

## بررسی مقایسه‌ای ضریب هدایت حرارتی گونه‌های چوبی سپیدار، ممرز و افراشیردار

سید معین رسولی نژاد موسوی<sup>1</sup>، مهسا برزگر<sup>2</sup>، محمد لایقی<sup>3</sup>

### چکیده

در این تحقیق ضریب هدایت حرارتی چوب سپیدار، ممرز و افراشیردار در محدوده دمایی 40 تا 80 درجه سانتی‌گراد، به طور تجربی در آزمایشگاه فیزیک گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران با بهره‌گیری از دستگاه اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی مطابق با استاندارد ASTM C177 اندازه‌گیری و سپس روابطی تجربی جهت پیش‌بینی ضرایب هدایت حرارتی سپیدار، ممرز و افراشیردار در محدوده‌ی دمایی مذکور پیشنهاد شد. جهت تعیین هدایت حرارتی از هر گونه چوبی دو نمونه آزمونی با سطح مقطع  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  و ضخامت 1cm از شمال ایران (جنگل‌های آمل) تهیه شد. نتایج نشان داد که ضریب هدایت حرارتی چوب‌های سپیدار، ممرز و افراشیردار به‌طور خطی با دما افزایش می‌یابد. همچنین، ضریب هدایت حرارتی این سه گونه مورد مقایسه قرار گرفت و نتایج نشان داد که بیشترین ضریب هدایت حرارتی در هر دمای میانگین مطلوب در بازه‌ی دمایی 40 تا 80 درجه سانتی‌گراد مربوط به گونه‌ی ممرز است.

**واژه‌های کلیدی:** سپیدار، ممرز، افراشیردار، ضریب هدایت حرارتی، روش آزمایشگاهی

---

1- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، گروه مهندسی مکانیک، نویسنده مسوول

moein\_rassoulinejad@ yahoo.com

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

3- استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

## مقدمه

هدایت حرارتی چوب، یکی از مهمترین ویژگی‌های فیزیکی چوب است که دانستن مقدار آن در چوب خشک‌کنی، تیمار گرمایی گرده‌بینه در کارخانجات روکش، پرس گرم برای چند سازه لایه‌ای و کاربردهای عایق مانند درب، پنجره، دیوار پوش و غیره حائز اهمیت می‌باشد. خاصیت عایق بودن چوب مزایای زیادی دارد، از جمله این که در مقایسه با فلزات هادی که در دماهای بالا نرم می‌شوند، سبب دوام چوب در مقابل آتش می‌شود (8). از صنوبر، ممرز و افراشیردار می‌توان در ساختمان، صنایع مبلمان و کاغذ سازی استفاده کرد. بنابراین آگاهی از ضریب هدایت حرارتی آنها از اهمیت بالایی برخوردار است.

دوبی و همکاران<sup>1</sup> (1999)، هدایت حرارتی 11 گونه از چوب‌های هند را اندازه‌گیری کردند و رابطه‌ی هدایت حرارتی با جرم ویژه و دما را به اثبات رساندند. نتایج آن‌ها نشان داد، که هدایت حرارتی پهن‌برگان با افزایش جرم ویژه به‌طور خطی افزایش می‌یابد. متوسط دما در محدوده  $18^{\circ}\text{C}$  تا  $48^{\circ}\text{C}$  قرار داشت (1) چن و همکاران<sup>2</sup>، شباهت برخی از ویژگی‌های هدایت حرارتی و هدایت الکتریکی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که مقدار نظری هدایت حرارتی تقریباً " شبیه مقدار آزمایشگاهی آن‌ها است و بزرگ‌ترین انحراف معیار آن 14/1% و متوسط انحراف معیار 7% است. نتیجه این تحقیق، روش عملی جهت مطالعه ویژگی‌های حرارتی چوب را فراهم نمود (2). اُرس و سنل<sup>3</sup> (1999)، ضرایب هدایت حرارتی چوب‌های سدر، نراد، دوگلاس و راش را به‌دست آوردند. نتایج نشان داد که متوسط هدایت حرارتی در شرایط هوای خشک  $0/1128 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$  برای نراد،  $0/1146 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$  برای دوگلاس،  $0/1253 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$  برای سدر،  $0/1580 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$  برای راش،  $0/1783 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$  برای تخته خرده تولید شده با پرس مسطح و ضریب هدایت حرارتی تخته فیبر با دانسیته متوسط و تخته فیبر سخت به ترتیب  $0/1998 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$  و  $0/2263 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$  می‌باشد (5). استاورس و لازاروس<sup>4</sup> (2005)، مدلی از شبکه هوش مصنوعی طراحی کردند که هدایت حرارتی چوب را در دامنه گسترده‌ای از شرایط مانند میزان رطوبت، دما و دانسیته ظاهری برآورد می‌کند (6).

هانت و گو<sup>5</sup> (2006)، معادله همبستگی جدیدی برای هدایت حرارتی موثر در جهت شعاعی، مماسی به عنوان تابعی از چگالی به دست آوردند. نتایج می‌تواند در تنظیم مدل دو بعدی جهت آنالیز حرارتی ناپایدار تخته‌های ساخته شده از سوزنی برگان به کار رود (3). ونگ و همکاران<sup>6</sup> (2008)، هدایت حرارتی و ساختار بافت صنوبر<sup>7</sup> در 3 و 30 سالگی را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که دما در سطوح برگ در میان

<sup>1</sup> Dubey and et al.

<sup>2</sup> Chen and et al.

<sup>3</sup> Ors and Senel

<sup>4</sup> Stavros and Iazaros

<sup>5</sup> Hunt and Gu

<sup>6</sup> Wang and et al

<sup>7</sup> *populus tomentosa* Carr

انواع مختلف تقریباً مشابه و هدایت حرارتی برگ، دما و میزان آب برگ‌ها به هم مرتبط است. نتایج همچنین نشان داد که برگ با بافت ضخیم تر، مقاومت حرارتی بیشتری دارد (7). در تحقیق حاضر، هدایت حرارتی سه گونه چوب موجود از جنگل‌های شمال در محدوده دمایی مختلف، با استفاده از روش ASTM<sup>1</sup> C177 به‌طور تجربی اندازه‌گیری و رابطه‌ای جهت پیش‌بینی هدایت حرارتی سپیدار ممرز و افرا شیردار در محدوده دمایی 40 تا 80 درجه سانتی‌گراد پیشنهاد شده است.

## مواد و روش‌ها

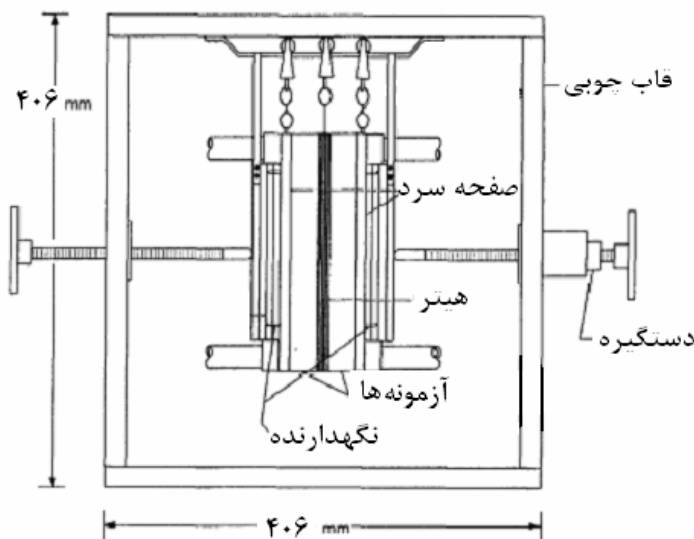
جدول علائم

درجه سلسیوس C	T دما
وات W	Q انرژی گرمایی
متر m	X فاصله ی بین مراکز دو ترموکوپل
(W/m. °C)	K ضریب انتقال حرارت
m <sup>2</sup>	A مساحت

از هر سه گونه چوب - سپیدار، ممرز و افرا شیردار - دو نمونه آزمون‌ی بدون عیب و با سطح مقطع  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  و ضخامت 1cm از جنگل‌های شمال ایران (آمل) تهیه شده است. برش نمونه‌های آزمون‌ی بینابینی بوده‌است. علت انتخاب این ابعاد با توجه به استاندارد NIST<sup>2</sup> می باشد (10). در این آزمایش از یک هیتر با پهنا و طول 200 میلی‌متر و ضخامت 2 میلی‌متر به‌عنوان منبعی جهت ایجاد گرما در یک سمت نمونه‌های آزمون‌ی و دو ژاکت آب به طول و پهنای 200 میلی‌متر و ضخامت 30 میل‌متر برای خنک کردن سمت دیگر نمونه‌های آزمون‌ی استفاده شده است. هیتر، ژاکت‌های آب و نمونه‌های آزمون‌ی چوب در قاب چوبی قرار گرفتند. برای ثابت نگه داشتن سطوح نمونه آزمون‌ی‌های چوبی در تماس با هیتر و ژاکت‌های آب از گیره‌های نگهدارنده در طرفین دستگاه استفاده شد. در این دستگاه از یک منبع تغذیه جهت ایجاد و کنترل مقدار ورود انرژی گرمایی به سطح چوب و یک وات‌متر از نوع Lutron DW-6060 برای نمایش مقدار انرژی گرمایی وارده به سطح نمونه آزمون‌ی استفاده گردید. حس‌گرهای دما نیز از نوع PT-100 با دقت  $\pm 0/1 \text{ } ^\circ\text{C}$  برای اندازه‌گیری دمای طرفین چوب مورد استفاده قرار گرفتند (شکل 1). طرحواره‌ای از دستگاه پیشنهاد شده توسط موسسه ملی فناوری و استاندارد اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی پانل‌های  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  را نشان می‌دهد (9). ضمناً نمونه‌های آزمون‌ی در شرایط مشابه و با رطوبت تعادل 12% در آزمایشگاه فیزیک گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران مورد آزمایش قرار گرفتند.

<sup>1</sup> American Society for Testing and Materials

<sup>2</sup> National institute of standards and technology (NIST)



شکل ۱- تصویر شماتیک NIST جهت اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی پانل چوبی

نخست هیتر روشن شد و شار حرارتی مورد نظر تنظیم گردید تا دماها به حالت پایدار<sup>۱</sup> برسند. سپس ضریب هدایت حرارتی متوسط نمونه‌های آزمونی توسط قانون فوریه به‌دست آمد:

$$Q = 2kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

که در معادله بالا  $Q$  نرخ انتقال حرارت از صفحه گرم بر حسب وات،  $k$  ضریب هدایت حرارتی نمونه‌های آزمونی و  $A$  مساحت قاعده نمونه‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است که ضریب ۲ به دلیل پخش گرما بین دو نمونه آزمونی در معادله قرار داده شده است. با به‌دست آوردن (معادله ۱) بر حسب  $k$  خواهیم داشت:

$$k = \frac{Q \cdot \Delta x}{2A \Delta T} \quad (2)$$

در تحقیق حاضر، مقدار  $\Delta x = 0.005 \text{ m}$  و  $A = 0.04 \text{ m}^2$  است. بنابراین معادله بالا به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$k = 0.0625 \frac{Q}{\Delta T} \quad (3)$$

## نتایج

ضریب هدایت حرارتی نمونه‌های آزمونی سپیدار، ممرز و افرا شیردار در محدوده دمایی ۴۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است. این ضرایب بر اساس دمای میانگین بین منبع گرم و سرد گزارش می‌شود

<sup>۱</sup> Steady state

(4)، و جداول 1 تا 3 مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده ضریب هدایت حرارتی طبق فرمول 1 در نمونه‌های آزمونی را نشان می‌دهد.

جدول 1- مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده ضریب هدایت حرارتی طبق (فرمول 1) در نمونه‌های آزمونی سپیدار

شماره آزمایش	دمای میانگین (°C)	مقدار انرژی گرمایی (W)	اختلاف دما (°C)	ضریب انتقال حرارت (W/m. °C)
1	53/0	20/8	10/0	0/129
2	63/5	24/1	11/1	0/136
3	73/3	34/1	15/5	0/138
4	81/1	45/2	19/9	0/142

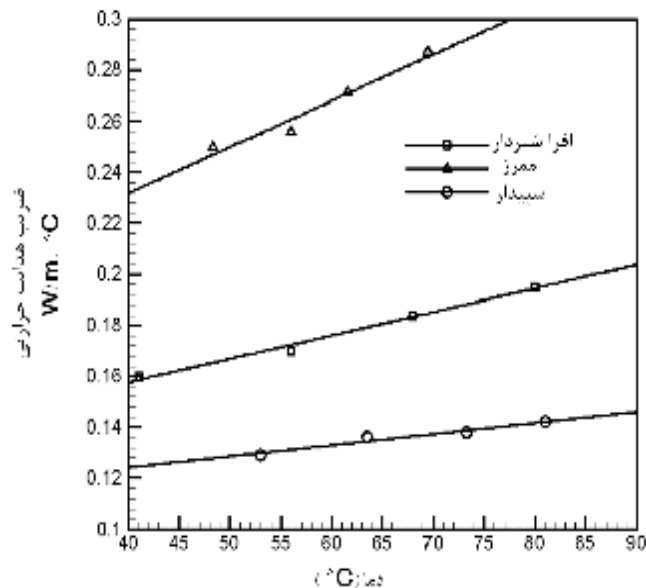
جدول 2- مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده ضریب هدایت حرارتی طبق (فرمول 1) در نمونه‌های آزمونی افراشیردار

شماره آزمایش	دمای میانگین (°C)	مقدار انرژی گرمایی (W)	اختلاف دما (°C)	ضریب انتقال حرارت (W/m. °C)
1	41/0	21/5	8/4	. /160
2	56/0	25/7	9/5	. /170
3	68/0	35/2	12/0	. /184
4	80/0	45/6	14/6	. /195

جدول 3- مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده ضریب هدایت حرارتی طبق (فرمول 1) در نمونه‌های آزمونی ممرز

شماره آزمایش	دمای میانگین (°C)	مقدار انرژی گرمایی (W)	اختلاف دما (°C)	ضریب انتقال حرارت (W/m. °C)
1	48/3	20/0	5/0	. /250
2	56/0	26/2	6/4	. /256
3	61/6	35/1	8/1	. /271
4	69/5	45/4	9/9	. /287

شکل 2 برازش خطی داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. این خطوط بهینه که با تقریب بسیار خوبی به وسیله نرم افزار Tecplot منطبق بر نقاط به دست آمده از آزمایش رسم شده‌اند روند تغییرات ضریب هدایت حرارتی گونه‌های مذکور را مشخص می‌کنند.



شکل 2- تغییرات ضرایب هدایت حرارتی افرا شیردار، ممرز و سپیدار با دما

همان‌طور که در شکل 2 دیده می‌شود، ضریب هدایت حرارتی نمونه‌های آزمونی سپیدار، افرا شیردار و ممرز در دمای  $40^{\circ}\text{C}$ ، به ترتیب حدود  $0.124 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$ ،  $0.158 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$  و  $0.232 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$  است. تغییر ضریب هدایت حرارتی را می‌توان به صورت زیر فرض نمود:

$$k(T) = k_0 + b(T - T_0) \quad (4)$$

که  $k_0$ ، میزان ضریب هدایت حرارتی نمونه‌های آزمونی در دمای  $40^{\circ}\text{C}$  و  $T_0 = 40^{\circ}\text{C}$  فرض می‌شود. ثابت  $b$  شیب خط در شکل 2 است که مقدار آن برای سپیدار تقریباً  $4/37 \times 10^{-4} \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}^2$  و برای افرا شیردار و ممرز به ترتیب  $9/17 \times 10^{-4} \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}^2$  و  $18/0 \times 10^{-4} \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}^2$  است. بنابراین روابط تجربی برای ضریب هدایت حرارتی این سه گونه را می‌توان تدوین نمود (جدول 4).

جدول 4- روابط تجربی برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی ممرز، افرا شیردار و سپیدار

رابطه تجربی ضریب هدایت حرارتی (W/m.°C)	محدوده دمایی (°C)	گونه
$k(T) = 0.232 + 0.0018(T - 40)$	$40 \leq T \leq 80$	ممرز
$k(T) = 0.158 + 0.000917(T - 40)$	$40 \leq T \leq 80$	افرا شیردار
$k(T) = 0.124 + 0.000437(T - 40)$	$40 \leq T \leq 80$	سپیدار

## بحث

با برازش خط ضریب هدایت حرارتی چوب ممرز در (شکل 2) می‌توان نتیجه گرفت که مقدار این ضریب به‌طور خطی از  $0/250 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  در دمای  $48/3 \text{ } ^\circ\text{C}$  به  $0/287 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  در دمای  $69/5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ، در افرا شیردار به‌طور خطی از  $0/160 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  در دمای  $41 \text{ } ^\circ\text{C}$  به  $1/195 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  در دمای  $80 \text{ } ^\circ\text{C}$  و ضریب هدایت حرارتی چوب سپیدار به‌طور خطی از  $0/129 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  در دمای  $53 \text{ } ^\circ\text{C}$  به  $0/142 \text{ } ^\circ\text{C}$  در دمای  $81/1 \text{ } ^\circ\text{C}$  افزایش می‌یابد و بیشترین انحراف از خط برازش ضریب هدایت حرارتی کمتر از 10% و نزدیک به دمای  $57 \text{ } ^\circ\text{C}$ ،  $56 \text{ } ^\circ\text{C}$  و  $64 \text{ } ^\circ\text{C}$  به ترتیب برای ممرز، افراشیردار و سپیدار می‌باشد. با مقایسه ضرایب هدایت حرارتی این سه گونه می‌توان نتیجه گرفت، ضریب هدایت حرارتی ممرز بیشتر از افرا شیردار و سپیدار است. چگالی چوب یکی از عوامل مهم در انتقال حرارت است، یعنی با افزایش چگالی ضریب هدایت حرارتی افزایش می‌یابد و ممرز به دلیل داشتن بیشترین چگالی در بین نمونه‌های آزمونی دیگر، بیشترین ضریب هدایت حرارتی را دارا می‌باشد و این نتایج منطبق با تحقیقات منبع (9) می‌باشد. همچنین می‌توان استنباط کرد، با افزایش دما ضریب هدایت حرارتی چوب به صورت خطی افزایش می‌یابد و می‌توان از معادلات به‌دست آمده در جدول (4) برای به‌دست آوردن ضریب هدایت حرارتی گونه‌های مورد آزمایش در این مقاله در دمای میانگین مطلوب استفاده کرد.

## سپاسگزاری

در پایان، از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج جناب آقای دکتر مهران روح نیا و جناب آقای دکتر کامبیز پورطهماسبی مدیر محترم گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشگاه تهران، به دلیل پشتیبانی و حمایت‌های بی‌دریغ تشکر و قدردانی می‌کنیم.

**منابع**

1. Dubey, Y.M., J.D, Jain and S, Gupta, 1999, Studies on thermal conductivity of some Indian hardwoods, Journal of the Timber Development Association Of India, 45(1-2):33-38.
2. Chen, R.Y., Y.Q., Xie., Q.X., Yang., Y.Q., Liao and J.G., Lin. Study on wood thermal conductivity in transverse direction by analogism, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China, Chinese Academy of Forestry.
3. Hunt, J.F and H. Gu, 2006, Two-dimensional finite element heat transfer model of soft wood. Part I. Effective thermal conductivity, wood and fiber science, 38(4): 592-598.
4. Incorpra, Frank P., Introduction to heat transfer, Vol I, John Wiley & Sons, Inc.
5. Ors.Y and A. senel, 1999, Thermal Conductivity Coefficients of Wood and Wood-Based Materials. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 23: 239-246.
6. Stavros. A and I. Lazaros, 2005, Predicting wood thermal conductivity using artificial neural networks. Wood and fiber science, 37 ( 4): 682-690.
7. Wang. M., W.J., Zhang., J. Xiao., Z.Y, Zhang and J. Liu , 2008, Forestry Studies in China. 10(3): 173-178.
8. Wood handbook : wood as an engineering material. Madison, WI : USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL ; GTR-113: Pages 3.1-3.24
9. YANG Qing-xian, 2001, Theoretical expressions of thermal conductivity of wood, Journal of Forestry Research, 12(I): 43-46
10. Zarr, R.R., G.R, Dalton and S.M, Fiorovante, Development of a NIST Standard Reference Database for Thermal Conductivity of Building Materials, National Institute of Standards and Technology.