



بررسی روش‌های محاسبه ضریب رسانش مواد در حالت‌های مختلف ماده

مهرداد مسگرپور^۱، علی حیدری^{۲*}، سیفالله سعدالدین^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۳- استاد، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

* سمنان، صندوق پستی ۷۹-۳۵۱۴۵، a.heydari@semnaniau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی کامل دریافت: ۲۳ مهر ۱۳۹۶ پذیرش: ۱۲ آذر ۱۳۹۶ ارائه در سایت: ۲۰ دی ۱۳۹۶	ضریب رسانش (K) در تعیین انتقال حرارت صورت گرفته در مواد نقش اساسی دارد. این ضریب به‌عنوان یک خاصیت از ماده، قابل اندازه‌گیری می‌باشد. مواد مختلف دارای خاصیت هدایت حرارتی مختلف می‌باشند. به طور کلی به ترتیب فلزات، غیر فلزات و گازها دارای بیشترین خاصیت انتقال حرارت هدایت هستند. در این بررسی به مطالعه روش‌های سنجش این ضریب در حالت‌های مختلف مواد از قبیل جامدات، سیالات، گازها و نانو سیال‌ها پرداخته می‌شود. روش‌های آزمایشگاهی متنوعی برای اندازه‌گیری مقدار ضریب هدایت حرارتی وجود دارد. نتایج نشان می‌دهد روش اندازه‌گیری ضریب رسانش، وابسته به حالت ماده و ساختار درونی آن می‌باشد. روش‌های اندازه‌گیری این ضریب در سیالات و گازها با توجه به ماهیت متغیر آن‌ها به چند روش متفاوت تقسیم گردیده است که از آن جمله می‌توان به روش اندازه‌گیری با سیم داغ، روش آنالیز ثابت گرمایی، حالت پایدار صفحات موازی و (۳) اشاره نمود.
کلیدواژگان ضریب رسانش هدایت حرارتی انتقال حرارت، جابجایی	

A review on thermal conductivity of material in different type

Mehrdad mesgarpour¹, ali heydari^{2*}, seyfollah saddodin³

1- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran

2- Strategic Center for Energy and Sustainable Development, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran

* P.O.B. 35145-79 Semnan, Iran, a.heydari@semnaniau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 15 October 2017
Accepted 3 December 2017
Available Online 1 January 2018

Keywords

Conduction heat
transfer coefficient
convection,
heat, fluid

ABSTRACT

Thermal conductivity is one of the most important property of any type of materials. It's shown that how much thermal energy can be cross inside the body. Solid material have the most rate of thermal conductivity. After solid material, fluid and gases have thermal conductivity rate. Measuring this property is step 1 to understand where and how material can be use. In this study several ways to measure thermal conductivity is shown. Also for non-solid material like fluid and component material introduce some new experimental test to measure thermal conductivity

Please cite this article using:

Mehrdad mesgarpour, ali heydari, seyfollah saddodin, A review on thermal conductivity of material in different type, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 8, No. 4, pp. 7-13, 2018 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

بررسی انتقال حرارت یکی از ابزارهای شناخت پدیده‌ها و توصیف آنهاست. به جز موارد خاص، تقریباً تمامی فرایندها دارای انتقال حرارت می‌باشند. محیطی که انتقال حرارت در آن صورت می‌گیرد نقش بسیار مهمی در میزان انتقال دارد. توانایی انتقال حرارت در مواد را با ضریب انتقال حرارت بیان می‌کنند. به عبارت دیگر محیط پایه، چقدر توانایی عبور حرارت را از خود دارد. اولین بررسی‌ها در این زمینه را فوریه انجام داد. وی با بررسی مواد جامد توانست روش تعیین ضریب رسانش را برای مواد جامد پیشنهاد دهد [۱]. روش پیشنهادی او برای موادی که به صورت طبیعی وجود داشته باشند مناسب بود، اما برای موادی با ابعاد بسیار کوچک و مواد با مقدار کم پاسخگو نبود. مهم‌ترین مشکل روش وی، عدم کارایی برای اندازه‌گیری این ضریب در سیالات می‌باشد. در این مطالعه به بررسی روش‌های تعیین ضریب انتقال حرارت در سیالات و جامدات با مقاطع ویژه پرداخته می‌شود.

۲- رسانش گرمایی در جامدات

زمانی که گرادیان دما در یک جسم جامد به وجود می‌آید، انرژی گرمایی از سمت گرم‌تر به سمت سردتر انتقال می‌یابد. طبق قانون بولتزمن^۱ این انرژی در بسته‌هایی به نام فونون^۲ گسیل می‌شوند. بر اساس قانون بولتزمن داریم:

$$-C_s \cdot \text{grad } T \frac{dN}{dT} = \frac{\partial N}{\partial t} \quad (1)$$

که در رابطه فوق N تعداد فونون‌ها در واحد حجم می‌باشد. این قانون بیان می‌کند نرخ تغییرات فونون‌ها بر حسب زمان رابطه مستقیم با گرادیان دما و تغییرات تعداد فونون‌ها بر حسب دما دارد. شکل ساده‌شده این قانون برای مواد جامد همان معادله قانون فوریه می‌باشد.

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

۳- رسانش گرمایی برای گازها:

روابط بسیاری برای رسانش در گازها بر اساس قوانین تئوری نوشته شده است. عمومی‌ترین شکل این روابط به صورت زیر است.

$$K_g = \varepsilon \eta_g C_{v_g} \quad (3)$$

در رابطه فوق ε یک عدد خالص برای هر گاز، η_g ویسکوزیته آن گاز و C_{v_g} گرمای ویژه گاز در حجم ثابت است. همان‌طور که میدانیم اندازه ضریب رسانش برای گازها بسیار کوچک‌تر از ضریب رسانش در جامدات است. بنابراین و با در نظر گرفتن گاز به‌عنوان یک گاز کامل^۳ می‌توان ضرایب η_g ، C_{v_g} ، ε را در گاز کامل در نظر گرفت.

$$\varepsilon = \frac{9\gamma - 5}{4} \quad (4)$$

که در رابطه فوق γ نرخ گرمای ویژه در فشار ثابت و حجم ثابت است. همچنین برای ویسکوزیته گاز داریم:

$$\eta_g = \left(\frac{m\bar{c}}{3\sqrt{2}\pi\sigma^2} \right) \quad (5)$$

در رابطه فوق m جرم مولکولی گاز، σ قطر مولکول، \bar{c} سرعت نسبی مولکولی با رابطه زیر است.

$$\bar{c} = \left(\frac{8kT}{\pi m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

در فشار و دمای عادی K_g حدود $5 \times 10^{-5} \text{ cal/cm.deg}$ می‌باشد.

۴- رسانش گرمایی در مایعات:

با توجه به شباهت آرایش مولکولی مایعات به جامدات، با استفاده از قانون بولتزمن و نگاه مولکولی به رفتار سیال می‌توان اثبات نمود رابطه رسانش گرمایی در سیالات به صورت زیر است.

$$K_L = \left(\frac{RC_s^2}{V(A' + BT)} \right) \left(\frac{\left(\frac{h\omega_e}{KT} \right)^2 e^{\frac{h\omega_e}{KT}}}{\left(e^{\frac{h\omega_e}{KT}} - 1 \right)^2} \right) + \left(\frac{V - V_s}{V} \right) \varepsilon \eta_g C_{v_g} \quad (7)$$

ترم اول معادله فوق رسانش گرمایی به وجود آمده بر مبنای ارتعاش مولکولی و انتقال آن به مولکول مجاور می‌باشد. ترم دوم رابطه بیانگر حرکت پیش‌بینی‌نشده و تصادفی مولکول است. نکته بسیار جالب در این رابطه این است که اگر $\left(\frac{h\omega_e}{KT} \right) < 1$ باشد، مقدار $\frac{\left(\frac{h\omega_e}{KT} \right)^2 e^{\frac{h\omega_e}{KT}}}{\left(e^{\frac{h\omega_e}{KT}} - 1 \right)^2} = 1$ می‌گردد و این عامل اصلی ایجاد رسانش در سیالات است. رفتار رسانایی سیال با دما تغییر می‌کند، به طوری که در زیر نقطه دمای بحرانی این رابطه

³ Ideal gas

¹ Boltzmann
² Phonon

قانون اندازه‌گیری زمان و دما در طی یک پالس ناگهانی الکتریکی قرار دارد. بنا بر قوانین فیزیکی یک پالس الکتریکی همواره مقدار ثابتی از دما را در یک جسم ایجاد می‌کند، از سویی از دمای محیط سیال از سیم کمتر باشد سبب خنک شوندگی در سیم می‌شود. این مقدار انتقال حرارت از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\Delta T = -\left(\frac{q}{4\pi k}\right) Ei\left(\frac{-r^2}{4Dt}\right) \quad 0 < t < t_1 \quad (8)$$

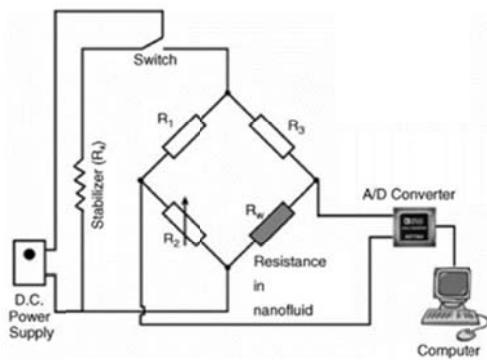
در رابطه فوق D قطر سیم و r فاصله بین دو انتهای سیم می‌باشد. Ei در رابطه فوق تابعی از توزیع انتگرالی محیط اطراف سیم است.

$$-Ei(\alpha) = \int_{\alpha}^{\infty} \frac{1}{u} \exp(-u) du = -\beta - \ln \alpha - \frac{\alpha^2}{4} \quad (9)$$

در رابطه فوق β ثابت اویلر به میزان $\beta = 0.5772$ و $\alpha = r^2/4Dt$ می‌باشد. با در نظر گرفتن کوچک بودن r و بزرگ بودن D می‌توان ضریب رسانش را پس از ساده‌سازی به دست آورد.

$$k = \left[\frac{q}{4\pi(\Delta T_2 - \Delta T_1)} \right] \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (10)$$

برای اندازه‌گیری دقیق ضریب رسانش، معمولاً روش سیم داغ را به صورت زیر در یک مدار قرار می‌دهند. شکل ۲ نمایی از قرارگیری سیم داغ برای سنجش ضریب رسانش نانو سیال را نشان می‌دهد.

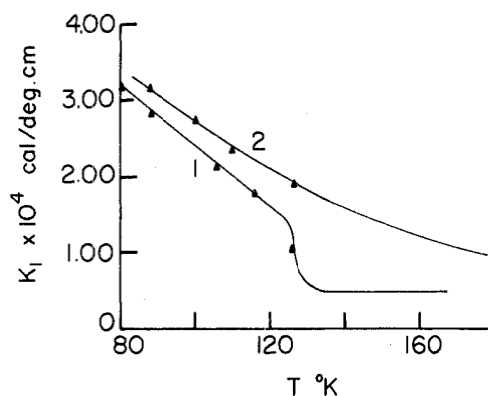


شکل ۲ نحوه به کارگیری روش سیم داغ در آزمایش

روش آنالیز ثابت گرمایی

روش آنالیز ثابت گرمایی بر اساس تئوری منابع صفحه‌ای گذرا^۷ برای اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی سیالات کار

به صورت خطی تغییر می‌کند. در شکل ۱ می‌توان این رابطه را مشاهده نمود.



شکل ۱ رابطه رسانش گرمایی با دما در دو فشار مختلف در نیتروژن

۵- روش‌های سنجش ضریب رسانش در مواد

همان‌طور که در قسمت قبل نیز گفته شد، روش‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری رسانایی گرمایی مواد وجود دارد. مهم‌ترین و کاربردی‌ترین این روش‌ها عبارت‌اند از [۲-۵]:

روش سیم داغ در حالت گذرا^۱

روش آنالیز ثابت گرمایی^۲

روش صفحات موازی در حالت پایا^۳

روش سلول استوانه‌ای^۴

روش نوسان دمایی^۵

روش ω ^۳

روش سیم داغ در حالت گذرا

اولین بار هورروکس^۶ در سال ۱۹۳۱ این روش را برای اندازه‌گیری ضریب رسانش پودرها پیشنهاد داد [۶]. روش‌های بسیاری بر پایه این روش برای اندازه‌گیری ضریب رسانش سیالات ارائه شده است.

مزیت مهم این روش سادگی عملکرد و قابلیت استفاده برای انواع سیالات به‌ویژه نانو سیالات می‌باشد. بر اساس این روش یک سیم پلاتینی برای سنجش درون سیال استفاده می‌شود. سیم به‌عنوان گرم‌کن و دماسنج به‌طور همزمان عمل می‌کند که تحت

¹ Transient hot-wire technique

² Thermal constants analyzer technique

³ Steady-state parallel-plate method

⁴ Cylindrical cell method

⁵ Temperature oscillation technique

⁶ Horrocks

⁷ transient plane source (TPS)

زمانی که مولد الکتریکی جریان را به مدار می‌دهد بر اثر مقاومت در TPS گرادیان دمایی برحسب زمان ایجاد می‌شود. این گرادیان متناسب است با مقاومت الکتریکی درون TPS.

$$\Delta T(\tau) = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{R_p(\tau)}{R_o} - 1 \right] \quad (11)$$

در رابطه فوق α ضریب دمایی مقاومت، R_o مقاومت الکتریکی حسگر است. (τ) تابع زمانی برحسب جریان است که به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\tau = \sqrt{\frac{lR}{r_p^2}} \quad (12)$$

در رابطه فوق r_p شعاع حسگر و R مقاومت درونی آن است. بر اساس قانون فوریه در رسانش اگر در سیال هیچ‌گونه اثر جابجایی^۲ نداشته باشیم $\Delta T(\tau)$ از رابطه زیر نیز به دست می‌آید [۹].

$$\Delta T(\tau) = \left(\frac{w}{\pi^{1.5} r_p k} \right) D(\tau) \quad (13)$$

که در آن $D(\tau)$ عبارت است از:

$$D(\tau) = \int_0^\tau d\sigma (\sigma^{-2}) \int_0^1 v dv \int_0^1 u du \times \exp\left[\frac{-u^2 - v^2}{4\sigma^2} \right] I_0\left(\frac{vu}{2\sigma^2} \right) \quad (14)$$

در روابط فوق w قدرت مولد الکتریکی، I_o تابع بسل بهبودیافته و $D(\tau)$ تابع هندسی^۳ است [۱۰].

روش صفحات موازی در حالت پایا

استفاده از روش انتقال حرارت رسانش در حالت پایا یکی از روش‌های اندازه‌گیری رسانش گرمایی در مواد است. برای ساده‌تر کردن و تخمین دقیق‌تر، به‌کارگیری صفحات گسترده موازی می‌تواند سودمند باشد. بر این مبنا روش صفحات موازی در حالت پایا برای سنجش ضریب هدایت رسانش در مواد مختلف به‌ویژه سیالات مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۵ نمایی از این دستگاه مشاهده می‌شود.

می‌کند. بر این اساس در این روش المان صفحه به‌عنوان دماسنج و منبع گرمایی عمل می‌کند. صفحه بر اساس قانون فوریه کار می‌کند و از این قانون برای اندازه‌گیری ضریب هدایت استفاده می‌کند. مهم‌ترین مزایای این روش عبارت است از [۷]:

اندازه‌گیری بسیار سریع است.

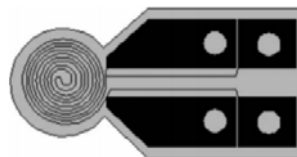
قابلیت اندازه‌گیری بازه وسیعی از رسانش‌ها (از ۰/۰۲ تا

$$\left(\frac{W}{m.k} \right) 200$$

نیازی به آماده‌سازی نمونه ندارد.

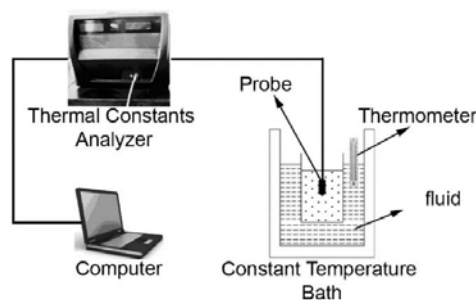
با توجه به ابعاد کوچک، بسیار انعطاف‌پذیر است.

اولین قدم در انجام آزمایش با این روش تهیه یک TPS است. TPS در واقع یک صفحه بسیار کوچک است که سیم با مقاومت گرمایی معلوم به‌صورت بسیار فشرده روی آن قرار گرفته است. برای جلوگیری از آسیب به این سیم‌های بسیار نازک معمولاً این صفحه را بین دو لایه محافظ با ضخامت بسیار کم قرار می‌دهند [۸]. نمونه‌ای از این المان را می‌توان در شکل ۳ مشاهده نمود.



شکل ۳ نمایی از TPS

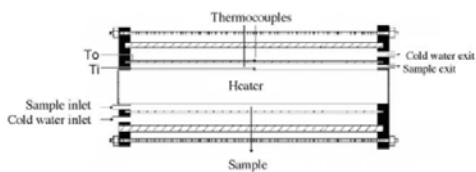
برای انجام آزمایش به این روش نیاز به یک تحلیلگر دمایی ثابت^۱، یک مخزن، یک حمام دمای ثابت و دماسنج نیاز است. مطابق شکل ۴ در یک شبکه این لوازم قرار می‌گیرد.



شکل ۴ نمایی از شبکه در روش TPS

² Convection effect
³ Geometric function

¹ Thermal constants analyzer



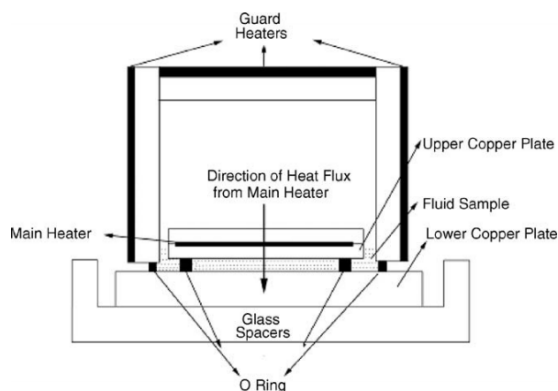
شکل ۶ نمایی از دستگاه استوانه‌ای

یک گرم‌کن الکتریکی درون سیلندر اول قرار دارد. در طول آزمایش گرما به صورت شعاعی به سمت بیرون جریان می‌یابد. این در حالی است که سیال موردنظر توسط سیال دیگری که احاطه شده در حال خنک شده است. با بررسی دمای خوانده شده توسط دماسنج‌ها می‌توان از رابطه زیر ضریب هدایت را به دست آورد. مقادیر شعاع بر اساس فاصله قرارگیری سیلندرهای یکدیگر محاسبه می‌شود. اساس کار این روش بر مبنای مبدل حرارتی لوله‌ای می‌باشد. دقت بسیار بالا و قابلیت خاص برای اندازه‌گیری ضریب هدایت در گازها از مهم‌ترین ویژگی‌های این روش آزمایش به حساب می‌آید. مهم‌ترین مشکل این روش تغییر شکل سیلندرها در طول زمان و نیز نیاز به آماده‌سازی اولیه می‌باشد [۱۴]. در شکل ۷ نمونه‌ای فواصل بین سیلندرها را مشاهده می‌کنیم.

روش ۳

مطابق روش سیم داغ، این روش نیز بر مبنای انتقال حرارت شعاعی و عملکرد همزمان به صورت گرم‌کن و دماسنج است. مهم‌ترین تفاوت این روش استفاده از پاسخ زمانی می‌باشد.

$$k = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L \left[\frac{\Delta T}{\dot{Q}_e} - \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L k_c} \right]} \quad (17)$$



شکل ۵ نمایی از دستگاه سنجش ضریب هدایت به روش صفحات موازی

عملکرد این دستگاه بر مبنای انتقال حرارت از صفحات به سیال موردنظر می‌باشد. گرمای تولیدی توسط گرم‌کن به صفحه مسی منتقل شده و صفحه‌ای گرما را به سیال انتقال می‌دهد. بر اساس انتقال حرارت صورت گرفته گرادیان دمایی اندازه‌گیری می‌شود.

$$k = \left(\frac{\dot{q} L_g}{S \Delta T} \right) \quad (15)$$

در رابطه فوق L_g ضخامت فیلم پرکننده بین دو صفحه مسی، مساحت سطح گذار است. ضریب هدایت گرمایی از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱-۱۳].

$$K_e = \left(\frac{k_s - k_g s_g}{s - s_g} \right) \quad (16)$$

در نظر گرفتن انتقال حرارت در یک بعد یکی از بزرگ‌ترین مشکلات این روش است.

روش سلول استوانه‌ای

یکی از بهترین و مورد استفاده‌ترین روش‌های اندازه‌گیری ضریب رسانش مواد روش استوانه‌ای می‌باشد. سادگی ساختار در عین دقت بالا باعث شده این روش برای تقریباً تمامی سیالات کاربرد داشته باشد. روش کار این متد انتقال حرارت بین سیلندرهایی هم‌مرکز است. ساختمان این روش از یک استوانه از جنس مس در مرکز و یک استوانه از جنس ورق گالوانیزه در بیرون آن که درون یک استوانه از جنس سرامیک و عایق تشکیل شده است. در شکل ۶ می‌توان نمونه برش خورده این سیستم را مشاهده نمود.

$$\frac{1}{q} = \left(\frac{D}{2i\omega} \right)^{0.5} \quad (19)$$

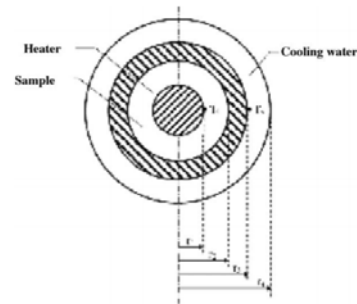
در رابطه فوق D ضریب بخش گرما در مواد است. با قرار دادن رابطه فوق در معادله ۱۸ می‌توان گرادیان دمای تولیدشده را به دست آورد (۲۰).

$$\Delta T = \frac{P}{l\pi k} \int_0^\infty \frac{\sin^2 kb}{(kb)^2 (k^2 + q^2)^{0.5}} dk \quad (20)$$

دستگاه‌هایی که بر مبنای این روش ساخته شده‌اند، بیشتر دارای ساختاری پیچیده هستند و همین موضوع این روش را برای کاربردهای آزمایشگاهی توجیه نمی‌کند. این روش تنها برای اندازه‌گیری تأثیر دما بر رسانش نانو سیالات استفاده می‌شود [۱۵، ۱۶].

۶- جمع بندی

ضریب رسانش در مواد تعیین کننده سرعت انتقال حرارت در آن ماده و خاصیتی ذاتی از ماده می‌باشد. روشهای مختلفی برای اندازه‌گیری این خاصیت وجود دارد که در شکل ۸ به طور خلاصه آمده است.

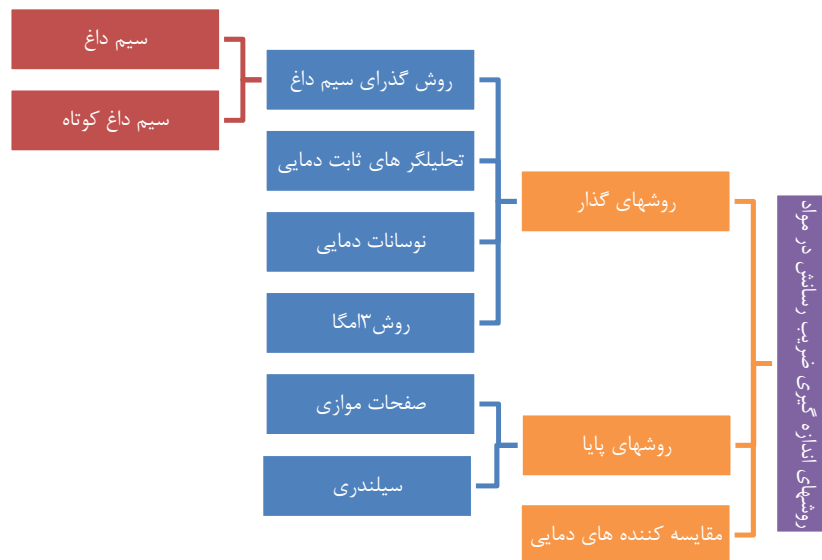


شکل ۷ نمای فواصل بین سیلندرها

یک فرکانس سینوسی الکتریکی با دامنه ω در یک سیم فلزی، تولید موج حرارتی با دامنه 2ω می‌کند که با ترکیب با دامنه الکتریکی به 3ω می‌رسد. حل دقیق در فاصله r از مرکز تولید حرارت را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد.

$$\Delta T(r) = \frac{P}{l\pi k} k_o(qr) \quad (18)$$

در رابطه فوق $\frac{P}{l}$ دامنه مولد الکتریکی، k ضریب رسان، k_o مرتبه صفر تابع بسل است. شدت این مجموعه ترکیبی برابر است با:



شکل ۸ نمایی از روش های مختلف اندازه گیری ضریب رسانش در مواد

[۲] S. E. Gustafsson, Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials, *Review of Scientific Instruments*, Vol. ۶۲, No. ۳, pp. ۸۰۴-۷۹۷, ۱۹۹۱

[۳] G. Paul, M. Chopkar, I. Manna, P. Das, Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. ۱۴, No. ۷, pp. ۱۹۲۴-۱۹۱۳, ۲۰۱۰

[۱] Y. A. Cengel, *Heat and mass transfer: a practical approach*: Boston: McGraw-Hill; ۳rd ed., ۲۰۰۷

- [۴] E. Van der Held, F. Van Drunen, A method of measuring the thermal conductivity of liquids, *Physica*, Vol. ۱۵, No. ۱۰, ۱۹۴۹
- [۵] N. B. Vargaftik, *Handbook of thermal conductivity of liquids and gases*: CRC press, ۱۹۹۳
- [۶] W. Jobst, Measurement of thermal conductivities of organic aliphatic liquids by an absolute unsteady-state method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. ۷, No. ۷, pp. ۷۳۲-۷۳۵, ۱۹۶۴
- [۷] Y. Xuan, Q. Li, Heat transfer enhancement of nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. ۲۱, No. ۱, pp. ۶۴-۵۸, ۲۰۰۰
- [۸] D. Zhu, X. Li, N. Wang, X. Wang, J. Gao, H. Li, Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of Al₂O₃-H₂O nanofluids, *Current Applied Physics*, Vol. ۹, No. ۱, pp. ۱۳۹-۱۳۱, ۲۰۰۹
- [۹] X. Wang, X. Xu, S. U. S. Choi, Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture, *Journal of thermophysics and heat transfer*, Vol. ۱۳, No. ۴, pp. ۴۸۰-۴۷۴, ۱۹۹۹
- [۱۰] W. Jiang, G. Ding, H. Peng, Measurement and model on thermal conductivities of carbon nanotube nanorefrigerants, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. ۴۸, No. ۶, pp. ۱۱۱۵-۱۱۰۸, ۲۰۰۹
- [۱۱] O. K. Bates, G. Hazzard, G. Palmer, Thermal conductivity of liquids, *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*, Vol. ۱۰, No. ۳, pp. ۳۱۸-۳۱۴, ۱۹۳۸
- [۱۲] D. Briggs, Thermal conductivity of liquids, *Industrial & Engineering Chemistry*, Vol. ۴۹, No. ۳, pp. ۴۲۱-۴۱۸, ۱۹۵۷
- [۱۳] S. H. Lin, H. Eyring, W. J. Davis, Thermal conductivity of liquids, *The Journal of Physical Chemistry*, Vol. ۶۸, No. ۱۰, pp. ۳۰۲۰-۳۰۱۷, ۱۹۶۴
- [۱۴] H. Kurt, M. Kayfeci, Prediction of thermal conductivity of ethylene glycol-water solutions by using artificial neural networks, *Applied Energy*, Vol. ۸۶, No. ۱۰, pp. ۲۲۴۸-۲۲۴۴, ۲۰۰۹
- [۱۵] D. G. Cahill, Thermal conductivity measurement from ۴۰ to ۷۵۰ K: the ω method, *Review of Scientific Instruments*, Vol. ۶۱, No. ۲, pp. ۸۰۸-۸۰۲, ۱۹۹۰
- [۱۶] W. Clark, R. Powell, Measurement of thermal conduction by the thermal comparator, *Journal of Scientific Instruments*, Vol. ۳۹, No. ۱۱, pp. ۵۴۵, ۱۹۶۲