

# برآورد رطوبت تعادل چوب در دمای بالای ۱۰۰ درجه سانتیگراد

امیر هومن حمصی

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

## چکیده

با توجه به توسعه فناوری‌های جدید و کارآمد در زمینه فرآوری چوب، تاثیر رطوبت نسبی بر رطوبت تعادل چوب در دماهای بالاتر از نقطه جوش آب، طی سالیان اخیر توجه پژوهشگران و متخصصین صنایع فرآورده‌های چوب را به خود جلب نموده است. در این تحقیق، ضمن مطالعه مبانی نظری مورد نیاز، معادلات ریاضی مربوط به روابط سایکومتري چوب در دامنه دمای خشک ۹۳ تا ۲۶۰ درجه سانتیگراد و دمای تر در محدوده ۳۸ تا ۹۹ درجه سانتیگراد، جمع‌آوری و بسط یافته و مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، موضوعات مرتبط با اندازه‌گیری دمای تر، دمای آدیاباتیک اشباع، نقطه شبنم، رطوبت نسبی، محتوای بخار و آنتالپی جریان هوای مرطوب، مطالعه و مورد بحث قرار گرفت. در نهایت، مقادیر رطوبت نسبی و رطوبت تعادل چوب، متناظر با دمای خشک و تر در محدوده مورد نظر ارائه شد. با توجه به مطابقت قابل قبول مقادیر برآورد شده با برخی نتایج حاصل از مشاهدات تجربی سایر پژوهشگران، به نظر می‌رسد موضوعات مطروحه در این مطالعه به عنوان پایه‌ای برای تحقیقات آتی مناسب باشد.

واژه‌های کلیدی: سایکومتري، رطوبت تعادل، رطوبت نسبی، آنتالپی، دمای بالا

## مقدمه

اخیراً روابط سایکومتري و تاثیر رطوبت نسبی بر رطوبت تعادل چوب در دماهای بالاتر از نقطه جوش آب، به دو دلیل عمده توجه پژوهشگران و متخصصین صنایع فرآورده‌های جنگلی را به خود جلب نموده است. اول آنکه در دهه گذشته، فناوری خشک کردن چوب و الوار در دمای بالا و زمان کوتاه، توسعه زیادی یافته و ثانیاً، موضوع صرفه‌جویی در مصرف انرژی طی فرآوری مصنوعات چوبی است که در برخی کشورهای پیشرفته، مورد توجه قرار گرفته است. کنترل رطوبت چوب، به خصوص طی خشک کردن الوار در صنایع مبلمان بسیار مهم بوده و به رطوبت نسبی کوره چوب خشک کنی وابسته است. همچنین محاسبه مصرف انرژی و ارزیابی پتانسیل بازیافت انرژی در کوره‌های چوب خشک کنی و خشک کن روکش‌های چوبی، مستلزم تعیین رطوبت نسبی به عنوان یک عامل مهم است (Corder 1976; Rosen 1979). فرایند سایکومتري، روشی ساده و مناسب برای اندازه‌گیری مقادیر نسبی هوا و بخار آب موجود در جریان هوای مرطوب است. استفاده از این روش مستلزم اندازه‌گیری دمای واقعی هوا (دمای خشک،  $T_{db}$ ) و همچنین دمای پارچه مرطوبی است که آب موجود در آن تبخیر و به گاز (بخار آب)، تبدیل می‌گردد (دمای تر،  $T_{wb}$ ). طبق نظر بسیاری از صاحب‌نظران و پژوهشگران، با استفاده از پدیده سایکومتري می‌توان رطوبت نسبی متناظر را تا دمای خشک ۲۶۰ درجه سانتیگراد، به طور مطلوبی محاسبه کرد (Worrall, 1985). به منظور بررسی قابلیت اطمینان نتایج حاصل از روابط سایکومتري در

**بیش از ۲ میلیون مقاله فارسی در این سایت موجود میباشد**

دماهای زیر ۱۰۰ درجه سانتیگراد، تا دنون آزمون‌های تجربی قابل توجهی توسط محققین مختلف انجام شده است (Wengert and Mitchel 1979). در خصوص دماهای بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتیگراد، پیش‌بینی‌های مربوط به رطوبت نسبی و رطوبت تعادل چوب عمدتاً بر روابط پراکنده‌ای مبتنی بوده که از بسط مبنای نظری مربوط به دماهای پایین بدست آمده و توسط آزمایشات تجربی چندان زیادی پشتیبانی نمی‌گردد (Anon. 1976; Evans and Vaughan 1977; Zimmerman and Lavine 1964). هدف از این مطالعه، جمع‌آوری و بررسی معادلات ریاضی حاکم و ارایه مناسب‌ترین آنها برای انجام محاسبات سایکومتری در دماهای بالا و بررسی قابلیت اطمینان مقادیر رطوبت نسبی هوا و رطوبت تعادل چوب، با توجه به نتایج حاصل از مشاهدات تجربی مربوطه می‌باشد.

**مبنای نظری**

به منظور استفاده از روابط ریاضی برای برآورد رطوبت نسبی و رطوبت تعادل چوب متناظر با آن در دماهای بالا، سایکومتریک، به کارگیری مفاهیم اصولی ترمودینامیک در قالب دمای اشباع آدیاباتیک، دمای تر، دمای نقطه شبنم، آنتالپی، فشار جزئی بخار آب، فشار بخار اشباع، رطوبت نسبی، درصد بخار، رطوبت تعادل و روابط متقابل آنها مورد نیاز است.

**دمای اشباع آدیاباتیک**

هنگامی که هوای غیر اشباع در مجاورت آب قرار گیرد، هوا مرطوب و خنک خواهد شد. چنانچه عملکرد سیستم ترمودینامیکی به گونه‌ای طراحی شده باشد که هیچ حرارتی با محیط اطراف تبادل نگردد (سیستم بسته باشد)، فرآیند از نوع آدیاباتیک خواهد بود. بنابراین اگر دمای آب ثابت بماند، انتظار می‌رود گرمای نهان تبخیر برابر با حرارت محسوس از دست رفته توسط هوا در هنگام سرد شدن باشد. چنانچه درجه حرارت هوا هنگام اشباع شدن با دمای آب برابر باشد، به آن درجه حرارت، دمای اشباع آدیاباتیک ( $T_s$ ) گفته می‌شود. هنگامی که هوا با دمای  $T_{db}$  و نسبت رطوبت  $Y$ ، تا درجه حرارت  $T_s$  خنک شود، مقدار حرارتی معادل  $Q$  را از دست می‌دهد:

$$Q_1 = (H_a)_T + Y(H_{wv})_T - (H_a)_s - Y(H_{wv})_s \quad (1)$$

همزمان با سرد شدن هوا، نسبت رطوبت آن از  $Y$  به  $Y_s$  در نقطه اشباع افزایش یافته و گرمای جذب شده طی فرآیند تبخیر ( $Q_2$ )، عبارت است از:

$$Q_2 = (Y_s - Y)[(H_{wv})_s - (H_w)_s] \quad (2)$$

ار آنجا که فرآیند از نوع آدیاباتیک است،  $Q_1 = Q_2$  بوده و پس از تنظیم معادله برای  $Y$  خواهیم داشت:

$$Y = \frac{Y_s[(H_{wv})_s - (H_w)_s] + (H_a)_s - (H_a)_T}{(H_{wv})_T - (H_w)_s} \quad (3)$$

آنتالپی آب مایع در دمای صفر درجه سانتیگراد برابر با صفر و گرمای نهان تبخیر آن:

$$(\Delta H_v)_{32} = 1075.1 \text{ Btu/lb} = 597.3 \text{ Kcal/Kg}$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$(H_{wv})_S = (\Delta H_v)_{32} + \int_{32}^{T_s} c_{wv} dT, \quad (4)$$

$$(H_{wv})_T = (\Delta H_v)_{32} + \int_{32}^{T_{db}} c_{wv} dT, \quad (5)$$

$$(H_a)_S - (H_a)_T = \int_{T_{db}}^{T_s} c_a dT, \text{ and} \quad (6)$$

$$(H_w)_S = \int_{32}^{T_s} c_w dT. \quad (7)$$

نسبت رطوبت متناظر با شرایط اشباع در دمای اشباع آدیاباتیک ( $Y_s$ ) به فشار بخار جزئی آب در دمای اشباع آدیاباتیک ( $P_s$ ) مربوط است. چنانچه فشار کل برابر با یک اتمسفر باشد (Zimmerman and Lavine 1964)، خواهیم داشت:

$$Y_s = \frac{0.6244 p_s^*}{(14.70 - p_s^*)}. \quad (8)$$

در دامنه حرارتی ۳۸ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد، فشار جزئی بخار آب با دقت مطلوبی از روی دمای اشباع آدیاباتیک ( $T_s$ ) قابل محاسبه است:

$$p_s^* = 1.236 \times 10^7 \exp\left(-\frac{9,160}{T_s + 459.6}\right). \quad (9)$$

مقادیر  $C_w$  و  $C_a$ ،  $C_{wv}$  به توجه به توابع سری دما، به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$c_a = 0.2317 + 9.01 \times 10^{-6} \bar{T} + 1.22 \times 10^{-8} \bar{T}^2 - 2.78 \times 10^{-12} \bar{T}^3$$

$$c_{wv} = 0.427 + 1.416 \times 10^{-5} \bar{T} + 4.318 \times 10^{-8} \bar{T}^2 - 8.171 \times 10^{-12} \bar{T}^3$$

$$c_w = 0.991 + 8.04 \times 10^{-5} T$$

که در آن  $T$  بر حسب درجه فارنهایت بوده و مقدار  $C_w$  در محدوده ۱۰۰ تا ۲۱۲ درجه فارنهایت (۳۸ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد)، یک تابع خطی است. پس از انتگرال گیری از معادلات (۴) تا (۷) و جایگزینی آنها به همراه معادله (۸) در معادله (۳)، می توان  $Y$  را به صورت تابعی از  $T_{db}$  و  $T_s$  محاسبه کرد.

### دمای تر

هنگامی که هوای غیراشباع از اطراف یک دماسنج مرطوب عبور می کند، آب از سطوح نم‌دار تبخیر شده و موجب خنک شدن دماسنج می شود. هنگامی که نرخ انتقال حرارت از سطح مرطوب به وسیله هدایت و جابجایی برابر با نرخ باشد که در آن حرارت را

به صورت گرمای نهان تبخیر از دست می‌دهد، دمای تعادلی تحت عنوان دمای تر حاصل می‌شود. نرخ انتقال گرمای محسوس از هوا به دماسنج مرطوب، عبارت است از:

$$\dot{Q}_1 = h_f A (T_{db} - T_{wb}) \quad (10)$$

نرخ اتلاف حرارت به وسیله تبخیر، که از طریق لایه هوای پوشاننده سطح مرطوب پراکنده می‌شود، عبارت است از:

$$\dot{Q}_2 = (\Delta H_v)_{wb} W \quad (11)$$

که در آن:

$$W = M_{wv} A_k (p_{wb}^* - p) \quad (12)$$

به این ترتیب نسبت رطوبت را می‌توان با استفاده از فشار جزئی بخار و از طریق روابطی مشابه معادله (۸)، تعیین نمود:

$$Y_{wb} = \frac{M_{wv} p_{wb}^*}{M_a (p_t - p_{wb}^*)} \quad (8a)$$

$$Y' = \frac{M_{wv} p}{M_a (p_t - p)} \quad (8b)$$

پس از کسر کردن معادله (8b) از (8a) و با فرض آنکه فشار جزئی بخار آب در مقایسه با هوا ناچیز است، می‌توان از معادله زیر استفاده کرد (Treybal 1955):

$$(p_{wb}^* - p) \cong \frac{M_a p_t}{M_{wv}} (Y_{wb} - Y') \quad (13)$$

با تعریف مجدد K به صورت اختلاف نسبت رطوبت و تلفیق معادلات (11) و (13) خواهیم داشت:

$$\dot{Q}_2 = (\Delta H_v)_{wb} A \bar{k} (Y_{wb} - Y') \quad (14)$$

در دمای  $T_{wb}$  خواهیم داشت  $\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2$  و بنابراین:

$$Y' = Y_{wb} - \frac{h_f}{\bar{k} (\Delta H_v)_{wb}} (T_{db} - T_{wb}) \quad (15)$$

برای غلظت کم، رابطه تجربی زیر با دقت زیادی مصداق دارد (Bennet and Myers 1962):

$$\frac{h_f}{k c_m} = (N_{Le})^{2/3} = \left( \frac{k}{c \rho D_v} \right)^{2/3} \quad (16)$$

پس از تلفیق رابطه (۱۵) و (۱۶) خواهیم داشت:

$$Y' = Y_{wb} - \frac{(N_{Le})^{2/3}}{(\Delta H_v)_{wb}} (T_{db} - T_{wb}) \quad (17)$$

مقدار  $(\Delta H_v)_{wb}$  را می‌توان با رابطه زیر بدست آورد (Zimmerman and Lavine, 1964):

$$(\Delta H_v)_{wb} = 1,094 - 0.576 T_{wb} \quad (18)$$

همچنین، مقادیر عدد لویس ( $N_{Le}$ ) و ظرفیت حرارتی مخلوط بخار آب و هوا ( $C_m$ )، تابع دما و رطوبت نسبی هستند. در واقع عدد

لویس  $\left( \frac{k}{c \rho D_v} \right)$  برای مخلوط هوا-بخار آب، در شرایط میانگین دمای خشک و تر اندازه‌گیری می‌شود:

$$T_{av} = \frac{T_{wb} + T_{db}}{2}$$

در خصوص دانسیته ( $\rho_m$  بر حسب  $\text{lb/ft}^3$ )، با توجه به قانون گازهای ایده‌آل داریم:

$$\rho_m = \frac{1 + Y'}{(T_{av} + 459.6)(0.0252 + 0.0407 Y')}$$

همچنین برای ظرفیت حرارتی ( $c_m$  بر حسب  $\text{Btu/lb F}$ )، بر اساس مقدار متوسط ظرفیت حرارتی هوا و بخار آب در دامنه  $T_{av}$  از ۱۵۰ تا ۳۵۵ درجه فارنهایت (۶۵ تا ۱۸۰ درجه سانتیگراد)، داریم:

$$c_m = 0.243 + 0.455 Y'$$

برای ضریب انتشار ( $D_v$  بر حسب  $\text{ft}^2/\text{h}$ )، با توجه به برازش خطی مشاهدات که توسط Vaughan و Evans در سال ۱۹۷۷ ارائه شد، خواهیم داشت:

$$D_v = 0.663 + 4.03 \times 10^{-3} T_{av}$$

در نهایت برای برآورد هدایت حرارتی رطوبت در بخار آب و هوا، خواهیم داشت:

$$k_{vv} = 0.0083 + 2.5 \times 10^{-5} T_{av} \text{ (Weast 1966)}$$

$$k_a = 0.0132 + 2.39 \times 10^{-5} T_{av} \text{ (Bennett \& Myers 1962)}$$

مقایسه نسبت رطوبت بر اساس دمای تر ( $Y$ ) و دمای اشباع آدیاباتیک ( $Y$ ):

پس از تعریف مجدد برخی متغیرها و لحاظ نمودن برخی مفروضات، دو معادله (۳) و (۱۷) با یکدیگر قابل مقایسه‌اند. از آنجا که گرمای تبخیر در هر درجه حرارت (در این مورد  $T_s$ )، صرفاً اختلاف مابین آنتالپی هوا و بخار آب است، داریم:

$$(\Delta H_v)_s = (H_{vv})_s - (H_w)_s \quad (19)$$

پس از بازنویسی معادله (۱۹)، خواهیم داشت:

$$(H_w)_s = (H_{wv})_s - (\Delta H_v)_s \quad (20)$$

می توان معادلات (۳) و (۲۰) را با یکدیگر تلفیق نمود و در نتیجه:

$$Y = \frac{Y_s(\Delta H_v)_s + (H_a)_s - (H_a)_T}{(\Delta H_v)_s + (H_{wv})_T - (H_{wv})_s} \quad (21)$$

مقادیر متوسط ظرفیت حرارتی (۰/۲۴ برای هوا و ۰/۴۶ برای آب) بر حسب Btu/lb F را در معادلات (۴) تا (۶) جایگزین و پس از انتگرال گیری، داریم:

$$(H_{wv})_s = (\Delta H_v)_{32} + 0.46(T_s - 32), \quad (4a)$$

$$(H_{wv})_T = (\Delta H_v)_{32} + 0.46(T_{db} - 32), \text{ and} \quad (5a)$$

$$(H_a)_s - (H_a)_T = 0.24(T_s - T_{db}) \quad (6a)$$

معادلات (۴a) تا (۶a) را می توان در معادله (۲۱) جایگزین نمود و در نتیجه خواهیم داشت:

$$Y = Y_s - \frac{(0.24 + 0.46Y)}{(\Delta H_v)_s} (T_{db} - T_s) \quad (22)$$

شیوه تنظیم معادله (۲۲)، مشابه معادله (۱۷) بوده و در صورتی که  $N_{Le} = 1.0$  و  $Cm = 0.24 + 0.46Y$  بوده و همچنین  $Y$  و  $T_{wb}$  را به ترتیب با  $Y$  و  $T_s$  جایگزین کنیم، با یکدیگر یکسان خواهند شد. از آنجا که در مقاصد کاربردی، عملاً  $T_{wb}$  به جای  $T_s$  اندازه گیری می شود، در مباحث آتی مقدار  $Y'$  جایگزین  $Y$  می گردد.

### دمای نقطه شبنم، $T_{dp}$

نقطه شبنم، دمایی است که در آن، مقدار معینی هوای مرطوب در اثر سرد شدن در یک فشار ثابت، اشباع می گردد. دمای نقطه شبنم را می توان از طریق ترسیم یک خط افقی در نمودار سایکومتري از نقطه مرتبط با یک دما و رطوبت معین به نقطه دیگری با همان رطوبت در منحنی ۱۰۰ درصد اشباع، برآورد نمود. همچنین نقطه اشباع را می توان از طریق مرتب کردن معادله (۹) و جایگزین نمودن  $P_{wb}$  و  $T_{dp}$  به ترتیب به جای  $P_s$  و  $T_s$ ، مشروط به معلوم بودن  $Y'$ ، محاسبه نمود.

$$T_{dp} = \frac{9,160}{16.33 - \ln p_{wb}^*} - 459.6 \quad (23)$$

که در آن:

$$p_{wb}^* = \frac{14.70Y'}{0.6244 + Y'}$$

به خصوص هنگامی که  $T_{wb}$  از حدود ۷۰ درجه سانتیگراد کمتر است، تفاوت زیادی مابین  $T_{dp}$  و  $T_{wb}$  وجود دارد.

## رطوبت نسبی و درصد بخار

رطوبت نسبی بر حسب درصد بیان شده و با رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$RH = \frac{P}{P^*} \times 100. \quad (24)$$

در دماهای بالای ۱۰۰ درجه سانتیگراد و فشار اتمسفر، رطوبت نسبی کمتر از ۱۰۰ درصد خواهد بود چرا که مقدار حداکثر  $P$  برابر با ۱ اتمسفر و  $P^*$  بیشتر از ۱ اتمسفر خواهد بود. به عنوان نمونه در ۲۶۰ درجه سانتیگراد، حداکثر رطوبت نسبی فقط ۲/۲ درصد خواهد بود. در تریخ شرایط محیط‌های دارای دمای زیاد، مفهومی تحت عنوان درصد (محتوای) بخار مصداق مناسبی دارد (Sturney 1952).

$$SC = \frac{P}{P_t} \times 100. \quad (25)$$

بنابراین، خطوط ثابت درصد بخار، همان خطوط ثابت فشار بخار جزئی آب بوده و مشابه خطوط نقطه اشباع هستند. از ترکیب معادلات (۲۴) و (۲۵) در فشار اتمسفر خواهیم داشت:

$$RH = \frac{14.7}{P^*} SC. \quad (26)$$

به این ترتیب در محتوای بخار ۱۰۰ درصد، بیشترین رطوبت نسبی ممکن در هر مقدار دما قابل برآورد است.

## آنتالپی

آنتالپی یا محتوای حرارتی هر ماده، به طور کلی به صورت تفاوت مابین آنتالپی در یک درجه حرارت معین و یک درجه حرارت دلخواه (در اینجا صفر درجه سانتیگراد)، تعریف می‌گردد. به این ترتیب، آنتالپی بخار آب (مرطوب) عبارت است از:

$$H = (H_a)_T + Y'(H_{wv})_T \quad (27)$$

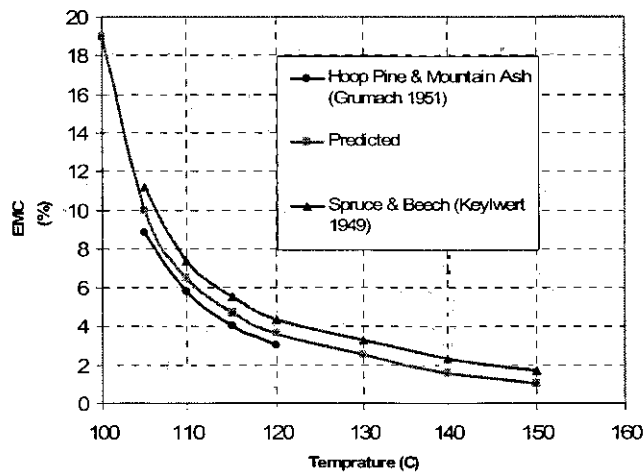
$$H = \int_{32}^{T} c_a dT + Y' \left[ (\Delta H_v)_{32} + \int_{32}^{T} c_{wv} dT \right]. \quad (28)$$

پس از جایگزینی  $C_a$  و  $C_{wv}$  با فرم تابعی چندجمله‌ای بر حسب  $T$ ، و همچنین متغیر  $Y'$  با توجه به معادله (۱۷)، مقدار  $H$  را می‌توان در دامنه  $T_{db}$  و  $T_{wb}$  با توجه به معادله (۲۸)، محاسبه نمود. برای یک دمای تر ثابت، تغییرات آنتالپی در محدوده دمای خشک ۹۳ تا ۲۶۰ درجه سانتیگراد، اندک است. با افزایش دمای خشک، افزایش در گرمای محسوس هوای مرطوب تقریباً معادل با کاهش گرمای نهان در اثر کاهش رطوبت است. در دمای خشک ثابت ۱۵۰ درجه سانتیگراد، مقدار  $H$  به صورت تابعی از دمای تر قابل محاسبه است. در یک دمای تر ثابت، مقدار  $H$  برای تغییرات دمای خشک در محدوده ۹۳ تا ۲۶۰ درجه سانتیگراد، تا حدود ۱/۵ درصد خطا به همراه دارد.

## نتایج و بحث

با تلفیق روابط ریاضی یاد شده، رطوبت نسبی و رطوبت تعادل چوب با توجه به دمای خشک و تر محاسبه گردیده و در جدول ۱ درج شده است. به عنوان نمونه، برای دمای خشک ۱۰۷ و دمای تر ۹۳ درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی حدود ۶۲ درصد و رطوبت تعادل حدود ۵/۸ درصد برآورد میگردد.

اکثر داده‌های پایه و روش‌های ریاضی مربوط به ارزیابی رطوبت تعادل در دماهای بالای ۱۰۰ درجه سانتیگراد به کارهای پژوهشگران آلمانی و استرالیایی در اواخر دهه ۱۹۴۰ و اوایل دهه ۱۹۵۰ میلادی بر می‌گردد (Kauman 1956; Kollman 1961). همچنین Rosen طی سال‌های ۱۹۷۸ و ۱۹۸۰، مقادیر تجربی رطوبت تعادل چوب را برای مخلوط هوا و بخار در دامنه دمای تر ۵۰ الی ۱۰۰ درجه سانتیگراد، ارائه کرد. تا همین اواخر، مقادیر تجربی رطوبت تعادل موجود در دمای بالای ۱۰۰ درجه سانتیگراد، مربوط به بخار فوق داغ، آن هم در فشار اتمسفر بود (Hann 1985). منحنی بخار فوق داغ خالص ( $T_{wb} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ )، نشان‌دهنده حداکثر رطوبت تعادلی است که در هر دمای خشک قابل اکتساب است. بالای ۱۰۰ درجه سانتیگراد، رطوبت تعادل با افزایش دما سریعاً نقصان یافته و در ۱۳۵ درجه سانتیگراد به کمتر از ۳ درصد می‌رسد. نمودار ۱، مقادیر تجربی رطوبت تعادل برخی گونه‌های چوبی در بخار فوق داغ تحت فشار اتمسفر را در مقایسه با مقادیر محاسبه شده توسط معادلات ریاضی نشان می‌دهد. برخی جداول و نمودارهای موجود در سوابق تحقیق (Kauman 1956; Ladell 1957) که رطوبت تعادل چوب در مجاورت با بخار هوای داغ (بالای ۱۰۰ سانتیگراد) در فشار اتمسفر را در بر دارند، با استفاده از روش‌های برون‌یابی استخراج شده‌اند. Loughborough و Stamm در سال ۱۹۳۵ با مطالعه داده‌های مربوط به دفع هم‌دما دریافتند که نمودار لگاریتم فشار بخار آب در مقابل معکوس دمای مطلق برای رطوبت‌های مختلف، به صورت یک خط راست است. تعمیم این خطوط به دماهای بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتیگراد، با نتایج مشاهدات تجربی در بخار فوق داغ، در حد رواداری یک درصد رطوبت، مطابقت دارد.



نمودار ۱- مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت تعادل برخی گونه‌های چوبی در بخار فوق داغ در مقایسه با مقادیر محاسبه شده



جدول ۱- برآورد رطوبت نسبی و رطوبت تعادل چوب در دمای خشک بالای ۱۰۰ سانتیگراد

دمای خشک		دمای تر (C\F)									
C\F		۶۶\۱۵۰	۷۱\۱۱۶	۷۷\۱۱۷	۸۲\۱۱۸	۸۸\۱۱۹	۹۱\۱۱۹.۵	۹۳\۱۲۰	۹۶\۱۲۰.۵	۹۹\۱۲۱	۱۰۰\۱۲۱
۹۳\۱۲۰	EMC	۳.۳ <sup>۱</sup>	۴.۴	۵.۵	۶.۹	۱۱.۰	۱۴.۹	۲۱			
	RH	(۳۲) <sup>۲</sup>	(۴۲)	(۵۲)	(۶۴)	(۸۲)	(۹۲)	(۱۰۰)			
۹۶\۱۲۰.۵	EMC	۳.۰	۳.۹	۵.۰	۵.۹	۸.۲	۱۱.۲	۱۵.۴	۲۰.۰		
	RH	(۲۹)	(۴۰)	(۴۸)	(۶۰)	(۷۲)	(۸۰)	(۹۱)	(۱۰۰)		
۹۹\۱۲۱	EMC	۲.۶	۳.۳	۴.۰	۵.۰	۶.۶	۸.۴	۱۰.۸	۱۴.۵	۱۹.۷	
	RH	(۲۶)	(۳۳)	(۴۱)	(۵۱)	(۶۲)	(۷۲)	(۸۱)	(۹۱)	(۱۰۰)	
۱۰۲\۱۲۱.۵	EMC	۲.۴	۲.۹	۳.۵	۴.۵	۵.۷	۷.۰	۸.۸	۱۰.۷	۱۴.۰	۱۵.۵
	RH	(۲۴)	(۳۰)	(۳۸)	(۴۷)	(۵۸)	(۶۶)	(۷۴)	(۸۲)	(۸۹)	(۹۵)
۱۰۴\۱۲۲	EMC	۲.۱	۲.۶	۳.۲	۳.۹	۵.۰	۵.۹	۶.۹	۸.۳	۱۰.۴	۱۱.۳
	RH	(۲۳)	(۲۷)	(۳۴)	(۴۲)	(۵۲)	(۶۱)	(۶۷)	(۷۴)	(۸۲)	(۸۶)
۱۰۷\۱۲۲.۵	EMC	۱.۹	۲.۳	۲.۸	۳.۴	۴.۳	۵.۱	۵.۸	۶.۷	۸.۰	۸.۸
	RH	(۲۰)	(۲۵)	(۳۱)	(۳۸)	(۴۸)	(۵۷)	(۶۲)	(۶۷)	(۶۴)	(۷۹)
۱۱۰\۱۲۳	EMC	۱.۷	۲.۱	۲.۵	۳.۱	۳.۸	۴.۵	۴.۹	۵.۵	۶.۳	۶.۹
	RH	(۱۸)	(۲۳)	(۲۸)	(۳۵)	(۴۴)	(۵۱)	(۵۵)	(۶۱)	(۶۷)	(۷۱)
۱۱۳\۱۲۳.۵	EMC	۱.۵	۱.۹	۲.۳	۲.۷	۳.۴	۳.۹	۴.۳	۴.۷	۵.۴	۵.۸
	RH	(۱۶)	(۲۱)	(۲۶)	(۳۱)	(۳۹)	(۴۶)	(۵۱)	(۵۵)	(۶۱)	(۶۵)
۱۱۶\۱۲۴	EMC	۱.۳	۱.۶	۲.۱	۲.۵	۳.۱	۳.۵	۳.۸	۴.۲	۴.۷	۵.۰
	RH	(۱۴)	(۱۹)	(۲۴)	(۲۹)	(۳۷)	(۴۲)	(۴۶)	(۵۱)	(۵۶)	(۵۹)
۱۲۱\۱۲۵	EMC	۱.۰	۱.۳	۱.۶	۲.۰	۲.۴	۲.۸	۳.۱	۳.۴	۳.۶	۳.۸
	RH	(۱۲)	(۱۶)	(۲۰)	(۲۴)	(۳۰)	(۳۵)	(۳۹)	(۴۳)	(۴۷)	(۴۹)
۱۲۷\۱۲۶	EMC	۰.۸	۱.۱	۱.۳	۱.۶	۲.۰	۲.۲	۲.۴	۲.۷	۲.۹	۳.۱
	RH	(۱۰)	(۱۳)	(۱۷)	(۲۰)	(۲۶)	(۳۰)	(۳۳)	(۳۶)	(۴۰)	(۴۲)
۱۳۵\۱۲۷.۵	EMC	۰.۵	۰.۷	۰.۹	۱.۱	۱.۴	۱.۷	۱.۹	۲.۱	۲.۳	۲.۴
	RH	(۸)	(۱۰)	(۱۳)	(۱۶)	(۱۹)	(۲۳)	(۲۶)	(۲۹)	(۳۱)	(۳۲)
۱۴۹\۱۳۰	EMC	۰.۱	۰.۲	۰.۳	۰.۴	۰.۵	۰.۷	۰.۹	۱.۱	۱.۲	۱.۴
	RH	(۵)	(۷.۵)	(۹)	(۱۱.۵)	(۱۳)	(۱۵)	(۱۷)	(۱۹)	(۲۲)	(۲۴)

مطالعات انجام شده حاکی از آن است که روش برون‌یابی برای برآورد رطوبت تعادل چوب در دماهای بالای ۱۰۰ درجه و فشار هوای متفاوت با یک اتمسفر، قابل استفاده است (Czepek 1952; kauman 1956; Keylwerth and noack 1964; Kroll 1951). همچنین در برخی مطالعات تجربی انجام شده در خصوص جذب هم‌دما، مقادیر رطوبت تعادل در دامنه‌های متفاوت فشار و دمای بالای ۱۰۰ درجه، ارائه شده است (Engelhardt 1979; Noack 1959; Strickler 1968). بواسطه تخریب حرارتی جزئی و کاهش جرم چوب، تفسیر دمای تعادل چوب در دماهای بالاتر، فرآیند پیچیده‌ای است. البته، روشهایی برای تصحیح این اتلاف جرم توسط پژوهشگران پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است محققین مختلف طی آزمون‌های تجربی، بعضاً مقادیر رطوبت تعادل چوب را با اختلاف قابل توجهی به خصوص در رطوبت نسبی بالای ۸۰ درصد گزارش نموده‌اند که به عنوان نمونه می‌توان به مقادیر جذب هم‌دما در دمای ۱۷۰ درجه سانتیگراد اشاره کرد. البته این تفاوت‌ها می‌تواند به روش آزمایش و نوع گونه چوبی مورد آزمون نیز مربوط باشد.

لازم به ذکر است، استفاده عملی از روابط سایکومتري برای برآورد رطوبت تعادل چوب، با محدودیت ها و مشکلاتی همراه است. اندازه‌گیری دقیق دمای تر، در دماهای خشک بالای ۱۰۰ درجه سانتیگراد به مراتب دشوارتر از دماهای پایین ۱۰۰ است. همچنین طراحی دماسنج تر و فتیله آن باید به گونه‌ای باشد که همواره سطح حباب دماسنج مرطوب مانده و هوای مرطوب کافی در اطراف فتیله در جریان بوده تا بدین ترتیب، از انتقال گرمای تبخیر آب از فتیله به هوای مرطوب به صورت گرمای محسوس، اطمینان حاصل گردد. ادوات اندازه‌گیری دمای تر در درجه حرارت های پایین، لزوماً واجد خصوصیات مناسب برای عملکرد در دماهای بالا نیستند. همچنین بسیاری از نمودارها و جداول سایکومتريک موجود در سوابق تحقیق، بر فرض یکسان بودن دمای اشباع آدیاباتیک و دمای تر استوار بوده و تغییرات خواص پارامترهای فیزیکی با توجه به دما و رطوبت را لحاظ نمیکنند. بنابراین، نسبت رطوبت محاسبه شده از طریق روابطی مانند معادله ۲۲ (براساس دمای اشباع آدیاباتیک) و مقادیر ارائه شده در برخی از نمودارهای سایکومتريک (براساس دمای تر) و در دماهای تر و خشک بالای ۹۳ درجه سانتیگراد، به وضوح با یکدیگر متفاوتند. هر چند در روابط تحلیلی پیشنهادی در این مقاله، تغییر پارامترهای فیزیکی با توجه به تغییر شرایط در نظر گرفته شده است، در هنگام استفاده از معادلات ارائه شده (مانند روابط ۱۳ و ۱۶)، در طوبت‌های بالا، باید جانب احتیاط را رعایت نمود تا به تدریج نتایج حاصله با مشاهدات تجربی بیشتر، تأیید گردد. لازم به ذکر است یکی از مشکلات موجود در مطالعاتی از این دست، کمبود داده‌های تجربی مربوط به اندازه‌گیری رطوبت تعادل در دماهای بالای ۱۰۰ درجه سانتیگراد و بعضاً وجود برخی تناقضات در آنهاست. هرچند، نتایج حاصل از روش برون‌یابی، تطابق خوبی برای بخار فوق داغ خالص در فشار اتمسفر دارد، به نظر می‌رسد، مقادیر برآورد شده آن برای مخلوط هوا-بخار، بیشتر از مقادیر مورد انتظار است. در نهایت پیشنهاد می‌گردد مطالعات بیشتری در خصوص توسعه رابطه ریاضی بین  $T_{wb}$  و  $T_{db}$ ،  $Y'$  به عمل آمده و نتایج محاسبات با آزمون‌ها و اندازه‌گیری‌های تجربی بیشتر، مقایسه گردد.

#### منابع و مأخذ:

1. ANONYMOUS. 2001. Psychrometric chart, Bulletin 491-1/76, Proctor and Schwartz, SCM Corp., Philadelphia, PA.
2. BENNETT, C. O., AND J. E. MYERS. 1998. Momentum, heat, and mass transfer, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, NY.
3. BIRD, R. B., W. E. STEWART, AND E. N. LIGHTFOOT. 1960. Transport phenomena. John Wiley and Sons, Inc., New York, NY. P. 258.
4. CORDER, S. E. 1986. Energy use in an industrial veneer dryer. For. Prod. J. 26(9).
5. ENGELHARDT, F. 1990. Investigations on the sorption of water vapor by beech at temperatures ranging from 110 to 170 °C. Holz Roh-Werkst. 37(3).
6. EVANS, A. A., AND S. R. V. AUGHAN. 1998. Hygrothermal properties of the air-steam system. Chemical Engineering SI Data Item 1012, Chemical Engineering Group, Wellington, New Zealand. 36pp.
7. GRUMACH, M. 1951. The equilibrium moisture content of wood in superheated steam. Australia, CSIRO. Div. For. Prod., International Report Project 17, Progress Report No.5. 5pp.
8. HANN, R. A. 1965. An investigation of the drying of wood at temperatures above 100 degrees Centigrade. Dissertation, North Carolina State University, Raleigh, NC. P. 8.
9. HOUGAN, O. A., K. M. WATSON, AND R. A. RAGATZ. 2001. Chemical process principles, part I: Material and energy balances. John Wiley and Sons, Inc., New York, NY. P. XXII.
10. KAUMAN, W. G. 1956. Equilibrium moisture content relations and drying control in superheated steam drying. For. Prod. J. 6(9):328-332.
11. KEYLWERTH, R. 1989. Fundamentals of high temperature drying of wood. Holz-Zentralblatt 75(76).
12. AND D. NOACK. 1999. The kiln drying of lumber. 1. Holz Roh-Werkst. 22(1).

13. KOLLMANN, F. F. P. 1961. High temperature drying, research application and experience in Germany. For Prod. J.11(11).
14. KROLL, K. 1991. Movement of the moisture in softwood when dried at temperatures around 100 C, Part II. Holz Roh- Werkst. 9(5).
15. LADELL, J. L. 2003. High temperature kiln-drying of Eastern Canadian softwoods. For. Prod. Lab.Can. Tech. Note 2. 18 pp.
16. NOACK, D. 1985. Contribution to the sorption of wood at elevated temperatures and water pressures. Holz Roh-Werkst. 17(5): 205-212.
17. PERRY, J. H. 2004. Chemical engineers' handbook., McGraw- Hill Book Co., Inc., New York, NY.
18. ROSEN, H. N. 1980. Psychrometric Relationships and Equilibrium Moisture Content of Wood at Temperatures Above 212 F, Wood and Fiber, v. 12(3).
19. Wood behavior during impingement jet drying. In Drying ' 80, vol. I, Developments in drying. Hemisphere publishing Corp., New York, NY. Pp 413-421.
20. STAMM, A. J. 1964. Wood and cellulose science. Ronald Press, New York, NY. P. 152.
21. STRICKLER, M. O. 1978. High temperature moisture relations of grand fir. For. Prod. J. 18(4).
22. STURNEY, H. 1952. Seasoning in pure hot steam. Holz Roh- Werkst 10(9): 358-362.
23. TREYBAL, R. E. 2005. Mass transfer operations. McGraw- Hill Book Co., Inc., New York, NY. P. 168.
24. WEAST, R.C. (ED) 1996. Handbook of chemistry and physics. The Chemical Rubber Co., Cleveland, OH. P. E-2.
25. WENGERT, E. M., AND. H. MITCHELL. 1998. Psychrometric relationships and equilibrium moisture content of wood at temperatures below 212 F (100 C) In Proceedings of the Symposium on Wood Moisture Content-Temperature and Humidity Relationships, Blacksburg, VA, October 29, 1979. Pp. 4-11.
26. WORRALL, R.W. 1965. Psychrometric determination of relative humidities in air with dry-bulb temperatures exceeding 212 F. In A. Wecer, ed., Humidity and moisture measurement and control in science and industry. Vol. I.
27. ZIMMERMAN, O. T. AND I. LAVINE. 1964. Industrial research service's psychrometric tables and charts. Industrial Research Service, Inc., Dover, NH.

## ضمیمه

## علائم ریاضی:

$A$	= مساحت سطح مرطوب، $ft^2$
$c$	= ظرفیت حرارتی، $Btu/lb F$
$D_v$	= ضریب انتشار بخار آب، $ft^2/h$
$h$	= ضریب انتقال حرارت، $Btu/h ft^2 F$
$H$	= آنتالپی هوای خشک یا آب، $Btu/lb$
$\Delta H_v$	= گرمای نهان تبخیر، $Btu/lb$
$k$	= هدایت حرارتی، $Btu/ft F h$
$M$	= وزن مولکولی، $lb/lb mole$
$N_{Le}$	= عدد لوپس، $k/c \rho D_v$
$p$	= فشار جزئی بخار آب، $psi$
$P^*$	= فشار اشباع بخار آب که در دمای بالای ۱۰۰ درجه سانتیگراد، همان فشار بخار آب است، $psi$
$p_t$	= فشار کل اتمسفر خشک کننده، $psi$
$Q$	= انتقال حرارت، $Btu/lb$
$Q$	= نرخ انتقال حرارت، $Btu/h$
$RH$	= رطوبت نسبی، درصد
$SC$	= محتوای بخار، درصد
$T$	= دما، $F$
$T$	= دمای مطلق، $R$
$W$	= نرخ تبخیر جرم، $lb water/h$
$Y$	= نسبت رطوبت بر اساس دمای اشباع آدیاباتیک، $lb water vapor/lb dry air$
$Y'$	= نسبت رطوبت بر اساس دمای تر، $lb water vapor/lb dry air$
$k$	= نرخ انتقال جرم، $lb-mole water vapor/h ft^2 psi$
$\bar{k}$	= نرخ انتقال جرم، واحد اختلاف رطوبت $lb/h ft^2$
$\rho$	= دانسیته، $lb/ft^3$

زیر نویس ها:

$a$	= هوا	$s$	= در دمای اشباع آدیاباتیک	$m$	= مخلوط هوا و بخار آب
$av$	= متوسط	$t$	= مجموع یا کل	$wv$	= بخار آب
$db$	= دماسنج خشک	$T$	= در دمای خشک	$f$	= لایه هوا
$dp$	= نقطه شبنم	$w$	= آب (مایع)	$wb$	= در دمای تر



# Estimation of EMC of Wood in High Temperatures (Above 100 C)

**A.H. Hemmasi**

*Associate Professor, Wood & Paper Engineering Dept., Science & Research Branch, IAU*

## **Abstract**

In accordance with development of new technologies in wood processing, effect of relative humidity on EMC of wood in high temperatures (above boiling of water) has got attention of wood scientists in recent years. In this research, addition to study the required theoretical aspects, mathematical equation for describing psychometric relation of wood in dry bulb range of 93 to 260 C and wet bulb of 38 to 99 C was gathered, developed and investigated. To do this, subjects related to measurement of dry and wet bulb temperatures, saturation adiabatic temperatures, dew point, relative humidity, steam content and enthalpy of moist air was studied and presented. Finally, relative humidity and EMC of wood related to dry and wet bulb temperatures in above mentioned range was presented. According to good agreement of estimated values with experimental results of other researches, it seems that it is possible to use the outcomes of this research as a basis for further studies.

**Keywords:** Psychometric, Equilibrium moisture content, relative humidity, enthalpy, high temperature