونه‌های شاهد، ۹ درصد کاهش مقاومت در چوب بلوط و ۷ درصد در نمونه‌های گردو وجود داشت [۱۷].

نتایج تجزیه و تحلیل آماری نشان داد که بین مقاومت به فشار موازی الیاف ترموودها تفاوت معنی‌داری در سطح اعتماد ۹۵ درصد وجود ندارد و این نوع مقاومت ترموود متأثر از روش خشک کردن چوب قبل از آغاز فرایند تولید ترموود نیست. در مقابل، نتایج نشان داد که مقاومت به ضربه در نمونه‌های ترموود تولید شده با چوب خشک‌شده در کوره معمولی با دمای کم به طور میانگین ۶۰ درصد بیشتر از مقاومت به ضربه نمونه‌های تولید شده با چوب خشک‌شده در کوره با دمای متوسط و کوره رادیو فرکانس خلاً بود ولی تفاوت معنی‌داری بین میانگین داده‌ها در روش خشک کردن با کوره معمولی در دمای متوسط و رادیو فرکانس خلاء مشاهده نشد. میانگین مقاومت به ضربه نمونه‌ها در دامنه ۲/۳ الی ۳/۷ ژول متغیر بود.

تحقیقات گذشته حاکی از آن است که خواص دینامیکی چوب مانند مقاومت به ضربه در مقایسه با سایر مقاومت‌ها در اثر اصلاح حرارتی بیشتر تنزل پیدا می‌کند [۱۹]. اغلب خواص مکانیکی چوب با کاهش رطوبت دیوارهای سلولی (آب پیوندی) افزایش می‌یابد. با این حال، کاهش رطوبت موجب هم کشیدگی در چوب شده و حذف رطوبت کنترل نشده می‌تواند منجر به توسعه ریز ترک‌ها در چوب و متعاقباً تنزل خواص مکانیکی آن شود [۲۰]. Lee و Jung (۲۰۰۰) ویژگی‌های خشک شدن چوب زبان‌گنجشک کره‌ای به ضخامت ۶۶ میلی‌متر را در هر دو کوره RFV و معمولی مقایسه کردند. در مقایسه با خشک کردن در کوره معمولی، هم کشیدگی مماسی و شعاعی چوب خشک‌شده با رادیو فرکانس/خلأ به ترتیب تا ۴۰ و ۲۵ درصد کاهش یافت. ۱۴ درصد انرژی جذب‌شده بیشتر در خمش ناگهانی (ضربه) نیز در چوب خشک شده در کوره رادیو فرکانس/خلأ در مقایسه با چوب خشک شده در کوره معمولی به دست آمد [۲۱]. یک مطالعه مقایسه‌ای دیگر برای بررسی اثر خشک کردن به روش رادیو فرکانس/خلأ و کوره معمولی بر خواص فیزیکی

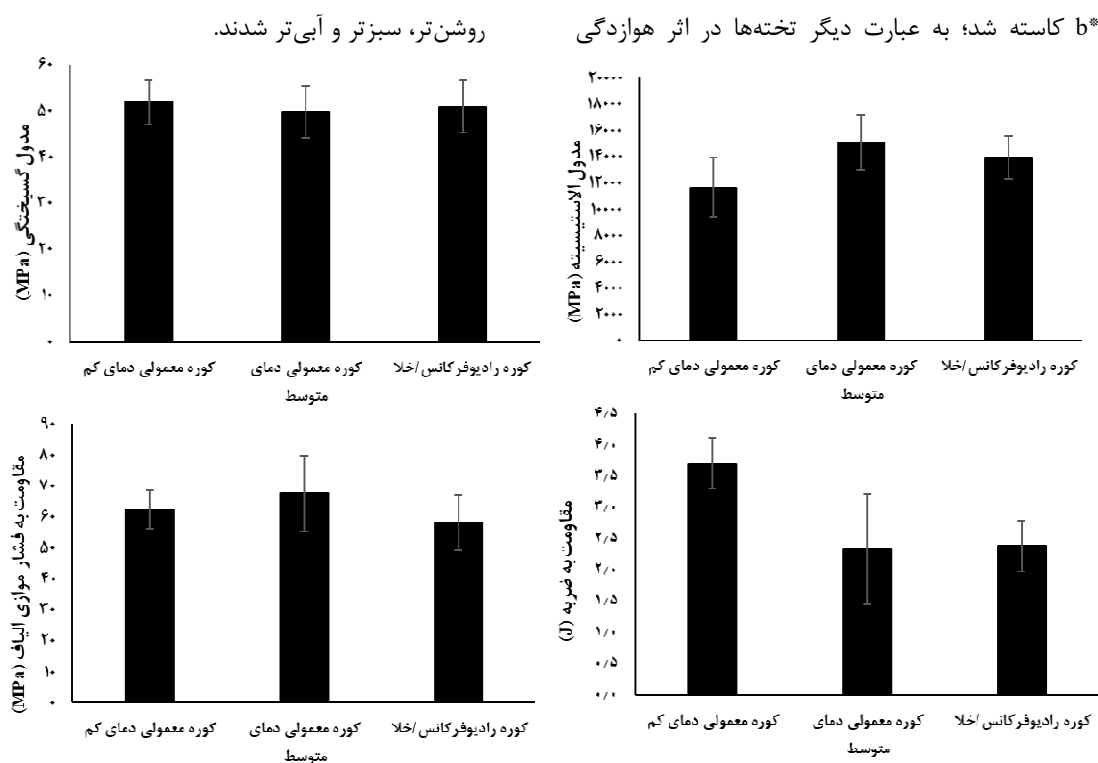
(چگالی و رطوبت تعادل) و مکانیکی (خمش استاتیکی، مقاومت برشی، مقاومت فشاری و سختی) چوب کاج سفید نشان داد که علی‌رغم عدم تفاوت در چگالی چوب و ویژگی‌های مکانیکی آن، میزان رطوبت تعادل چوب خشک‌شده در کوره رادیو فرکانس/خلأ بیشتر از کوره معمولی بود [۲۲]. معمولاً عدم رعایت اصول صحیح فرآیند تولید ترموود می‌تواند منجر به تنزل بیش‌ازحد مجاز در مقاومت به ضربه شود؛ بنابراین، اندازه‌گیری این نوع مقاومت، پارامتر مهمی برای کنترل کیفیت چوب اصلاح حرارتی شده محسوب می‌شود. نتایج تحقیقات Guler و Dilek (۲۰۲۰) نیز نشان داد کاهش مقاومت به ضربه چوب‌های خشک‌شده در کوره HF/V<sup>۸</sup> نسبت به کوره معمولی بیشتر بود، به طوری که مقاومت به ضربه در بلوط ۲۰ درصد و در گردو ۱۷ درصد کاهش یافته است [۱۷].

#### مقاومت به هوازدگی (شدت تغییر رنگ و ترک-

##### خوردگی)

نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد بین پارامترهای رنگ ترموودهای تولید شده با چوب‌های خشک‌شده با سه روش کوره معمولی دمای کم، متوسط و کوره رادیو فرکانس خلاً پس از هوازدگی وجود ندارد (جدول ۲)؛ به عبارت دیگر می‌توان گفت که شدت تغییر رنگ ترموود بر اثر هوازدگی متأثر از روش خشک کردن چوب قبل از فرآیند تولید ترموود نیست. گر چه خشک کردن چوب تحت خلاء/رادیو فرکانس منجر به تولید چوب‌های خشک با رنگ روشن‌تر و شدت تغییر رنگ کمتر می‌شود [۱۴] ولی نتایج تحقیق حاضر نشان داد که در نهایت رنگ ترموودهای تولیدی متأثر از روش خشک کردن چوب نیست. همه انواع چوب‌های اصلاح حرارتی شده مانند ترموود مقاوم به هوازدگی نبوده و در اثر هوازدگی کم و بیش به رنگ خاکستری تغییر رنگ می‌دهند [۱]؛ بنابراین، پوشش دهی ترموود با پوشش‌های حاوی مواد جاذب UV برای کاربرد در فضای باز ضروری است. در اثر هوازدگی بر پارامتر روشنایی نمونه‌ها افزوده شد ولی از مقدار پارامترهای \*<sup>۸</sup>

<sup>۸</sup>High-frequency vacuum



شکل ۲- تأثیر روش خشک کردن چوب کاج جنگلی بر مقاومت‌های مکانیکی ترموود

جدول ۲- تغییر پارامترهای رنگ نمونه‌های ترموود کاج جنگلی بعد از هوازدگی

روش خشک کردن	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	$\Delta E$
گروه معمولی دمای کم	$4.06 \pm 0.79^a$	$-4.96 \pm 0.45^a$	$-8.32 \pm 1.48^a$	$10.61 \pm 1.50^a$
گروه معمولی دمای بالا	$3.78 \pm 0.02^a$	$-4.99 \pm 0.76^a$	$-7.65 \pm 2.22^a$	$11.19 \pm 1.49^a$
گروه رادیوفرکانس/اخلا	$3.64 \pm 0.92^a$	$-5.25 \pm 0.40^a$	$-8.92 \pm 0.92^a$	$10.99 \pm 1.12^a$

\* حروف لاتین گروه‌بندی دانکن می‌باشند

چوب‌های خشک‌شده با روش‌های مختلف مشاهده نشد. تحقیقات گذشته حاکی از آن است که شدت ترک خوردگی چوب اصلاح حرارتی شده در مقایسه با چوب معمولی در اثر هوازدگی کمتر است [۲۳]. Sandberg و Söderström (۲۰۰۶) نیز دریافتند که صرف‌نظر از اثرات اصلاح حرارتی، شدت ترک‌های سطحی متأثر الگوی برش و طرز قرارگیری دواپر سالیانه است [۲۴].

نتایج نشان داد که شدت ترک خوردگی سطحی در نمونه‌های ترموود در اثر هوازدگی متأثر از روش خشک کردن چوب کاج جنگلی قبل از آغاز فرایند تولید ترموود نیست و تفاوت معنی‌داری بین نمونه‌های تولید شده از چوب‌های خشک‌شده با گروه معمولی و رادیوفرکانس خلاء مشاهده نشد (جدول ۳). لازم به ذکر است که بعد از فرآیند تولید ترموود و قبل از هوازدگی، ترک‌های سطحی در نمونه‌های ترموود تولید شده از

جدول ۳- تعداد و مجموع کل ترک‌های سطحی در نمونه‌های ترموود بعد از هوازدگی

ویژگی‌های کیفی	کوره معمولی		کوره رادیو فرکانس/خلاء
	دمای متوسط	دمای کم	
تعداد ترک‌های سطحی	۱۷/۶۶±۷/۰۹ <sup>a</sup>	۲۸/۶۶±۱۱/۹۳ <sup>a</sup>	۱۶/۶۶±۱/۵۲ <sup>a</sup>
مجموع طول ترک‌های سطحی (mm)	۹۰/۹۷±۴۰/۲۲ <sup>a</sup>	۲۰۷/۹۰±۱۱۵/۶۲ <sup>a</sup>	۱۱۴/۳۲±۴۶/۲۳ <sup>a</sup>

بر ویژگی‌های کیفی چوب اصلاح حرارتی شده باید به طور مجزا بررسی شود.

### نتیجه‌گیری

به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که رطوبت تعادل و پایداری ابعاد ترموود نوع D کاج جنگلی و نیز پارامترهای رنگ و مقاومت به هوازدگی آن متأثر از روش خشک‌کردن چوب قبل از بارگذاری آن در کوره ترموود نیست. در مقابل، مقدار برخی مقاومت‌های مکانیکی آن مانند مقاومت به ضربه و مدول الاستیسیته بسته به روش خشک‌کردن چوب متفاوت بود و خشک‌کردن در کوره معمولی در دمای کم در مقایسه با همین روش در دمای متوسط و نیز کوره رادیو فرکانس خلاء منجر به کاهش مدول الاستیسیته و افزایش مقاومت به ضربه ترموود شد. اغلب مقاومت‌های مکانیکی چوب به ویژه ویژگی‌های دینامیکی آن مانند مقاومت به ضربه طی خشک شدن در دماهای بالا تنزل پیدا می‌کند. بنابراین تفاوت‌های مشاهده شده بین روش خشک‌کردن در دمای کم در مقایسه با دو روش دیگر می‌تواند ناشی از اثرگذاری دما بر ویژگی‌های مکانیکی چوب باشد. در مجموع می‌توان گفت که گرچه ترموود برای مصارفی که مقاومت‌های مکانیکی چوب مهم است (مانند اعضای تحمل بار در سازه‌های چوبی) استفاده نمی‌شود ولی در صورت عدم اتخاذ روش مناسب برای خشک‌کردن چوب‌های مصرفی در تولید ترموود، ممکن است مقاومت‌های مکانیکی آن کمتر از الزامات مورد نظر انجمن بین‌المللی ترموود فنلاند باشد و صرفاً کنترل مقدار رطوبت چوب قبل از بارگذاری در کوره ترموود کفایت نمی‌کند. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات بعدی به اثرگذاری مقدار رطوبت چوب و تاریخچه خشک‌کردن آن بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سایر چوب‌های اصلاح حرارتی شده مانند چوب روغن گرمایی شده پرداخته شود. با توجه به ویژگی‌های متفاوت خشک شدن گونه‌های مختلف چوب، اثرگذاری روش خشک‌کردن هر گونه چوبی

### منابع

- [1] Hill, C.A. (2007) "Wood modification: chemical, thermal and other processes", John Wiley & Sons.
- [2] Hill, C., Altgen, M. and Rautkari, L. (2021) "Thermal modification of wood—a review: chemical changes and hygroscopicity," *Journal of materials science*, 56(11), pp. 6581–6614. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05722-z..>
- [3] Jones, D., Sandberg, D., Goli, G. and Todaro, L., (2020) "Wood Modification in Europe: A state-of-the-art about processes, products and applications", Florence: Firenze University Press.
- [4] Nikoutadibir, A., Tarmian, A., Mohtasebi, S.S. and Abdulkhani, A. (2023) "Emission of volatile organic compounds from heat-treated Scots pine wood as affected by wood drying method: Results obtained with olfactory machine and headspace gas chromatography-mass spectrometry," *Drying technology*, 41(4), pp. 577–589. <https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2109160>.
- [5] Sandberg, D., Kutnar, A. and Mantanis, G. (2017) "Wood modification technologies - a review," *IForest : biogeosciences and forestry*, 10(6), pp. 895–908. <https://doi.org/10.3832/ifor2380-010>.
- [6] Resch, H. (2006) "High-frequency electric current for drying of wood - historical perspectives," *Maderas Ciencia y tecnología*, 8(2), pp. 67-82. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2006000200001>.
- [7] Espinoza, O. and Bond, B. (2016) "Vacuum drying of wood—state of the art," *Current forestry reports*, 2(4), pp. 223–235. <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0045-9>.
- [8] Aydin, I. and Colakoglu, G. (2005) "Formaldehyde emission, surface roughness, and some properties of plywood as function of veneer drying temperature," *Drying technology*, 23(5), pp. 1107–1117. <https://doi.org/10.1081/drt-200059142>.
- [9] Jamalirad, L. et al. (2011) "Physical and mechanical properties of plywood manufactured from treated red-heart beech (*Fagus orientalis* L.) wood veneers," *Bioresources*, 6(4), pp. 3973–3986. <https://doi.org/10.15376/biores.6.4.3973-3986>.

- [18] Tarmian, A. (2017) "Wood Drying Theories", University of Tehran Press, Tehran. (In Persian).
- [19] Esteves, B.M. and Pereira, H.M. (2008) "Wood modification by heat treatment: A review," *Bioresources*, 4(1), pp. 370-404. <https://doi.org/10.15376/biores.4.1.370-404..>
- [20] Mishra, K., Dubey, M.K., Chauhan, S.S. and Kumar Sethy, A. (2024) "Radio frequency-assisted drying of wood: a comprehensive review," *Wood material science & engineering*, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2344041>.
- [21] Lee, N.H. and Jung, H.S. (2000) "Comparison of shrinkage, checking, and absorbed energy in impact bending of Korean ash squares dried by a radio-frequency/vacuum process and a conventional kiln", *Forest products journal*, 50(2), pp.69-69.
- [22] Harris, R.A. and Lee, A.W. (1985) "Properties of white pine lumber dried by radio-frequency/vacuum process and conventional kiln process" *Wood and fiber science*, pp.549-552.
- [23] Tomak, E. D., Ustaomer, D., Yildiz, S. and Pesman, E. (2014) "Changes in surface and mechanical properties of heat treated wood during natural weathering," *Measurement*, 53, pp. 30-39. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.03.018>.
- [24] Sandberg, D. and Söderström, O. (2006) "Crack formation due to weathering of radial and tangential sections of pine and spruce," *Wood material science & engineering*, 1(1), pp. 12-20. <https://doi.org/10.1080/17480270600644407>.
- [10] Tarmian, A., Ciritcioğlu, H.H., Ünsal, Ö., Ahmadi, P., Gholampour, B. and Oladi, R. (2022) "Efficiency of radiofrequency-vacuum (RF/V) technology for mixed-species drying of wood disks with inherent defects," *Drying technology*, 40(5), pp. 1002-1012. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1833214>.
- [11] Ananías, R.A., Sepúlveda-Villarroel, 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), pp. 4886-4897. <https://doi.org/10.15376/biores.15.3.4886-4897>.
- [12] Harris, R.A. and Lee, A.W. (1985) "Properties of white pine lumber dried by radio-frequency/vacuum process and conventional kiln process" *Wood and fiber science*, pp.549-552.
- [13] Mohd-Jamil, A.W. and Zairul, A.R. (2019) "Mechanical properties of timber dried using radio frequency-vacuum system," in *GCEC 2017*. Singapore: Springer Singapore, pp. 185-192. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-8016-6\\_14](https://doi.org/10.1007/978-981-10-8016-6_14)
- [14] Nikoutadbir, A., Sharifi, N. and Tarmian, A. (2022) "Comparison of efficiency of radiofrequency/vacuum kiln and conventional kiln for drying Scots pine wood", *Forest and Wood Products*, 75(1), pp.61-72. (In Persian).
- [15] ISO 13061-14 (2016) "Physical and Mechanical Properties of Wood—Test Methods for Small Clear Wood"
- [16] Blanchet, P., Kaboorani, A.K. and Bustos, C. (2016) "Understanding the effects of drying methods on wood mechanical properties at ultra and cellular levels", *Wood and Fiber Science*, 48(2), pp.117-128
- [17] 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), pp. 7861-7871. <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.7861-7871>.