



Preparation of time-based schedule for drying of walnut slab with different width in vacuum/hot-air kiln

Asghar Sistani¹, Asghar Tarmian^{2*}, Foroogh Dastoorian³

1- Ph.D. Student, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran

2- Corresponding Author, Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran, Email: tarmian@ut.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Wood Engineering and Cellulosic Products, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran

Received: September 2025

Accepted: December 2025

Abstract

Problem definition and objectives: Drying wood is one of the most important stages of its primary processing, which affects the final quality and cost of producing wood products. Drying valuable hardwood slabs such as Persian walnut in a conventional kiln is associated with serious challenges due to their large dimensions, including prolonged drying time, cracking, deformation, and the occurrence of internal stresses. Similar to conventional kilns, for drying wood in a vacuum kiln, an optimal schedule should be developed according to the type of species and its dimensions. In addition, the type of vacuum kiln and its technical specifications, such as the heat transfer system, also affect the optimal schedule. In other words, a separate schedule must be prepared for each type of vacuum kiln. The main objective of this study was to develop a time-based schedule for drying Iranian walnut (*Juglans regia* L.) slabs in an industrial-scale vacuum/hot air kiln.

Methodology: Persian walnut slabs with a nominal thickness of 7 cm and a length of 180 cm, in two width ranges (below and above 400 mm), were dried. Initial moisture content of the slabs ranged from 60% to 70%. An industrial vacuum/hot air kiln with a nominal volume of 12 cubic meters and a hot oil heating system with intermittent vacuum application was used to dry the slabs. Three time-based schedule were used in 9 to 10 steps with a maximum temperature of 70°C and a maximum vacuum of 0.45 bar. In the first, second and third schedule, the temperature of the first step was 45, 40 and 35°C, and the drying time was 152, 167 and 176 hours, respectively. The vacuum and heating time used for each schedule was also different. After the end of drying, the final moisture content, moisture gradient in thickness and width, residual stress (casehardening), cracking and warp intensity were determined. The experiment was based on a Completely Randomized Design and the significance of the mean data was analyzed with Duncan's multiple range test.

Results: The final moisture content of the slabs in all drying schedules was in the range of 10–12%, which is suitable for the final use of the material in the production of office and household rustic-style furniture. The highest moisture gradient across the thickness and width of the slabs was observed in schedule 1, whereas schedule 3 showed the lowest gradient. Surface and end checking were significantly more severe in schedule 1 (total check length exceeding 1500 mm in wide

slabs), while the length was reduced to less than 200 mm in schedule 3. Case-hardening also decreased significantly in schedule 3. Furthermore, deformation defects such as cupping, bowing, springing, and twisting were minimized in schedule 3, leading to a substantial improvement in the final quality of the slabs. In all schedules, wide slabs (over 400 mm) exhibited greater checking and deformation compared to narrow slabs.

Conclusion: Drying schedule strongly determines the final quality of walnut slabs. In the schedule 1, rapid drying of the slabs due to higher temperatures and greater vacuum resulted in severe defects, while schedule 3, with mild drying condition improved moisture uniformity, reduced cracks and deformations, and enhanced overall quality. Therefore, schedule 3 is recommended as the optimal drying schedule for Iranian walnut slabs in vacuum/hot-air kilns.

Keywords: Drying, Persian walnut slab, Case hardening, Deformation, Surface checks.

تدوین برنامه زمان پایه بهینه برای خشک کردن اسلب‌های گردو با پهنای مختلف در کوره خلأ/هوای گرم

اصغر سیستانی^۱، اصغر طارمیان^۲، فروغ دستوریان^۳

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران.
۲- نویسنده مسئول، استاد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران. رایانه: tarmian@ut.ac.ir
۳- استادیار، گروه مهندسی صنایع چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

تاریخ دریافت: مهر ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: آذر ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: خشک کردن چوب یکی از مهم‌ترین مراحل فرآوری اولیه آن به شمار می‌رود که کیفیت نهایی و هزینه تولید محصولات چوبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. خشک کردن اسلب‌های چوبی پهن‌برگ ارزشمند مانند گردو در کوره هوای گرم به علت ابعاد بزرگ با چالش‌های جدی از جمله طولانی شدن مدت زمان خشک شدن، ترک خوردگی، تغییر شکل و بروز تنش‌های داخلی همراه است. از این رو، به کارگیری فناوری‌های نوین مانند کوره‌های خلأ برای خشک کردن سریع‌تر این نوع مقطوعات چوبی توام با کنترل معایب ضرورت دارد. مشابه کوره هوای گرم، برای خشک کردن چوب در کوره خلأ نیز باید متناسب با نوع گونه و ابعاد آن، برنامه بهینه تدوین شود. ضمن اینکه، نوع کوره خلأ و مشخصات فنی آن مانند سیستم انتقال حرارت نیز بر تهیه برنامه بهینه تأثیرگذار است. به عبارت دیگر، برای هر نوع کوره خلأ باید برنامه مجزا تهیه شود. هدف اصلی این پژوهش تهیه یک برنامه زمان پایه برای خشک کردن اسلب‌های گردوی ایرانی (*Juglans regia L.*) در یک کوره خلأ/هوای گرم در مقیاس صنعتی بود.

مواد و روشها: اسلب‌های گردوی ایرانی با ضخامت اسمی ۷ سانتیمتر و طول اسمی ۱۸۰ سانتیمتر در دو پهنای کمتر و بیشتر از ۴۰۰ میلی‌متر خشک شدند. رطوبت اولیه نمونه‌ها در دامنه ۶۰ تا ۷۰ درصد بود. از یک کوره خلأ/هوای گرم صنعتی به حجم اسمی ۱۲ مترمکعب و سیستم گرمایشی روغن داغ با اعمال ناپیوسته خلأ برای خشک کردن اسلب‌ها استفاده شد. سه برنامه زمان پایه در ۹ الی ۱۰ گام با حداکثر دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و حداکثر خلأ ۰/۴۵ بار استفاده شد. در برنامه‌های اول، دوم و سوم به ترتیب دمای شروع گام ۴۵، ۴۰ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان خشک شدن نیز به ترتیب ۱۵۲، ۱۶۷ و ۱۷۶ ساعت بود. مدت زمان اعمال خلأ و حرارت‌دهی نیز در برنامه‌های مذکور متفاوت بود. پس از پایان هر برنامه، رطوبت نهایی، گرادیان رطوبت در ضخامت و پهنای، میزان تنش‌های باقی‌مانده (برون سختی)، شدت ترک خوردگی و تغییر شکل‌ها اندازه‌گیری شد. نمونه‌برداری در قالب طرح کاملاً تصادفی بوده و معنی‌داری میانگین داده‌ها با آزمون چند دامنه دانکن تحلیل شد.

نتایج: میانگین رطوبت نهایی اسلب‌ها در همه برنامه‌ها در محدوده ۱۰ تا ۱۲ درصد قرار گرفت که برای کاربرد نهایی در تولید میلمان اداری و خانگی به سبک روستیک مناسب است. بیشترین گرادیان رطوبت در ضخامت و پهنای اسلب‌ها مربوط به برنامه اول و کمترین مقدار در برنامه سوم مشاهده شد. شدت ترک خوردگی سطحی و مقطعی در برنامه اول بسیار زیاد بود (طول کل ترک‌ها بیش از ۱۵۰۰ میلی‌متر در اسلب‌های پهن)، در حالی که این مقدار در برنامه سوم به کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر کاهش یافت. برون سختی نیز در برنامه سوم به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد. علاوه بر این، تغییر شکل‌هایی مانند ناودانی، کماتی، خمیدگی و تابیدگی در برنامه سوم به حداقل رسید و کیفیت نهایی اسلب‌ها به‌طور

قابل توجهی بهبود یافت. در همه برنامه‌ها، اسلب‌های پهن‌تر (بیش از ۴۰۰ میلی‌متر) ترک‌خوردگی و تغییر شکل بیشتری نسبت به اسلب‌های با پهنای کم داشتند.

نتیجه‌گیری: برنامه خشک‌کردن نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت نهایی اسلب‌های گردو دارد. در برنامه اول به علت خشک شدن سریع اسلب‌ها به دلیل استفاده از دمای بالاتر و مقدار خلأ بیشتر با معایب چوب خشک‌کنی بیشتری همراه بود، در حالی که در برنامه سوم، اعمال شرایط ملایم‌تر موجب یکنواختی رطوبت، کاهش ترک و تغییر شکل و بهبود کیفیت اسلب‌ها شد. بر اساس یافته‌ها، برنامه سوم را می‌توان به عنوان برنامه بهینه برای خشک کردن اسلب‌های گردوی ایرانی در کوره خلأ/هوای گرم توصیه کرد.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کردن، اسلب گردوی ایرانی، برون‌سختی، تغییر شکل، ترک‌های سطحی.

مقدمه

مقطوعات ضخیم و الوارهایی با ابعاد نامتعارف همچون اسلب‌ها توصیه شده است [۱۰، ۱۱].

از منظر اقتصادی نیز استفاده از روش‌های تحت خلأ مزیت قابل توجهی دارد. زمان خشک‌کردن در این روش معمولاً دو تا سه برابر کوتاه‌تر از کوره‌های متداول است که این موضوع موجب کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی می‌شود [۱۲]. کوتاه‌تر شدن چرخه تولید، امکان ورود سریع‌تر محصول به بازار و پاسخ‌گویی بهتر به تقاضای مشتریان صنایع مبلمان را فراهم می‌سازد [۱۳]. افزون بر این، کاهش عیوبی مانند ترک‌خوردگی و تغییر شکل، هزینه‌های ناشی از فرآوری مجدد و دورریز را نیز کاهش می‌دهد. مجموع این عوامل سبب می‌شود هزینه نهایی خشک‌کردن اسلب‌ها در این روش رقابتی بوده و از نظر اقتصادی برای تولید محصولات با ارزش افزوده بالا مانند مبلمان اداری و خانگی کاملاً توجیه‌پذیر باشد. در جدول ۱ تفاوت‌های کلیدی بین دو روش از نظر شاخص‌های فنی و کیفی ارائه شده است.

در صنعت به چوب‌های بریده شده با لبه‌های ناصاف حاصل از الگوی برش مماسی گرده‌بینه به طور متداول "اسلب" گفته می‌شود. واژه "اسلب" در صنعت چوب و مبلمان اغلب به همان مقطوعات چوبی حاصل از الگوی برش مماسی گرده‌بینه اطلاق می‌شود. الگوی برش مماسی نوعی برنامه برش گرده‌بینه است که در آن خطوط برش با یکدیگر موازی هستند. اسلب معمولاً به طول گرده‌بینه و به ضخامت بین ۵ تا ۱۰ سانتیمتر بوده و دارای پوست طبیعی در امتداد لبه‌ها است. از اسلب در ساخت انواع مبلمان به ویژه به عنوان صفحه میزهای

یکی از دلایل اصلی خشک‌کردن چوب، رساندن رطوبت آن به رطوبت تعادل محل مصرف است تا دچار کمترین تغییرات ابعادی در محصول نهایی شود. از این رو، خشک کردن چوب به عنوان یکی از مهم‌ترین مراحل فرآوری اولیه به شمار می‌رود و حدود ۳۰ درصد از کل هزینه تولید الوار خشک را به خود اختصاص می‌دهد [۱]. اتخاذ روش مناسب چوب خشک‌کنی، نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت نهایی و هزینه‌های تولید دارد. در میان روش‌های مختلف، خشک‌کردن در کوره‌های معمولی به روش جابه‌جایی هوای گرم، رایج‌ترین شیوه در صنعت است [۲]. با این حال، این روش برای گونه‌های پهن‌برگ حساس به عیوب و همچنین مقطوعات با ابعاد بزرگ مانند اسلب و الوارهای ضخیم بسیار زمان‌بر بوده و خطر بروز عیوبی همچون ترک‌های سطحی و مقطعی را افزایش می‌دهد. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، فناوری خشک‌کردن تحت خلأ، به‌ویژه در ترکیب با امواج رادیوفرکانس (RF/V)^۱، توسعه یافته است. در این فرآیند، آب موجود در چوب در دمای پایین‌تر به نقطه جوش می‌رسد و در نتیجه شرایطی برای خشک شدن سریع‌تر و یکنواخت‌تر در دمای ملایم فراهم می‌شود [۳-۵]. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که به‌کارگیری روش RF/V علاوه بر کاهش مدت زمان خشک‌کردن، منجر به کاهش شدت ترک‌خوردگی، تغییر شکل و تغییر رنگ چوب می‌شود [۶-۹]. بنابراین، این فناوری به طور ویژه برای خشک‌کردن

1. Slab

2. Radio-frequency vacuum (RF/V)

غذاخوری و کنفرانس به صورت یکپارچه با هدف ساخت محصولات چوبی با نقوش طبیعی و زیبا استفاده می‌شود.

جدول ۱- مقایسه خشک کردن چوب به روش کوره خلأ و کوره معمول از نظر شاخص‌های فنی، کیفی و هزینه‌ها

شاخص مقایسه	خشک کردن معمولی	خشک کردن تحت خلأ	منابع
محدوده دمایی (درجه سانتی‌گراد)	۶۰ تا ۱۱۰	۴۰ تا ۷۰	[۱۲]
زمان خشک کردن	طولانی (هفته‌ها)	۲ تا ۵ برابر سریع‌تر	[۱۳] و [۱۴]
کیفیت ظاهری (رنگ، تابیدگی)	احتمال تغییر رنگ و تابیدگی زیاد	حفظ رنگ طبیعی؛ تابیدگی کمتر	[۱۴]
هزینه مصرف انرژی	بالا (به دلیل حرارت زیاد)	۲۰-۳۰ درصد کمتر	[۱۲]
هزینه سرمایه‌گذاری و نگهداری	نسبتاً پایین	بالا (پمپ‌ها و کنترل فشار)	[۱۰]
کاربرد صنعتی توصیه شده	الوارهای معمولی	الوارهای ضخیم و پهن‌برگ بارزش	[۱۱] و [۱۳]

داشته‌اند [۲۰]. به عنوان نمونه، Görgün و Ünsal (۲۰۲۱) نشان دادند که استفاده از کوره RF/V در فرآیند خشک کردن اسلب‌های چنار، نه تنها زمان عملیات را کاهش می‌دهد، بلکه با طراحی مقطع U شکل می‌توان از گسترش ترک‌های مقطعی نیز جلوگیری کرد [۲۱]. در کوره‌های خلأ، مشابه کوره‌های هوای گرم، برای خشک کردن گونه‌های مختلف باید برنامه چوب خشک‌کنی بهینه به طور مجزا تهیه شود. در مقایسه با کوره‌های هوای گرم، تدوین برنامه چوب خشک‌کنی در کوره‌های خلأ با پیچیدگی بیشتری همراه است. علاوه بر مشخصات چوب مصرفی مانند ابعاد و گونه، نوع کوره خلأ (پیوسته یا ناپیوسته) و سیستم گرمایشی آن (مانند گرمادهی از طریق امواج الکترومغناطیس، بخار فوق داغ، صفحات داغ و یا هوای گرم) و سایر مشخصات فنی کوره (مانند فرکانس امواج و توان کوره) نیز بر تهیه برنامه بهینه بسیار تأثیرگذار است [۱۲]. برخلاف خشک کردن در کوره‌های هوای گرم که برای اغلب گونه‌های تجاری دنیا برنامه بهینه تدوین شده است [۲۲] برای خشک کردن انواع گونه‌ها در کوره‌های خلأ تاکنون به‌طور منسجم برنامه‌های چوب خشک‌کنی بهینه تدوین نشده است. در تحقیقات گذشته به برنامه چوب خشک‌کنی چوب گردو (*Juglans regia*) در کوره RFV پرداخته شده است [۱۸] ولی گزارشی از برنامه بهینه برای خشک کردن اسلب گردوی ایرانی (*Juglans regia*) در کوره خلأ/هوای گرم گزارش نشده است.

در حال حاضر، مناسب‌ترین و متداول‌ترین فناوری برای خشک کردن تخته‌های بسیار ضخیم و پهن و همچنین چوب‌های با ارزش اقتصادی بالا، روش‌های

Lyon و همکاران (۲۰۲۱) اثرات خشک کردن خلأ و خشک کردن هوای گرم را بر رنگ چوب افرا مقایسه کردند. آن‌ها نشان دادند که خشک کردن در کوره خلأ با دمای پایین و محیط کم اکسیژن، علاوه بر کاهش زمان خشک کردن، منجر به یکنواختی بیشتر رنگ میان تخته‌ها می‌شود [۱۵]. El Metwaly و همکاران (۲۰۲۴) تأثیر مقدار خلأ، دما و ضخامت نمونه را بر ویژگی‌های خشک کردن چوب بلوط قرمز و راش با تغییر هر یک از این پارامترها بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار خلأ، مقدار رطوبت نهایی و مدت زمان خشک کردن کاهش می‌یابد [۱۶]. در همین راستا، Hoang و Bui (۲۰۲۳) موفق شدند با استفاده از ترکیب خلأ و مادون قرمز چوب گونه *Xylia xylocarpa* را طی ۶۴ ساعت تا رطوبت ۱۰ درصد در دمای ۵۸/۷ درجه سانتی‌گراد خشک کنند [۱۷]. در مطالعات اخیر، کارایی فناوری RF/V برای گونه‌های مختلف از جمله گردو نیز مورد بررسی قرار گرفته است. Dilek و Guler (۲۰۲۰) نشان دادند که مدت زمان خشک کردن الوار گردو با ضخامت حدود ۸ سانتی‌متر در این روش تا ۱۰ برابر کمتر از خشک کردن در هوای آزاد است [۱۸]. همچنین، Tarmian و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که با بهره‌گیری از کوره RF/V، خشک کردن دیسک‌های گردو بدون بروز ترک‌های V شکل امکان‌پذیر است [۱۹]. افزون بر این، Ananaeis و همکاران (۲۰۲۰) نیز کاهش هم‌کشیدگی و ترک‌های سطحی را در چوب اکالیپتوس با استفاده از این فناوری تأیید کردند. علاوه بر الوارهای معمولی، برخی پژوهش‌ها بر خشک کردن مقطوعات با اشکال هندسی خاص مانند دیسک‌ها و اسلب‌ها تمرکز

استفاده شد. همه اسلب‌های مورد استفاده دارای محدوده رطوبتی ۶۰ تا ۷۰ درصد و فاقد هرگونه معایب نظیر ترک و شکاف قابل مشاهده بودند.

اندازه‌گیری رطوبت اولیه اسلب‌ها

رطوبت اولیه نمونه‌ها با استفاده از روش خشک کردن در آون (۲ ± ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد) بر اساس استاندارد ASTM D4442 تعیین شدند [۲۴].

روش خشک کردن

عملیات خشک کردن در یک کوره خلأ/هوای گرم ناپیوسته در مقیاس صنعتی انجام شد. مشخصات فنی کوره در جدول ۲ ارائه شده و نمای کلی آن در شکل ۱ نمایش داده شده است. از چوب دستک‌هایی به ابعاد مقطع ۲/۵ × ۲ سانتی‌متر و به فاصله ۴۰ سانتی‌متر برای دسته‌بندی و چیدن اسلب‌ها استفاده شد. برای کاهش شدت تغییر شکل‌ها، از بلوک‌های بتنی به وزن تقریبی ۳۰ کیلوگرم به فاصله یک متر بر روی ردیف فوقانی اسلب‌ها استفاده شد.

مبتنی بر خلأ یا ترکیب رادیوفرکانس و خلأ است. این فناوری به تدریج در بسیاری از کشورها در حال توسعه می‌باشد. یکی از دلایل اصلی عدم استقبال از خشک کردن چوب با کوره‌های رادیوفرکانس/خلأ یا خلأ/هوای گرم در ایران، شاید عدم آگاهی و دانش کافی نسبت به این فناوری و همچنین سرمایه‌گذاری بالای مورد نیاز برای ساخت چنین کوره‌هایی است [۱۱]. بنابراین، در تحقیق حاضر به تدوین برنامه‌های بهینه برای خشک کردن اسلب‌های گردوی ایرانی در کوره‌های متناوب خلأ/هوای گرم پرداخته شد.

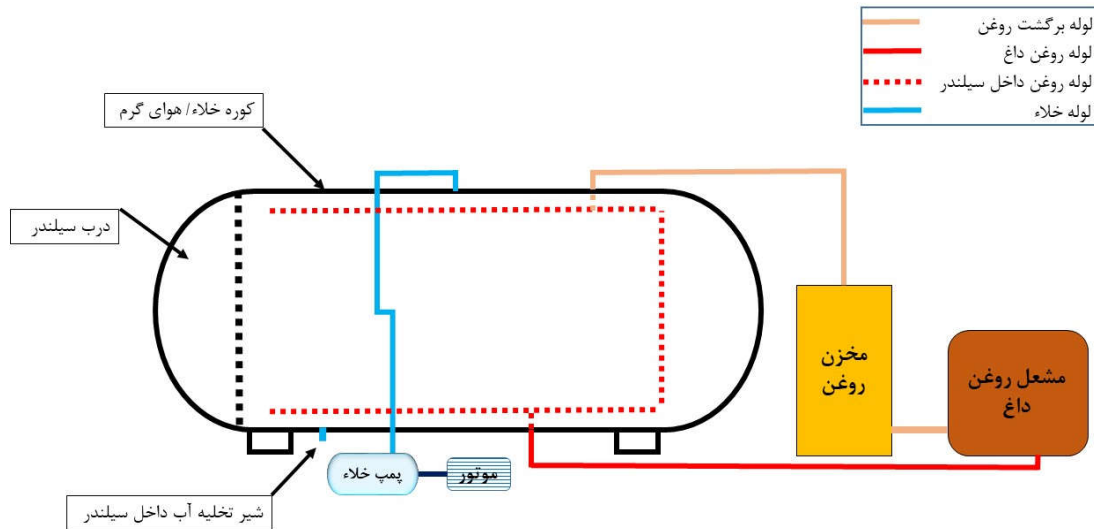
مواد و روش‌ها

نمونه برداری

در این پژوهش، اسلب‌های چوب گردوی ایرانی (*Juglans regia L.*) از گرده‌بینه درختان منطقه هزارجریب (حد فاصل سوادکوه و سمنان و گلستان) واقع در شهرستان نکا از توابع استان مازندران تهیه شدند. رویشگاه طبیعی گردوی ایرانی در این منطقه در ارتفاعات میان‌بند و کوهستانی با اقلیم معتدل و مرطوب می‌باشد [۲۳]. اسلب‌ها با ضخامت اسمی ۷ سانتی‌متر، طول ۱۸۰ سانتی‌متر و در دو پهنای کمتر و بیشتر از ۴۰۰ میلی‌متر

جدول ۲- مشخصات فنی کوره چوب خشک‌کنی خلأ/هوای گرم

مشخصات فنی کوره	
شکل هندسی	سیلندری
قطر داخلی (متر)	۳۷/۱
طول (متر)	۸
ضخامت جداره (سانتیمتر)	۳
جنس بدنه	فولاد
سیستم گرمایش	روغن داغ
نحوه انتقال گرما	لوله‌های رفت و برگشت داخل سیلندر
منبع انرژی گرمایی	۵-۳ m ³ h مشعل گاز
پمپ خلأ	مدل TRVA 65-300
ظرفیت پمپ خلأ	m ³ /h ۵۵۲-۱۱۹
فشار تخلیه	mbar ۱۰۱۳
روش بارگیری کوره	ریل و واگن
سیستم عملکرد کوره	خلأ/گرما سیکلی



شکل ۱- شمایی از کوره خلأ/ هوای گرم مورد استفاده

خلاصه مشخصات این سه برنامه در جدول ۳ ارائه شده است. پس از پایان هر برنامه، رطوبت نهایی نمونه‌ها با روش خشک کردن در آون در دمای ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد.

به منظور بررسی اثر سرعت خشک‌کردن و پهنای اسلب‌ها بر کیفیت نهایی، سه برنامه خشک‌کنی زمان پایه با حداکثر دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد بر اساس تحقیقات گذشته و نیز تجربه عملی محققین در حوزه فناوری خشک کردن تحت خلأ اجرا شد (مطابق جدول ۴ تا ۶).

جدول ۳- خلاصه مشخصات برنامه‌های خشک‌کنی اسلب گردو در کوره خلأ/ هوای گرم ناپیوسته

برنامه خشک‌کنی	دمای شروع (درجه سانتی‌گراد)	حداکثر دما (درجه سانتی‌گراد)	مقدار فشار/خلأ (بار)	تعداد گام‌ها	کل مدت زمان (ساعت)
برنامه ۱	۴۵	۷۰	۴۵/۰-۰۱/۱	۹	۱۵۲
برنامه ۲	۴۰	۷۰	۴۵/۰-۰۱/۱	۱۰	۱۶۷
برنامه ۳	۳۵	۷۰	۵۰/۰-۰۱/۱	۱۰	۱۷۶

جدول ۴- برنامه اول چوب خشک‌کنی در کوره خلأ/ هوای گرم ناپیوسته

مدت زمان	مدت زمان هر عملیات (ساعت)				مقدار فشار/خلأ (بار)	دما (درجه سانتی‌گراد)	گام
	هر گام	تخلیه آب و تهویه هوا	حفظ خلأ در دمای گام	حرارت‌دهی در فشار اتمسفری			
۲۴	-	-	-	۲۴	۰۱/۱	۴۵	۱
۱۸	۲	-	۸	۸	۷/۰	۵۰	۲
۱۸	۲	-	۸	۸	۶۵/۰	۵۵	۳
۱۸	۲	-	۸	۸	۶/۰	۶۰	۴
۱۸	۲	-	۸	۸	۵۵/۰	۶۵	۵

۶	۷۰	۵/۰	۸	۸	۲	۱۸
۷	۷۰	۴۵/۰	۸	۸	۴	۲۰
۸	۶۵	۰/۱/۱	تنش‌زدایی			۶
۹	دمای محیط	۰/۱/۱	-	-	۱۲	۱۲
کل مدت زمان خشک شدن						
۱۵۲						

جدول ۵- برنامه دوم چوب خشک‌کنی در کوره خلأ/هوای گرم ناپیوسته

گام	دما (درجه سانتی‌گراد)	مقدار فشار/خلأ (بار)	مدت زمان هر عملیات (ساعت)			مدت زمان هر گام (ساعت)
			حرارت‌دهی در فشار اتمسفری	حفظ خلأ در دمای گام	تخلیه آب و تهویه هوا	
۱	۴۰	۰/۱/۱	۱۶			۱۶
۲	۴۵	۸/۰	۸	۷	۴	۱۹
۳	۵۰	۷۵/۰	۸	۶	۳	۱۷
۴	۵۵	۷/۰	۹	۸	۲	۱۹
۵	۶۰	۶۵/۰	۹	۹	۲	۲۰
۶	۶۵	۵۵/۰	۸	۱۰	۲	۲۰
۷	۷۰	۵/۰	۸	۱۰	۲	۲۰
۸	۷۰	۴۵/۰	۷	۸	۳	۱۸
۹	۶۵	۰/۱/۰/۱	تنش‌زدایی			۶
۱۰	دمای محیط	۰/۱/۱	-	-	۱۲	۱۲
کل مدت زمان خشک شدن						
۱۶۷						

جدول ۶- برنامه سوم چوب خشک‌کنی در کوره خلأ/هوای گرم ناپیوسته

گام	دما (درجه سانتی‌گراد)	مقدار فشار/خلأ (بار)	مدت زمان هر عملیات (ساعت)			مدت زمان هر گام (ساعت)
			حرارت‌دهی در فشار اتمسفری	حفظ خلأ در دمای گام	تخلیه آب و تهویه هوا	
۱	۳۵	۰/۱/۱	۱۸	-	-	۱۸
۲	۴۰	۸۵/۰	۱۰	۶	۴	۲۰
۳	۴۵	۸۰/۰	۱۰	۶	۳	۱۹
۴	۵۰	۷۵/۰	۱۰	۸	۲	۲۰
۵	۵۵	۷۰/۰	۹	۱۰	۲	۲۱
۶	۶۰	۶۰/۰	۸	۱۱	۲	۲۱
۷	۶۵	۵۵/۰	۸	۱۱	۲	۲۱
۸	۷۰	۵۰/۰	۸	۷	۳	۱۸
۹	۶۵	۰/۱/۰/۱	تنش‌زدایی			۶
۱۰	دمای محیط	۰/۱/۱	-	-	۱۲	۱۲
کل مدت زمان خشک شدن						
۱۷۶						

ابتدا نمونه‌هایی به ابعاد ۷×۲ سانتی‌متر×پهنای اسلب تهیه شد و سپس در راستای ضخامت به سه لایه به ابعاد ۲×۲ سانتی‌متر×پهنای اسلب تقسیم شدند. به همین صورت، برای محاسبه گرادیان رطوبت نهایی در پهنای نیز پس از تهیه نمونه‌ها با ابعاد مذکور، نمونه‌ها در راستای پهنای اسلب به پنج لایه به ابعاد ۷×۲×۲ تقسیم شدند.

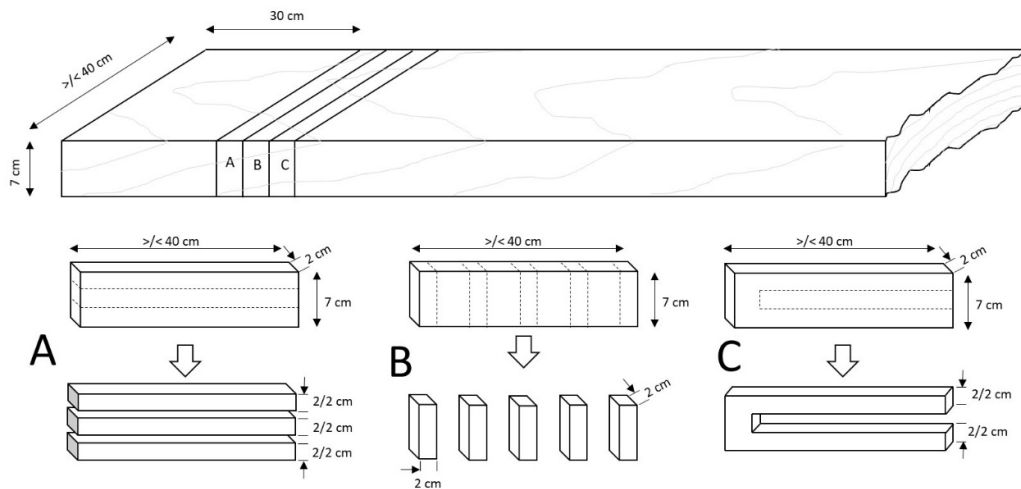
اندازه‌گیری ویژگی‌های کیفی اسلب‌های خشک‌شده

رطوبت نهایی و گرادیان رطوبت

میانگین رطوبت نهایی اسلب‌ها با روش خشک کردن در آون تعیین شد. برای محاسبه گرادیان رطوبت نهایی در ضخامت، در فاصله ۳۰ سانتی‌متر از مقاطع طولی اسلب‌ها،

رابطه ۱ اندازه‌گیری شد [۲۶]. مقدار x و x' به ترتیب فاصله دو لبه بیرونی نمونه پیش و پس از برش (برحسب میلی‌متر) و 2، مجذور طول هر یک از نمونه‌ها می‌باشد. میزان انحراف شاخه‌ها بلافاصله بعد از برش نمونه‌ها و نیز بعد از گذشت ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد.

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



شکل ۲- شمایی از روش برش نمونه برای اندازه‌گیری گرادیان رطوبت در راستای ضخامت (A) و پهنا (B) و برون سختی (C)

مقدار رطوبت هر لایه به روش خشک کردن در آون اندازه‌گیری شد و گرادیان رطوبت در راستای ضخامت و پهنا محاسبه شد. شمایی از روش برش نمونه‌ها برای اندازه‌گیری گرادیان رطوبت در شکل ۲ نمایش داده شده است.

تنش‌های باقی‌مانده (برون سختی)

شدت تنش‌های باقی‌مانده با استفاده از آزمون برش نمونه‌های دوشاخه در راستای ضخامت و با استفاده از

نتایج و بحث

رطوبت نهایی و گرادیان رطوبت

میانگین رطوبت نهایی اسلب‌ها در هر سه برنامه در محدوده ۱۰ تا ۱۲ درصد قرار داشت که نشان‌دهنده کارایی برنامه‌های چوب خشک‌کنی در کاهش رطوبت تا سطح مناسب برای کاربرد نهایی است. خشک کردن اسلب‌ها تا رطوبت نهایی مورد نظر، به طور متوسط ۶ الی ۷ روز به طول انجامید، در حالی که خشک کردن این نوع اسلب‌ها با این ابعاد در کوره هوای گرم معمولاً بیشتر از یک ماه به طول می‌انجامد [۹]. این مسئله مؤید مزیت کوره خلأ هوای گرم در کاهش چشمگیر مدت زمان خشک‌شدن چوب و کاهش هزینه مصرف انرژی در مقایسه با کوره هوای گرم است [۱۰ و ۱۲]. در اسلب‌های کمتر از ۴۰ سانتی‌متر پهنا، بیشترین گرادیان رطوبت در ضخامت مربوط به برنامه اول

معایب خشک کردن

شدت ترک خوردگی سطحی و مقطعی مطابق استاندارد ISO 9709 ارزیابی شد [۲۷]. پهنا، عمق، تعداد و مجموع طول ترک‌ها به طور جداگانه ثبت شد. همچنین احتمال وقوع ترک‌های داخلی (شانه عسلی شدن) با برش اسلب‌ها در نزدیکی مقاطع عرضی بررسی شد.

تغییر شکل‌ها

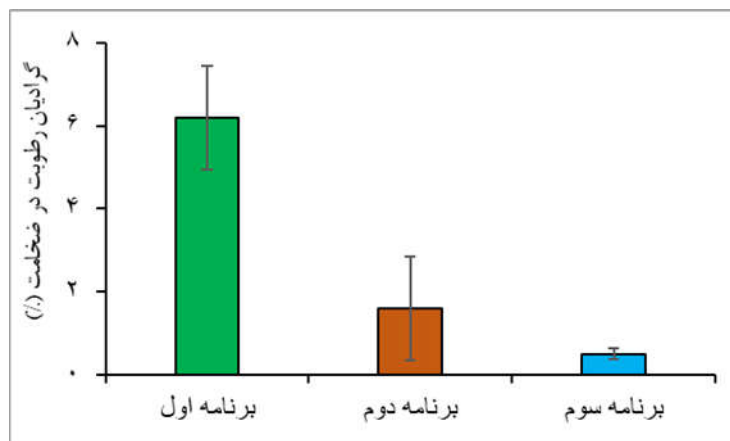
انواع تغییر شکل شامل ناودانی، کمانی، خمیدگی و تابیدگی بر اساس استاندارد ISO 9709 و به روش کمی اندازه‌گیری شدند [۲۷].

تجزیه و تحلیل آماری

آزمایش‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی و با ۵ تکرار برای هر تیمار انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن با استفاده از نرم افزار SPSS در سطح احتمال ۰/۰۵ صورت گرفت.

رطوبت در سطح کمتر از مغز بود. این الگوی گرادیان رطوبت معمولاً در چوب‌های پهن‌تر از چوب‌درون گونه‌های سوزنی‌برگ شکل می‌گیرد [۲]. بنابراین، می‌توان گفت که مشابه کوره‌های معمولی، خشک شدن اسلب‌ها در کوره خلأ/هوای گرم نیز از سطح به مغز رخ می‌دهد. شیب گرادیان رطوبت در ضخامت بیشتر از پهنای بود و مؤید این مسئله است که ضخامت اسلب در مقایسه با پهنای آن، نقش تعیین کننده‌ای در سرعت انتشار رطوبت و مدت زمان خشک شدن دارد. بر اساس گزارش Gao و همکاران (۲۰۲۴) بر روی چوب *Masson pine*، کنترل گرادیان رطوبت به عنوان عامل کلیدی در کاهش ترک‌های سطحی معرفی شده است [۲۸].

(۶/۲ درصد) و کمترین مقدار مربوط به برنامه سوم (۰/۵ درصد) بود (شکل ۳). در اسلب‌های پهن‌تر از ۴۰ سانتی‌متر نیز روند مشابهی مشاهده شد، به طوری که گرادیان در برنامه اول (۷/۱ درصد) به طور معنی‌داری بیشتر از برنامه سوم (۰/۴۸ درصد) بود. مشابه نتایج به دست آمده برای گرادیان رطوبت در ضخامت، مقدار گرادیان رطوبت در پهنای نیز در برنامه اول بیشتر از دو برنامه دیگر بود و در برنامه سوم، تغییرات رطوبت در راستای پهنای کمتر بود. این نتایج نشان می‌دهد که کاهش سرعت خشک شدن در برنامه سوم موجب یکنواخت‌تر شدن توزیع رطوبت بین سطح و مغز اسلب‌ها می‌شود. به طور کلی الگوی گرادیان رطوبت در همه اسلب‌ها کم و بیش از نوع پارابولیکی بود (شکل ۴) و مقدار

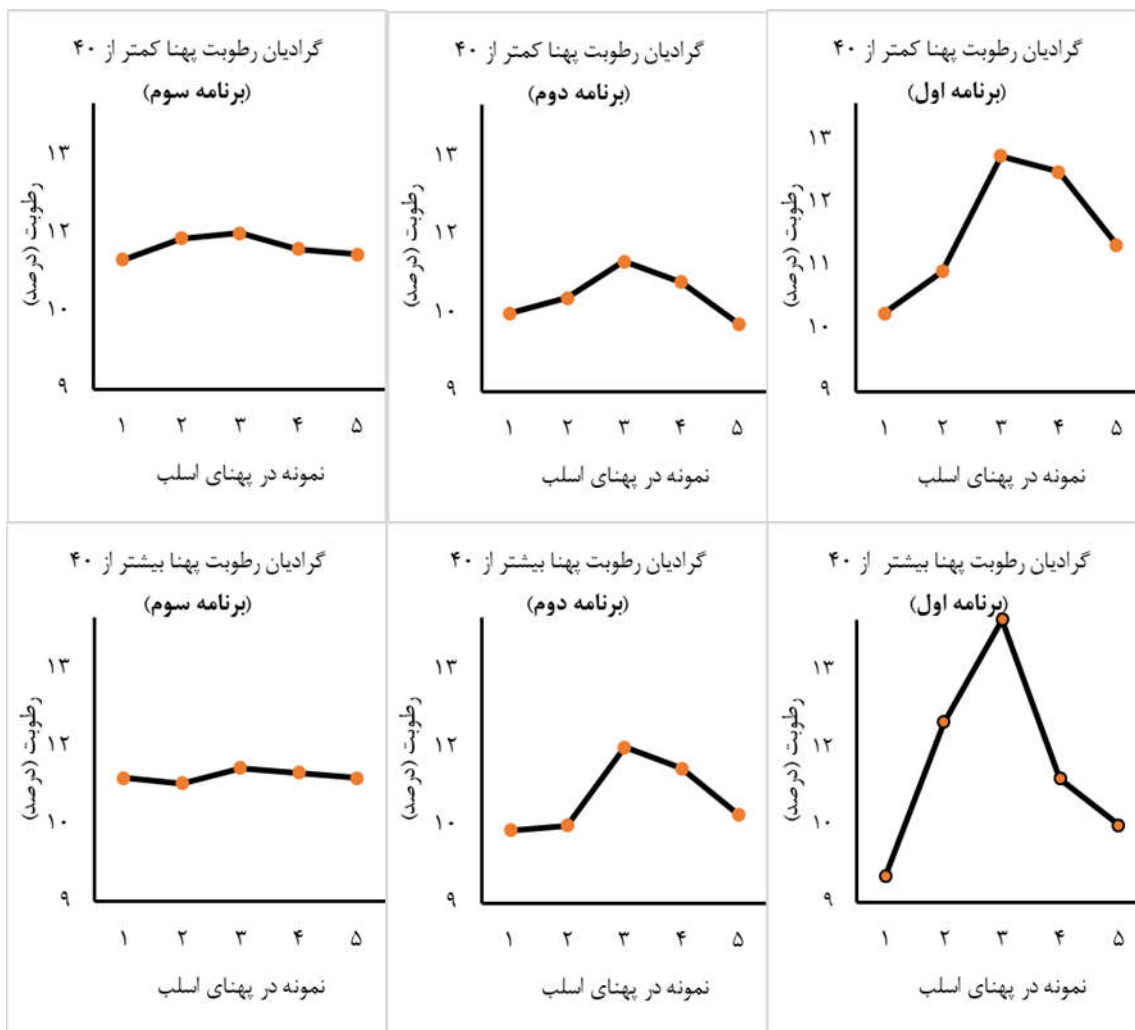


شکل ۳- گرادیان رطوبت نهایی در ضخامت اسلب گردو (با پهنای کمتر از ۴۰ سانتیمتر) در برنامه‌های اجرا شده

یافته‌های Tarvainen و همکاران (۲۰۰۶) مطابقت دارد که گزارش کردند افزایش سرعت خشک کردن موجب افزایش تمایل به بروز برون سختی در گونه کاج جنگلی و نوئل نیروژ می‌شود [۲۹]. برون سختی پدیده‌ای چندعاملی است که تحت تأثیر خصوصیات گونه، ابعاد مقطع چوب و پارامترهای برنامه خشک کردن پدید می‌آید. گونه در تعیین میزان نفوذپذیری و ناهمسانی هم کشیدگی نقش اساسی دارد؛ گونه‌هایی با تفاوت بیشتر بین هم کشیدگی شعاعی و مماسی و نفوذپذیری پایین معمولاً حساسیت بالاتری به برون سختی نشان می‌دهند [۳۰، ۳۱].

برون سختی

نتایج آزمون برون سختی برش نمونه‌های دوشاخه نشان داد که میزان تنش‌های باقی‌مانده در اسلب‌های خشک‌شده با برنامه سوم به طور قابل توجهی کاهش یافته است (0.00031 mm^{-1} برای اسلب با پهنای کم‌تر و 0.00036 mm^{-1} برای اسلب پهن‌تر). در مقابل، اسلب‌های خشک‌شده در برنامه اول مقادیر بالاتری تنش را نشان داد (0.00118 mm^{-1} و 0.00105 mm^{-1}) و نمونه‌های برش شده دارای برون سختی زیادی بودند، به گونه‌ای که شاخه‌ها بلافاصله پس از برش به سمت یکدیگر حرکت کردند (شکل ۵). این نتایج با



شکل ۴- الگوی گرادبان رطوبت در پهناي اسلب گردو در برنامه‌های اجراشده

برون سختی در اسلب‌های گردوی ایرانی توصیه می‌شود از برنامه‌هایی با افزایش تدریجی دما، اعمال ملایم خلأ در مراحل اولیه استفاده شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برنامه چوب خشک‌کنی ملایم نقش مؤثری در کاهش برون سختی دارد. در مورد نمونه‌های مربوط به برنامه دوم نیز پس از ۲۴ ساعت، شاخه‌ها به سمت یکدیگر حرکت کردند (شکل ۵ ب و د، نمونه میانی)، که این پدیده احتمالاً ناشی از گرادبان رطوبت بوده است [۲].

ابعاد نمونه نیز قابل توجه است: تخته‌ها و اسلب‌های ضخیم‌تر به دلیل مسیر طولانی‌تر انتشار رطوبت و کندی تعدیل رطوبت در مغز، احتمال بیشتری برای ایجاد گرادبان رطوبتی سطح-مغز و در نتیجه برون سختی دارند [۲۹، ۳۲]. از منظر برنامه خشک‌کردن، افزایش سریع دما، کاهش ناگهانی رطوبت نسبی یا اعمال خلأ قوی در مراحل ابتدایی، سبب افزایش سرعت خشک شدن سطح نسبت به مغز و تشدید تنش‌های باقی‌مانده می‌شود و ریسک برون سختی را بالا می‌برد [۷، ۳۱]. بر این اساس، برای کاهش



شکل ۵- نمونه‌های دوشاخه برش خورده از اسلب‌های خشک‌شده با برنامه اول (چپ)، برنامه دوم (وسط) و برنامه سوم (راست): الف) بلافاصله پس از برش در اسلب‌های با پهنای کم؛ ب) ۲۴ ساعت پس از برش در اسلب‌های با پهنای کم؛ ج) بلافاصله پس از برش در اسلب‌های با پهنای زیاد؛ د) ۲۴ ساعت پس از برش در اسلب‌های با پهنای زیاد.

ترک‌خوردگی و شانه‌عسلی شدن

شدت ترک‌خوردگی سطحی و مقطعی در اسلب‌های با پهنای کم و پهنای زیاد تحت برنامه اول به‌طور معناداری بیشتر از سایر برنامه‌ها بود (جدول ۷ و شکل‌های ۶-۸). به‌عنوان نمونه، طول کل ترک‌های سطحی در اسلب‌های پهن ۱۵۵۳/۸ میلی‌متر بودند، درحالی‌که این مقدار در برنامه سوم تنها ۱۸۲/۴ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. همچنین، تعداد کل ترک‌ها در برنامه سوم به حداقل کاهش یافت (۴ ترک سطحی و ۱-۲ ترک مقطعی). بروز ترک‌های بیشتر در برنامه اول را می‌توان به استفاده از دماهای بالاتر در مراحل ابتدایی، اعمال خلأ شدیدتر و کوتاه‌تر بودن مدت زمان کل خشک‌کردن نسبت داد. این شرایط موجب خشک شدن سریع لایه‌های سطحی می‌شود درحالی‌که مغز همچنان مرطوب باقی می‌ماند و در نتیجه سبب ایجاد گرادیان شدید رطوبتی و تنش‌های

کششی سطحی شده که نهایتاً به ترک‌خوردگی منجر می‌شود [۲]. افزون بر این، کوتاه‌تر بودن مدت زمان کل خشک‌کردن در برنامه اول در مقایسه با دو برنامه دیگر، فرصت کافی برای یکنواخت شدن رطوبت در ضخامت و پهنای اسلب را فراهم نکرده و این امر به تشدید معایب انجامیده است. در مقابل، برنامه سوم با به‌کارگیری افزایش تدریجی دما، و خلأ ملایم‌تر و نیز زمان طولانی‌تر خشک‌کردن، امکان توزیع یکنواخت‌تر رطوبت در سطح و مغز اسلب‌ها را فراهم ساخت. این شرایط منجر به کاهش قابل توجه شدت ترک‌خوردگی و تعداد ترک‌ها شد و کیفیت نهایی اسلب‌ها را بهبود بخشید. این یافته‌ها با نتایج گزارش‌شده توسط Espinoza و Bond (۲۰۱۶) همخوانی دارد که نشان دادند استفاده از روش‌های خشک‌کردن تحت خلأ با دمای بالا و خلأ شدید در مراحل اولیه، می‌تواند احتمال ترک‌خوردگی را افزایش دهد [۱۰].

۳۳]. خشک کردن سریع چوب به ویژه در گام‌های ابتدایی علت اصلی ترک خوردگی سطحی است. بنابراین، اعمال شرایط ملایم چوب خشک کنی در گام‌های ابتدایی در جلوگیری از وقوع این عیب مؤثر است.

همچنین، این نتایج با مطالعات Yin و همکاران (۲۰۲۱) و Fu و همکاران (۲۰۲۳) مطابقت دارد که تنش‌های خشک کردن و گرادیان رطوبتی را از عوامل اصلی ترک خوردگی و تغییر شکل چوب معرفی کرده‌اند [۳۰،



شکل ۶- ترک سطحی در اسلب‌های دارای پهنای کم خشک شده با برنامه اول (الف)، برنامه دوم (ب) و برنامه سوم (ج).



شکل ۷- ترک سطحی در اسلب‌های دارای پهنای زیاد خشک‌شده با برنامه اول (الف)، برنامه دوم (ب) و برنامه سوم (ج). وجود ترک‌های سطحی زیاد و پهن در اسلب مربوط به برنامه اول؛ ترک‌های سطحی و انتهایی کمتر در اسلب مربوط به برنامه دوم، اسلب بدون ترک سطحی و مقطعی مربوط به برنامه سوم.



شکل ۸- ترک مقطعی در اسلب‌های دارای پهنای زیاد خشک‌شده با برنامه اول (الف) و (د)، برنامه دوم (ب) و برنامه سوم (ج).

خشک‌کردن عمدتاً ناشی از تنش‌های خشک‌کردن غیریکنواخت است و عوامل طبیعی چوب مانند جوان‌چوب، چوب واکنشی و ماریچ تار آن را تشدید می‌کنند [۲]. علاوه بر این، رعایت اصول چیدن و دسته‌بندی الوارها و چوبدستک گذاری و استفاده از وزنه بر روی الوارهای دسته بندی شده نیز در کاهش تغییرشکل‌ها مؤثر است. سرعت خشک‌کردن و برنامه چوب‌خشک‌کنی نیز در بروز برخی از معایب تغییر شکل نقش مهمی دارند؛ در اثر خشک‌کردن سریع یا بیش از حد بر شدت ناودانی و خمیدگی افزوده می‌شود [۲، ۳۱]. در مقابل، اعمال دمای ملایم و گام تنش‌زدایی مناسب فرصت تعادل تنش‌ها را فراهم کرده و تغییرشکل‌ها را کاهش می‌دهد [۱۰]. جهت‌گیری و انحراف الیاف از محور طولی نیز در بروز تابیدگی اثرگذار است و در برنامه‌های سریع تشدید می‌شود [۳۰، ۳۴]. در برنامه سوم با افزایش تدریجی دما، خلأ ملایم‌تر و زمان طولانی‌تر، خروج یکنواخت رطوبت در سراسر مقطع چوب امکان‌پذیر شد و تغییرشکل‌ها کاهش یافت، که با نتایج Oltean و همکاران [۲۰۰۷] (۳۱) و Yin و همکاران [۲۰۲۱] (۳۰) نیز همخوانی دارد.

اثر پهنای اسلب

اثر پهنای اسلب نیز بر شدت عیوب خشک‌کردن مشهود بود. نتایج نشان داد که اسلب‌های پهن‌تر (بیش از

در خصوص بروز شانه‌عسلی شدن، در برنامه سوم هیچ نوع شانه‌عسلی مشاهده نشد. در برنامه دوم، این عیب به‌صورت محدود و موردی ظاهر شد، درحالی‌که در برنامه اول به میزان قابل‌توجهی مشاهده شد. این نتایج اهمیت کنترل تدریجی دما و خلأ در کاهش بروز عیوب داخلی را نشان می‌دهد و با مطالعات پیشین Fu و همکاران (۲۰۲۳) که نقش تنش‌های داخلی و سرعت بالای خشک‌کردن را در ایجاد این عیب برجسته کرده‌اند، همخوانی دارد [۳۳]. ترک داخلی وقتی رخ می‌دهد که از دماهای بالا برای خشک‌کردن چوب استفاده شود وقتی که هنوز رطوبت مغز تخته بیشتر از رطوبت اشباع فیبر است [۲]. احتمال وقوع این نوع عیب چوب خشک‌کنی در مقطوعات با ابعاد بزرگ مانند اسلب و گونه‌های با چگالی بالا مانند بلوط و اعمال بیش از حد دما و خلأ در گام‌های ابتدایی (مشابه برنامه اول) بیشتر است.

تغییر شکل‌ها

شدت تغییرشکل‌ها (کمانی، ناودانی، خمیدگی و تابیدگی) در اسلب‌های خشک‌شده تحت برنامه اول به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از سایر برنامه‌ها بود (جدول ۷). برای مثال، میزان متوسط تابیدگی در اسلب‌های باریک برابر با ۲/۸ میلی‌متر و در اسلب‌های پهن برابر با ۳۸/۲ میلی‌متر بود، در حالی که در برنامه سوم این مقادیر به ترتیب به ۲/۶ و ۳/۴ میلی‌متر کاهش یافت. تغییر شکل چوب طی

حاضر با نتایج Gao و همکاران (۲۰۲۲) و Sakagami (۲۰۱۹) مطابقت دارد که نشان دادند ابعاد بزرگ تر چوب منجر به افزایش گرادیان رطوبت و به تبع آن شدت ترک خوردگی و تغییر شکل می شود [۲۸، ۳۳]. به طور کلی، اسلب های با پهنای بیشتر از ۴۰۰ میلی متر حساسیت بیشتری نسبت به ایجاد ترک و تغییر شکل نشان دادند. با این حال، اجرای برنامه سوم در این گروه نیز موجب بهبود کیفیت نهایی شد، به طوری که اختلاف بین دو گروه (پهنای کم و زیاد) در این برنامه کاهش یافت.

۴۰۰ میلی متر) در همه برنامه ها، ترک خوردگی و تغییر شکل بیشتری نسبت به اسلب های با پهنای کم داشتند. برای مثال، طول کل ترک های سطحی در برنامه اول از ۱۲۵۳ میلی متر در اسلب با پهنای کم به ۱۵۵۳/۸ میلی متر در اسلب پهن یافت. همچنین، میزان تابیدگی در همان برنامه برای اسلب با پهنای کم ۲۱/۸ میلی متر بود، در حالی که در اسلب های پهن به ۳۸/۲ میلی متر رسید. این نتایج نشان می دهد که افزایش پهنای اسلب موجب طولانی تر شدن مسیر انتشار رطوبت و ایجاد گرادیان شدیدتر بین مغز و سطح می شود و متعاقباً ترک خوردگی و تغییر شکل بیشتر می شود. یافته های

جدول ۷- نتایج ویژگی های کیفی اسلب های خشک شده با دو محدوده پهنای در سه برنامه چوب خشک کنی در کوره خلأ/ هوای گرم

برنامه های اجرا شده			ویژگی های کیفی	پهنای اسلب
برنامه سوم	برنامه دوم	برنامه اول		
۲۷/۰ ^{ab} ± ۲۶/۱۱	۱۲/۰ ^c ± ۲۳/۱۰	۱۵/۱ ^a ± ۹۴/۱۱	میانگین رطوبت نهایی (درصد)	تغییر شکل میانگین عمق ترکها تعداد کل ترکها
۱۴/۰ ^b ± ۵/۰	۲۵/۱ ^b ± ۵۹/۱	۲۵/۱ ^a ± ۱۹/۶	گرادیان رطوبت در ضخامت (درصد)	
۲/۰ ^b ± ۴۲۵/۰	۲۱/۰ ^{ab} ± ۹۷۵/۰	۵۱/۰ ^{ab} ± ۰۵/۱	گرادیان رطوبت در پهنای (درصد)	
۰۰۰۰۰۳۱/۰	۰۰۰۰۰۱۴۶/۰	۰۰۰۰۰۱۸۸/۰	میانگین برون سختی (mm-1)	
۰۸/۱۹۸	۰۴۰۷	۰۱۲۵۳	سطحی	
۰۲/۲۰	۰۲/۴۸۸	۰۳۷۰	مقطعی	
۰۲	۰۵/۲	۰۲/۳	سطحی	
۰۴/۱	۰۲/۳	۰۵/۴	مقطعی	
۰۴/۳	۰۲/۵	۰۶/۹	سطحی	
۰۴/۱۲	۰۶/۴۴	۰۴/۵۸	مقطعی	
۰۰/۴	۰۸/۷	۰۲/۲۰	سطحی	
۰۱	۰۱۵	۰۱۷	مقطعی	
۰۸/۰ ^c ± ۸/۱	۰۵۲/۱ ^{bc} ± ۴/۴	۰۱۶/۴ ^b ± ۴/۷	ناودانی	
۰۴۸/۱ ^b ± ۸/۲	۰۶۴/۱ ^b ± ۸/۲	۰۲۶/۷ ^a ± ۸/۱۱	کمانی	
۰۶۷/۱ ^{abc} ± ۴/۲	۰۶۴/۱ ^a ± ۸/۴	۰۱۴/۱ ^{ab} ± ۶/۳	خمیدگی	
۰۸۲/۱ ^c ± ۶/۲	۰۵۸/۱ ^c ± ۳	۰۳۵/۸ ^b ± ۸/۲۱	تابیدگی	
۰۴۳/۰ ^{ab} ± ۳۸/۱۱	۰۲۶/۰ ^c ± ۲۲/۱۰	۰۴۹/۰ ^{bc} ± ۸۲/۱۰	میانگین رطوبت نهایی (درصد)	
۰۳۴/۰ ^b ± ۴۸/۰	۰۰۸/۰ ^b ± ۸۷/۱	۰۷۵/۳ ^a ± ۰۵/۷	گرادیان رطوبت در ضخامت (درصد)	
۰۱۸/۰ ^c ± ۳۹۵/۰	۰۴۹/۰ ^{ab} ± ۸۰۵/۰	۰۲۰/۱ ^a ± ۴۵/۱	گرادیان رطوبت در پهنای (درصد)	
۰۰۰۰۰۰۳۶۷/۰	۰۰۰۰۰۰۳۷۹/۰	۰۰۰۰۰۰۱۰۵/۰	میانگین برون سختی (mm-1)	
۰۴/۱۸۲	۰۲/۶۲۷	۰۸/۱۵۵۳	سطحی	
۰۶/۴۲	۰۶/۴۸۱	۰۸/۵۲۷	مقطعی	
۰۸/۱	۰۵/۲	۰۱/۴	سطحی	
۰۵/۱	۰۱/۳	۰۹/۲	مقطعی	
۰۳/۲	۰۸/۴	۰۲/۶	سطحی	
۰۲/۱۵	۰۸/۳۵	۰۹۵	مقطعی	
۰۴	۰۱۰	۰۱۵	سطحی	

مقطعی	۱۹ ^a	۱۷ ^a	۲ ^a
ناودانی	۶۳/۵ ^a ± ۲/۱۲	۹۶/۳ ^{ab} ± ۸/۷	۰۷/۲ ^c ± ۶/۲
کمانی	۳۰/۲ ^a ± ۶/۸	۴۸/۱ ^b ± ۸/۳	۲۲/۱ ^b ± ۲
خمیدگی	۵۸/۱ ^{bc} ± ۲	۵۹/۲ ^{ab} ± ۸/۳	۴۱/۱ ^c ± ۱
تابیدگی	۶۸/۱۷ ^a ± ۲/۳۸	۲۸/۲ ^c ± ۸/۳	۱۴/۱ ^c ± ۴/۳

میانگین تغییر شکل اسلب‌ها
(میلی‌متر)

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که انتخاب برنامه خشک‌کردن نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت نهایی اسلب‌های گردوی ایرانی دارد. برنامه اول به دلیل دمای بالاتر، خلأ شدیدتر در گام‌های ابتدایی و زمان کوتاه‌تر، بیشترین گرادیان رطوبتی را سبب شد و منجر به افزایش تنش‌های باقی‌مانده، ترک‌خوردگی سطحی و مقطعی شد. همچنین شدت تغییر شکل‌ها در این برنامه بیشترین مقدار را داشت. در مقابل، برنامه سوم با افزایش تدریجی دما، خلأ ملایم‌تر و زمان طولانی‌تر خشک‌کردن، یکنواختی رطوبت را بهبود داد و شدت ترک‌ها و تغییر شکل‌ها را کاهش داد. پهنای اسلب نیز بر شدت عیوب مؤثر بود؛ اسلب‌های پهن‌تر ترک و تغییر شکل بیشتری داشتند. مقدار رطوبت نهایی در هر سه برنامه مطلوب بود، اما در برنامه سوم یکنواختی رطوبت، حداقل تنش و کمترین ترک و تغییر شکل مشاهده شد. با توجه به نتایج به دست آمد، برنامه سوم برای خشک کردن اسلب‌های گردوی ایرانی به ضخامت ۷ سانتی‌متر و پهنای بیش از ۴۰۰ میلی‌متر در کوره خلأ/هوای گرم به‌عنوان برنامه بهینه قابل پیشنهاد است. برای تحقیقات آتی، تهیه برنامه چوب خشک‌کنی سایر گونه‌های تجاری کشور مانند راش در این نوع کوره‌های خلأ پیشنهاد می‌شود.

منابع

- [5] Antti, A.L., 1995. Microwave drying of pine and spruce. Holz als Roh- und Werkstoff, 53(5), pp.333–338. <https://doi.org/10.1007/s001070050099>
- [6] Chen, Z. and Lamb, F.M., 2001. Vacuum drying of small wood components at room temperature. Forest Products Journal, 51(10), pp.55–59.
- [7] Chen, Z. and Lamb, F.M., 2003. Analysis of cyclic vacuum drying curve. Wood Science and Technology, 37(3–4), pp.213–219. <https://doi.org/10.1007/s00226-003-0187-6>
- [8] Chen, Z. and Lamb, F.M., 2004. A vacuum drying system for green hardwood parts. Drying Technology, 22(3), pp.577–595. <https://doi.org/10.1081/DRT-120029997>
- [9] 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), pp.497–500. DOI: 10.1080/07373930601184088
- [10] Espinoza, O. and Bond, B., 2016. Vacuum drying of wood—state of the art. Current Forestry Reports, 2, pp.223–235. <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0045-9>
- [11] Tarmian, A., 2019. The establishment of radio frequency-vacuum wood drying in Iran. Iran Wood and Paper Industry Magazine, 134, pp.29–34. (In Persian).
- [12] Avramidis, S., Lazarescu, C. and Rahimi, S., 2023. Basics of Wood Drying. In: Peter Niemz, Alfred Teischinger and Dick Sandberg, editors. Springer Handbook of Wood Science and Technology, pp.679–706. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81315-4_13
- [13] Jiang, Z., Yamamoto, H., Yoshida, M. Dohi, M. and Tanak, K., 2024. Effect of low vacuum medium temperature drying on reduction of residual stress and correction of warp of Japanese cedar timber. European Journal of Wood and Wood Products, 82, pp. 1511–1522. <https://doi.org/10.1007/s00107-024-02100-3>
- [14] Lee, Ch., 2024. Effect of stacking position on drying rate during radio-frequency vacuum combined with mechanical press drying of Douglas-fir and Radiata pine. Journal of Wood Science. 70(7), <https://doi.org/10.1186/s10086-024-02122-8>.
- [15] Lyon, S., Bowe, S. and Wiemann, M., 2021. Comparing vacuum drying and conventional drying effects on the coloration of hard maple lumber. Research Paper FPL-RP-708. Madison, WI: U.S.
- [1] Goshnev, 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), pp.336–339. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0862-4>
- [2] Tarmian, A., 2017. Wood drying theories. University of Tehran Press, Tehran. (In Persian).
- [3] Avramidis, S. and Zwick, R.L., 1992. Exploratory radio-frequency/vacuum drying of three B.C. coastal softwoods. Forest Products Journal, 42(7/8), pp.17–24.
- [4] 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), pp.41–47.

- <https://doi.org/10.15376/biores.17.1.1643-1658>
- [26] European Committee for Standardization (CEN), 2005. EN 14464 – Round and sawn timber — Method for assessment of drying quality. CEN, Brussels, Belgium.
- [27] International Organization for Standardization, 2011. ISO 9709 – Wood — Methods of measuring physical characteristics of wood. ISO, Geneva, Switzerland.
- [28] Gao, Y., Xu, W., Yang, F. and Chen, Z., 2022. Effect of timber size on moisture gradients and surface checking during kiln drying. *Drying Technology*, 40(6), pp.981–992. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1944670>
- [29] Tarvainen, V., Ranta-Maunus, A., Hanhijärvi, A. and Forsén, H., 2006. The effect of drying and storage conditions on case hardening of Scots pine and Norway spruce timber. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 8(1), pp.3–14. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2006000100001>
- [30] Yin, Q., Dai, C., Yu, H., Chen, H. and Zhao, R., 2021. Drying stress and strain of wood: A review. *Applied Sciences*, 11(11), p.5023. <https://doi.org/10.3390/app11115023>
- [31] Oltean, L., Teischinger, A. and Hansmann, C., 2007. Influence of temperature on cracking and mechanical properties of wood during wood drying — a review. *BioResources*, 2(4), pp.789–811. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.2.4.789-811>
- [32] Sakagami, H., 2019. Influence of wood dimensions on drying behavior and checking in sugi (*Cryptomeria japonica*). *Journal of Wood Science*, 65(1), pp.1–9. <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1797-y>
- [33] Fu, Z., Yu, J., Jiang, J., Chen, Z. and Zhou, F., 2023. Wood deformation and cracking during drying: A review. *Forests*, 14(5), p.1029. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14051029>
- [34] Sharma, R.K., Welling, J. and Niemz, P., 2010. Influence of spiral grain on distortion of beech wood during drying. *European Journal of Wood and Wood Products*, 68(2), pp.207–213. <https://doi.org/10.1007/s00107-009-0376-7>
- Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 5 p.
- [16] Elmetwaly, M. S., Saker, L. H. R. and Salem, M. S., 2024. Heat and Mass Transfer Characteristics during Vacuum Drying of Wood. *Journal of Engineering Research*, 8(3), Article 17.
- [17] Bui, T. T. K., Le, A. D. and Hoang, T. T. H., 2023. Research on optimizing the drying process of *Pyinkado* (*Xylia xylocarpa*) by vacuum infrared radiation drying method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1155 (1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1155/1/012030>
- [18] 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.
- [19] Tarmian, A., Ciritcioglu, H.H., Görgün, H.V., 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*. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1833214>
- [20] Ananías, R.A., Sepúlveda-Villarreal, 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>
- [21] Ünsal, Ö. and Görgün, H.V., 2021. Tabletop with natural wood material drying practices; sycamore tree species example. *Furniture Decoration Magazine*, 164, May–June.
- [22] Boone, R.S., Kozlik, C.J., Bois, P.J. and Wengert, E.M., 1988. Dry kiln schedules for commercial woods: temperate and tropical. General Technical Report FPL-GTR-57. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- [23] Ebrahimi, A. and Niknam, V., 2004. Ecology of walnut (*Juglans regia* L.) in Iran. *Iranian Journal of Natural Resources*, 57(4), pp.567–578.
- [24] ASTM International, 2007. ASTM D4442 – Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-base materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [25] Ambrose, E., Jusoh, I., Duju, A. and Welman, N., 2022. Effects of incision, forced-air drying, and pressure pretreatments on wet pockets, drying rate, and drying defects of *Acacia mangium* wood. *BioResources*, 17(1), pp. 1643–1658.