



دانشگاه گولستان

مجله پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل  
جلد هجدهم، شماره اول، ۱۳۹۰  
[www.gau.ac.ir/journals](http://www.gau.ac.ir/journals)

## بررسی اثر مقدار رطوبت بر مقاومت الکتریکی چوب صنوبر دلتوئیدس در دماهای ثابت

\*هدایت‌اله امینیان<sup>۱</sup> و قنبر ابراهیمی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه تهران،

آستاد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۸۹/۸/۲؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۱/۱۰

### چکیده

در این پژوهش به منظور بررسی اثر مقدار رطوبت بر مقاومت الکتریکی چوب، سه پایه صنوبر دلتوئیدس (*p. delooides*) سه درخت از جنگل شصت کلاته گرگان قطع و از تنه هر کدام، هشت آزمونه جور سالم و بدون عیب به ابعاد  $2 \times 7/5 \times 10$  سانتی متر تهیه گردید. مقاومت الکتریکی و دمای داخلی متناظر هر آزمونه به طور جداگانه، با افزایش تدریجی دما بین ۹۵-۱۵ درجه سانتی گراد اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی در چند نوبت تکرار شده و همه آزمونه‌ها در ابتدا و انتهای هر نوبت از اندازه‌گیری توزین شدند. در پایان، برای تعیین مقدار رطوبت آزمونه‌ها، تمامی آن‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای  $103 \pm 2$  درجه سانتی گراد خشک شدند و با فرض خطی بودن تغییرات مقدار رطوبت چوب طی هر نوبت آزمایش، مقدار رطوبت متناظر با هر یک از مقادیر مقاومت الکتریکی و دمای داخلی در هر آزمونه محاسبه شد. تجزیه واریانس در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان داد، تفاوت بین مقادیر مختلف دمایی معنی‌دار می‌باشد و مقاومت الکتریکی در یک مقدار رطوبت ثابت با افزایش دما، کاهش می‌یابد. به این ترتیب، ۸ مدل خطی جهت تعیین ارتباط بین مقدار رطوبت با مقاومت الکتریکی در مقادیر دمایی مختلف به طور جداگانه بررسی شد. با توجه به تجزیه واریانس ضرایب همبستگی، بهترین مدل انتخاب و براساس آن، منحنی‌های مقدار رطوبت- مقاومت الکتریکی در دماهای مختلف رسم گردید. نتایج نشان داد، در همه مقادیر دمایی، مقاومت الکتریکی با افزایش مقدار رطوبت، با شیبی مشابه، کاهش می‌یابد، اما در دمای ۹۵ درجه سانتی گراد، شیب منحنی کاهش پیدا می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** چوب صنوبر، مقاومت الکتریکی، دما، مقدار رطوبت، کوره چوب خشک‌کنی

\* مسئول مکاتبه: [hedaminian@yahoo.com](mailto:hedaminian@yahoo.com)

مجله پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل جلد (۱۸)، شماره (۱) ۱۳۹۰

#### مقدمه

چوب درختان در حال رشد، متناسب با نیاز درخت جهت فتوسنتز و فرآیندهای رشد، دارای مقادیر متناهی آب است، که پس از قطع، تا رسیدن به رطوبت تعادل، با محیط پیرامونی خود در تبادل رطوبتی می‌باشد. مقدار رطوبت تعادل، به نوع گونه چوبی، رطوبت اولیه چوب، رطوبت نسبی و دمای محیط بستگی دارد (ابراهیمی و فائزی‌پور، ۱۹۹۴؛ انجمن علوم و تکنولوژی چوب، ۲۰۰۷).

از آنجایی که، مقدار رطوبت، بر اغلب خواص مهم چوب تأثیر می‌گذارد، استفاده مؤثر از چوب و فرآورده‌های چوبی نیازمند روش‌هایی کارآمد و قابل اعتماد برای اندازه‌گیری مقدار رطوبت می‌باشد. دو روش اصلی تعیین مقدار رطوبت چوب، روش خشک کردن در آون و روش تقطیر است، که به‌رغم دقت بالای روش تقطیر در تعیین مقدار رطوبت چوب‌های تیمار شده، روش خشک کردن در آون معمولاً برای کارهای پایه آزمایشگاهی پذیرفته شده و به‌دلیل اندازه‌گیری مستقیم مقادیر مورد استفاده در تعیین رطوبت، به‌عنوان با ارزش‌ترین و دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری رطوبت چوب، جهت کالیبره کردن سایر روش‌ها به‌کار می‌رود (انجمن آزمون و مواد آمریکا، ۲۰۰۲). با این حال، نیاز به محفظه‌های گران‌قیمت، مهارت‌های محاسباتی، زمان طولانی آزمایش و نیز تخریب نمونه، جایگزینی روش‌هایی ساده‌تر و سریع‌تر، هم‌چون استفاده از رطوبت‌سنج‌های الکتریکی را، ضروری ساخته است (جیمز، ۱۹۸۸).

با پی‌ریزی پایه‌های اولیه پژوهش‌هایی در این راستا توسط استام (۱۹۲۹) و داویس (۱۹۳۷)، ارتباط بین مقاومت الکتریکی چوب با مقدار رطوبت آن مورد توجه و ارزیابی قرار گرفت (ابراهیمی، ۲۰۰۰). مقاومت الکتریکی چوب با توجه به مقدار رطوبت آن از هزاران مگا اهم در حالت خشک تا چندین اهم در مقادیر رطوبتی بالاتر از نقطه اشباع الیاف تغییر می‌کند. به همین دلیل، در دامنه‌هایی از مقدار رطوبت، به‌ویژه در مقادیری کم‌تر از نقطه اشباع الیاف که چوب یک نارسانای خوب (رسانای ضعیف) محسوب می‌شود، می‌توان با دقت به‌نسبت خوبی از این خاصیت به‌عنوان شاخصی برای اندازه‌گیری رطوبت چوب به‌طور دقیق و سریع استفاده نمود (جیمز، ۱۹۸۸؛ تیتا و همکاران، ۲۰۰۳؛ انجمن ملی صنایع جنگل، ۲۰۰۴؛ انجمن علوم و تکنولوژی چوب، ۲۰۰۷). با این حال، در رطوبت‌هایی بالاتر از نقطه اشباع الیاف، استفاده از این ویژگی برای تعیین رطوبت با دقت کافی، کاربرد چندانی ندارد (انجمن ملی صنایع جنگل، ۲۰۰۴).

### هدایت‌اله امینیان و قنبر ابراهیمی

با بهبود کارایی رطوبت‌سنج‌های الکتریکی در رطوبت‌هایی کم‌تر از نقطه اشباع الیاف، اندازه‌گیری رطوبت چوب با آن‌ها در دهه ۱۹۴۰ میلادی گسترش یافت (ساندوز، ۱۹۹۳)، تا جایی که، امروزه، رطوبت‌سنج‌های الکتریکی دستی با امکان قرائت مستقیم، به‌عنوان ابزاری بسیار ساده و سریع، در سطح وسیعی از صنایع فرآورده‌های جنگلی، به‌کار می‌روند (فروسن و تارواینن، ۲۰۰۰). با این‌حال، این دسته از رطوبت‌سنج‌ها، به‌رغم مزایای متعدد، نیاز به اصلاح مقادیر اندازه‌گیری شده براساس نوع گونه و درجه حرارت دارند، تا نتایج قابل اعتمادی به‌دست دهند (ابراهیمی، ۲۰۰۰؛ فروسن و تارواینن، ۲۰۰۰). به همین دلیل، به‌طور معمول، برای یک گونه خاص و دمایی ثابت، بر حسب درصد کالیبره می‌شوند و برای سایر گونه‌ها، جدولی از ضرایب اصلاحی مناسب، توسط سازندگان آن‌ها تهیه می‌گردد (جیمز، ۱۹۸۸).

در همین راستا و به‌منظور درجه‌بندی رطوبت‌سنج مقاومتی بر مبنای گونه چوب بلوط اروپا در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، رابطه تجربی ۱ در دامنه رطوبتی ۲۳-۳ درصد پیشنهاد شد (کیل‌ورث و نوآک، ۱۹۵۶).

$$\text{Log} [\log (R) - \epsilon] = 1/0.09 - 0.322 \times u \quad (1)$$

که در آن،  $R$ : مقاومت ویژه (اهم) و  $u$ : رطوبت (درصد).

چندی بعد، با بررسی ۱۸ گونه چوبی بومی ونزوئلا و ۱۳ گونه چوب بومی آمریکای شمالی در دامنه رطوبتی ۲۰-۸ درصد و دمای ثابت ۲۱ درجه سانتی‌گراد، رابطه ۲، بین مقاومت الکتریکی در جهت الیاف و مقدار رطوبت، پیشنهاد (لانگ‌ویگ و اسکار، ۱۹۷۵) و بر همین مبنای مقاومت الکتریکی ۲۲ گونه پهن‌برگ ایالات متحده و ۱۰ گونه پهن‌برگ غنا در راستای موازی الیاف و در دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد (اوکاه، ۱۹۷۶).

$$\text{Log} (R) = A - B \times \log(u) \quad (2)$$

که در آن،  $R$ : مقاومت ویژه (اهم)،  $u$ : رطوبت (درصد) و  $A$  و  $B$ : ضرایب ثابت معادله.

در حال حاضر، میانگین مقاومت الکتریکی و ضرایب اصلاحی مربوطه برای اغلب گونه‌های تجاری آمریکای شمالی براساس گونه دوگلاس فر<sup>۱</sup> و دمای ۲۶ درجه سانتی‌گراد (۸۰ درجه فارنهایت)

1- Pseudotsuga Menziesii

تهیه شده است (فاف و گاراهان، ۱۹۸۷؛ جیمز، ۱۹۸۸؛ سیمپسون، ۱۹۹۱). اما، با توجه به اثر نوع گونه چوبی بر مقاومت الکتریکی و تفاوت روابط مقدار رطوبت- مقاومت الکتریکی گونه‌های مختلف، نمی‌توان از رطوبت‌سنج‌های مقاومتی کالیبره شده برای گونه‌های بومی شمال آمریکا، جهت اندازه‌گیری مقدار رطوبت گونه‌هایی از سایر مناطق استفاده کرد (جیمز، ۱۹۸۸).

به این ترتیب، آزمایشگاه‌های فورین تک<sup>۱</sup>، جهت استفاده یکسان از ضرایب اصلاحی گونه و دمای پیشنهادی برام‌هال و سالامون (۱۹۷۴) و سیچ و فاف (۱۹۷۵)، کتابچه‌ای شامل جداول ضرایب اصلاحی مربوطه، منتشر کردند (مک‌کی، ۱۹۸۴) و مدتی بعد، در نتیجه تجارب عملی کارخانجات مرتبط، جهت تصحیح قرائت رطوبت‌سنج‌های مقاومتی دو میخی با الکترودهای عایق از نوع دلم‌هورست<sup>۲</sup>، رابطه‌های جدیدی جهت تعیین مقدار رطوبت واقعی ۸ گونه سوزنی‌برگ و ۵ گونه پهن‌برگ در دماهای ۲۹-، ۲۳-، ۱۸-، ۱۲-، ۴ و ۴۹ درجه سانتی‌گراد پیشنهاد شد (فاف و گاراهان، ۱۹۸۷).

از آنجایی‌که، اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، نیاز به تماس الکتریکی در دو نقطه مشخص از چوب دارد، معمولاً، از تماس دو نوع الکتروده، سطحی و میخی استفاده می‌شود (جیمز، ۱۹۸۸). الکترودهای میخی، به واسطه سهولت استفاده، با رعایت یکنواختی جنس آن‌ها به‌منظور کاهش احتمال قرائت‌های متفاوت از قطعات چوبی مشابه (مک‌کی، ۱۹۸۴)، کاربرد وسیع‌تری در مقایسه با الکترودهای سطحی دارند (جیمز، ۱۹۸۸؛ ابراهیمی و فائزی‌پور، ۱۹۹۴؛ بون و ون‌گرت، ۱۹۹۸)، ضمن آن‌که، با توجه به تأثیر شکل الکترودها بر مقاومت الکتریکی، یک رطوبت‌سنج مشخص، به‌طور معمول، با همان نوع الکترودهی به‌کار می‌رود، که به‌وسیله سازنده‌اش تهیه شده است (بون و ون‌گرت، ۱۹۹۸؛ فروسن و تارواینن، ۲۰۰۰) ولی، به‌رغم تفاوت در فاصله بین الکترودها در رطوبت‌سنج‌های مختلف و اهمیت آن بر مقاومت الکتریکی از منظر تنوری، فاصله بین الکترودها هیچ تأثیری بر مقاومت الکتریکی ندارد (آپنست و های، ۱۹۹۲؛ فروسن و تارواینن، ۲۰۰۰).

هنگام استفاده از الکترودهای میخی، لازم است به‌منظور افزایش دقت در اندازه‌گیری، الکترودها به‌طوری در سطح عریض چوب قرار گیرند تا جریان الکتریکی در جهت موازی الیاف برقرار شود (جیمز، ۱۹۸۸؛ ابراهیمی و فائزی‌پور، ۱۹۹۴)، با این‌حال، در سطوح رطوبتی پایین، حدود ۱۵ درصد، اثر جهت الیاف قابل چشم‌پوشی است، ولی در سطوح رطوبتی بالا، حدود ۲۰ درصد، اثر جهت الیاف

1- Forintek  
2- Delmhorst

ممکن است تا حدود ۲ درصد، مقدار رطوبت را کم‌تر نشان دهد (جیمز، ۱۹۸۸). هر چند، بررسی‌های جدیدتر، تفاوت معنی‌داری را بین جهات اندازه‌گیری نشان نداده است (لانگ‌ویگ و اسکار، ۱۹۷۵؛ آپنست و های، ۱۹۹۲؛ بون و ونگرت، ۱۹۹۸؛ فروسن و تارواینن، ۲۰۰۰). در هر حال، براساس قانون «ضخامت یک چهارم - یک پنجم»، مقدار رطوبت در عمق یک چهارم تا یک پنجم از ضخامت یک چوب با مقطع مستطیل، برابر با مقدار رطوبت میانگین کل مقطع عرضی است، به همین دلیل، قرائت مقدار رطوبت در چنین عمقی، شاخص مناسبی از میانگین مقدار رطوبت چوب می‌باشد (جیمز، ۱۹۸۸؛ انجمن آزمون و مواد آمریکا، ۲۰۰۲).

با توجه به محدوده اطمینان رطوبت‌سنج‌های مقاومتی (۳۰-۶ درصد)، این نوع از رطوبت‌سنج‌ها در رطوبت‌هایی بالاتر از نقطه اشباع الیاف (۳۰-۲۶ درصد بسته به نوع گونه) با نمایش تابعی ضعیف، نامنظم و پیش‌بینی‌ناپذیر بین هدایت الکتریکی و مقدار رطوبت، فقط نشان می‌دهند رطوبت چوب بالاتر از نقطه اشباع الیاف است (جیمز، ۱۹۸۸)، اما، در مقادیر رطوبتی پایین‌تر از نقطه اشباع الیاف، یک رابطه نه چندان خطی، بین لگاریتم مقاومت الکتریکی و مقدار رطوبت چوب وجود دارد، به طوری‌که، با کاهش رطوبت، مقدار مقاومت الکتریکی، به شدت افزایش می‌یابد (جیمز، ۱۹۸۸؛ ابراهیمی و فائزی‌پور، ۱۹۹۴)، با این حال، در مقادیر رطوبتی کم‌تر از ۶ درصد، به دلیل کم بودن هدایت الکتریکی، اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، به سختی انجام می‌شود (جیمز، ۱۹۸۸؛ فاف و گاراهان، ۱۹۸۷؛ ابراهیمی و فائزی‌پور، ۱۹۹۴).

از سویی دیگر، افزایش دمای چوب در یک مقدار رطوبت ثابت، هدایت الکتریکی را افزایش و مقاومت الکتریکی را کاهش می‌دهد (کیل‌ورث و نوآک، ۱۹۵۶؛ جیمز، ۱۹۸۸؛ فروسن و تارواینن، ۲۰۰۰). هر چند، این اثر خیلی کوچک است و احتمال دارد در مقادیر رطوبتی کم‌تر از ۸-۶ درصد، این ارتباط معکوس شود (جیمز، ۱۹۸۸). همچنین، دانسیته چوب بر مقاومت الکتریکی آن تأثیر چندانی ندارد و مقاومت الکتریکی مستقل از آن می‌باشد (جیمز، ۱۹۸۸؛ ورماس، ۱۹۸۲؛ فروسن و تارواینن، ۲۰۰۰؛ ابراهیمی و فائزی‌پور، ۱۹۹۴)، ضمن آن‌که، در یک مقاومت الکتریکی یکسان، تفاوت مقدار رطوبت در دو بخش چوب درون و چوب برون، فقط حدود ۰/۵ درصد است و به‌رغم تفاوت نسبی این دو بخش در مقادیر رطوبتی پایین (حدود ۸ درصد)، تفاوت در مقادیر رطوبتی بالا (حدود نقطه اشباع الیاف)، معنی‌دار نیست (فروسن و تارواینن، ۲۰۰۰).

به این ترتیب، به منظور بررسی نحوه عملکرد انواع مختلف رطوبت‌سنج‌های مبتنی بر مقاومت الکتریکی و تأثیر عوامل مختلف بر مقاومت الکتریکی چوب، برازش منحنی‌های مقدار رطوبت-مقاومت الکتریکی چندین گونه چوبی از رویشگاه‌های مختلف اروپا، با استفاده از رابطه ۳ انجام شد (فروسن و تارواینن، ۲۰۰۰).

$$\text{Log}(\text{Log}(R) + 1) = a \times u + b \quad (3)$$

که در آن،  $R$ : مقاومت ویژه (اهم)،  $u$ : رطوبت (درصد) و  $A$  و  $B$ : ضرایب ثابت معادله. همچنین، مطالعات انجام شده بر روی چندین گونه از رویشگاه‌های مختلف اروپا نشان داد، می‌توان از رابطه ۴ با دقت کافی ( $r^2=97\%$  درصد) در پیش بینی مقاومت الکتریکی استفاده نمود (فروسن و تارواینن، ۲۰۰۰).

$$\text{Log}(\text{Log}(R) + 2) = -0.0147 \times T - 0.262 \times u + 0.00158 \times T \times u + 1.075 \quad (4)$$

که در آن،  $R$ : مقاومت ویژه (اهم)،  $u$ : رطوبت (درصد) و  $T$ : دمای چوب (درجه سانتی‌گراد). با توجه به پیچیدگی رفتار ویسکوالاستیک چوب، تحت اثر متقابل مقدار رطوبت، دما، تنش‌های ناشی از هم‌کشیدگی غیریکنواخت در زیر نقطه اشباع الیاف و ویژگی‌های آناتومیکی چوب در گونه‌های مختلف، به‌ویژه در گام‌های پایانی برنامه‌های چوب خشک‌کنی که منجر به بروز خسارات مختلف هم‌چون ترک‌ها، چین‌خوردگی‌ها و انواع اعوجاج شامل تاب، کمانی شدن و ناودانی شدن می‌شود، آگاهی از دانش پایه در این زمینه، جهت اندازه‌گیری خودکار، آنی و پیوسته شرایط، به‌ویژه در کنترل گام‌های برنامه‌های چوب خشک‌کنی به‌منظور افزایش ایمنی، جلوگیری از بروز معایب، کاهش تغییرات مقدار رطوبت نهایی و کنترل کیفیت چوب طی فرآیند چوب خشک‌کنی اهمیت می‌یابد (ابراهیمی و فائزی‌پور، ۱۹۹۴؛ چنگ و همکاران، ۲۰۰۴؛ گیو و همکاران، ۲۰۰۴؛ کلایبر و سیلینگ، ۲۰۰۴؛ کلیگر و همکاران، ۲۰۰۵). امروزه، در بین تمامی روش‌های اندازه‌گیری پیوسته و آنی، روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری وزن تخته‌های بار کوره با ترازوهای الکترونیکی و محاسبه تغییرات وزن جهت تعیین تغییرات رطوبت به‌دلیل دقت بالا (زلنیوک و ان، ۱۹۹۶؛ وایبرگ و همکاران، ۲۰۰۰؛ دیویس، ۲۰۰۴) و نیز استفاده از مقاومت الکتریکی چوب در تعیین رطوبت جاری بار کوره به‌دلیل کاربرد ساده و عملی، از روش‌های رایج محسوب می‌شوند (توتونجیان، ۲۰۰۷).

استفاده از مقاومت الکتریکی چوب جهت کنترل دقیق، پیوسته و هم‌زمان شرایط داخل کوره، ضمن نیاز به توسعه ادوات کنترل الکتریکی و الکترونیکی در بیرون از کوره، به اطلاعات پایه و قابل اعتمادی در مورد مقاومت الکتریکی چوب بار کوره در مقادیر رطوبت و دمای متناظر با گام‌های مختلف برنامه چوب خشک‌کنی نیازمند است (ابراهیمی و فائزی‌پور، ۱۹۹۴). در خصوص مقاومت الکتریکی گونه‌های چوبی داخلی و اثر عوامل مختلف بر آن‌ها اطلاعات کافی در دست نیست، با این حال، در نخستین تلاش‌های انجام شده، مقاومت الکتریکی سه گونه راش، توسکا و تبریزی در دمای ثابت ۲۱ درجه سانتی‌گراد و در ۵ سطح متفاوت از رطوبت تعادل، اندازه‌گیری و ضرایب معادله رگرسیون مربوط به هر یک بر مبنای رابطه ۵ تعیین شد (قدیری‌اصلی و فائزی‌پور، ۱۹۹۷) و در پژوهش‌های بعدی، به منظور تهیه نرم‌افزار کنترل پیوسته کوره، مدل‌های ریاضی مناسب ۶ تا ۹ پیشنهاد شد (توتونجانیان، ۲۰۰۷). نتایج به دست آمده نشان داد، می‌توان از مقاومت الکتریکی در ساختار سیستم هدایت پیوسته کوره چوب خشک‌کنی، جهت اندازه‌گیری رطوبت چوب و کنترل فرآیند چوب خشک‌کنی استفاده نمود.

$$\text{Log}(R) = a \times u + b \quad (5)$$

$$\text{Log}(R) = a \times \left[ \frac{1}{U+b} \right] + c \times T + d \times \left[ \left[ \frac{1}{U+b} \right] \times T \right] + e \quad (6)$$

$$\text{Log}(R) = aU + bT + c(U \times T) + d \quad (7)$$

$$\text{Log}(\text{Log}(R)) = aU + bT + c(U \times T) + d \quad (8)$$

$$\text{Log}(R) = a\text{Log}(U) + bT + c(\text{Log}(U) \times T) + d \quad (9)$$

که در آن،  $R$ : مقاومت ویژه (اهم)،  $u$ : رطوبت (درصد)،  $T$ : دمای چوب (درجه سانتی‌گراد) و  $e$ ،  $d$ ،  $c$  و  $b$ : ضرایب ثابت معادله.

به این ترتیب، با توجه به لزوم بومی‌سازی دانش فنی کنترل خودکار، آنی و پیوسته کوره‌های چوب خشک‌کنی و ضرورت تهیه منحنی‌ها و مدل‌های چوب خشک‌کنی مجزا برای هر یک از گونه‌های چوبی و بر مبنای مقاومت الکتریکی، رطوبت و دمای داخلی چوب (دیویس، ۲۰۰۴)، آگاهی از

چگونگی تغییرات مقاومت الکتریکی گونه‌های چوبی بومی در شرایط رطوبتی و دمایی متفاوت در اولویت قرار می‌گیرد. بنابراین، در ادامه بررسی‌ها انجام شده پیشین (قدیری اصلی و فائزی پور، ۱۹۹۷؛ توتونجانیان، ۲۰۰۷) و با هدف تهیه منحنی‌های مقاومت الکتریکی - مقدار رطوبت در دماهای مختلف و تعیین ضرایب معادلات مربوطه، با فرض وجود ارتباطی معکوس بین مقدار رطوبت و مقاومت الکتریکی چوب در دمای ثابت، مقاومت الکتریکی صنوبر دلتوئیدس<sup>۱</sup>، با توجه به حداکثر دمای تعریف شده در برنامه‌های چوب خشک‌کنی رطوبت پایه پیشنهادی آزمایشگاه فرآورده‌های جنگلی ایالات متحده<sup>۲</sup> (ابراهیمی و فائزی پور، ۱۹۹۴)، در دامنه دمایی ۹۷-۱۵ درجه سانتی‌گراد و دامنه مقدار رطوبتی ۳ درصد تا بالاتر از نقطه اشباع الیاف (۱۸۸ درصد) مورد بررسی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

تعداد ۳ درخت صنوبر از طرح جنگلداری بهرام‌نیا (شصت‌کلاته گرگان) انتخاب و قطع گردید. از ارتفاع برابر سینه هر یک از تنه‌ها، گرده بینه‌ای به طول تقریبی ۱۲۰ سانتی‌متر جدا و از چوب درون هر گرده بینه تعداد ۸ آزمون شعاعی سالم، راست تار و بدون گره به ابعاد اسمی  $2 \times 7/5 \times 15$  سانتی‌متر، در مجموع تعداد ۲۴ آزمون جور تهیه شد و پس از آن، همه آزمون‌ها تا هنگام شروع آزمایش، در ظرفی محتوی آب قرار گرفتند، تا هنگام شروع آزمایش، رطوبتی بالاتر از نقطه اشباع الیاف داشته باشند. آزمون‌ها در دسته‌های ۴ تایی، در محیط آزمایشگاه قرار داده شدند، تا آب اضافی آن‌ها خارج و سطح آن‌ها خیس نباشد. سپس، از دو سر هر آزمون، ۲ نمونه به ابعاد اسمی  $2 \times 2 \times 2$  سانتی‌متر جهت تعیین رطوبت اولیه، وزن خشک و دانسیته خشک آزمون‌ها تهیه و ابعاد اسمی نهایی آزمون‌ها به  $2 \times 7/5 \times 10$  سانتی‌متر (ASTM D 4444-92، ۲۰۰۲) تغییر یافت و سپس با استفاده از استانداردهای ASTM D4442-92 (۲۰۰۲) و ASTM D2395-93 (۲۰۰۲) به ترتیب، مقدار رطوبت و دانسیته خشک آزمون‌ها تعیین شد.

هم‌زمان با تعیین رطوبت اولیه و اندازه‌گیری دانسیته خشک آزمون‌ها، در وسط سطح شعاعی آن‌ها، دو سوراخ به قطر اسمی ۶ میلی‌متر و عمق اسمی ۵-۴ میلی‌متر از سطح  $(1/5-1/4)$  (یک پنجم تا یک چهارم) ضخامت) به فاصله اسمی ۲۵ میلی‌متر ( $25/88$  میلی‌متر) از یکدیگر و  $37/5$  میلی‌متر در

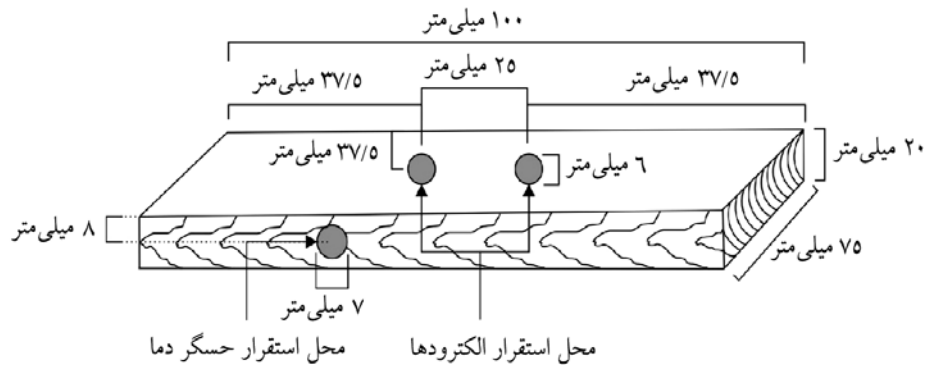
1- *P. Deltoeids*

2- Forest product Laboratory (FPL)



راستای موازی الیاف (فاصله اسمی مرکز هر سوراخ از سر تخته در جهت طولی) از هر سر تخته و ۳۷/۵ میلی‌متر در جهت عمود بر الیاف (فاصله اسمی مرکز هر سوراخ از لبه تخته در جهت عرضی) از هر لبه، جهت قرار دادن الکترودهای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و یک سوراخ در سطح مماسی آزمونه‌ها و در راستای عمود بر جهت سوراخ‌های مربوط به الکترودهای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، به قطر اسمی ۷ میلی‌متر و عمق اسمی ۳۷/۵ میلی‌متر به‌منظور استقرار حس‌گر اندازه‌گیری دمای داخلی چوب و به فاصله ۸ میلی‌متر از هر لبه (فاصله اسمی مرکز سوراخ از لبه در ضخامت تخته) ایجاد (شکل ۱) و سپس، دو سر تمامی آزمونه‌های آزمون تعیین مقاومت الکتریکی با پارافین آغشته و توزین شدند.

سپس، الکترودهای فولادی جهت اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به داخل سوراخ‌های مربوطه کوبیده و کابل‌های پوشش‌دار (ترکیبی از پی وی سی<sup>۱</sup>، غلاف متشکل از رشته سیم‌های بافته شده و فویل آلومینیوم) مربوط به اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به آن‌ها متصل و کابل‌های پوشش‌دار متصل به حس‌گرهای دما از نوع LM-35-DZ با توانایی اندازه‌گیری دما در دامنه ۵۵- تا ۱۵۰+ درجه سانتی‌گراد در سوراخ‌های تعبیه شده مربوطه مستقر شدند. به‌منظور جلوگیری از عدم تبادل حرارتی بین محیط داخل حفره اندازه‌گیری دما و هوای داخل محفظه، اطراف کابل متصل به حس‌گر در ورودی حفره، با چسب سیلیکون شفاف (چسب آکواریوم) پوشانده شد.



شکل ۱- محل قرار گرفتن الکترودهای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و حسگرهای دما.

آزمونه‌ها همراه با الکترودها و حسگر دما، در داخل محفظه‌ای با قابلیت چرخش هوا و کنترل دما قرار داده شدند. حرارت داخل محفظه از طریق یک هیتر متصل به سیستم اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، حداکثر تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد تأمین شد و یک پنکه فلزی، چرخش هوای داخل محفظه را بر عهده داشت. سیستم اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نیز، در واقع، یک گیگا اهم متر الکترونیکی با قابلیت استفاده در رطوبت‌های مختلف بود که به‌منظور انجام این پژوهش، طراحی، ساخته و برنامه‌ریزی شده است. یک برنامه نرم‌افزاری از پیش نوشته و نصب شده در رایانه نیز کنترل سیستم اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، دمای داخلی چوب و داخل محفظه را بر عهده داشت.

از زمان شروع آزمایش تا رسیدن دمای داخلی آزمونه‌ها به حداکثر دمای ممکن (۹۷ درجه سانتی‌گراد)، مقادیر مقاومت الکتریکی چوب بین دو جفت الکتروود و دمای متناظر با آن در زمان‌های مختلف قرائت و برای هر آزمونه به‌طور جداگانه در رایانه ذخیره شد. سپس، همان‌گونه که آزمونه‌ها پیش از قرار گرفتن در داخل محفظه توزین شده بودند، پس از خروج از داخل محفظه‌ها نیز دوباره وزن شدند. پس از انجام یک نوبت اندازه‌گیری برای تمامی ۲۴ آزمونه، اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و دمای داخلی تمامی آزمونه‌ها، تا رسیدن رطوبت آن‌ها به حداقل رطوبت ممکن (۵-۲ درصد)، در چند نوبت تکرار شد. کلیه قرائت‌های مربوط به مقاومت الکتریکی، دمای داخلی چوب و دمای محیط، با توجه به زمان قرائت، در فایل‌های ذخیره و پس از پایان اندازه‌گیری‌ها، با انتقال به نرم‌افزار MS Excel 2003، دسته بندی و پردازش شدند.

سپس، تمامی آزمونه‌ها در اتو با دمای  $103 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد قرار داده شده و پس از خشک شدن کامل و تثبیت وزن، توزین شدند. از آنجایی‌که، زمان هر نوبت آزمایش، بین ۳-۲ ساعت بود و افزایش دما به‌صورت تدریجی انجام می‌شد، مقدار رطوبت آزمونه‌ها در طی هر نوبت آزمون، به‌رغم عایق کردن مقاطع، کاهش می‌یافت، بنابراین، با فرض خطی بودن تغییرات رطوبت بین آغاز تا پایان هر نوبت آزمون، مقدار رطوبت متناظر با قرائت‌های انجام شده محاسبه گردید و سپس، به‌منظور انجام محاسبات و تجزیه تحلیل‌های آماری مربوطه، کلیه مقادیر دما، رطوبت و مقاومت الکتریکی متناظر، در نرم‌افزار MS Excel 2003 مرتب و با استفاده از نرم‌افزار SPSS 14 همه تجزیه و تحلیل‌های آماری مربوطه در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد.

## نتایج

متوسط دانسیته خشک آزمونه‌ها،  $0/31$  گرم بر سانتی‌مترمکعب تعیین گردید و آزمون تجزیه واریانس نشان داد، با توجه به میانگین دانسیته پایه‌های ۱، ۲ و ۳، به‌ترتیب،  $0/3062$ ،  $0/31$  و  $0/3225$ .

گرم بر سانتی‌مترمکعب، در بین دانسیته ۳ پایه مورد مطالعه، تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. ولی، به‌رغم نبود تفاوت معنی‌دار در مقاومت الکتریکی پایه‌های مورد مطالعه، در بین مقاومت الکتریکی ۲۴ آزمونه مورد مطالعه، تفاوت معنی‌داری وجود دارد. آزمون دانکن نشان داد، تمامی آزمونه‌ها به‌جز یک آزمونه، در یک گروه قرار می‌گیرند، به همین دلیل، به‌رغم وجود تفاوت بین یک آزمونه با سایر آزمونه‌ها، تمامی آزمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شدند.

نتایج به‌دست آمده از تعیین رطوبت نشان داد، متوسط رطوبت اولیه آزمونه‌ها، ۱۵۵/۳۹ درصد و دامنه رطوبتی آزمونه‌های مورد مطالعه ۱۸۸/۷۲-۲/۵۹ درصد می‌باشد، ضمن آن‌که، دامنه دمایی مورد مطالعه ۱۰۰/۱-۱۵/۱۴ درجه سانتی‌گراد بوده است. آزمون تجزیه واریانس نشان داد، تفاوت بین سطوح مختلف دمایی معنی‌دار است، اما با توجه به تعدد گروه‌ها (بیش از ۵۰ گروه)، آزمون دانکن قادر به نمایش گروه‌بندی نبود. به همین دلیل، در بررسی‌های بعدی، کلیه سطوح دمایی جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفتند. با این‌حال، در دامنه‌های دمایی پایین (کم‌تر از ۱۸ درجه سانتی‌گراد) و بالا (بیش از ۹۰ درجه سانتی‌گراد)، چون تعداد مشاهدات در هر دما به اندازه کافی نبود (کم‌تر از ۱۰ مشاهده در هر دما)، مجموع مشاهدات مربوط به دماهای ۱۵، ۱۶ و ۱۷ درجه سانتی‌گراد در یک گروه (۱۷)، دماهای ۹۳ و ۹۴ درجه سانتی‌گراد در یک گروه (۹۳)، دماهای بالاتر از ۹۵ درجه سانتی‌گراد در یک گروه (۹۵) و سایر سطوح دمایی هر یک در یک گروه جداگانه قرار گرفتند.

اثر مقدار رطوبت بر مقاومت الکتریکی چوب در دمای ثابت، از رابطه کلی ۲ تبعیت می‌کند (لانگ‌ویگ و اسکار، ۱۹۷۵). با این‌حال، روابط کلی ۶، ۷ و ۸ نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند (فروسن و تارواینن، ۲۰۰۰؛ توتونجانیان، ۲۰۰۷). به این ترتیب، صرف‌نظر از مثبت یا منفی بودن ضرایب و با توجه به معادله‌های ۳، ۵، ۷ و ۸ در عدم استفاده از لگاریتم رطوبت، در نهایت، ۸ معادله کلی مندرج در جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱- معادله‌های مورد استفاده در بررسی اثر مقدار رطوبت بر مقاومت الکتریکی در سطوح دمایی ثابت.

شماره	معادله	شماره	معادله
(۱۰)	$\text{Log}(R) = a \times u + b$	(۱۴)	$\text{Log}(R) = a \times \text{Log}u + b$
(۱۱)	$\text{Log}(\text{Log}(R)) = a \times u + b$	(۱۵)	$\text{Log}(\text{Log}(R)) = a \times \text{Log}(u) + b$
(۱۲)	$\text{Log}(\text{Log}(R) + 1) = a \times u + b$	(۱۶)	$\text{Log}(\text{Log}(R) + 1) = a \times \text{Log}(u) + b$
(۱۳)	$\text{Log}(\text{Log}(R) + 2) = a \times u + b$	(۱۷)	$\text{Log}(\text{Log}(R) + 2) = a \times \text{Log}(u) + b$

R: مقاومت ویژه (اهم)، U: رطوبت (درصد)، T: دمای چوب (درجه سانتی‌گراد) و a و b: ضرایب ثابت معادله.

به منظور تهیه ضرایب معادله‌های مورد نظر، ابتدا مقادیر  $\text{Log}(R)$ ،  $\text{Log}(\text{Log}(R))$ ،  $\text{Log}(\text{Log}(R)+1)$  و  $\text{Log}(\text{Log}(R)+2)$  و  $\text{Log}(u)$  محاسبه و پس از تعیین نرمال بودن داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS 14، ضرایب مربوط به هر یک از معادله‌های رگرسیون خطی ۱۰ تا ۱۷، با استفاده از مشاهدات آزمایش، در هر یک از سطوح ثابت دمایی از ۹۵-۱۷ درجه سانتی‌گراد تعیین گردید. تجزیه واریانس ضرایب همبستگی معادله‌های یاد شده، تفاوت معنی‌داری را نشان داد (جدول ۲) و آزمون دانکن مشخص کرد، کوچک‌ترین میانگین ضریب همبستگی مربوط به رابطه ۱۰ و بزرگ‌ترین میانگین ضریب همبستگی مربوط به رابطه ۱۴ از جدول ۱ می‌باشد (جدول ۳).

جدول ۲- تجزیه واریانس ضرایب همبستگی ۸ معادله رگرسیون خطی مقدار رطوبت- مقاومت الکتریکی.

Sig.	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	
۰/۰۰۰	۱۰۴/۳۲۶	۰/۹۱۲	۷	۶/۳۸۶	بین گروه‌ها
		۸۷۴۵E-۰۳	۶۱۶	۵/۳۸۷	درون گروه‌ها
			۶۲۳	۱۱/۷۷۴	کل

جدول ۳- آزمون دانکن ضرایب همبستگی ۸ معادله رگرسیون خطی مقدار رطوبت- مقاومت الکتریکی.

$\alpha=0/05$					تعداد	شماره معادله
۵	۴	۳	۲	۱		
				۰/۶۳۱	۷۸	۱
			۰/۶۸۷		۷۸	۴
		۰/۶۹۹	۰/۶۹۹		۷۸	۳
		۰/۷۲۰			۷۸	۲
	۰/۸۷۵				۷۸	۶
۰/۸۸۳	۰/۸۸۳				۷۸	۷
۰/۸۹۰					۷۸	۸
۰/۸۹۰					۷۸	۵
۰/۶۶۶	۰/۰۷۹	۰/۱۶۸	۰/۳۸۳	۱		Sig.

با توجه به نتایج به دست آمده از بررسی ضرایب همبستگی، رابطه ۱۴ به عنوان بهترین معادله انتخاب و ضرایب  $a$  و  $b$  از معادله بالا در همه سطوح دمایی تعیین (جدول ۴) و منحنی مقدار رطوبت- مقاومت الکتریکی بر مبنای رابطه یاد شده، در همه سطوح دمایی رسم شد.

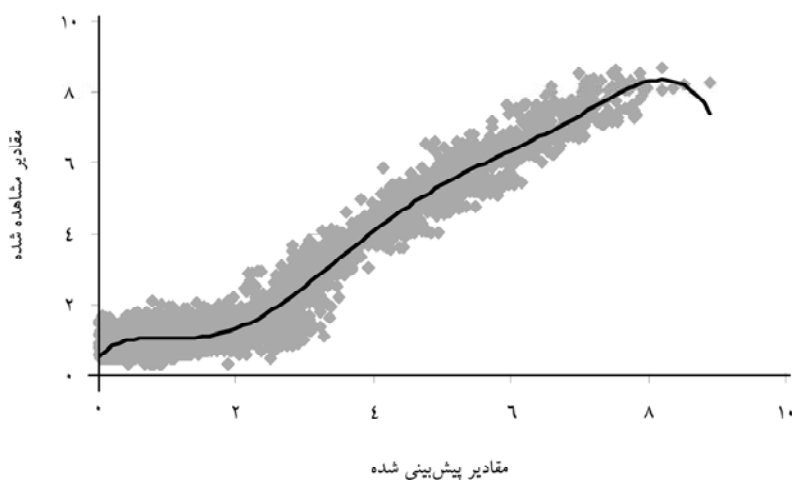
هدایت‌اله امینیان و قنبر ابراهیمی

جدول ۴- ضرایب معادله رگرسیون خطی مقدار رطوبت- مقاومت الکتریکی در سطوح مختلف دما.

دما				دما				دما			
b	a	تعداد	(درجه سانتی‌گراد)	b	a	تعداد	(درجه سانتی‌گراد)	b	a	تعداد	(درجه سانتی‌گراد)
۸/۸۸۹	-۴/۲۰۳	۶۸	۶۹	۱۰/۳۷۲	-۴/۷۹۸	۷۳	۴۳	۱۰/۹۸۲	-۴/۸۹۸	۱۶	۱۷
۸/۶۷	-۴/۱۱۶	۶۰	۷۰	۱۰/۵۵	-۴/۹۸۴	۶۸	۴۴	۸/۷۳۹	-۳/۷۶۸	۱۹	۱۸
۹/۵۲۶	-۴/۴۹۷	۵۲	۷۱	۱۰/۳۰۴	-۴/۷۷۶	۶۶	۴۵	۱۰/۳۰۵	-۴/۵۴۵	۳۵	۱۹
۹/۰۶۵	-۴/۳۱۲	۵۹	۷۲	۹/۷۳	-۴/۴۴	۶۰	۴۶	۱۱/۴۶	-۵/۲۱۹	۵۹	۲۰
۹/۳۱۸	-۴/۴۴۷	۷۳	۷۳	۱۰/۲۰۴	-۴/۶۶۲	۵۳	۴۷	۱۱/۵۹۲	-۵/۲۸۲	۷۹	۲۱
۹/۱۲	۴/۴۰۴	۵۵	۷۴	۱۰/۲۴۸	۴/۷۱۷	۶۲	۴۸	۱۰/۳۵۳	۴/۶۸۲	۳۴	۲۲
۸/۹۶۳	۴/۲۳	۵۷	۷۵	۹/۷۷۷	۴/۴۵۷	۴۷	۴۹	۹/۷۲۱	۴/۴۵۴	۲۷	۲۳
۹/۱۸۹	۴/۴۴۹	۵۸	۷۶	۹/۸۱۶	۴/۵۳۱	۵۹	۵۰	۱۰/۳۳۳	۴/۷۸۶	۳۷	۲۴
۸/۹۹۵	-۴/۳۰۵	۵۹	۷۷	۹/۳۵۱	-۴/۳۷۴	۴۶	۵۱	۱۰/۸۵۴	-۵/۰۸۵	۴۲	۲۵
۹/۵۱۷	-۴/۶۹	۵۶	۷۸	۱۰/۱۸	-۴/۷۳۷	۵۰	۵۲	۹/۵۱۵	-۴/۲۸۴	۳۸	۲۶
۹/۳۹۸	-۴/۶۵۷	۵۷	۷۹	۹/۱۹۵	-۴/۱۹	۵۹	۵۳	۸/۵۳۵	-۳/۹۶۵	۷۱	۲۷
۸/۷۸۸	-۴/۳۳۶	۵۳	۸۰	۸/۸۵۵	-۴/۰۲۶	۴۷	۵۴	۹/۸۸۱	-۴/۷	۶۰	۲۸
۸/۴۱۹	-۴/۱۱۳۳	۴۵	۸۱	۹/۶۸۲	-۴/۴۸۳	۵۱	۵۵	۱۰/۲۳۳	-۴/۷۴	۵۱	۲۹
۸/۲۶۷	-۴/۰۸	۴۴	۸۲	۹/۶۳۸	-۴/۵۱۹	۵۶	۵۶	۱۰/۸۶۸	-۵/۱۶۷	۶۹	۳۰
۹/۱۹۳	-۴/۴۶۶	۵۳	۸۳	۹/۵۶۱	-۴/۳۳۷	۵۲	۵۷	۴/۹۳۹	-۴/۵۹۳	۹۲	۳۱
۸/۹۹۲	-۴/۴۲۴	۶۲	۸۴	۸/۹۹۱	-۴/۱۳۸	۵۵	۵۸	۹/۸۱۶	-۴/۷۶۸	۱۰۷	۳۲
۹/۸۷۷	-۵/۲۴۲	۱۹	۸۵	۹/۷۹۶	-۴/۶۱۱	۵۴	۵۹	۹/۵۹۳	-۴/۶۲۲	۱۰۲	۳۳
۹/۳۸۶	-۴/۸۹۸	۳۲	۸۶	۹/۴۲۶	-۴/۳۴۸	۵۶	۶۰	۱۰/۱۰۳	-۴/۸۳۸	۹۸	۳۴
۸/۸۲	-۴/۴۴۲	۲۹	۸۷	۹/۱۹۲	-۴/۲۸۹	۴۹	۶۱	۱۰/۱۳۱	-۴/۷۶۱	۹۸	۳۵
۹/۲۹۳	-۴/۸۸۶	۲۱	۸۸	۸/۹۳۲	-۴/۱۲	۵۸	۶۲	۹/۷۸	-۴/۵۵	۸۴	۳۶
۸/۹۳۱	-۴/۵۱۸	۲۱	۸۹	۸/۴۶	-۳/۸۸۴	۹۱	۶۳	۱۰/۲۳۴	-۴/۷۵۶	۹۵	۳۷
۹/۰۸	-۴/۸۱۶	۱۶	۹۰	۹/۰۴۵	-۴/۱۳۹	۵۹	۶۴	۱۰/۲۸۸	-۴/۸۹۲	۸۲	۳۸
۷/۹۹۴	-۳/۸۴۸	۱۳	۹۱	۸/۹۴۸	-۴/۱۴	۵۹	۶۵	۱۰/۵۲۷	-۴/۹۲۶	۷۷	۳۹
۸/۴۸۸	-۴/۱۳۸	۱۶	۹۲	۸/۵۲۹	-۳/۹۴۲	۵۷	۶۶	۱۰/۳۵۳	-۴/۸۵۲	۶۸	۴۰
۸/۶۵۱	-۴/۳۰۳	۱۴	۹۳	۸/۶۴۹	-۳/۹۸۵	۷۶	۶۷	۱۱/۰۹	-۵/۲۱۷	۳۹	۴۱
۷/۴۴۸	-۳/۴۱۶	۲۴	۹۵	۹/۰۲۸	-۴/۲۶۳	۶۷	۶۸	۱۱/۱۱۹	-۵/۱۶۷	۷۳	۴۲

### بحث و نتیجه‌گیری

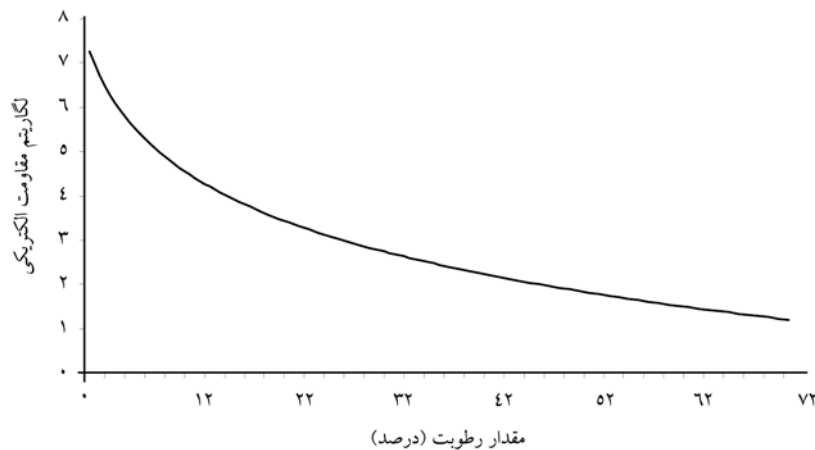
به‌منظور بررسی میزان همبستگی مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر مشاهده شده، با توجه به ضرایب به‌دست آمده در جدول ۴ و با استفاده از همه مقادیر رطوبت و دمای داخلی اندازه‌گیری شده، مقدار لگاریتم مقاومت الکتریکی با استفاده از رابطه ۵ در همه موارد محاسبه و ابرنقاط مقادیر پیش‌بینی شده (لگاریتم مقاومت الکتریکی پیش‌بینی شده) در برابر مقادیر مشاهده شده معادله ۵ در رطوبت‌های بالا (مقاومت الکتریکی کم)، مقاومت الکتریکی بزرگ‌تری را پیش‌بینی می‌کند، در حالی‌که، با کاهش رطوبت و افزایش مقاومت الکتریکی (افزایش مقادیر مشاهده شده)، مقادیر مقاومت الکتریکی، کوچک‌تر پیش‌بینی می‌شود.



شکل ۲- ابرنقاط لگاریتم مقاومت الکتریکی پیش‌بینی شده در برابر لگاریتم مقاومت الکتریکی مشاهده شده.

$$y = -0.0011x^7 + 0.0289x^6 - 0.2489x^5 + 1.2732x^4 - 2.3349x^3 + 1.8198x^2 + 0.5398x$$

به این ترتیب، با توجه به مناسب بودن ابرنقاط مقادیر پیش‌بینی شده (لگاریتم مقاومت الکتریکی مشاهده شده) در برابر مقادیر پیش‌بینی شده (لگاریتم مقاومت الکتریکی مشاهده شده)، و اطمینان از صحت و دقت ضرایب به‌دست آمده در پیش‌بینی مقاومت الکتریکی، منحنی تغییرات لگاریتم مقاومت الکتریکی (مقادیر پیش‌بینی شده) در برابر تغییرات مقدار رطوبت (متوسط مقدار رطوبت) در همه مقادیر ثابت از دما (متوسط مقدار دما) رسم شد، که در اینجا به‌صورت موردی، منحنی مربوط به دمای ثابت ۵۱ درجه سانتی‌گراد نشان داده می‌شود (شکل ۳).



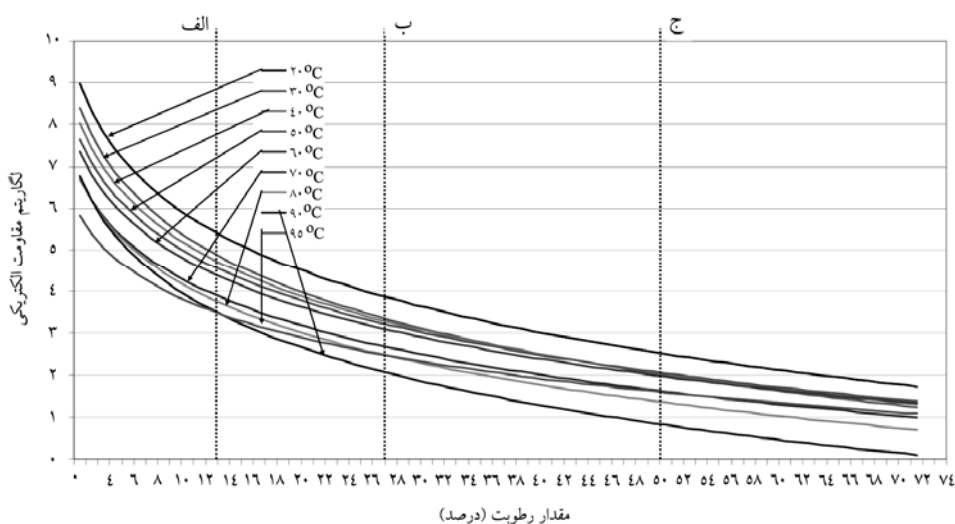
شکل ۳- تغییرات لگاریتم مقاومت الکتریکی با تغییرات مقدار رطوبت در دمای ثابت ۵۱ درجه سانتی‌گراد.

همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، تغییرات مقاومت الکتریکی با تغییر مقدار رطوبت رابطه‌ای معکوس دارد و با افزایش مقدار رطوبت در یک دمای ثابت، مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد که با نتایج به دست آمده از پژوهش‌های پیشین سازگار است (لانگ‌ویگ و اسکار، ۱۹۷۵؛ جیمز، ۱۹۸۸؛ فروسن و تارواینن، ۲۰۰۰).

از آنجایی‌که، منحنی‌های رسم شده در سطوح دمایی مختلف، در بسیاری از موارد، بر یکدیگر منطبق می‌شوند و دقت مقادیر پیش‌بینی شده در مقادیر رطوبتی حداقل بالاتر از ۷۳ درصد کاهش می‌یابد، منحنی‌های مربوط به دماهای ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۹۵ درجه سانتی‌گراد، به منظور مقایسه‌ای یکسان، حداکثر تا مقدار رطوبت ۷۳ درصد در کنار هم رسم شدند (شکل ۳). همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در یک مقدار رطوبت ثابت، مقاومت الکتریکی با افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد، چنین رفتاری، پیش از این توسط جیمز (۱۹۸۸) و فروسن و تارواینن (۲۰۰۰) نیز گزارش شده است.

اما، نکته قابل توجه در این خصوص، تغییرات منحنی در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که با سرعت کم‌تری در مقایسه با سایر منحنی‌ها، کاهش می‌یابد، به طوری‌که منحنی ۹۵ درجه سانتی‌گراد، از مقدار رطوبتی بالاتر از ۱۴ درصد (نقطه چین الف)، مقاومت الکتریکی بیش‌تری از منحنی مربوط به دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد (شکل ۴). این روند هم‌چنان ادامه دارد و مجدداً در مقدار

رطوبتی حدود ۲۸ درصد (نقطه چین ب) منحنی ۸۰ درجه سانتی‌گراد و در مقدار رطوبتی بالاتر از نقطه اشباع الیاف حدود ۵۱ درصد (نقطه چین ج) را قطع و مقاومت الکتریکی بیش‌تری از منحنی‌های دمایی مربوطه نشان می‌دهد. به‌نظر می‌رسد، در سطوح دمایی بالا نزدیک به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، اثر متقابل دما و رطوبت، عامل بروز چنین رفتاری باشد، ضمن آن‌که، در سطوح دمایی پایین‌تر، بین ۶۰-۳۰ درجه سانتی‌گراد، با افزایش مقدار رطوبت به بالاتر از نقطه اشباع الیاف، منحنی‌های مربوطه به‌طور تقریبی بر یکدیگر منطبق و مقادیر پیش‌بینی شده بسیار نزدیک به یکدیگر می‌باشند.



شکل ۴- مقایسه تغییرات لگاریتم مقاومت الکتریکی در برابر مقدار رطوبت چوب صنوبر در سطوح مختلف دمایی.

از آنجایی‌که، اندازه‌گیری دقیق مقاومت الکتریکی در تعیین رطوبت توسط رطوبت‌سنج‌ها و نیز تهیه برنامه‌های کنترل خودکار و پیوسته کوره‌های چوب خشک‌کنی کاربرد فراوانی دارد، چنین رفتاری ضمن تأکید بر اثر متقابل رطوبت و دما بر مقاومت الکتریکی چوب، تهیه معادلاتی با حضور هر دو متغیر را، به‌ویژه در شرایطی که چوب در دماهای بالا، نزدیک به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، خشک می‌شود، به‌منظور تأمین دقت کافی در پیش‌بینی مقاومت الکتریکی، ضروری می‌نماید (فروسن و تارواینن، ۲۰۰۰؛ توتونجانیان، ۲۰۰۷).



منابع

1. American Society for Testing and materials. 2002. Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-base materials, ASTM Standard D 4442-92, Pp: 517-522.
2. American Society for Testing and materials. 2002. Standard test methods for use and calibration of hand-held moisture Meters, ASTM Standard D 4444-92. Pp: 523-528.
3. American Society for Testing and materials. 2002. Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials, ASTM Standard D 2395-02, Pp: 358-365.
4. Apneseth, T. and Hay, M. 1992. Test ab baerbare elektriska fuktighetsmalere, NTI Norsk Treteknisk Institutt, Arbeids rapport, 48p.
5. Boone, R.S. and Wengert, E.M. 1998. Guide for using portable electric moisture measures on lumber, Department of forest ecology and management, School of natural resources, Universit of Wisconsin-madison, Report, 88: 4.
6. Bramhall, G. and Salamon, M. 1974. Combined species-temperature correction tables for moisture meters, Dept. of Environment, Can. Forest Serv. Western Forest Prod. Lab, Inform. Rep. VP-X-103. (revised 1978)
7. Cech, M.Y. and Pfaff, F. 1975. Moisture content correction tables for resistance-type moisture meters, Dept. of Environment, Can. Forest Serv. Forestry Tech. Rep. 7.
8. Cheng, W., Morooka, T., Liu, Y. and Norimoto, M. 2004. Shrinkage stress of wood during drying under superheated steam above 100 °C, Holzforchung, 58: 423-427.
9. Davies, I.I. 1937. A Wide range vacuum-tube resistance bridger. Instruments, 10: 261-268.
10. Davis, C.P. 2004. A robotic Gravimetric test system for wood drying, researchholz Roh Werkstl. 62: 197-202.
11. Ebrahimi, Gh. and Faezipour, M. 1994. Kiln Drying Lumber. Tehran University Publication, 2234: 461. (Translated In Persian)
12. Ebrahimi, Gh. 2000. Wood Water Relations. Tehran University Publication, 2456: 374. (Translated In Persian)
13. Frosen, H. and Tarvainen V. 2000. Accuracy and Functionality of hand held wood moisture content meters, Technical Research Centre of Finland, VTT Publications, 420: 79.
14. Ghadiri Asli, S.M. and Faezipour, M. 1997. Determining of electrical resistance and bending properties of Fagus sp, Alnus sp. and Populus sp. In varying equilibrium moisture content (EMC). Iran. J. Natur. Resour. 49: 115-126. (In Persian)

15. Gu, H.M., Young, T.M., Moschler, W.W. and Bond, B.H. 2004. Potential sources of variation that influence the final moisture content of kiln-dried hardwood lumber, *Forest Prod. J.* 54: 11. 65-70.
16. James, W.L. 1988. Electric moisture meters for wood, Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-6. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 17p.
17. Keylwerth, R. and Noack, D. 1956. On the influence of higher temperatures on the electric measurement of wood moisture content using the resistance principle, *Holz als Roh- und Werkstoff*, 14: 5. 162-172.
18. Klaiber, V. and Seeling, U. 2004. The influence of drying method on the warp behavior of Norway spruce (*Picea abies* (L) Karst.) sawn timber, *Forest Prod. J.* 54: 4. 79-86.
19. Klinger, R., Bengtsson, C. and Johansson, M. 2005. Comparison between HT-dried and LT-dried spruce timber in terms of shape and dimensional stability, *Holzforschung*, 59: 647-653.
20. Langwig, J.E. and Skaar, C. 1975. Electrical resistivities of 18 Venezuelan and 13 North American Woods, *Wood Sci.* 8: 350-354.
21. Mackay, J.F.G. 1984. Assessment of accuracy of species temperature correction tables for resistance-type moisture meters, Forintek Canada Corp, Western Laboratory, Vancouver, British Columbia, 12p.
22. National Associations of Forest Industries (NAFI). 2004. Timber Species and properties, Timber Manual Datafile P1, Revised edition, 18p.
23. Okah, K. 1976. Moisture sorption and electrical resistivity of some woods and barks, PhD Thesis. SUNY Coll Environ Sci For, Syracuse NY, 195p.
24. Pfaff, F. and Garrahan, P. 1987. New temperature correction factors for the portable resistance-type moisture meter, Forintek Canada Corporation, Eastern Laboratory Ottawa, Ontario, Pp: 71-75.
25. Sandoz, J.L. 1993. Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading, *Wood Science and Technology*, 27: 373-380.
26. Simpson, W.T. 1991. Dry Kiln Operator's Manual, Agriculture handbook AH-88, United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, Revised August 1991, 274p.
27. Society of Wood Science and Technology (SWST). 2007. Teaching Unit Number 2, Slide Set 1, PP Show: 70p.
28. Tiitta, M., Kainulainen, P., Harju, A.M., Venalainen, M., Manninen, A.M., Vuorinen, M. and Viitanen, H. 2003. Comparing the Effect of Chemical and Physical Properties on Complex Electrical Impedance of Scots Pine Wood, *Holzforschung*, 57: 4. 433-439.
29. Tootoonjanian, A. 2007. The on-line and automatic measurement of wood moisture content during kiln drying. M.Sc. Thesis. University of Tehran, 143p. (In Persian)

30. Vermaas, H.F. 1982. D.C. Resistance moisture meters for wood, Part I. Review of some fundamental Considerations, South Afric. Forest. J. 121: 88-92.
31. Wiberg, P., Sehlstedt-P, S.M.B. and Moren, T.J. 2000. Heat and mass transfer during sapwood drying above the fiber saturation point. Drying Technology, 18: 8. 1647-1664.
32. Zeleniuc, O. and Ene, N. 1996. Gravimetric system to determine the moisture content of wood during the drying process, P 213-220. In: Proceeding 5<sup>th</sup> International IUFRO Wood Drying Conference, Banská Štiavnica, Slovak Republic.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Wood & Forest Science and Technology*, Vol. 18(1), 2011  
[www.gau.ac.ir/journals](http://www.gau.ac.ir/journals)

## **Evaluation of The Effect of Moisture Content on The Electrical Resistance of Poplar Wood at Constant Temperatures**

**\*H. Aminian<sup>1</sup> and Gh. Ebrahimi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Dept. of Wood and Paper Science and Technology, University of Tehran,

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Wood and Paper Science and Technology, University of Tehran

Received: 2010/10/24; Accepted: 2011/01/30

### **Abstract**

In order to evaluate the effect of moisture content (MC) on the electrical resistance (R) of poplar wood, three poplar trees (*P. deltoides*) were selected and harvested in the Shast Kalateh forest in Gorgan, and eight matched clear specimens with dimensions of 2×7/5×10 cm were taken from each one. The electrical resistance and the corresponding internal temperature values of each specimen were measured simultaneously with a gradual increase in temperature between 15-100 °C, separately. The test was repeated for several turns and all of the specimens were weighed at the beginning and end of each run. All of the specimens were oven-dried with temperature of 103±2 °C for 24 hours at the end of the test to calculate the MC values corresponding to each electrical resistance and internal temperature values of each specimen with assuming the linear changes of MC of wood during each run of testing. The analysis of variance (ANOVA) at the 95% confidence level by SPSS14 software showed that the difference between different temperature values was significant, and electrical resistance decreased at a constant MC by the increase of temperature. Thus, eight linear models were evaluated to determine relationship between MC and electrical resistance at different temperature values, separately. According to the ANOVA test of the correlation coefficient, the best equation was chosen and moisture content-electrical resistance curves at different temperatures were drawn based on it. The results have shown that the electrical resistance decreases with increasing of moisture content at all temperature values with a same slope, but the slope of the curve decreases at the high temperature values (close to 100 °C).

**Keywords:** Poplar wood, Electrical resistance, Temperature, Moisture content, Wood kiln drying

---

\* Corresponding Author; Email: [hedaminian@yahoo.com](mailto:hedaminian@yahoo.com)