

## روشی ساده و قابل اجرا در کلاس درس برای اندازه‌گیری رسانش گرمایی

مجید افشاری<sup>۱</sup>، ابوذر میرزایی<sup>۲</sup>

پدیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۶

دریافت: ۱۴۰۱/۹/۲۳

### چکیده

انتقال گرما، به معنی حرکت گرما در سراسر مرز سیستم به دلیل اختلاف دما بین سیستم و محیط اطراف آن، پدیده‌ای شناخته شده در زندگی روزمره است. عموم افراد هنگام آشنایی یا عایق‌سازی گرمایی خانه‌ها بدون این که آگاهی از اصول فیزیکی این پدیده داشته باشند، از مفاهیم مربوط به آن بهره می‌گیرند. انتقال گرما از نظر شهودی به خواص مواد، یعنی به مفهوم فیزیکی رسانش گرمایی، مرتبط است. با وجود سادگی این مفهوم، اما اندازه‌گیری رسانش گرمایی معمولاً دشوار است. در این مقاله یک روش ساده، سریع و عملی معرفی می‌شود که مقادیر کاملاً دقیقی را برای ضریب رسانش گرمایی مواد عایق و نیمه‌عایق به دست می‌دهد و برای آموزش این مفهوم و اجرا در یک محیط کلاسی مناسب است.

**واژگان کلیدی:** انتقال گرما، ضریب رسانش گرمایی، مواد عایق، مواد نیمه‌عایق، آزمایش.

<sup>۱</sup>. استادیار گروه علوم پایه دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران، نویسنده مسؤل، m.afshari@cfu.ac.ir

<sup>۲</sup>. دبیر فیزیک، آموزش و پرورش لردگان، چهار محال بختیاری، ایران.

## مقدمه

انتقال گرما یک پدیده روزمره شناخته شده است. افراد، حتی اگر از اصول فیزیکی این پدیده آگاهی نداشته باشند، به طور شهودی این پدیده را به ویژگی های مواد ربط می دهند. انتقال گرما، به شدت، به نوع ماده بستگی دارد و با ضریب رسانش گرمایی مشخص می شود (هالیدی<sup>۱</sup>، رزنیك<sup>۲</sup> و واكر<sup>۳</sup>، ۲۰۱۳). در محیط مدرسه، یافتن مقدار تقریبی آن بسیار دشوار است، زیرا آزمایش ها معمولاً به تجهیزات نسبتاً پیچیده ای نیاز دارند که در مدارس موجود نیست (لو<sup>۴</sup>، ای<sup>۵</sup> و ژانگ<sup>۶</sup>، ۲۰۰۱؛ اورتونو<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۱). مشکل دیگر، انتقال گرمای ناشی از همرفت است که نمی توان از آن چشم پوشی کرد یا حداقل آن را کنترل کرده و مقدار تقریبی آن را به دست آورد (بی<sup>۸</sup>، بالنتین<sup>۹</sup> و تامسن<sup>۱۰</sup>، ۲۰۰۸). با وجود این، چندین آزمایش وجود دارد که تجربه و چارچوبی از این مفهوم در سطح نیمه کمی برای دانش آموزان فراهم می کنند، اما معلمان اغلب مجبور می شوند بررسی رسانش گرمایی را به مقایسه ی موادی با ویژگی های رسانایی گرمایی متفاوت، مانند فلزات و پلی استایرن، محدود کنند. در این مقاله، یک روش ساده، سریع و تقریباً عملی برای اندازه گیری رسانایی گرمایی مواد عایق و نیمه عایق معرفی می شود که این شکاف را پر می کند و برای اجرا در محیط کلاس مناسب است.

روش پیشنهادی اندازه گیری رسانایی گرمایی، بر اساس اندازه گیری وابستگی دمایی به زمان یک آب خنک کننده ی غوطه ور در مخلوطی از آب و یخ برای یک بازه ی زمانی نسبتاً کوتاه است (ژیوب<sup>۱۱</sup> و چیپک<sup>۱۲</sup>، ۲۰۲۰). پیکربندی این آزمایش بسیار ساده و سراسر است. برای تجزیه و تحلیل اندازه گیری ها، یک ترفند ساده پیشنهاد می شود، که به طور مستقیم ضریب رسانش گرمایی را به دست می دهد. با استفاده از این روش، رسانایی های گرمایی نسبتاً دقیقی برای رساناهای گرمایی ضعیف و رساناهایی که رسانش گرمایی ضعیف تری از آب را کد (که به عنوان محیط خنک کننده استفاده می شود) دارند، به دست می آید. با وجود این، این روش محدودیت هایی نیز دارد. اگر چه این پیکربندی آثار مربوط به همرفت و تابش را حذف می کند اما برای رساناهای خوب، مانند فلزات، مناسب نیست (ژیوب و چیپک، ۲۰۲۰).

## رسانش گرمایی و سردسازی آب

ظرفی بسته با دیواره های رسانا در نظر می گیریم که از آب پر شده است. دیواره های ظرف از ماده ای با ضریب رسانش گرمایی  $\lambda$  به ضخامت  $d$  ساخته شده اند و مساحت سطح ظرف  $S$  است. جرم آب درون ظرف  $m_w$  و گرمای ویژه آن  $C_w$  است. در آغاز، ظرف با آب داغ نزدیک به نقطه جوش پر می شود. ظرف حاوی آب با دمای اولیه  $T_w^0$ ، به سرعت در مخزنی بزرگ از مخلوط آب و یخ با دمای  $T_R$  فرو برده می شود. دمای آب درون ظرف  $T_w(t)$  به مدت چند دقیقه اندازه گیری می شود. برای شرایط توصیف شده، دیواره ی داخلی ظرف با آب درون آن و دیواره ی خارجی با مخلوط آب و یخ درون مخزن همدماست و بنابراین انتقال گرما از طریق فرایند تابش ناچیز است. علاوه بر این، آب درون ظرف به آرامی هم زده می شود که تضمین می کند دمای آب درون ظرف در نزدیکی دیواره ها و مرکز آن یکسان است. جریان همرفت در مخزن حاوی مخلوط آب و یخ قابل چشم پوشی است. بنابراین، برای توصیف وابستگی دمایی آب درون ظرف به زمان  $T_w(t)$ ، کافی است رسانش گرما از طریق دیواره های ظرف را بررسی کنیم.

<sup>۱</sup> Halliday<sup>۲</sup> Resnick<sup>۳</sup> Walker<sup>۴</sup> Lu<sup>۵</sup> Yi<sup>۶</sup> Zhang<sup>۷</sup> Ortuño<sup>۸</sup> Bee<sup>۹</sup> Ballentine<sup>۱۰</sup> Thomsen<sup>۱۱</sup> Dziob<sup>۱۲</sup> Čepič

تفاوت دمای وابسته به زمان آب درون ظرف و دمای مخزن را با  $\theta$  نمایش می‌دهیم؛ یعنی  $\theta(t) = T_w(t) - T_R$  دمای آب درون ظرف در اثر انتقال گرما از طریق دیواره‌های ظرف کاهش می‌یابد:

$$m_w c_w \frac{d\theta}{dt} = -\lambda \frac{S}{d} \theta \quad (1)$$

که از حل معادله (۱) اختلاف دمایی وابسته به زمان به دست می‌آید

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad \tau = \frac{m_w c_w d}{\lambda S} \quad (2)$$

که در آن  $\theta_0$  اختلاف دمایی اولیه  $T_w(0) - T_R$  است. زمان مشخصه،  $\tau$ ، مدت زمانی است که طی آن اختلاف دمایی به

$\frac{1}{e}$  (تقریباً ۳۷٪) مقدار اولیه کاهش می‌یابد. به ازای زمان‌های کوچکتر از زمان مشخصه  $\Delta t < \tau$ ، معادله (۲) خطی شده و به عبارتی همانند معادله (۱) و البته غیردیفرانسیلی تبدیل می‌شود. در زمان  $\Delta t$  دمای آب درون ظرف در نتیجه انتقال گرما به ظرف، به اندازه  $T(t) - T(0) = \theta(t) - \theta_0$  تغییر می‌کند. انتقال گرما ناشی از اختلاف دمایی  $\theta(t)$  میان آب درون ظرف و مخزن است. معادله‌ی خطی شده (۱) تبدیل می‌شود به

$$m_w c_w [\theta(t) - \theta_0] = -\lambda \frac{S}{d} \theta(t) \Delta t \quad (3)$$

برای ساده‌سازی معادله (۳) قرار می‌دهیم  $\theta(t) = \theta$  و بنابراین داریم

$$\frac{(\theta_0 - \theta)}{\theta} = \frac{\lambda S}{m_w c_w d} \Delta t \quad (4)$$

با تعریف  $r(t) = \frac{\theta_0 - \theta}{\theta}$  و توجه به اینکه با شیب  $\frac{\lambda S}{m_w c_w d}$  به صورت خطی به زمان وابسته است،

$$r(t) = \frac{\lambda S}{m_w c_w d} \Delta t \quad (5)$$

تعیین رسانایی گرمایی  $\lambda$  به صورت سراسر امکان‌پذیر می‌شود.

### پیکربندی آزمایش

در شکل ۱ پیکربندی آزمایش نشان داده شده است. از ظرفی با دیواره‌های عایق و با ابعاد مناسب که بتوان حدود ۵ تا ۷ لیتر مخلوط آب و یخ در آن جای داد، به عنوان مخزن استفاده می‌شود و نسبت یکسانی آب و یخ درون آن قرار می‌گیرد. ما از یخدان یونولیتی استفاده کردیم. ظرفی که درون آن آب داغ ریخته می‌شود، در واقع، لیوان‌هایی هستند که از مواد متفاوتی ساخته شده‌اند. درون لیوان آب داغ ریخته و دهانه آن را با لایه‌ای ضخیم از جنس یونولیت که سوراخی در آن ایجاد شده پوشاندیم. برای اندازه‌گیری دمای آب داغ درون لیوان، از طریق سوراخ موجود در درپوش یونولیتی، دماسنجی را وارد آن کردیم. اکنون لیوان حاوی آب داغ، درون مخزن آب و یخ فرو برده می‌شود. به منظور دست‌یابی به بیشترین اختلاف دما میان آب داغ درون لیوان و مخلوط آب و یخ درون مخزن، فرایند ریختن آب داغ درون لیوان و فروردن آن درون مخزن باید تا جایی که امکان دارد، سریع انجام شود. دمای آب درون لیوان به مدت چند دقیقه اندازه‌گیری می‌شود. دمای مخلوط یخ و آب در مخزن نیز کنترل شده و برای جلوگیری از افزایش موضعی دما در نزدیکی دیواره‌های لیوان، یک بار در دقیقه کمی هم زده می‌شود.



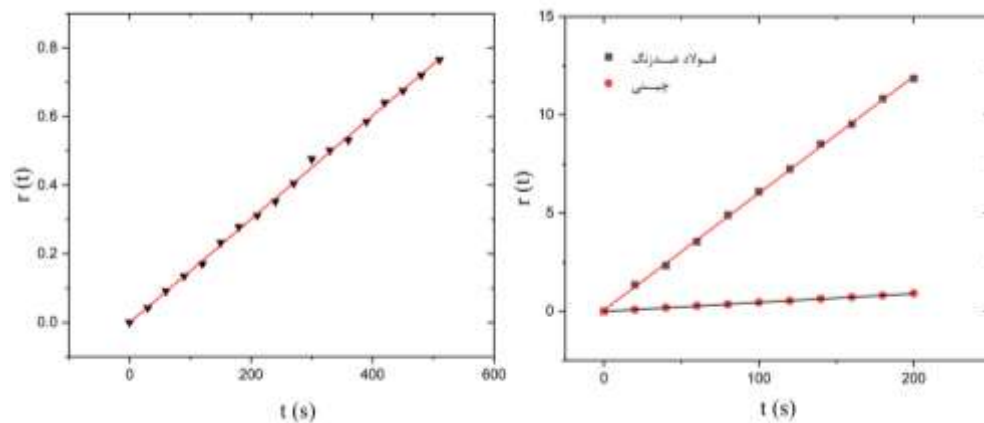
شکل ۱. پیکربندی آزمایش اندازه گیری ضریب رسانش گرمایی. شماتیک (سمت چپ) و واقعی (سمت راست). (ژیوب و چیپک، ۲۰۲۰)

### نتایج آزمایش

برای اندازه گیری ضریب رسانش گرمایی مواد مختلف، دمای آب در حال سرد شدن که وابسته به زمان است، در سه لیوان با جنس‌های متفاوت اندازه گیری شد. لیوان‌هایی که برای این آزمایش به کار برده شدند از جنس پلاستیک، چینی و فولاد ضد زنگ<sup>۱</sup> و تقریباً استوانه‌ای بودند. دما با استفاده از دماسنج‌هایی با دقت  $0.1^{\circ}\text{C}$  در بازه‌های سی ثانیه‌ای (پلاستیک) و بیست ثانیه‌ای (چینی و فولاد ضد زنگ) اندازه گیری شدند. برای اندازه گیری ابعاد لیوان‌ها از کولیس استفاده کردیم و برای گرمای

ویژه آب در محاسبات، مقدار  $4200 \frac{J}{kg \cdot K}$  به کار برده شد.

در شکل ۲ وابستگی دمایی آب به زمان، در لیوان‌های مختلف، در طول سرد شدن آب نمایش داده شده است. شکل ۲، حاصل  $r(t)$  از دماهای اندازه گیری شده به ازای بازه زمانی حدود  $510^{\circ}\text{C}$  (پلاستیک) و  $200^{\circ}\text{C}$  (چینی، فولاد ضد زنگ) را نشان می‌دهد. به علت کوچک بودن ضریب رسانش گرمایی پلاستیک در مقایسه با چینی و فولاد ضد زنگ، بازه زمانی اندازه گیری باید طولانی‌تر باشد. برازش خطی برای هر ماده انجام شد و ضریب رسانش گرمایی از شیب حاصل از برازش و استفاده از رابطه (۵) به دست آمد.



شکل ۲. وابستگی زمانی  $r(t)$  که از اندازه گیری دما برای لیوان‌های پلاستیکی (سمت چپ)، چینی و فولاد ضد زنگ (سمت راست)، به دست آمده است.

در جدول ۱ نتایج اندازه گیری ضریب رسانش گرمایی، نتایج ژیوب و چیپک (۲۰۲۰) با استفاده از همین روش و مقادیر ثبت شده در <https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity> فهرست شده است.

<sup>۱</sup> stainless steel

جدول ۱. ضرایب رسانش گرمایی برای پلاستیک، چینی و فولاد ضدزنگ  $(Wm^{-1}K^{-1})$ 

فولاد ضد زنگ	چینی	پلاستیک	
۴/۷۳	۱/۶۱	۰/۳۳	پژوهش حاضر
۴/۴	۱/۵۷	۰/۲۵	ژیوب و چیپک (۲۰۲۰)
۱۶	۱/۵	۰/۰-۱۷/۵	<a href="https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity">https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity</a>

همانطور که ملاحظه می‌شود، مقادیر ضریب رسانش گرمایی برای مواد متفاوت، به جز برای فولاد ضدزنگ، در توافق خوبی با مقادیر ارائه شده در متون علمی هستند. اختلاف میان مقادیر مربوط به پلاستیک در اندازه‌گیری ما و کارهای دیگر، به این دلیل است که مقدار ضریب رسانش گرمایی برای پلاستیک بسته به نوع پلیمر و دما در بازه ۰/۱۷ تا ۰/۵ قرار دارد و این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت جنس لیوان‌های پلاستیکی موجود در آزمایش باشد (ژیوب و چیپک، ۲۰۲۰)، ولی نکته مهم این است که مقدار اندازه‌گیری شده در بازه مورد نظر قرار دارد. همچنین نتایج ژیبوب و چیپک (۲۰۲۰)، نشان می‌دهد که برای عایق‌مانند پلی‌استایرن و عایق ضعیفی مانند چوب نیز نتیجه دقیقی به دست می‌آید. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که این روش برای عایق‌هایی مانند پلی‌استایرن یا عایق‌های ضعیف مانند چوب، پلاستیک یا چینی، کاملاً قابل اعتماد و دقیق است. با وجود این، مقایسه‌ی رسانش گرمایی اندازه‌گیری شده برای فولاد ضدزنگ و مقدار آن در متون علمی، اختلاف زیادی را نشان می‌دهد. چگونه می‌توان این نتیجه را تفسیر کرد؟

زمان مشخصه محاسبه شده برای لیوان استیل  $4^S$  است، اما مقدار اندازه‌گیری شده مطابق این روش، بیشتر از  $170^S$  است (در اندازه‌گیری ما حدوداً ۷۸ ثانیه به دست آمد). علاوه بر این، وابستگی زمانی نسبت  $r(t)$  در بازه زمانی مشخصه اندازه‌گیری شده تقریباً خطی است، که نشان می‌دهد رفتار سردسازی نیز بسیار شبیه به عایق‌ها یا عایق‌های ضعیف است و بنابراین، می‌توان از این روش استفاده کرد. اما این موضوع دور از واقعیت است. نتایج اندازه‌گیری برای رساناهای حرارتی خوب نشان می‌دهد که این اختلاف برای هر رسانای حرارتی خوب وجود دارد. دلیل این اختلاف مقادیر در ادامه توضیح داده می‌شود. لیوان‌های ساخته شده از رساناهای گرمایی خوب، به طور بسیار موثری گرما را از طریق دیواره‌ها انتقال می‌دهند. به دلیل آن که آب نزدیک به دیواره‌ها تقریباً به طور یکنواخت خنک می‌شود، احتمالاً همرفت کوچک است. بنابراین نمی‌توان در نظر گرفت که کل آب موجود در لیوان به طور یکنواخت خنک می‌شود، اما انتقال گرما به آب داخل لیوان نیز باید در نظر گرفته شود. رسانش گرمایی آب، بدون

$$\frac{W}{m \cdot K}$$

همرفت،  $0.6065 m \cdot K$  است که بیش از ده برابر، کمتر از رسانش گرمایی فولاد ضدزنگ است. لایه‌های آب نزدیک به دیواره‌ها با انتقال کامل گرما، در واقع مانند یک "عایق" داخلی در لیوان عمل می‌کنند. اگر داده‌های رساناهای خوب، به همان روش به کار برده شده برای عایق‌ها و عایق‌های ضعیف تحلیل شود، آنچه در واقع اندازه‌گیری می‌شود رسانش گرمایی مؤثر است که لایه‌های آب نزدیک به دیواره‌ها را نیز در بر دارد (ژیوب و چیپک، ۲۰۲۰). این توضیح با بررسی دقیق‌تر بستگی زمانی اولیه‌ی نسبت  $r(t)$  در لیوان چوبی، تأیید می‌شود. این کسر در آغاز اندازه‌گیری خطی نیست. چوب عایق گرمایی نسبتاً خوبی است اما ظرفیت گرمایی قابل توجهی نیز دارد. بنابراین، پس از قرار گرفتن لیوان چوبی حاوی آب داغ در مخزن، دیواره‌های لیوان شروع به خنک شدن می‌کنند. تا زمانی که رفتار دما در دیواره‌های چوبی ظرف خطی نباشد، رسانش گرما را نمی‌توان با استفاده از معادله ساده (۲) توصیف کرد.

بنابراین روش ارائه شده محدود به موادی با رسانش گرمایی قابل مقایسه با آب یا کمتر از آب است که پیش از این به آن اشاره شد. اگر دمای آب بیشتر از  $10^{\circ}C$  تا  $20^{\circ}C$  تغییر نکند و اختلاف دمای آن با مخزن بیشتر از  $50^{\circ}C$  باشد، با اطمینان

می‌توان رسانش گرمایی را از شیب  $r(t)$  محاسبه کرد. برای اجتناب از پدیده‌های انتقالی مانند زمان لازم برای گرم یا سرد شدن لیوان‌ها، پیشنهاد می‌شود که ۱۰ الی ۲۰ ثانیه پس از فروردن لیوان در مخزن، اندازه‌گیری آغاز شود. با وجود سادگی، این روش رسانایی گرمایی عایق‌های خوب و عایق‌های ضعیف را با دقت بسیار خوبی اندازه‌گیری می‌کند. به دلیل این که دمای آب در لیوان‌هایی که از مواد مطلوب این آزمایش ساخته شده‌اند، به طور چشمگیری تغییر نمی‌کند، اندازه‌گیری کامپیوتری انجام شده در اینجا، ضروری نیست. با اندازه‌گیری دستی نیز می‌توان مقادیر دقیقی برای رسانش گرمایی به دست آورد.

### نتیجه‌گیری

روشی ساده، مؤثر و تا حدودی سریع برای اندازه‌گیری رسانش گرمایی عایق‌ها و نیمه‌عایق‌ها را معرفی و بررسی کردیم. این روش می‌تواند به عنوان یک آزمایش نمایشی در کلاس درس فیزیک یا علوم تجربی یا یک آزمایش ساده و سراسر در محیط آزمایشگاه به کار گرفته شود. سادگی، شهودی بودن و هزینه کم این آزمایش ویژگی‌هایی هستند که آن را به ابزاری عالی برای معرفی رسانش گرمایی تبدیل می‌کند. علاوه بر این، روش پیشنهادی برای اندازه‌گیری رسانش گرمایی، شارش گرما و پیامدهای آن را به هم مرتبط می‌کند و باعث آگاهی از فرآیندهایی می‌شود که دلایل رایج تغییرات دما و دینامیک آن‌ها هستند. همچنین نشان می‌دهد که خواص فیزیکی مواد مختلف فقط اعداد انتزاعی محاسبه شده توسط دانشمندان نیستند، بلکه ویژگی‌های واقعی هستند که پیامدهای آن‌ها را می‌توان مشاهده و مقادیر آن‌ها را اندازه‌گیری کرد.

### منابع

- Bee, G., Ballentine, K., & Thomsen, M. (۲۰۰۸). Realistic problems involving thermal conductivity. *American Journal of Physics*, 76(۱۰), ۹۷۰-۹۷۴.
- Dziob, D., & Čepič, M. (۲۰۲۰). Simple method for measuring thermal conductivity. *Physics Education*, 55(۴), ۰۴۵۰۰۴.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (۲۰۱۳). *FUNDAMENTALS OF PHYSICS EXTENDED 10E*. Hoboken, NJ: Wiley.
- Lu, L., Yi, W., & Zhang, D. L. (۲۰۰۱).  $\omega$  method for specific heat and thermal conductivity measurements. *Review of scientific instruments*, 72(۷), ۲۹۹۶-۳۰۰۳.
- Ortuño, M., Márquez, A., Gallego, S., Neipp, C., & Beléndez, A. (۲۰۱۱). An experiment in heat conduction using hollow cylinders. *European journal of physics*, 32(۴), ۱۰۶۵.