

محاسبه ضرایب انتشار و دفع سطحی رطوبت در گونه بلوط بلندمازو با استفاده از منحنی‌های رطوبت - زمان

امیرهومن حمصی*

چکیده

آگاهی از ضرایب انتشار و دفع سطحی رطوبت در چوب، معیار مناسبی به منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی مدت زمان لازم برای خشک شدن چوب (الوار) محسوب می‌گردد. عوامل متعددی از قبیل درصد رطوبت و درجه حرارت چوب، سرعت جریان هوای مجاور و شرایط سطحی چوب می‌تواند بر روی یک و یا هر دو این ضرایب مؤثر باشد. در این مطالعه با استفاده از منحنی‌های رطوبت - زمان خشک شدن گونه بلوط بلندمازو به ضخامت‌های ۲/۵ و ۳/۲ سانتیمتر تحت برنامه T_۴-D_۳ در کوره‌های متعارف، ضرایب انتشار و دفع سطحی این گونه محاسبه شد. بررسیها حاکی از آن بود که در دامنه رطوبتی ۴۰ الی ۱۰ درصد، نتایج حاصل از بکارگیری دو منحنی، رطوبت - زمان به طور توأم و روش منحنی منفرد برای ضخامت‌های مختلف، در تأیید یکدیگر می‌باشند. این در حالیست که متوسط نرخ خشک شدن ضخامت ۲/۵ سانتیمتر در دامنه رطوبتی مورد نظر، به طور معنی‌داری بیشتر از ضخامت ۳/۲ سانتیمتر ارزیابی شد.

واژه‌های کلیدی: بلندمازو، ضریب انتشار، ضریب دفع سطحی، منحنی رطوبت - زمان

مقدمه

در فرآیند خشک شدن چوب، انتقال رطوبت به دو صورت انجام می‌شود. در ابتدا رطوبت از نواحی داخلی چوب به سطوح حرکت کرده و سپس از سطوح به هوای اطراف منتقل می‌شود. هر دو نوع این انتقال می‌تواند فرآیند خشک شدن را تحت تأثیر قرار دهد. در مراحل اولیه خشک شدن یک گونه نفوذپذیر، رطوبت از نواحی داخلی با نرخی بزرگتر و یا حداقل مساوی نرخ تبخیر سطحی به سطوح

* - استادیار گروه مهندسی صنایع چوب و کاغذ، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی (تهران)

تاریخ دریافت مقاله: ۸۱/۱۰/۲۴ تاریخ دریافت نسخه نهایی مقاله: ۸۲/۶/۵

منتقل شده و سطوح چوب را مرطوب نگه میدارد. در این حالت، نرخ تبخیر سطوح که با «ضریب انتقال سطحی^۱» مشخص می‌گردد، نرخ خشک شدن را کنترل نموده و یا تأثیر زیادی بر آن اعمال می‌نماید. با پیشرفت روند خشک شدن، حرکت رطوبت از نواحی داخلی، دیگر قادر به جبران نمودن نرخ تبخیر سطحی نخواهد بود. در این حالت، نرخ انتقال داخلی که با «ضریب انتقال داخلی رطوبت^۲» مشخص می‌گردد، فرآیند خشک شدن را کنترل می‌نماید (۱۵).

بیان کمی این دو نوع انتقال رطوبت در قالب ضرایب انتشار به توسعه روابط پیش‌بینی‌کننده نرخ خشک شدن چوب و شبیه سازی فرآیند خشک شدن الوار در کوره‌های چوب خشک کنی کمک می‌نماید. در این راستا بررسی معادلات ریاضی انتشار اجتناب‌ناپذیر است.

هر چند کاربرد معادلات انتشار تاکنون عمدتاً به رطوبت‌های زیر نقطه اشباع فیبر محدود می‌شد، با توجه به سوابق تحقیق و به عقیده برخی از محققان، دلایل منطقی در خصوص تعمیم کاربرد معادلات انتشار به محدوده رطوبت‌های بالای FSP وجود دارد (۱۵).

در این مطالعه سعی بر آنستکه ضریب انتشار رطوبت (D) و ضریب دفع سطحی (S)، در رابطه با راه حل پیشنهادی نیومن (Newman 1931) برای حل معادله انتشار در حالت غیریکنواخت^۳ (قانون دوم fick)، با توجه به منحنی‌های رطوبت - زمان فرآیند خشک شدن الوار در کوره محاسبه گردند. منحنی خشک شدن الوار، در واقع بیانگر مقدار متوسط رطوبت در چوب در هر مقطع زمانی از فرآیند خشک شدن می‌باشد. در راه حل پیشنهادی نیومن، ضرایب D و S ثابت در نظر گرفته می‌شوند که البته این فرض در خصوص چوب کاملاً صادق نیست (۹). به منظور ارزیابی D، و رابطه با آن با تغییرات رطوبت، مقطعی از زمان که جزء متوسط رطوبت^۴ در چوب (E)، مساوی ۰/۵ باشد، در نظر گرفته می‌شود. از طرفی مقدار S، معیاری از اثر ویسکوزیته و سرعت جریان هوا بر نرخ خشک شدن الوار تلقی می‌گردد و در نتیجه جداسازی D و S در راه حل نیومن در تحقیقات مربوط خشک شدن چوب در کوره، کاربردهای عملی مطلوبی به همراه دارد.

Skaar در سال ۱۹۵۴، روشی برای تعیین ضرایب D و S ارائه داد که در آن آگاهی از توزیع رطوبت در یک قطعه الوار در مقاطع زمانی مختلف مورد نیاز می‌باشد (۸). Choong و Skaar در سال ۱۹۶۹، روشی تقریبی برای ارزیابی D و S ارائه دادند که در آن زمان‌های لازم برای رسیدن جزء متوسط رطوبت به مقدار ۰/۵ در دو نمونه چوبی با ضخامت‌های مختلف مورد نیاز می‌باشد (۷).

Choong و Skaar در سال ۱۹۷۲، روش خود را بسط داد و طریقی برای محاسبه D و S با توجه به نمودار رطوبت - زمان نمونه‌هایی با ضخامت‌های مختلف ارائه دادند. این پژوهشگران پس از انجام

1- Surface transfer Coefficient

2- Internal moisture transfer coefficient

3- Unsteady - state diffusion equation

4- Fraction of average moisture

آزمایش‌های مربوط به انتقال رطوبت در مقاطع عرضی و طولی نمونه‌هایی از گونه‌های Sweetgum و Redwood، به این نتیجه رسیدند که لازمست ضریب S به منظور پیش‌بینی نرخ خشک شدن الوار لحاظ گردد و اینکه S تابعی از دانسیته چوب می‌باشد (۹). این نتایج با توجه به مطالعات Rosen (1982a)، تأیید گردید (۱۱).

Rosen در سال ۱۹۷۸ نشان داد که سرعت هوای در گردش، اثر قابل ملاحظه‌ای بر ضریب دفع سطحی اعمال می‌کند. وی دریافت که اهمیت نسبی ضریب دفع سطحی (مقاومت خارجی) در مقایسه با ضریب انتشار رطوبت در داخل چوب (مقاومت داخلی)، با کاهش ضخامت نمونه و یا سرعت هوا، افزایش می‌یابد (۱۰).

با توجه به پذیرش اهمیت ضریب دفع سطحی در فرآیند خشک شدن چوب، لازمست داده‌های حاصل از آزمایشات (۱۹۶۵) Biggerstaff, (۱۹۶۸) Choong & Fogg, (۱۹۶۳) Comstock و (۱۹۷۱) Hart & McNamara که در آن اثر مقاومت خارجی نادیده انگاشته شده بود، مجدداً بررسی و تحلیل گردند (۵). Liu در سال ۱۹۸۹، روشی به منظور برآورد ضریب انتشار داخلی^۱ و ضریب دفع سطحی^۲، از روی منحنی منفرد رطوبت - زمان ارائه داد. در این روش در اختیار داشتن منحنی رطوبت - زمان حاصل از خشک شدن تنها یک ضخامت مشخص از گونه مورد نظر، کفایت می‌کند (۹). در این روش آگاهی از زمان خشک شدن و شیب منحنی جزء رطوبت (E) برحسب زمان، در نقطه $E=0/5$ مورد نیاز می‌باشد. با توجه به معادلات یاد شده، در این مطالعه ضریب انتشار (D) و دفع سطحی (S) گونه بلوط (Quercus Castaneafolia) با توجه به منحنی‌های رطوبت - زمان خشک شدن الوارهایی به ضخامت ۲/۵ و ۳/۲ سانتیمتر در کوره، برآورد گردید. منحنی‌های رطوبت - زمان مورد نیاز از نتایج آزمایشهای تجربی عشوری (۱۳۷۵) و نجفی (۱۳۷۸) که به ترتیب به منظور تدوین برنامه خشک کردن گونه بلندمازو به ضخامت‌های ۲/۵ و ۳/۲ سانتیمتر در کوره‌های متعارف انجام شده، استخراج گردید.

مبانی نظری

قانون دوم Fick، انتشار غیریکتواخت رطوبت در چوب را به طور کلی در قالب معادله دیفرانسیل جزئی ذیل بیان می‌کند:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{d}{dX} \left(D \frac{dC}{dX} \right) \quad (۱)$$

که در آن، C عبارتست از غلظت رطوبت (یا در صد رطوبت) در چوب، t زمان، D ضریب انتشار و X فاصله هر نقطه نسبت به خط مرکزی یک نمونه متقارن در جهت جریان رطوبت می باشد. شرایط مرزی اولیه حاکم بر تبخیر سطحی عبارتند از:

$$C = C_0, \quad -a < x < a, \quad t = 0 \quad (2)$$

و

$$D \frac{dc}{dX} = S(C_e - C_a) \quad \text{و} \quad X = \pm a \quad \text{و} \quad t \geq 0 \quad (3)$$

که در آن:

C_e عبارتست از غلظت رطوبت^۱ در تعادل با فشار بخار آب موجود در هوای مجاور (تبخیر شده از سطح)، C_a غلظت واقعی رطوبت در سطح نمونه در هر لحظه، a نیمه ضخامت نمونه و S ضریب دفع سطحی. Newman در سال ۱۹۳۵، راه حل نظری معادله (۱) را به شرط ثابت بودن D به صورت ذیل ارائه داد:

$$\bar{E} = \frac{\bar{C} - C_e}{C_0 - C_e} = 2L^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-\beta_n^2 T)}{\beta_n^2 (\beta_n^2 + L^2 + L)} \quad (4)$$

که در آن \bar{C} مقدار متوسط C در مقطع ضخامت نمونه است و β_n ، ریشه های مثبت معادله

$$\beta_n \cdot \tan \beta_n = L \quad (5)$$

به طوریکه

$$\text{ضریب انتقال}^2 \quad L = S \cdot a / D \quad (6)$$

و

$$\text{زمان بدون بعد}^3 \quad T = D \cdot t / a^2 \quad (7)$$

1- Moisture concentration

2- Transport ratio

3- Dimensionless time

از آنجا که ضریب انتشار رطوبت در چوب طی فرآیند خشک شدن، به طور کلی تابعی از غلظت رطوبت می‌باشد (۷)، مقدار D محاسبه شده از رابطه (۴)، بیانگر مقدار متوسط در دامنه غلظت رطوبت می‌باشد.

Newman در سال ۱۹۳۱ و سپس Skaar در سال ۱۹۵۴، معادله (۴) را در ازای مقادیر مختلف ضریب انتقال (L)، حل نمودند. بدین ترتیب (Skaar & Choong (۱۹۶۹)، رابطه‌ای مابین $T_{0.5}$ و L به صورت ذیل ارائه دادند (۷):

$$T_{0.5} = 0.2 + \frac{0.7}{L} \quad (۸)$$

که در آن $T_{0.5}$ عبارتست از مقدار T (زمان بدون بعد)، هنگامی که $E=0.5$ باشد. با جایگزین کردن معادله (۳) بوسیله رابطه $C = C_0$ در حالیکه $X = \pm a$ و $t \geq 0$ باشد، ساده‌ترین راه حل معادله (۱) به صورت معادله ذیل بدست می‌آید:

$$E = 1 - 2 \left(\frac{Dt}{\pi a^2} \right) \quad (۹)$$

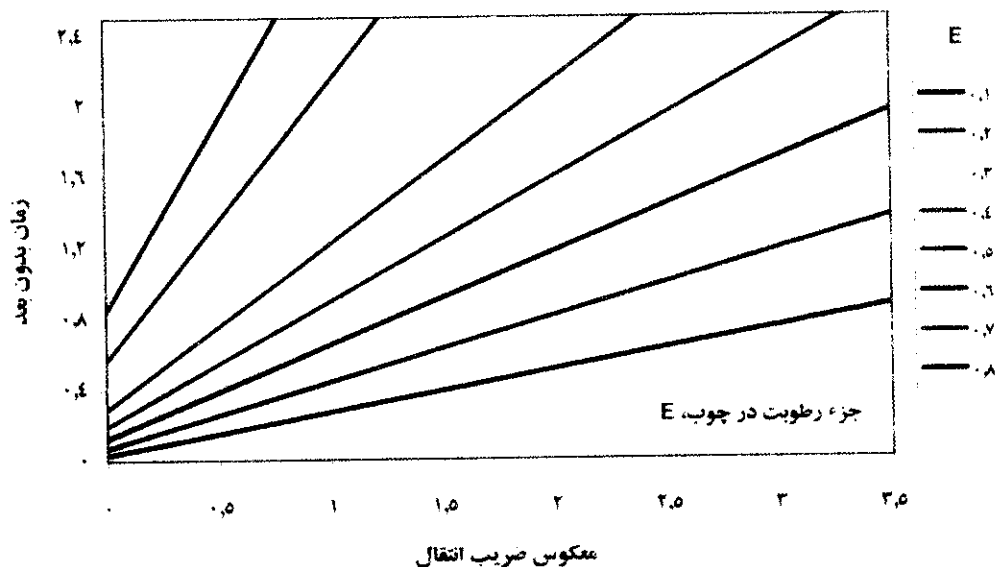
که صرفاً در مورد زمان‌های کوچک معتبر می‌باشد (۸). لازم به توضیح است با فرض عدم وجود مقاومت خارجی ($L = \infty$) در معادله (۸) و با در نظر گرفتن $E=0.5$ در معادله (۹)، هر دو معادله تقریباً یکسان می‌باشند.

با توجه به تحقیقات (Crank (۱۹۷۵)، مقدار D در معادله (۹)، هنگامی که $E=0.5$ باشد، تنها یک مقدار متوسط (\bar{D}) محسوب می‌گردد، بدین ترتیب رابطه (۱۰):

$$\bar{D} = \frac{1}{C} \int_0^C D(c) dc \quad (۱۰)$$

مبنایی به منظور یافتن رابطه‌ای تابعی مابین D و C بدست می‌دهد. به منظور مطالعه رابطه بین D و C از یکطرف و یافتن ارتباط S با ویسکوزیته و سرعت جریان هوا از طرف دیگر، جداسازی S و D در L (معادله ۸)، در حالت $L = \infty$ ضروری است (۹).
با توجه به رابطه خطی ما بین T و $\frac{1}{L}$ که در شکل (۱) نشان داده شده، معادله (۸) به صورت کلی زیر قابل تبدیل است:

$$T_E = A + \frac{B}{L} \quad (11)$$



شکل ۱: زمان بدون بار در ازای تغییرات معکوس ضریب انتقال برای مقادیر مختلف جزء رطوبت در چوب

که در آن مقادیر A و B ثابت‌هایی هستند که برای هر مقدار مشخص E ، منحصر به فرد می‌باشند. با توجه به شکل (۱)، مقادیر A و B در معادله (۱۱)، برای هر یک از مقادیر E بدست می‌آید. این مقادیر در جدول (۱) درج شده‌اند و می‌توان از آنها به منظور جداسازی ضرایب D و S که به طور تلوئیخی در معادله (۸) نهفته می‌باشند، از روی یک منحنی رطوبت - زمان استفاده نمود (۹).

جدول ۱ - ثابت‌های A و B برای هشت مقدار E در معادله (۱۱)

مقدار E								ثابت
۰/۸	۰/۷	۰/۶	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲	۰/۱	
۰/۰۳۱۴	۰/۰۷۰۶	۰/۱۲۵۶	۰/۱۹۶۳	۰/۲۹۰۰	۰/۴۰۳۰	۰/۵۶۸۰	۰/۸۴۴۸	A
۰/۲۳۹۰	۰/۳۷۲۰	۰/۵۲۵۰	۰/۷۰۱۰	۰/۹۳۱۱	۱/۱۹۸۰	۱/۵۶۸۴	۲/۱۵۱۲	B

در یک منحنی رطوبت - زمان فرضی که در آن جزء رطوبت در چوب (E)، با توجه به زمان (t)

ترسیم شده باشد، با در نظر گرفتن هر دو مقدار دلخواه E_1 و E_2 بر روی منحنی، زمانهای متناظر t_1 و t_2 بر روی محور افقی برآورد می‌گردد. با جایگزینی T در معادله (۱۱) برای هر دو نقطه دلخواه خواهیم داشت:

$$\frac{Dt_1}{a^2} = A_1 + \frac{B_1}{L} \quad (12)$$

$$\frac{Dt_2}{a^2} = A_2 + \frac{B_2}{L} \quad (13)$$

که در آن مقادیر D و L و a ثابت می‌باشند. با حذف L در معادلات (۱۲) و (۱۳) خواهیم داشت:

$$\frac{D}{a^2} = \frac{A_1/B_1 - A_2/B_2}{t_1/B_1 - t_2/B_2} \quad (14)$$

با توجه به آنکه مقادیر A و B و t با توجه به هر مقدار مشخص E متغیر می‌باشند، معادله (۱۴) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{D}{a^2} = \frac{d(A/B)/dE}{d(t/B)/dE} \quad \Bigg|_{E=0/5} \quad (15)$$

که در نقطه $E=0/5$ ارزیابی می‌گردد. بنابراین از این پس مقدار D با نقطه $E=0/5$ و $L \neq \infty$ مرتبط می‌باشد. معادله (۱۵) را می‌توان ساده‌تر نمود:

$$\frac{D}{a^2} = \frac{B \cdot dA/dE - A \cdot dB/dE}{B \cdot dt/dE - t \cdot dB/dE} \quad \Bigg|_{E=0/5} \quad (16)$$

با توجه به جدول (۱) و معادله (۱۶) خواهیم داشت:

$$\frac{D}{a^2} = \frac{-0/1654}{0/701 \times dt/dE + 2/05 \times t} \quad \Bigg|_{E=0/5} \quad (17)$$

که در آن مقادیر t و dt/dE با توجه به منحنی خشک شدن در نقطه $E=0/5$ استخراج می‌گردند. در صورت رسم منحنی تغییرات E در ازای $t^{1/2}$ به جای t (همانند Choong & Skaar, ۱۹۶۹ و ۱۹۶۵)

(Biggerstaff)، معادله زیر را می‌توان با رابط (۱۷) جایگزین نمود:

$$\frac{dt}{dE} = 2 \times t \times \frac{dt}{dE} \quad (18)$$

با توجه به آنکه برخی از محققان در مطالعات خود، ضریب دفع سطحی (اثر سطوح) را نادیده گرفته و D را با توجه به معادله (۹) محاسبه نمودند، مقایسه مقادیر حاصله با آنچه که از معادله (۱۷) بدست می‌آید، حائز اهمیت می‌باشد.

چنانچه D در معادله (۹)، به صورت \bar{D} برای $E=0.5$ در نظر گرفته شود، معادلات زیر بدست می‌آید:

$$t = 0.1963 \frac{a^2}{\bar{D}} \quad (19)$$

$$\frac{dt}{dE} = 0.7854 \frac{a^2}{\bar{D}} \quad (20)$$

با جایگزینی این روابط در معادله (۱۷) خواهیم داشت:

$$D = 1/116 \times \bar{D} \quad (21)$$

توجه شود که معادله (۹) برای زمانهای کوچک و $L = \infty$ صادق است. بنابراین معادله (۲۱)، که براساس معادلات (۹) الی (۲۰) تدوین شده، دارای دقت تقریبی می‌باشد. چنانچه D تعیین شود، L را می‌توان از معادله (۱۲) یا (۱۳) برای $E=0.5$ و S را از معادله (۶) محاسبه نمود.

همچنین به منظور محاسبه ضرایب D و S با توجه به منحنی‌های رطوبت - زمان ضخامت‌های مختلف، می‌توان به طریقه زیر عمل نمود:
با جایگزینی معادله (۶) در معادله (۸) خواهیم داشت:

$$T_{0.5} = 0.2 + \frac{0.7D}{S a} \quad (22)$$

همچنین با جایگزینی معادله (۷) در معادله (۲۲) برای $E = 0.5$ خواهیم داشت:

$$\frac{D.t_{0.5}}{a^2} = 0.2 + \frac{0.7VD}{Sa} \quad (23)$$

بدین ترتیب با ضرب کردن دو طرف معادله اخیر در عبارت $\frac{a}{0.7VD}$ معادله تقریبی (۱۹۶۹) Choong & Skaar بدست می‌آید:

$$\frac{t_{0.5}}{0.2 \times a} = \frac{a}{D} + \frac{3/5}{S} \quad (24)$$

مواد و روش‌ها

با توجه به روش‌ها و معادلات مذکور، در این مطالعه ضرایب انتشار (D) و دفع سطحی (S) گونه بلوط بلندمازو با توجه به نمودارهای رطوبت - زمان الوارهایی به ضخامت ۲/۵ و ۳/۲ سانتیمتر برآورد شد.

عشوری (۱۳۷۵)، به منظور تدوین برنامه خشک کردن چوب بلندمازو به ضخامت ۲/۵ سانتیمتر در کوره، برنامه‌های T_4-D_2 ، T_4-D_3 و T_5-D_2 را مورد آزمون قرار داده و در نهایت با توجه به نمودارهای بازرسی مشخصه کیفی، برنامه T_4-D_3 (تعدیل شده) را توصیه نمود (۳). همچنین نجفی (۱۳۷۸)، در مطالعه مشابهی که بر روی الوارهای به ضخامت ۳/۲ سانتیمتر با استفاده از برنامه‌های T_4-D_2 ، T_4-D_3 و T_5-D_3 انجام داد، در نهایت برنامه T_5-D_3 را پیشنهاد کرد (۴). با هدف برخورداری از شرایطی یکسان و حتی الامکان کاربردی به منظور محاسبه ضرایب D و S، در این مطالعه از داده‌های تجربی و منحنی‌های رطوبت - زمان حاصل از به کارگیری برنامه T_4-D_3 برای دو ضخامت ۲/۵ و ۳/۲ سانتیمتر استفاده گردید (۱۸).

بدین منظور مقادیر D و S به دو روش محاسبه گردید:

در روش اول، داده‌های مربوط به منحنی رطوبت - زمان برای هر دو ضخامت ۲/۵ و ۳/۲ سانتیمتر به طور همزمان مورد استفاده قرار گرفت. (روش Choong & Skaar). در روش دوم به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان مقادیر حاصله، منحنی رطوبت - زمان خشک شدن بلوط برای هر یک از ضخامت‌های ۲/۵ و ۳/۲ سانتیمتر به طور مجزا مورد استفاده قرار گرفت (روش Liu).

لازم به توضیح است با توجه به لزوم ثابت بودن دما و رطوبت نسبی در روشهای مذکور، به منظور محاسبه D و S از روی منحنی رطوبت - زمان، محاسبات مربوطه در هر یک از گامهای مختلف برنامه چوب خشک‌کنی که دارای شرایط ثابت دما و رطوبت نسبی می‌باشند، به طور مجزا انجام گردید. بدین ترتیب مقادیر D و S در شرایط متفاوت دما و رطوبت نسبی و طی گامهای مختلف برنامه چوب خشک‌کنی محاسبه گردید. همچنین به منظور ارزیابی نرخ خشک شدن الوار در هر لحظه، شیب خط مماس بر منحنی رطوبت -

زمان محاسبه شد. بدین منظور معادله ریاضی منحنی رطوبت - زمان با استفاده از روش برازش^۱ چند جمله‌ای و با دقت قابل قبول برآورد گردید. پس از مشتق‌گیری از معادله رطوبت - زمان، رابطه‌ای به منظور محاسبه نرخ خشک شدن الوار در هر لحظه از زمان بدست آمد.

جدول ۲ - برنامه چوب خشک‌کنی T_۴-D_۳

شماره گام	شماره گام	رطوبت	دمای خشک	دمای تر	اختلاف دمای خشک و تر	رطوبت نسبی	رطوبت تعادل
دمای خشک	تنزل دمای تر	آغاز گام	(سانتیگراد)	(سانتیگراد)	(سانتیگراد)	(درصد)	(درصد)
۱	۱	>۵۰	۴۳	۴۰	۳	۸۴	۱۶،۳
۱	۲	۵۰	۴۳	۴	۳۹	۷۸	۱۴،۲
۱	۳	۴۰	۴۳	۳۷	۴	۶۸	۱۱،۶
۱	۴	۳۵	۴۳	۳۲	۱۱	۴۸	۷،۹
۲	۵	۳۰	۴۹	۳۲	۱۷	۳۲	۵،۵
۳	۶	۲۵	۵۴	۳۲	۲۲	۲۲	۴
۴	۷	۲۰	۶۰	۲۸	۳۲	۱۵	۲،۹
۵	۷	۱۵	۸۲	۲۸	۵۴	۲۶	۳،۵

(دفتر بهره‌برداری و صنایع چوب، ۱۳۷۸)

ارائه نتایج و بحث

به منظور آگاهی از شرایط دما و رطوبت نسبی طی گام‌های مختلفی که در آن مقادیر D و S محاسبه شد، در جدول (۲)، برنامه چوب خشک‌کنی T_۴ - D_۳ و در جدول (۳)، گزارش روزانه درصد رطوبت و نرخ خشک شدن بلوط به ضخامت‌های ۲/۵ و ۳/۲ سانتیمتر ارائه شده است. همچنین در شکل‌های (۲) و (۳)، منحنی‌های رطوبت زمان خشک شدن بلوط تحت برنامه T_۴ - D_۳ به ترتیب برای ضخامت‌های ۲/۵ و ۳/۲ سانتیمتر با استفاده از داده‌های جدول (۲) ترسیم شده است. با هدف برخورداری از حداکثر دامنه رطوبتی مشترک، داده‌های مربوط به میانگین درصد رطوبت نمونه‌های کنترل برای ضخامت ۲/۵ سانتیمتر و مرطوب‌ترین نمونه‌ها برای ضخامت ۳/۲ سانتیمتر به منظور محاسبه D و S مدنظر قرار گرفت. بدین ترتیب ضرایب D و S طی دامنه رطوبتی ۴۰ الی ۱۰ درصد با استفاده از هر دو روش Choong & Skaar و Liu محاسبه گردید. به عنوان نمونه، طریقه محاسبه D و S در دامنه رطوبتی ۴۰ الی ۳۵ درصد به شرح ذیل ارائه می‌گردد:

1- Curve fitting

جدول ۳ - گزارش روزانه درصد رطوبت و نرخ خشک شدن الوار

ضخامت الوار								زمان تجمعی
سانتیمتر ۳/۲				سانتیمتر ۲/۵				
نرخ خشک شدن مرطوب ترین	میانگین نمونه های کنترل	خشک ترین نمونه ها	مرطوب ترین نمونه ها	نرخ خشک شدن میانگین	میانگین نمونه های کنترل	خشک ترین نمونه ها	مرطوب ترین نمونه ها	
درصد بر ساعت	درصد رطوبت			درصد بر ساعت	درصد رطوبت			ساعت
۰/۱۰۱	۴۱/۲۱	۳۷/۵	۴۵/۸	۰/۰۴۷	۵۲/۹	۴۴/۵	۶۳/۲	۰
۰/۰۹۵	۳۵/۹۱	۳۱/۸	۴۰/۳	۰/۰۵۷	۵۱/۲	۴۳	۶۱/۱	۲۴
۰/۰۹۰	۳۲/۸۸	۲۸/۸	۳۷/۳	۰/۰۶۶	۵۰/۳	۴۲/۴	۵۹/۱	۴۸
۰/۰۸۵	۳۰/۸	۲۶/۵	۳۵/۳	۰/۰۷۵	۴۹	۴۲/۱	۵۷/۱	۷۲
۰/۰۸۰	۲۸/۹۶	۲۴/۸	۳۳/۵	۰/۰۸۲	۴۷/۱	۴۰/۷	۵۴/۲	۹۶
۰/۰۷۶	۲۶/۶۴	۲۲/۲	۳۱/۴	۰/۰۸۸	۴۵	۳۹/۲	۵۱/۱	۱۲۰
۰/۰۷۲	۲۵	۲۰/۵	۲۹/۸	۰/۰۹۴	۴۲/۳	۳۶/۷	۴۷/۹	۱۴۴
۰/۰۶۸	۲۳/۵۷	۱۹	۲۸/۳	۰/۰۹۸	۳۹/۲	۳۳/۵	۴۴/۸	۱۶۸
۰/۰۶۵	۲۱/۶۲	۱۷	۲۶/۶	۰/۱۰۲	۳۷	۳۱/۹	۴۲	۱۹۲
۰/۰۶۳	۲۰/۱۳	۱۵/۴	۲۵/۱	۰/۱۰۴	۳۵/۵	۳۰/۴	۴۰/۴	۲۱۶
۰/۰۶۰	۱۹/۹۷	۱۴/۶	۲۳/۹	۰/۱۰۶	۳۲/۸	۲۷/۶	۳۷/۵	۲۴۰
۰/۰۵۸	۱۷/۳	۱۲/۷	۲۲/۲	۰/۱۰۶	۳۰	۲۴/۷	۳۴/۸	۲۶۴
۰/۰۵۷	۱۵/۸۵	۱۱/۴	۲۰/۵	۰/۱۰۶	۲۷/۴	۲۲	۳۲	۲۸۸
۰/۰۵۶	۱۴/۹۷	۱۰/۸	۱۹/۴	۰/۱۰۵	۲۵/۳	۲۰/۱	۲۹/۸	۳۱۲
۰/۰۵۵	۱۳/۶۵	۹/۵	۱۷/۹	۰/۱۰۲	۲۳/۳	۱۸/۲	۲۷/۶	۳۳۶
۰/۰۵۴	۱۲/۵۸	۸/۶	۱۶/۷	۰/۰۹۹	۲۰/۶	۱۵/۲	۲۴/۸	۳۶۰
۰/۰۵۲	۱۱/۷۷	۸/۱	۱۵/۷	۰/۰۹۵	۱۸/۱	۱۲/۷	۲۲/۱	۳۸۴
۰/۰۵۵	۱۰/۹	۷/۲	۱۴/۷	۰/۰۹۰	۱۵/۸	۱۰/۳	۱۹/۷	۴۰۸
۰/۰۵۵	۱۰/۶۶	۶/۸	۱۳/۳	۰/۰۸۳	۱۳/۶	۸/۴	۱۷/۱	۴۳۲
۰/۰۵۶	۸/۵۵	۵/۵	۱۱/۱	۰/۰۷۶	۱۱	۶/۳	۱۴/۱	۴۵۶
۰/۰۵۸	۶/۸۸	۴/۸	۹/۵	۰/۰۶۸	۹/۲	۴/۹	۱۲/۲	۴۸۰
۰/۰۶۰	۶/۰۹	۴/۵	۷/۸	۰/۰۵۹	۸/۲	۴/۶	۱۰/۵	۵۰۴
۰/۰۶۱	۷/۱۷	۴/۴	۷/۹	۰/۰۴۹	۷/۳	۴/۴	۹/۲	۵۲۸
				۰/۰۳۸	۶/۴	۴/۱	۷/۹	۵۵۲

روش اول:

برای مثال در روش اول (دو منحنی) با توجه به رابطه (۴) و جایگزینی درصد رطوبت به جای غلظت رطوبت برای نقطه $E=۰/۵$ خواهیم داشت:

$$۰/۵ = \frac{\bar{M} - ۳۵/۳}{۴۰/۲ - ۳۵/۳} \rightarrow \bar{M} - ۳۵/۳ = ۲/۵ \rightarrow \bar{M} = \%۳۷/۸$$

با در نظر گرفتن منحنی رطوبت - زمان برای ضخامت ۳/۲ سانتیمتر و با توجه به رابطه (۲۴) خواهیم داشت:

$$t_{۰/۵} = ۴۱/۱ \text{ hr} \quad \text{و} \quad a = ۱/۶ \text{ cm} \rightarrow \frac{۴۱/۱ \text{ hr}}{۰/۲ \times ۱/۶ \text{ cm}} = \frac{۱/۶ \text{ cm}}{D} + \frac{۳/۵}{S} \quad (a)$$

همچنین با توجه به منحنی رطوبت زمان برای ضخامت ۲/۵ سانتیمتر خواهیم داشت:

$$t_{0.5} = 25/7 \text{ hr} \quad \text{و} \quad a = 1/2 \text{ cm} \quad \rightarrow \quad \frac{25/7 \text{ hr}}{0.2 \times 1/25 \text{ cm}} = \frac{1/25 \text{ cm}}{D} + \frac{3/5}{S} \quad (\text{b})$$

با حل دستگاه دو معادله - دو مجهول a و b خواهیم داشت:

$$462375 \text{ s/cm} - 370080 \text{ s/cm} = \frac{0.35 \text{ cm}}{D}$$

$$92295 \text{ s/cm} = \frac{0.35 \text{ cm}}{D} \quad \rightarrow \quad D = 3/7465 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s} \quad \text{و}$$

با جایگزینی مقدار D در معادله اول خواهیم داشت:

$$\frac{41/1 \text{ hr}}{0.2 \times 1/6 \text{ cm}} = \frac{1/6 \text{ cm}}{3/7465 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}} + \frac{3/5}{S} \quad \rightarrow$$

$$462375 \text{ s/cm} - 427065 \text{ s/cm} = \frac{3/5}{S} \quad \rightarrow \quad S = 9/6056 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

روش دوم:

در روش دوم (یک منحنی)، با توجه به رابطه (۱۹) و حل معادله برای \bar{D} هر بار با توجه به منحنی رطوبت - زمان یک ضخامت مشخص خواهیم داشت:
الف) ضخامت ۳/۲ سانتیمتر:

$$t = 0.1963 \frac{a^2}{\bar{D}} \quad \rightarrow \quad \bar{D} = 0.1963 \times \frac{(1/6 \text{ cm})^2}{41/1 \text{ hr}} \quad \rightarrow$$

$$\bar{D} = 0.01220036 \frac{\text{cm}^2}{\text{hr}} \quad \rightarrow \quad \bar{D} = 3/389 \times 10^{-6} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

همچنین با استفاده از رابطه (۲۰) داریم:

$$\frac{dt}{dE} = -0.7854 \times \frac{(1/6 \text{ cm})^2}{0.01220036 \text{ cm}^2/\text{hr}} \quad \rightarrow \quad \frac{dt}{dE} = -164/8 \text{ hr}$$

بدین ترتیب با توجه به رابطه (۱۷) خواهیم داشت:

$$\frac{D}{(1/6\text{cm})^2} = \frac{-0/1654}{0/701 \times (-164/8\text{hr}) + 2/05 \times 41/1\text{hr}} \rightarrow D = 3/7862 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$$

در ادامه L را با توجه به معادله (۱۲) و جدول (۱) محاسبه می‌نمائیم:

$$\frac{3/7862 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s} \times 41/1\text{hr}}{(1/6\text{cm})^2} = 0/1963 + \frac{0/7010}{L} \rightarrow L = 30/4\text{cm}$$

سپس با استفاده از رابطه (۶) خواهیم داشت:

$$30/4\text{cm} = \frac{S \times (1/6\text{cm})^2}{3/7862 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}} \rightarrow S = 7/1930 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

(ب) ضخامت ۲/۵ سانتیمتر:

$$t = 0/1963 \frac{\text{a}^2}{D} \rightarrow \bar{D} = 0/1963 \times \frac{(1/25\text{cm})^2}{23/6\text{hr}}$$

$$\rightarrow \bar{D} = 0/1193759 \text{ cm}^2/\text{hr} \rightarrow D = 3/319 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$\frac{dt}{dE} = -0/7884 \times \frac{(1/25\text{cm})^2}{0/1193759 \text{ cm}^2/\text{hr}} \rightarrow \frac{dt}{dE} = -102/8\text{hr} \text{ و}$$

$$\frac{D}{(1/25\text{cm})^2} = \frac{-0/1654}{0/701 \times (-102/8\text{hr}) + 2/05 \times 25/7\text{hr}} \rightarrow D = 3/7046 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$\frac{3/7046 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s} \times 25/7\text{hr}}{(1/25\text{cm})^2} = 0/1963 + \frac{0/7010}{L} \rightarrow L = 30/4\text{cm} \text{ و}$$

$$30/4 = \frac{S \times (1/25\text{cm})^2}{3/7046 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}} \rightarrow S = 9/0088 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

بدین ترتیب مقادیر D و S تحت شرایط ثابت دما و رطوبت نسبی حاکم بر هر یک از گام‌های برنامه چوب خشک‌کنی در دامنه ۴۰ الی ۱۰ درصد رطوبت چوب (الوار)، با استفاده از هر دو روش محاسبه گردید. نتایج

حاصله در جدول (۴) درج شده است.

جدول ۴ - مقادیر محاسبه شده ضریب انتشار و ضریب دفع سطحی طی گام‌های مختلف

روش دو منحنی		روش یک منحنی					t ₀ /5 (hr)	ضخامت (cm)	دامنه رطوبت (%)
S (cm/s)	D (cm ² /s)	S (cm/s)	D (cm ² /s)	\bar{D} (cm ² /s)	dt/dE (hr)				
9.606E-05	3.747E-06	7.193E-05	3.786E-06	3.389E-06	-164.8	41.2	1.6	40-35	
		9.009E-05	3.705E-06	3.316E-06	-102.8	25.7	1.25		
9.321E-05	3.727E-06	7.141E-05	3.759E-06	3.364E-06	-166	41.5	1.6	35-30	
		8.939E-05	3.676E-06	3.29E-06	-103.6	25.9	1.25		
8.632E-05	3.619E-06	6.907E-05	3.636E-06	3.255E-06	-171.6	42.9	1.6	30-25	
		8.639E-05	3.553E-06	3.18E-06	-107.2	26.8	1.25		
9.112E-05	3.496E-06	6.720E-05	3.527E-06	3.166E-06	-176.4	44.1	1.6	25-20	
		8.419E-05	3.462E-06	3.099E-06	-110	27.5	1.25		
9.011E-05	3.390E-06	6.527E-05	3.436E-06	3.075E-06	-181.6	45.4	1.6	20-15	
		8.181E-05	3.364E-06	3.011E-06	-113.2	28.3	1.25		
5.671E-05	2.431E-06	4.630E-05	2.437E-06	2.182E-06	-256	64	1.6	15-10	
		5.788E-05	2.380E-06	2.131E-06	-160	40	1.25		

همانگونه که مشاهده می‌شود، مقادیر D و S حاصل از به کارگیری منحنی‌های رطوبت - زمان منفرد برای ضخامت‌های ۲/۵ و ۳/۲ سانتیمتر هر یک به تنهایی (روش Liu)، در تائید یکدیگر بوده و با مقادیر D و S حاصل از به کارگیری توأم دو منحنی رطوبت - زمان (روش Choong & Skaar) بسیار نزدیک می‌باشد. این تشابه در کلیه دامنه رطوبتی صدق می‌نماید. بدینوسیله قابلیت اطمینان نتایج حاصله تائید می‌گردد. روند نزولی مقدار D طی گام‌های مختلف کاهش رطوبت چوب در زیر نقطه اشباع فیبر، با نتایج مطالعات سایر محققین مطابقت داشته و با توجه به معادلات کلاسیک انتشار قابل توجیه می‌باشد (۱۶). البته از آنجا که برخی از محققین در روابط پیشنهادی خود، به رابطه مستقیم درصد رطوبت و دمای چوب با ضریب انتشار اشاره کرده‌اند (۱۵ و ۱۳)، اثر متقابل کاهش رطوبت و افزایش دما طی گام‌های مختلف، باید مدنظر قرار گیرد (۱۴ و ۱۷).

لازم به ذکر است، اندازه گیری ضریب دفع سطحی (S) توسط پژوهشگران مختلف، نتایج متفاوتی به

دنبال داشته که لزوماً در تأیید یکدیگر نمی‌باشند. همچنین در بسیاری از موارد مقادیر اندازه‌گیری شده با آنچه که معادلات کلاسیک پیش‌بینی می‌نمایند دارای همبستگی نمی‌باشد (۱۲).

طبق تحقیقات انجام شده، S تابعی از عوامل متعدد از قبیل دما، ویسکوزیته و سرعت سیال و همچنین جرم ویژه، درصد رطوبت و شرایط سطحی چوب می‌باشد که تغییر هر یک از این عوامل ممکن است به حصول نتایج متفاوت منجر گردد (۶). بنابراین به عنوان نمونه با توجه به عدم اطلاع از یکسانی سرعت جریان هوا در دو کوره مورد استفاده، تفاوت مشاهده شده در مقادیر S حاصله از روش «یک منحنی» برای ضخامت‌های مختلف (جدول ۴)، می‌تواند قابل توجیه باشد.

بنابراین با توجه به وجود عوامل متعدد مؤثر بر روی ضرایب انتشار و ضریب دفع سطحی توصیه می‌گردد تعمیم مقادیر D و S حاصل از این مطالعه به شرایط مختلف، با احتیاط انجام گیرد. از طرف دیگر با توجه به آنکه طی بررسی‌های به عمل آمده، هیچ گزارشی منتشر شده‌ای در خصوص اندازه‌گیری و یا محاسبه ضرایب D و S در مورد گونه‌های داخلی یافت نگردید، مطالعه حاضر علاوه بر تلقی به عنوان نخستین کوشش در این راستا، عمدتاً می‌تواند از جنبه روش شناختی نیز مورد توجه قرار گیرد.

لازم به یادآوری است که در این مطالعه از نتایج حاصل از خشک شدن الوارهایی در ابعاد مصرف نهایی و در کوره‌هایی با مقیاس صنعتی استفاده گردیده و انجام آزمون‌های استاندارد در مقیاس آزمایشگاهی و تحت شرایط کنترل شده، ممکن است نتایج متفاوتی به همراه داشته باشد. از طرفی انجام آزمایش در مقیاس صنعتی و تحت شرایط واقعی، می‌تواند نتایج کاربردی تری به منظور شبیه‌سازی فرآیند خشک کردن صنعتی چوب، حاصل نماید.

در ادامه، چگونگی تأثیر نرخ خشک شدن بر زوی مقادیر D و S مورد ارزیابی قرار گرفت. طبق بررسی‌های انجام شده و با توجه به شکل منحنی‌های رطوبت - زمان، معادله‌ای از درجه سوم، بیشترین تطابق با منحنی‌های واقعی را به همراه داشت (شکل‌های ۲ و ۳).

بدین ترتیب، معادله منحنی برازش شده برای مرطوب‌ترین نمونه‌ها، طی فرآیند خشک شدن الوار بلوط به ضخامت ۳/۲ سانتیمتر عبارتست از:

$$MC = 42/150282 - 0/10057 \times (t) + 0/000123 \times (t^2) - 0/000000108868652 \times (t^3)$$

$$R^2 = 0/9991 \quad \text{ضریب تعیین}$$

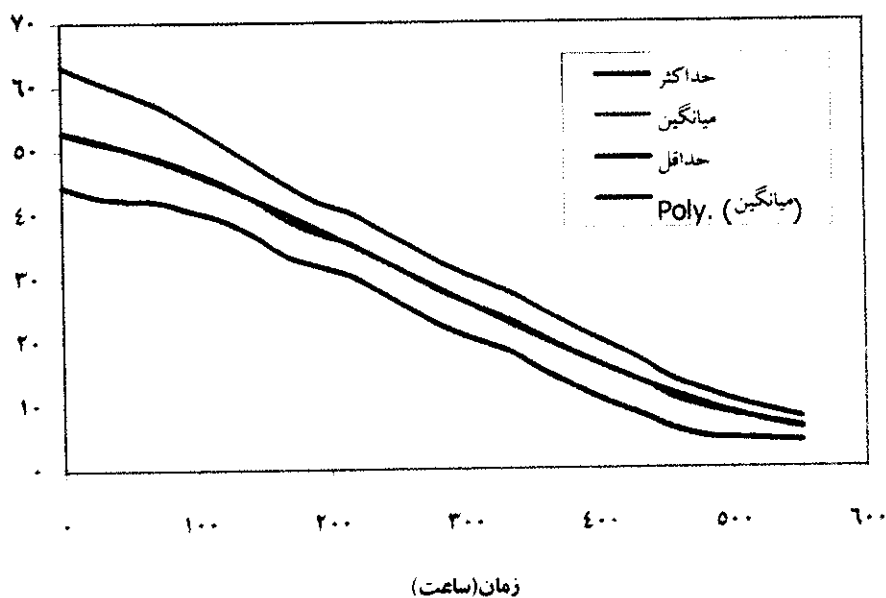
که در آن:

MC- رطوبت الوار بر حسب درصد

t- زمان بر حسب ساعت

به منظور محاسبه نرخ خشک شدن الوار در هر نقطه، از معادله برازش شده مشتق گرفته شد:

$$\frac{dMC}{dt} = -0.00057 + 0.000246 \times (t) - 0.000000326605956 \times (t^2)$$

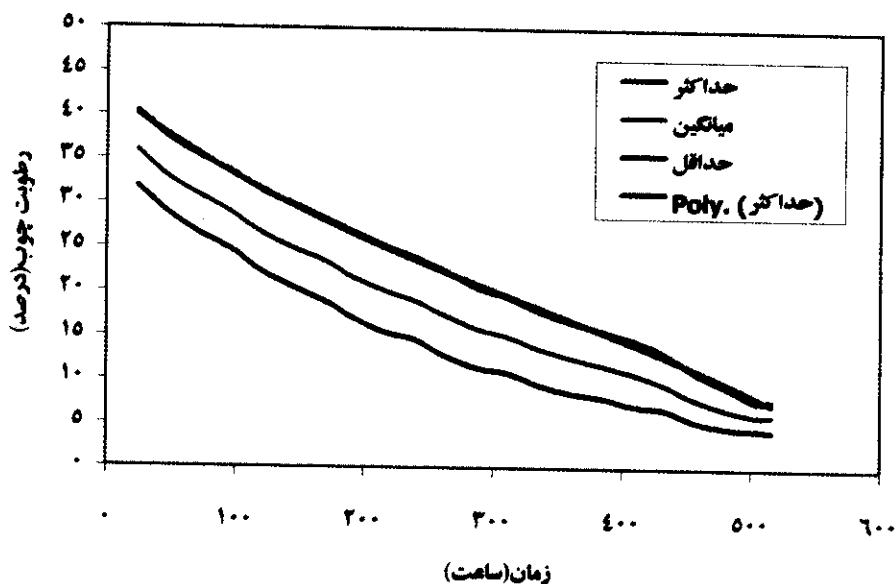


شکل ۲: منحنی خشک شدن بلندمازو به ضخامت ۲/۵ سانتیمتر

با استفاده از این معادله، نرخ خشک شدن الوار بلوط به ضخامت ۳/۲ سانتیمتر در هر مقطع زمانی محاسبه گردید (جدول ۳). به همین ترتیب معادله منحنی برازش شده برای رطوبت متوسط نمونه‌ها، طی فرآیند خشک شدن الوار بلوط به ضخامت ۲/۵ سانتیمتر عبارتست از:

$$MC = 52.967208 - 0.046921 \times (t) - 0.000223 \times (t^2) + 0.000000279079611 \times (t^3)$$

$$R^2 = 0.9993 \quad \text{ضریب تعیین}$$



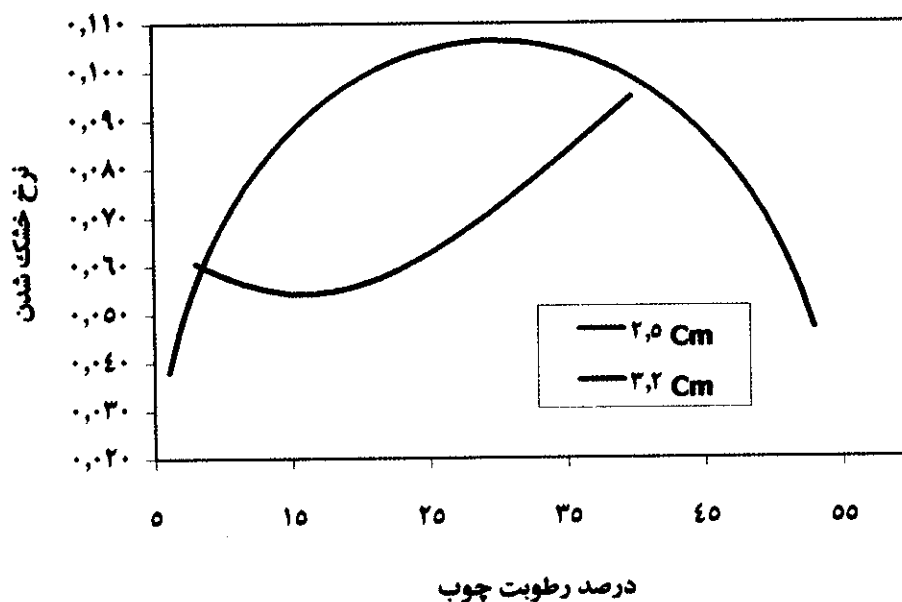
شکل ۳: منحنی خشک شدن بلندمازو به ضخامت ۳/۲ سانتیمتر

که پس از مشتق‌گیری خواهیم داشت:

$$\frac{dMC}{dt} = -0.046921 - 0.000446 \times (t) + 0.0000008372388833 \times (t^2)$$

نتایج حاصل از محاسبه نرخ خشک شدن الوار بلوط به ضخامت ۲/۵ سانتیمتر در هر مقطع زمانی با استفاده از معادله مذکور در جدول (۳) مشاهده می‌گردد.

همچنین شکل (۴)، تغییرات نرخ خشک شدن بلوط به ضخامت‌های ۳/۲ و ۲/۵ سانتیمتر برحسب درصد رطوبت چوب را در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود روند نرخ خشک شدن در ضخامت ۳/۲ سانتیمتر، با کاهش درصد رطوبت در ابتدا نزولی بوده و در رطوبت ۱۵ الی ۲۰ درصد به حداقل مقدار خود رسیده و سپس روندی صعودی را در پیش می‌گیرد. در ضخامت ۲/۵ سانتیمتر، با کاهش درصد رطوبت، روند نرخ خشک شدن در ابتدا صعودی بوده و در رطوبت ۲۵ الی ۳۰ درصد به حداکثر مقدار خود رسیده و سپس روندی نزولی را در پیش می‌گیرد. در دو نقطه ۸ و ۴۰ درصد رطوبت، منحنی‌های نرخ خشک شدن دو ضخامت ۳/۲ و ۲/۵ سانتیمتر با یکدیگر تلاقی می‌نماید.



شکل ۴: تغییرات نرخ خشک شدن بلندمازو به ضخامت‌های ۲/۵ و ۳/۲ سانتیمتر

این بدان معنی است که در ابتدای دامنه رطوبتی مشترک، با توجه به استفاده از برنامه چوب خشک‌کنی یکسان و شرایط مشابه دما و رطوبت نسبی، هر دو ضخامت با نرخ مساوی شروع به خشک شدن می‌نمایند، ولی با پیشرفت فرآیند خشک شدن و تأثیر عوامل مختلف و از جمله ضخامت، نرخ خشک شدن در ضخامت ۳/۲ سانتیمتر کاهش و در ضخامت ۲/۵ سانتیمتر افزایش می‌یابد تا اینکه تقریباً در انتهای دامنه رطوبتی مشترک (پایان فرآیند خشک شدن) و تثبیت شرایط دما و رطوبت نسبی، مجدداً نرخ خشک شدن در هر دو ضخامت با یکدیگر برابر می‌گردد. قابل توجه آنکه کاربرد آزمون t مستقل در کل دامنه رطوبتی حاکی از آنستکه نرخ خشک شدن در ضخامت ۲/۵ سانتیمتر در سطح معنی‌داری یک درصد، بیش از ضخامت ۳/۲ سانتیمتر می‌باشد (جداول ۵ و ۶).

یعنی با وجود آنکه نرخ خشک شدن در دو ضخامت به طور معنی‌داری با یکدیگر متفاوت می‌باشد، ولی محاسبات مربوط به تعیین ضرایب انتشار در هر دو ضخامت به حصول نتایج یکسانی منتهی گردید. انجام محاسبات مشابه بر روی ضخامت‌های متفاوت از گونه‌های مختلف می‌تواند اطلاعات بیشتری در این خصوص ارائه دهد.

جدول ۵ - میانگین نرخ خشک شدن ضخامت‌های مختلف

ضخامت (سانتیمتر)	تعداد مشاهدات	میانگین (درصد بر ساعت)	انحراف معیار (درصد بر ساعت)	معیار خطای میانگین
۲/۵	۲۴	$۸/۳۱۳ \times ۱۰^{-۲}$	$۲/۱۲۸ \times ۱۰^{-۲}$	$۴/۳۴۳ \times ۱۰^{-۳}$
۳/۲	۲۳	$۶/۶۶۸ \times ۱۰^{-۲}$	$۱/۴۳ \times ۱۰^{-۲}$	$۲/۹۸۲ \times ۱۰^{-۳}$

جدول ۶ - نتایج آزمون معنی‌دار بودن اختلاف میانگین نرخ خشک شدن

آزمون t-student مستقل				آزمون leven				برای همگنی واریانس
فاصله اعتماد ۹۵ درصد برای اختلاف میانگین‌ها		اختلاف میانگین	احتمال معنی‌داری (دوطرفه)	درجه آزادی	مقدار t	احتمال معنی‌داری	مقدار F	
محدوده پائین	محدوده بالا							
$۲/۷۱۴ \times ۱۰^{-۲}$	$۵/۷۴۹ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۶۴۵ \times ۱۰^{-۲}$	۰/۰۰۳	۴۵	۳/۰۹۶	۰/۰۳۱	۴/۹۷۶	با فرض همگنی واریانس‌ها
$۲/۷۰۹ \times ۱۰^{-۲}$	$۵/۸۰۳ \times ۱۰^{-۲}$	$۱/۶۴۵ \times ۱۰^{-۲}$	۰/۰۰۳	۴۰/۴۱	۳/۱۲			با فرض عدم همگنی واریانس‌ها

در نهایت، پیشنهاد می‌گردد به منظور حصول شناخت بهتر از فرآیند خشک شدن گونه‌های داخلی و اعمال نتایج حاصله برای مقاصد عملی، مطالعات متمرکزی در خصوص اندازه‌گیری ضرایب انتشار با توجه به روشهای شناخته شده و استاندارد به عمل آید. همچنین آگاهی بیشتر از رابطه مابین ضریب انتشار و رطوبت و دمای چوب و چگونگی تأثیر جرم ویژه و گونه چوب و احتمالاً جهت‌گیری دوایر رویش سالیانه، مستلزم انجام تحقیقات بیشتری می‌باشد.

منابع و مأخذ

- ۱- ابراهیمی، قنبر. ۱۳۷۰. فرآیند انتقال سیال در چوب. انتشارات دانشگاه تهران، ۲۹۰ صفحه.
- ۲- دفتر بهره‌برداری و صنایع چوب. ۱۳۷۸. طرح تدوین برنامه کوره برای خشک کردن چوب بلوط بلندمازو به ضخامت ۳/۲ سانتیمتر، سازمان جنگلها و مراتع کشور. وزارت جهاد سازندگی، ۱۱۲ صفحه.
- ۳- عشوری، علیرضا. ۱۳۷۵. تدوین برنامه خشک کردن چوب بلوط (به ضخامت ۲۵ میلیمتر). پایان‌نامه

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ. دانشگاه گرگان، ۹۵ صفحه.
 ۴- نجفی، هومن. ۱۳۷۸. تدوین برنامه کوره برای خشک کردن چوب بلوط بلندمازو به ضخامت ۳/۲ سانتی متر.
 پایان نامه کارشناسی ارشد، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی. ۱۰۶ صفحه.

- 5- Biggerstaff, T. 1965. Drying diffusion coefficients in wood as affected by temperature. *Forest products Journal*. 15(3): 127 - 133.
- 6- Bramhall, G. 1995. Diffusion and drying of wood. *Wood Science and Technology*. 29(3): 209-215.
- 7- Chen, Y. and Choong, E.T and Wetzel, D.M. 1994. Evaluation of diffusion coefficient and Surface emission coefficient by an optimization technique. *Wood and Fiber Science*, 27(2): 178-182.
- 8- Crank, J. 1975. *The mathematics of diffusion*. 2nd ed., clarendon press, Oxford, London.
- 9- Liu, Jen Y. 1989. A new method for separating diffusion coefficient and surface emission coefficient. *Wood and Fiber Science*, V. 21(2): 133-141.
- 10- Rosen, H. N. 1978. The influence of external resistance on moisture adsorption rates in wood. *Wood and Fiber Science*. 10(3): 218-228.
- 11- Rosen, H.N. 1982a. Predicting wood surface moisture content during water vapor sorption. *Wood Science and Technology*. 14(3): 134-137.
- 12- Siau, J.F and Avramidis, S. 1995. The surface emission coefficient of wood. *Wood and Fiber Science*, 28(2): 178-185.
- 13- Siau, J. F. 1971. *Flow in Wood*. Syracuse University press, New York, USA.
- 14- Siau, J. F. 1984. *Transport processes in Wood*. Springer, New York, USA.
- 15- Simpson, W. T. and Liu, Jen Y. 1997. An Optimization technique to determine red Oak surface and internal moisture transfer Coefficients during drying - *Wood and Fiber Science*, 29(4): 312-318.
- 16- Simpson, W. T. 1993. Determination and use of moisture diffusion coefficient to characterize drying of northern red oak (*Quercus rubra*). *Wood Science and Technology*, 27: 409-420.

-
- 17- Skaar, C. and Siau, J.F. 1981. Thermal diffusion of bound water in wood. *Wood Science and Technology*. 15(2): 105-112.
 - 18- United States Department of Agriculture. 1991. *Dry Kiln Operator's Manual*. USDA forest Service, forest product laboratory. Madison, Wisconsin. USA.