

## تدوین عددی و تجربی برنامه خشک کردن چوب راش در کوره بر پایه تئوری انتشار

محراب مدهوشی<sup>۱\*</sup> و ملیحه علیزاده<sup>۲</sup>

\*۱- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، پست الکترونیک: madhoushi@gau.ac.ir

۲- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: اردیبهشت ۱۳۹۶ تاریخ پذیرش: شهریور ۱۳۹۶

### چکیده

برنامه‌هایی که تاکنون برای خشک کردن انواع گونه‌های چوبی بومی ایران در داخل کشور تدوین شده‌اند برگرفته از کد برنامه‌های آزمایشگاه فرآورده‌های جنگلی آمریکا (FPL) بوده است که در نوع خود مشکلاتی را به همراه دارند. از این رو، هدف از انجام این تحقیق تدوین برنامه‌ای مناسب برای خشک کردن چوب راش برای اولین بار و متفاوت با برنامه‌های قبل است که در نوع خود مزیت‌هایی را نیز می‌تواند داشته باشد. چوب راش ایران (*Fagus orientalis*) با برش تجاری و با ضخامت ۵/۵ سانتی‌متر با برنامه‌ای بر پایه تئوری انتشار تا رسیدن به رطوبت نهایی  $12 \pm 2$  درصد خشک شد. این برنامه در ۳ مرحله جداگانه و با رطوبت‌های اولیه ۶۶/۶، ۵۸ و ۴۵ درصد بر روی سه بار متفاوت کوره اجرا گردید. دمای خشک اولیه (اولین گام) محاسبه شده در هر سه مرحله یکسان و برابر ۴۶ درجه سلسیوس و دمای تر در طول اجرای برنامه یکسان و برابر ۴۵ درجه سلسیوس منظور شد. شدت معایب کماتی، انحنای، تاب، ترک سطحی و ترک انتهایی در طول اجرای برنامه، قبل و بعد از خشک شدن در هر مرحله اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نمودارهای کنترل کیفیت انجام گردید. برنامه جدید که با استفاده از روابط ریاضی و بر پایه تئوری انتشار تدوین شد در هر سه بار کوره، نتایج قابل قبولی به همراه داشت. به طوری که شدت تغییرات معایب در هر سه بار کوره در نمودارهای تحلیل آماری در حدود قابل قبول کمی و کیفی قرار گرفتند. در نهایت، عدم ایجاد ترک سطحی در نمونه‌ها به دلیل اعمال شرایط ملایم کاهش رطوبت، به‌عنوان ویژگی برتر این برنامه جدید تدوین شده مطرح گردید.

واژه‌های کلیدی: راش، تئوری انتشار، معایب خشک شدن، ترک سطحی

### مقدمه

میزان خشک شدن الوار با توجه به رطوبت نسبی هوا، دمای هوا و سرعت جریان هوا در سطح الوار بستگی دارد. در داخل کوره‌های چوب خشک‌کنی، دما و رطوبت نسبی در سطح بالاتری نسبت به هوای آزاد نگه‌داشته می‌شود، همچنین سرعت هوا در کوره‌ها به مقدار بیشتری نسبت به خشک شدن چوب در هوای آزاد کنترل می‌شود. این موضوع، هم ظرفیت رطوبت قابل حمل در هوا و هم مقدار رطوبت تعادل را در کوره

خشک کردن چوب شامل خروج رطوبت و انتقال آن از مغز به سطح چوب می‌باشد که این انتقال در شرایط کنترل شده‌ای انجام می‌شود. در واقع خشک شدن چوب شامل حرکت مولکول‌های آب در هریک از حالت‌های مایع یا بخار، از میان یک ساختار بیولوژیک پیچیده می‌باشد (Keey et al., 2000).

Muchot *et al.*, 2006; Olek and Weres, 2006; Trcala, 2015; Zhao *et al.*, 2016). مدل‌های بر پایه انتشار برای گونه‌هایی که نفوذپذیری کمی دارند و از دانسیته بالایی برخوردار هستند از دقت بیشتری برخوردار است، چون فرایند خشک شدن بیشتر تحت کنترل سرعت آب پیوندی است.

لازم به ذکر است که مدل‌های بر پایه تئوری انتشار عمومی‌تر بوده و معمولاً بر اساس سرعت خشک شدن و بر پایه عوامل مختلف مؤثر در آن ارائه می‌شوند. مدل پیشنهادی توسط (Malmquist, 1991) از ویژگی‌های خاصی برخوردار است و بر اساس عوامل مختلف خشک شدن مانند گونه چوبی، ضخامت، سرعت وزش باد و نفوذپذیری چوب مدلی را ارائه می‌دهد که می‌تواند در تدوین برنامه‌های کوره گونه‌های داخلی ایران مورد استفاده قرار گیرد؛ زیرا هر گونه چوبی ویژگی خاصی دارد و ضروری است هر کشور برای گونه‌های بومی خود، بر اساس اصول علمی و تجربی، برنامه‌های چوب خشک‌کنی تهیه کند.

در این تحقیق ابتدا برنامه کوره بر اساس مدل و روابط ارائه شده توسط (Malmquist 1991) به صورت تحلیلی و با استفاده از مبانی تئوری انتشار در چوب و روابط حاکم بر آن و برای رطوبت‌های اولیه مختلف نوشته شده و در ادامه این برنامه‌ها به صورت تجربی اجرا می‌شود. هدف اصلی معرفی و دستیابی به شیوه‌ای جدید و مستقل از تدوین برنامه‌ها است که به کد برنامه‌های آزمایشگاه فرآورده‌های جنگلی آمریکا<sup>۱</sup> وابسته نبوده و علاوه بر بومی بودن مزیت‌های نسبی بیشتری نسبت به روش قبلی تدوین برنامه کوره برای گونه راش توسط (Madhoushi and Ebrahimi, 1996) داشته باشد.

## مواد و روش‌ها

### تدوین عددی برنامه

ابتدا در این تحقیق، متفاوت با سایر کارهای انجام شده در زمینه چوب خشک‌کنی در داخل کشور (که بر اساس برنامه‌های پیشنهادی FPL است و در آن کد برنامه‌های پیشنهادی برای

تحت تأثیر قرار می‌دهد. دانشمندان علم چوب توجه اصلی خود را در انتشار، به نقشی که در خشک‌کردن چوب دارد معطوف می‌کنند. در یک بار الوار تحت خشک‌کردن با این روش فرض شده است که تعادل مقدار رطوبت سطح، به دما و نسبت رطوبت هوای احاطه شده مربوط است و به دلیل تفاوت مقدار رطوبت بین سطح و داخل چوب است که پدیده انتشار اتفاق می‌افتد (Malmquist, 1991; Zhao *et al.*, 2016). شاید با قطعیت بتوان گفت که حضور رطوبت (در محیط و چوب) و رابطه آن با چوب مهمترین پارامتر در فراوری‌های اولیه چوب می‌باشد. نکته مهم این است که رطوبت چوب باید تحت شرایط کنترل شده و با رعایت نکات مربوط به تکنولوژی خشک‌کردن چوب تا اندازه مطلوبی از آن خارج بشود (Keey *et al.*, 2000). از این رو در میان فراوری‌های اولیه چوب، فرایند خشک‌کردن آن به دلایلی مانند کاهش مصرف انرژی، افزایش سرعت خشک شدن و حفظ کیفیت مطلوب چوب، دارای اهمیت ویژه‌ایست.

خشک‌کردن چوب در کوره مستلزم فراهم کردن شرایطی از دما و رطوبت نسبی است که این شرایط را اصطلاحاً برنامه کوره<sup>۱</sup> می‌نامند. تدوین برنامه‌های کوره، در تحقیقات به‌عمل آمده در نقاط مختلف دنیا سابقه‌ای طولانی دارد و امروزه نیز همچنان ادامه دارد اما تاکنون هیچ روش استاندارد برای آن ارائه نشده است. برخی از برنامه‌های کوره فقط بر اساس داده‌های تجربی ارائه شده‌اند و از روش‌های سعی و خطا برای تدوین آنها استفاده شده است. اما به‌منظور توصیف پدیده خشک شدن و تدوین برنامه‌ها بر اساس یک روش قابل اعتمادتر، ارائه مدل‌های ریاضی ضروریست. در این ارتباط مدل‌های مختلفی برای خشک شدن ارائه شده است، مانند مدل‌های تجربی (Awadalla *et al.*, 2004; Carr *et al.*, 2007; Haque *et al.*, 2011)، مدل‌های بر پایه انتقال جرم (Ananias *et al.*, 2009; Redman *et al.*, 2012; Wiberg *et al.*, 2000) و مدل‌های بر پایه تئوری انتشار<sup>۲</sup> (Čermák and Trcala, 2012; Liu *et al.*, 2001; Malmquist, 1991;

1-Kiln schedule  
2-Diffusion Theory

خشک کردن گونه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، با استفاده از روابط ریاضی ارائه شده توسط (Malmquist, 1991) برنامه‌ای مستقل از کد برنامه‌های FPL نوشته شد. روابط استفاده شده برای این منظور به شرح زیر می‌باشد:

$$T_D - T_{WD} + 5 = \frac{1.25 \tan \beta}{U_m \beta} + \frac{a' \rho \gamma \beta^2}{\alpha t_1} U_m \quad (1)$$

$$\frac{\tan \beta}{\beta} = \frac{Um_1}{F.S.P} \quad (2)$$

$$a' = a_1 \exp[a_2 \left(1 - \frac{\rho}{1000}\right)^2 + \frac{T_a}{33.4} - 1 + \beta \times F(t_1) \times F(T_a)] \quad (3)$$

$$T_a = T_{WD} + 5 \left[ \frac{\frac{Um_1}{Um} - 1}{\ln \frac{Um_1}{Um}} - 1 \right] \quad (4)$$

$$\alpha = 8\nu^{0.67} \quad (5)$$

در رابطه (۳):

$$F(t_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{t_1 - 0.02}{t_1}} e^{-y^2/2} dy \quad (6)$$

$$F(T_a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{60 - T_a}{10}} e^{-y^2/2} dy \quad (7)$$

و برای پهن‌برگان:  $a_1 = 0.24 \times 10^{-10}$ ,  $a_2 = 7.3$ .

در این رابطه زمان خشک شدن از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$T = \frac{f}{3600} \times \frac{t_1^2}{a' \beta^2} \times \ln \frac{Um_0}{Um} \quad (8)$$

دمای تر در کل برنامه ثابت است و به‌طور تقریبی از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$T_{WD} = 33.4 \left[ 1 + K \left(1 - \frac{\rho}{1000}\right)^2 \right] \quad (9)$$

که در آن K ضریب ثابت و مقدار آن برای پهن‌برگان برابر ۱/۵ است. مرحله (بار کوره) بر اساس رطوبت اولیه چوب‌ها در آن مرحله نوشته شد. این برنامه‌ها در جدولهای ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. با استفاده از روابط مذکور برنامه مورد نظر برای هر

جدول ۱- برنامه خشک کردن راش با ضخامت ۵/۵ سانتی متر با رطوبت اولیه ۶۶ درصد

رطوبت تعادل (%)	رطوبت نسبی (%)	اختلاف دمای خشک و تر (°C)	دمای تر (°C)	دمای خشک (°C)	رطوبت چوب (%)
۲۲/۹	۹۳	۱	۴۵	۴۶	۶۶
۲۲/۹	۹۳	۱	۴۵	۴۶	۵۰
۲۲/۹	۹۳	۱	۴۵	۴۶	۴۰
۲۲/۹	۹۳	۱	۴۵	۴۶	۳۰
۱۸/۱۵	۸۴/۳	۳	۴۵	۴۸	۲۵
۱۴/۵	۷۴	۵	۴۵	۵۰	۲۰
۱۱/۶	۶۲	۸	۴۵	۵۳	۱۵
۹/۶	۵۱	۱۱	۴۵	۵۶	۱۲

جدول ۲- برنامه خشک کردن راش ۵/۵ سانتی متر با رطوبت اولیه ۵۸ درصد

رطوبت تعادل (%)	رطوبت نسبی (%)	اختلاف دمای خشک و تر (°C)	دمای تر (°C)	دمای خشک (°C)	رطوبت چوب (%)
۲۲/۹	۹۳	۱	۴۵	۴۶	۵۸
۲۲/۹	۹۳	۱	۴۵	۴۶	۵۰
۲۲/۹	۹۳	۱	۴۵	۴۶	۴۰
۲۲/۹	۹۳	۱	۴۵	۴۶	۳۰
۱۸/۱۵	۸۴/۳	۳	۴۵	۴۸	۲۵
۱۴/۵	۷۴	۵	۴۵	۵۰	۲۰
۱۱/۶	۶۲	۸	۴۵	۵۳	۱۵
۹/۶	۵۱	۱۱	۴۵	۵۶	۱۲

جدول ۳- برنامه خشک شدن راش با ضخامت ۵/۵ سانتی متر با رطوبت اولیه ۴۵ درصد

رطوبت تعادل (%)	رطوبت نسبی (%)	اختلاف دمای خشک و تر (°C)	دمای تر (°C)	دمای خشک (°C)	رطوبت چوب (%)
۲۲/۹	۹۳	۱	۴۵	۴۶	۴۵
۲۲/۹	۹۳	۱	۴۵	۴۶	۴۰
۲۲/۹	۹۳	۱	۴۵	۴۶	۳۰
۱۸/۵۱	۸۴/۳	۳	۴۵	۴۸	۲۵
۱۴/۵	۷۴	۵	۴۵	۵۰	۲۰
۱۱/۶	۶۲	۸	۴۵	۵۳	۱۵
۹/۶	۵۱	۱۱	۴۵	۵۶	۱۲

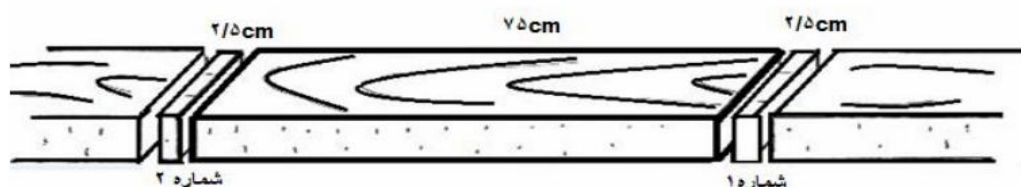
## تهیه نمونه‌های مورد آزمایش

چوب‌های مورد آزمایش به‌طور تجاری و با ابعاد  $۵/۵ \times$  مرحله (بار کوره) تهیه و در هر بار ۴۸ عدد الوار برای سه شد. تمام تخته‌های هر بار کوره از نظر معایب ناشی از خشک شدن مورد بررسی و وزن آنها در قبل و بعد از خشک شدن اندازه‌گیری و ثبت شد. معایب ناشی از خشک شدن که در این تحقیق مورد بررسی واقع شد، عبارت‌اند بودند از: کمانی، انحنای، تاب، ترک سطحی و ترک انتهایی. چوب‌دستک‌های مورد استفاده از چوب راش و به ابعاد  $۷۵ \times ۳/۵ \times ۲/۵$  سانتی‌متر تهیه و به تعداد ۲۸ عدد در هر بار

مورد استفاده قرار گرفت.

## نمونه‌های کنترل

در هر بار کوره، ۴ عدد نمونه کنترل به طول ۷۵ سانتی‌متر انتخاب شد تا معرف رطوبت جاری بار کوره باشد. برای محاسبه رطوبت اولیه بار کوره و رطوبت نمونه‌های کنترل، از دو انتهای هر نمونه کنترل یک آزمونه رطوبتی برش داده شد (شکل ۱) و رطوبت آنها محاسبه گردید. رطوبت اولیه برای بار اول تا سوم به ترتیب ۶۶، ۵۸ و ۴۵ درصد اندازه‌گیری شد و بر طبق این مقادیر برنامه کوره برای رطوبت‌های کمتر نوشته شد.



شکل ۱- روش بریدن نمونه کنترل و آزمونه‌های تعیین رطوبت

## مشخصات کوره چوب خشک‌کنی

در این تحقیق از یک دستگاه خشک‌کن به طول  $۲/۵$  متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۱ متر با مشخصات فنی مشخص استفاده شد. این دستگاه شامل محفظه ساخته‌شده درونی با پانل‌های آلومینیومی و اسکلت فلزی و ریل برای قراردادن چوب‌ها بر روی آن است. دیوارهای آلومینیومی داخل خشک‌کن کاملاً صیقلی بوده و کمترین مقاومت را برای گردش هوا ایجاد می‌کنند. این خشک‌کن دارای پنکه خروج رطوبت با الکتروموتور مقاوم در برابر رطوبت با پروانه آلومینیومی است. همچنین برای تنظیم دمای تر از سیستم اسپری آب در مجاورت پروانه اصلی استفاده می‌شود. هوای گرم در داخل کوره، با استفاده از رادیاتور فولادی و روغن داغ تأمین می‌شود. کوره مذکور مجهز به تابلوی کنترل نیمه‌اتوماتیک با امکان تنظیم دستی دمای خشک و تر و همچنین مشخص و فعال بودن سیستم اسپری آب و خروج رطوبت است.

## اجرای برنامه

بر اساس برنامه‌های نوشته شده بر اساس روابط ذکر شده، هر سه بار کوره با استفاده از برنامه‌های نوشته شده و مطابق جداول ۱ تا ۳ خشک شدند. دمای خشک اولیه برای هر سه برنامه  $۴۶^{\circ}\text{C}$  و دمای تر در کل برنامه ثابت و برابر با  $۴۵^{\circ}\text{C}$  اعمال گردید. از آنجا که برنامه اجرا شده از نوع برنامه‌های رطوبت پایه بود، از این رو به‌منظور تعیین شرایط کوره و اجرای گام جدید برنامه، نمونه‌های کنترل روزانه توزین شدند و بر اساس میانگین رطوبت نمونه‌های کنترل گام برنامه کوره تغییر و گام جدید اجرا شد. اجرای برنامه تا رسیدن رطوبت نمونه‌ها به مقدار متوسط  $۱ \pm ۱۲$  درصد ادامه یافت.

## اندازه‌گیری گرادیان رطوبتی (رطوبت پوسته و مغزی)

در پایان اجرای هر برنامه، از نمونه‌های کنترل آزمونه گرادیان رطوبتی تهیه گردید تا وضعیت تغییرات رطوبت در

ضخامت چوب‌ها را نشان دهد.

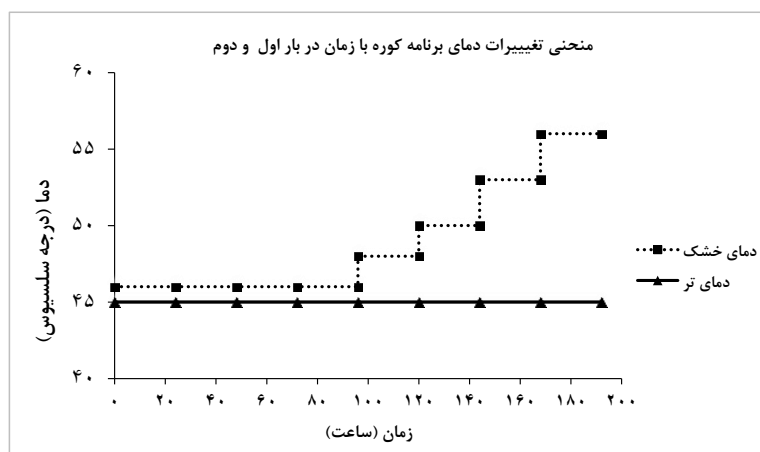
## نتایج

تغییرات رطوبت و دما در طی اجرای برنامه

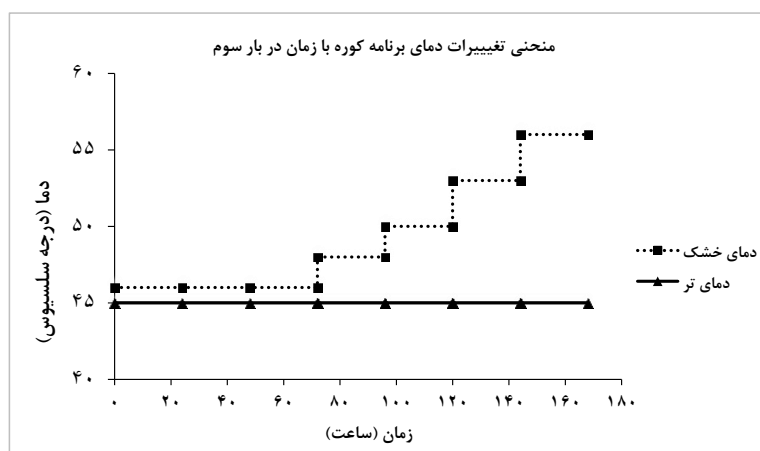
تغییرات گام‌های برنامه با محاسبه رطوبت جاری نمونه‌های کنترل به‌طور روزانه انجام شد. شکل‌های ۲ و ۳ تغییرات دماهای کوره را در سه بار کوره نشان می‌دهد. روند کاهش رطوبت و میانگین مرطوب‌ترین و خشک‌ترین نمونه‌های کنترل در زمان خشک شدن نیز در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ آورده شده است.

از آنجا که تمام پارامترهای موجود در روابط، غیر از رطوبت اولیه چوب‌ها برای سه بار کوره (سه تکرار) یکسان

بود، دمای خشک در اولین گام برای هر سه بار کوره یکسان و برابر ۴۶ و دمای تر ۴۵ درجه سلسیوس محاسبه شد و دمای خشک با تغییر رطوبت در کمتر از رطوبت اشباع الیاف نمونه‌ها تغییر کرد. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، نمودار تغییرات دما و تعداد گام‌های برنامه برای بار اول و دوم کوره یکسان است که می‌توان آن را به اختلاف رطوبتی کمتر بین بار اول و دوم در مقایسه با اختلاف رطوبتی بار دوم و سوم نسبت داد. در بار سوم همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد تعداد گام‌های برنامه و زمان آن کمتر است که علت آن کمتر بودن رطوبت اولیه نمونه‌ها در بار سوم کوره در مقایسه با دو بار دیگر است.



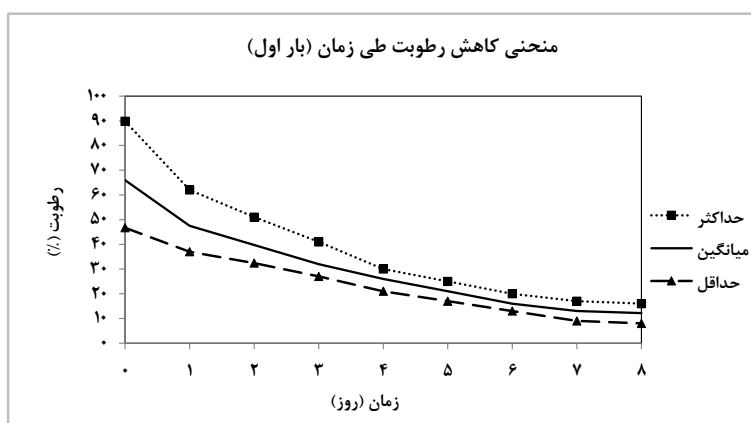
شکل ۲- نمودار تغییرات دمای برنامه کوره با زمان (بار اول و دوم)



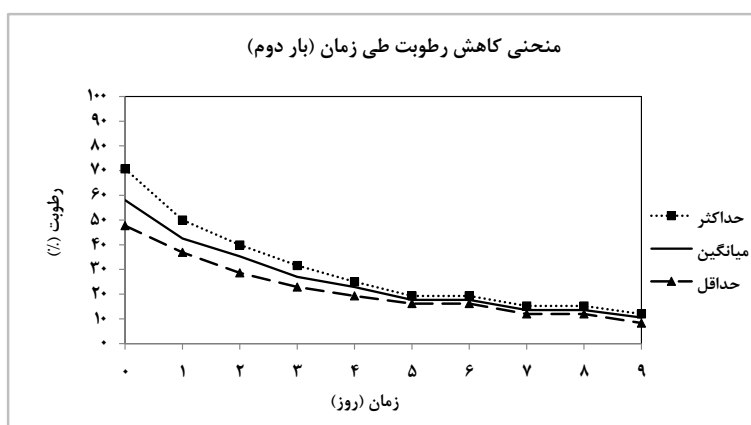
شکل ۳- نمودار تغییرات دمای برنامه کوره با زمان (بار سوم)

سانتی متر با روش تئوری انتشار است که در مقایسه با مطالعه قبلی انجام شده شرایط مطلوب تری را ارائه می دهد. نمودارهای تغییرات رطوبتی نشان دهنده سرعت نسبتاً مناسب خشک کردن چوب راش به ضخامت ۵/۵ سانتی متر با روش تئوری انتشار است که در مقایسه با مطالعه قبلی انجام شده توسط ( Madhoushi and Ebrahimi, 1996) شرایط مطلوب تری را ارائه می دهد.

البته چنین روندی از تغییرات در دما در مطالعات قبلی انجام شده و بر روی راش مشاهده نشده است (Madhoushi and Ebrahimi, 1996). به طور کلی، این نمودارها نشان دهنده ثبات بیشتر در دمای تری فرایند کلی خشک شدن با روش تئوری انتشار است. همچنین نمودارهای تغییرات رطوبتی نشان دهنده سرعت نسبتاً مناسب خشک کردن چوب راش به ضخامت ۵/۵



شکل ۴- تغییرات رطوبت طی زمان در بار اول کوره

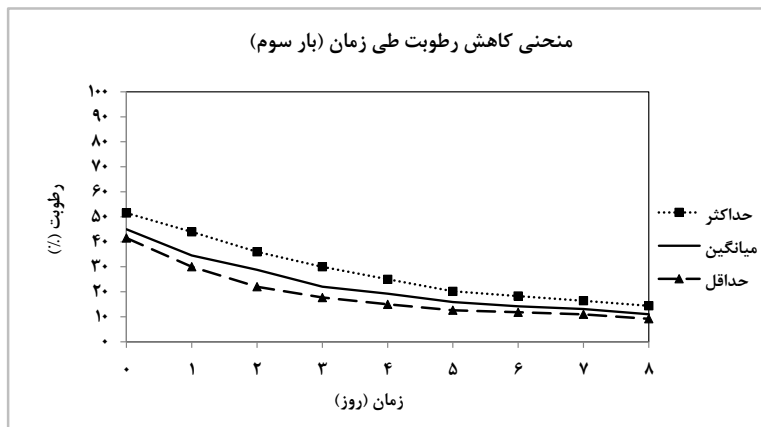


شکل ۵- تغییرات رطوبت طی زمان در بار دوم کوره

کنترل کیفیت و تعیین حدود قابل قبول برای آنها تغییرات این عیوب مشخص گردد. برای این منظور از نمودار مشخصه کیفی  $\bar{X}$  استفاده شد. وضعیت کلی معایب ایجادشده در هر بار نیز با استفاده از

وضعیت تغییر معایب پس از بررسی نمونه‌های مربوط به هر بار کوره و اندازه‌گیری معایب آنها، هر ردیف از تخته‌ها (جمعاً ۸ ردیف) به‌عنوان یک قسمت (بهر) فرض شد تا با استفاده از نمودارهای

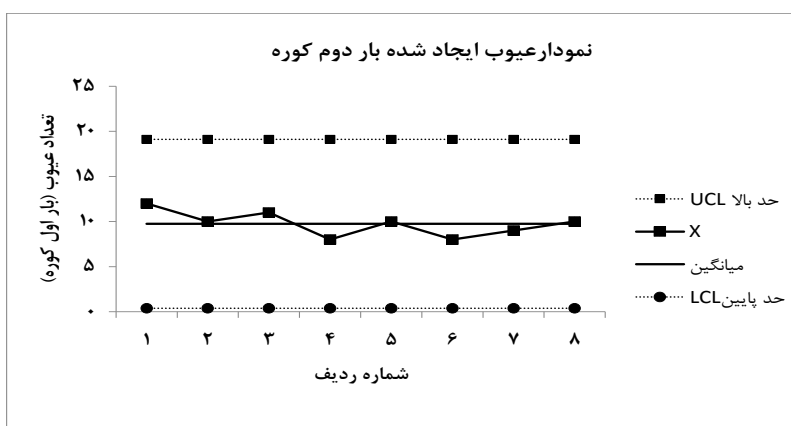
نمودار C که جزو نمودارهای بازرسی مشخصه کیفی است، تحلیل شد. در ترسیم این نمودار هریک از معایب کماتی، انحنا، تاب، ترک سطحی و ترک انتهایی به عنوان یک عیب و هر ردیف از تخته‌ها به عنوان یک قسمت (بهر) منظور شد. شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نمودار C رسم شده برای هر بار کوره را نشان می‌دهد.



شکل ۶- تغییرات رطوبت طی زمان در بار سوم کوره

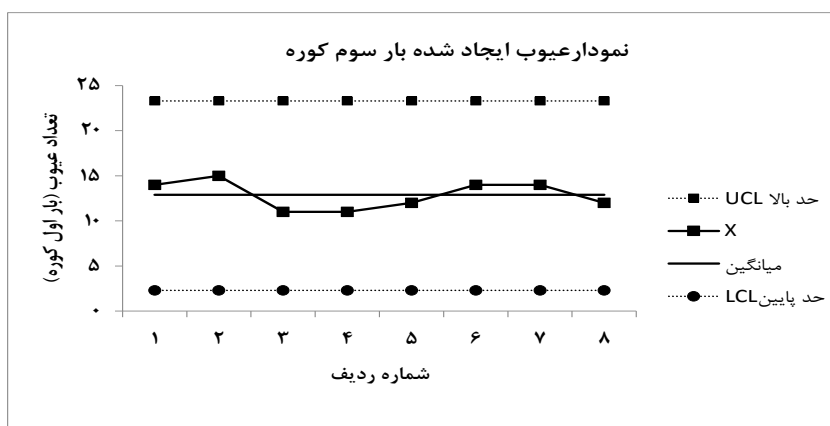


شکل ۷- نمودار C برای تعداد عیوب ایجاد شده مربوط به بار اول کوره



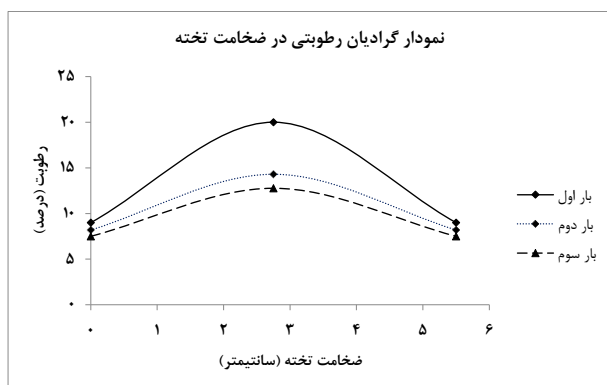
شکل ۸- نمودار C برای تعداد عیوب ایجاد شده مربوط به بار دوم کوره





شکل ۹- نمودار C برای تعداد عیوب ایجاد شده مربوط به بار سوم کوره

نمونه‌ها در هر سه بار یکسان و زمان خشک شدن آنها در کوره تقریباً یکسان است (بار اول ۸ روز، بار دوم ۹ روز و بار سوم ۸ روز)، دلیل اختلاف نمودار بار اول با بار دوم و سوم را می‌توان زیاد بودن رطوبت اولیه چوب‌های بار اول کوره (۶۶/۶ درصد) به نسبت دو بار دیگر عنوان کرد.



شکل ۱۰- نمودار چگونگی توزیع رطوبت در ضخامت تخته

با ترسیم نمودارهای مربوط به هر سه بار کوره مشخص گردید که پراکنش نقاط در هر سه مرحله نسبت به خط میانی (میانگین) یکنواخت بوده و در محدوده قابل قبول حدود کنترل قرار دارند و با توجه به تحلیل نمودارهای کنترل کیفیت شرایط قابل قبولی دارند. روند مطلوب تغییرات معایب در این مطالعه بر خلاف مطالعه قبلی ( Madhoushi and Ebrahimi, 1996) و سایر مطالعات انجام شده تدوین برنامه بر مبنای برنامه‌های FPL است و نشان‌دهنده مطلوب بودن این روش در تدوین برنامه‌های چوب خشک‌کنی در مقایسه با روش معرفی شده قبلی است.

همچنین در بررسی معایب ناشی از خشک شدن مشخص شد که هیچ‌گونه ترک سطحی در هنگام خشک شدن در چوب به وجود نیامد که روند ملایم کاهش رطوبت در برنامه را می‌توان دلیلی بر پیدایش این نتیجه مطلوب عنوان کرد.

تغییرات گرادیان رطوبتی (رطوبت پوسته و مغزی)

با انجام آزمون رطوبتی پوسته و مغز که پس از پایان یافتن هر مرحله از خشک شدن انجام شد، چگونگی گرادیان رطوبت در چوب‌های خشک‌شده در هر بار بررسی گردید. با توجه به نمودار رسم شده در شکل ۱۰ می‌توان گفت که بار اول به نسبت بار دوم و سوم کوره دارای گرادیان رطوبتی بیشتر (شیب بیشتر) بود. از آنجا که ابعاد

آزمون تجزیه واریانس دانکن

با انجام آزمون تجزیه واریانس دانکن با نرم‌افزار SPSS معایب اندازه‌گیری شده و تعداد معایب حاصل شده در سه بار کوره مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به تجزیه آماری (جدول ۴) مشخص شد که در معایب انحنا، تاب و ترک انتهایی بین سه بار اختلاف معنی‌داری وجود ندارد؛ اما در عیب کمائی اختلاف معنی‌داری بین بار اول با دو بار دیگر

حاصل شد که رطوبت اولیه بالا می‌تواند دلیلی بر این موضوع باشد. در مورد تعداد معایب نیز بین بار دوم و دو بار دیگر اختلاف معنی‌داری وجود داشت که دلیل آن احتمالاً به وجود الوار همراه عیب در این بار می‌تواند مربوط باشد.

جدول ۴- آزمون دانکن برای مقایسه معایب ایجاد شده بین سه بار کوره

متغیرها	سطح a	سطح b	سطح معنی‌داری
کمانی	بار ۱	بار ۲ و ۳	*0.02
انحنا	بار ۱، ۲ و ۳	-	ns/0.92
تاب	بار ۱، ۲ و ۳	-	ns/0.22
ترک انتهایی	بار ۱، ۲ و ۳	-	ns/0.68
تعداد معایب	بار ۲	بار ۱ و ۳	**0.00

\*\*\*: معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد، \*\*: معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد، ns: عدم اختلاف معنی‌دار

## بحث

به اختلاف زیاد مقدار رطوبت اولیه بین بار اول و دو بار دیگر مربوط دانست.

### فهرست علائم

$T_D$	دمای خشک (°C)
$T_{WD}$	دمای تر (°C)
$U_m$	رطوبت تناسبی الوار در مراحل مختلف خشک شدن (%)
$U_{mi}$	رطوبت بحرانی کل مقطع الوار در مرحله‌ای که سطح الوار به رطوبت اشباع الیاف می‌رسد (%)
$a'$	ضریب انتقال رطوبت ( $m^2/s$ )
$t_1$	نصف ضخامت الوار (m)
علائم یونانی	
B	پارامتر شدت خشک شدن (برحسب رادیان)
$\rho$	چگالی پایه (نسبت وزن خشک به حجم مرطوب) ( $kg/m^3$ )
$\gamma$	گرمای تبخیر آب (J/kg)
$\alpha$	ضریب انتقال گرما ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

همچنین در بررسی معایب ناشی از خشک شدن مشخص شد که ترک سطحی در هنگام خشک شدن در چوب به وجود نیامد که روند ملایم کاهش رطوبت در برنامه

چوب راش تحت برنامه‌ای بر پایه تئوری انتشار در معرض خشک شدن قرار گرفت. این برنامه برای سه بار کوره به صورت سه تکرار تدوین شد که پارامترهای نوشتن برنامه جزء رطوبت اولیه نمونه‌ها، برای هر سه برنامه یکسان در نظر گرفته شد. طبق محاسبات انجام شده و برنامه تدوین شده دمای خشک اولین گام (گام شروع برنامه) برای هر سه بار ۴۶ درجه سلسیوس و دمای تر در هر سه بار یکسان و برابر ۴۵ درجه سلسیوس محاسبه گردید. نتایج حاصل از اجرای برنامه نشان می‌دهد که برنامه نوشته شده هم از لحاظ شرایط ایجاد معایب و هم از لحاظ تعداد معایب ایجاد شده شرایط مطلوبی را برای خشک کردن چوب گونه راش ایران فراهم آورده است. به طوری که تحلیل نمودارهای کنترل کیفیت رسم شده، شرایط نرمالی را نشان می‌دهند. این در حالی است که چنین روند مطلوبی در برنامه‌های تدوین شده با روش‌های قبلی مشاهده نشده بود. طبق آزمون تجزیه واریانس دانکن این برنامه در سه تکرار نتایج مشابهی را در تحلیل مقادیر معایب انحنا، تاب و ترک انتهایی نشان داد، به طوری که بین سه بار اختلاف معنی‌داری در این معایب وجود نداشت؛ اما در عیب کمانی اختلاف معنی‌داری بین بار اول با دو بار دیگر کوره حاصل شد که می‌توان دلیل آن را

- Keey, R.B., Langrish, T.A.G., Walker, J.C.F., 2000. Kiln-Drying of Lumber. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Liu, J.Y., Simpson, W.T., Verrill, S.P., 2001. An inverse moisture diffusion algorithm for the determination of diffusion coefficient. *Drying Technology*, 19:1555-1568.
- Madhoushi, M., Ebrahimi, G., 1996. Kin drying schedule for *Fagua orientalis*. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 4:5-14.
- Malmquist, I., 1991. Lumber drying as a diffusion process. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 49:161-167.
- Muchot, N., Thiercelin, F., Perre, P., Zoulanian, A., 2006. Characterization of diffusion transfer of bound water and water vapor in beech and spruce. *Maderas Ciencia y tecnología*, 8:139-147.
- Olek, W., Weres, J., 2006. Effects of the method of identification of the diffusion coefficient on accuracy of modeling bound water transfer in wood. *Transport in Porous Media*, 66:135.
- Redman, A.L., Bailleres, H., Turner, I., Perré P., 2012. Mass transfer properties (permeability and mass transfer) of four australoian hardwood species. *BioResources*, 7:3410-3424.
- Trcala, M., 2015. Spectral stochastic modeling of uncertainties in nonlinear diffusion problems of moisture transfer in wood. *Applied Mathematical Modelling*, 39:1740-1748.
- Wiberg, P., Sehlstedt-P, S.M.B., Morén, T.J., 2000. Heat and mass transfer during sapwood above the fibre saturation point. *Drying Technology*, 18:1647-1664.
- Zhao, J., Fu, Z., Jia, X., Cai, Y., 2016. Modeling conventional drying of wood: Inclusion of a moving evaporation interface. *Drying Technology*, 34:530-538.
- را می‌توان دلیلی بر پیدایش این نتیجه مطلوب عنوان کرد. نتیجه حاصل در ارتباط با ترک سطحی از جمله ویژگی برتر این برنامه عنوان می‌گردد. به‌طورکلی، نتایج حاصل حکایت از آن دارد که تدوین برنامه خشک‌کردن چوب در کوره بر پایه تئوری انتشار روشی مطمئن‌تر و با ایجاد معایب کمتر است که می‌تواند به‌جای روش‌های قبلی مورد استفاده قرار گیرد.

### منابع مورد استفاده

- Ananias, R.A., Broche, W., Alvear, M., Salinas C., and Keey, R.B., 2009. Using an overall mass-transfer coefficient for prediction of drying of Chelean coigue. *Wood and Fiber Science*, 41:426-432
- Awadalla, H.S.F., El-Dib, A.F., Mohamad, M.A., Reuss, M., Hussein, H.M.S., 2004. Mathematical modelling and experimental verification of wood drying process. *Energy Conversion and Management*, 45:197-207.
- Carr, E.J., Turner, I.W., Perré, P., 2011. A New Control-Volume Finite-Element Scheme for Heterogeneous Porous Media: Application to the Drying of Softwood. *Chemical Engineering & Technology*, 34:1143-1150.
- Čermák P, Trcala, M., 2012. Influence of uncertainty in diffusion coefficients on moisture field during wood drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55:7709-7717.
- Haque, M.N., Riley, S.G., Langrish, T.A.G., Pang, S., 2007. Model Predicted Effect of Process Variables on Kiln Drying of *Pinus radiata* Boards. *Drying Technology*, 25:455-461.

## Numerical and experimental establishment of kiln drying schedule for Iranian beech wood based on diffusion theory

M. Madhoushi<sup>1\*</sup> and M. Alizadeh<sup>2</sup>

1\*-Corresponding author, Associate Prof., Department of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, Email: madhoushi@gau.ac.ir

2- Former MSc. Student, Department of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received: April, 2017

Accepted: Aug., 2017

### Abstract

In order to establish a kiln drying schedule for Iranian Beech (*Fagus orientalis*) Wood, commercially cut lumbers with the thickness of 5.5 cm, were selected from Shast-Kola region, Gorgan. Then, lumber were dried under the kiln schedule based on diffusion theory (from Malmquist's relations) to the final moisture content of  $12\pm 2\%$ . This schedule was adopted and implemented for three kiln loads with three different initial moisture contents, 66.6, 58 and 45 percent. Initial drying bulb temperature (first step) and wet-bulb temperature were calculated, respectively, at 46 °C and 45 °C for all three schedules. The severity of surface checks, end checks and warp (bowing, crooking, twisting) in the lumbers were measured before and after the drying process. Quality control methods were employed to analyze the wood defects. Results showed that kiln drying of beech wood based on diffusion theory was satisfactory and the severity of changes in defect were statistically acceptable in all loads. Superior characteristics of this method, was related to nearly zero surface checks in samples, because the moisture content was reduced slowly.

**Keywords:** Beech, diffusion theory, drying defects, surface checks.