



Design and Fabrication of a Solid Thermal Conductivity Measurement Device based on Comparative Method

Mehdi Jafari Vardanjani^{1*}, Maliheh Izadi²

¹Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

²University of Isfahan, Faculty of Geography, Department of Urban Planning, Isfahan, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 02.28.2024

Revised: 04.28.2024

Accepted: 05.11.2024

Keyword:

Heat Transfer Coefficient

Solids

Laboratory Device

Physical Parameter

*Corresponding Author:

Mehdi Jafari Vardanjani

Email: m-jafari@tvu.ac.ir

ABSTRACT

Heat transfer coefficient of solids is one of the common physical parameters which is measured to determine the degree of heat conduction or insulation of the desired material against heat. The main goal of this study was to design and fabricate a device for measuring the heat transfer coefficient of the solids based on the comparative method and its evaluation compared to the absolute method. In this device, temperature changes were recorded in the form of graphs. The conductive heat transfer coefficient of the solid samples was calculated after defining the parameters. In the hardware, electrical equipment (dimmer, temperature thermostat, microprocessor, temperature sensor, and interfaces) and mechanical equipment (aluminum heat sink, thermal insulation, steel body, and connections) were used and assembled. After designing the computer software for monitoring and calculating the conductive heat transfer coefficient, hardware and software sections were linked to make the device a functional set. According to the results obtained by testing solid specimens performed on the device, it was concluded that the performance of the device was within the error range of less than 5%. In addition, based on the temperature parameter ΔT_p , the stability of the comparative method was approximately 71% higher than the absolute method.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The conduction heat transfer coefficient of solids is one of the common physical parameters of materials, which, in addition to scientific research applications, is considered the basis of design and material selection in industries related to heat transfer. Considering the accuracy required in measuring this parameter, and the appropriate methods of different materials, the preparation of measuring devices for this parameter requires high accuracy.

In the present research, the advantages of the comparative method were considered for measuring the heat transfer coefficient of solids. The designed and fabricated hardware and software were also described. Finally, some specimens were tested in the device and the test results analyzed for two absolute and comparative methods.

Since the rate of heat passes through the standard part and the specimen in the comparative method due to the series configuration (Figure 1), the heat transfer coefficient (k) can be calculated using the following equation:

$$k = k_s \cdot \frac{A_s \cdot \Delta T_s \cdot L}{A \cdot \Delta T \cdot L_s} \quad (1)$$

where A , ΔT , and L are the area, temperature difference, and length, respectively. The "s" subscript denotes the standard part.

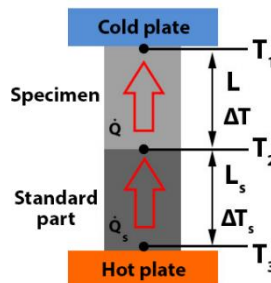


Figure 1. Comparative method configuration: A standard material (reference) with a known heat transfer coefficient is installed in series with the specimen and the heat transfer coefficient is measured.

Methodology

Figure 2 (a) depicts the exploded view of the device. The logical connection of the hardware and software components of the device is presented in the flowchart in Figure 2 (b). The designed hardware in addition to the software were designed to monitor and record the temperature variations while all data was recorded in the database for calculations and analyses.

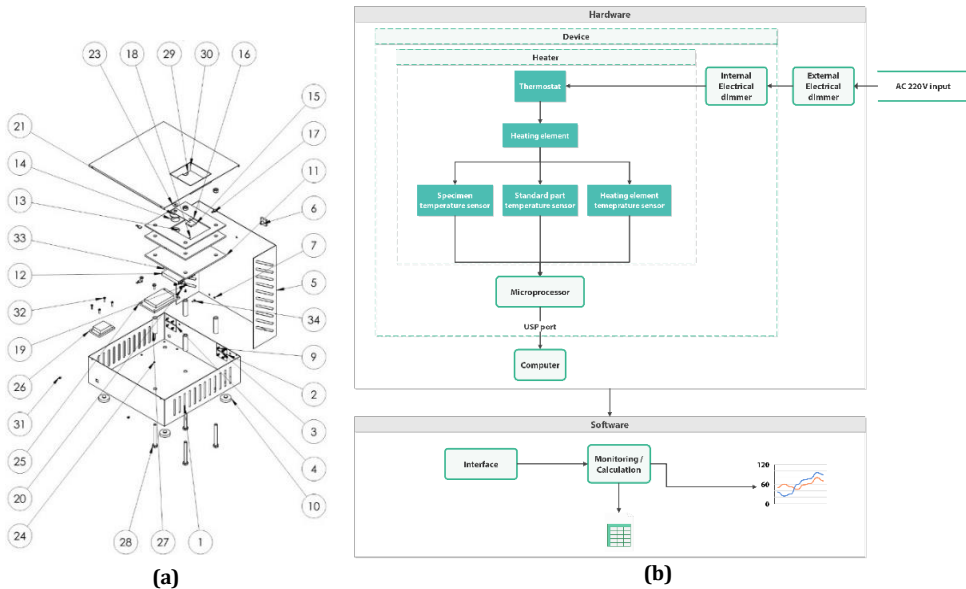


Figure 2. (a) Exploded view of the device designed; (b) the relationship of the hardware and software components of the device.

In order to evaluate the performance of the device and compare the two methods, 5 specimens were examined. The dimensions of the specimens were all $30 \times 30 \times 3 \text{ mm}^3$. The test was conducted at an ambient temperature of $25 \text{ }^\circ\text{C}$, during 200 s in order to achieve temperature equilibrium.

Results and discussion

Considering the results obtained in Figure 3, it was concluded that the comparative method, by removing the errors related to the environment, the material of the hot plate, and the power consumption of the device provides more accurate results than the absolute method. However, by comparing Figure 3 (a) and (b), the instability of the temperature values obtained in the absolute method can be observed compared to the comparative method. This implies the lesser temperature stability of the absolute method in the measured time period compared to the comparative method. This is corrected in the comparative method on both scales. In order to quantitatively investigate this issue, the parameter ΔT_V was designated as follows:

$$\Delta T_V = \frac{|\Delta T_{Max} - \Delta T_{Min}|}{\Delta t} \tag{2}$$

where ΔT_{Max} is the maximum temperature difference and ΔT_{Min} is the minimum temperature difference in the time period Δt . As a result, less ΔT_V is interpreted as the higher accuracy of this method. As can be observed in Figure 4, the value of ΔT_V for all samples is lower in the comparative method than in the absolute method. The average value obtained for the comparative method is equal to 0.064 and for the absolute

method equal to 0.22. Assuming ΔT_V as term for stability of the measurement method, this value difference shows that the comparative method is 71% more stable than the absolute method.

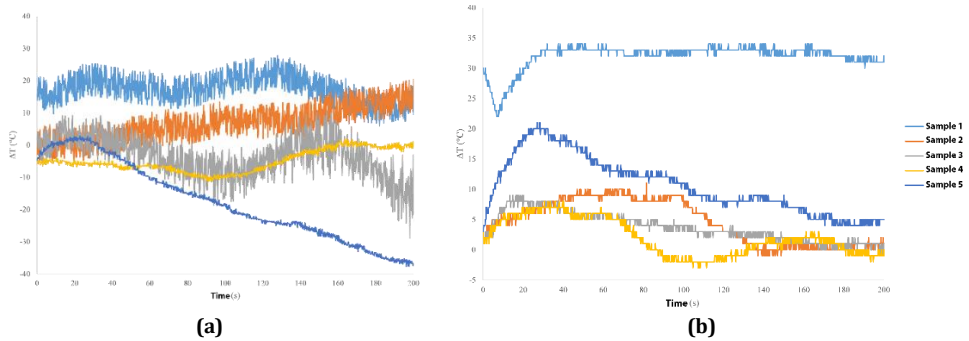


Figure 3. Temperature difference graph obtained in the (a) absolute and (b) comparative methods.

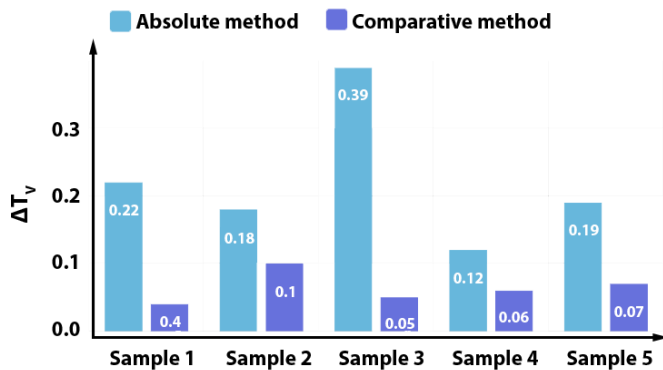


Figure 4. Comparison of ΔT_V parameter in absolute and comparative methods for 5 specimens.

Conclusion

In the current study, the process of designing and manufacturing a device for measuring the heat transfer coefficient of solids based on the comparative method was explained while compared to the absolute method. Based on the results and analysis of the comparison of available values, it was concluded that the performance of the device was within the error range of less than 5%. Furthermore, the stability and repeatability of the comparative measurement method used was 71% higher with regard to the ΔT_V parameter.



دانشگاه فنی و حرفه‌ای
تفصیلی تهران

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

بهار ۱۴۰۳، دوره ۱، شماره ۱، ۱۲۲-۱۰۳

آدرس نشریه: <https://jssc.tvu.ac.ir/>

doi:10.48301/2024.446134.1010



طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارتی جامدات بر اساس روش مقایسه‌ای

مهدی جعفری وردنجانی^{۱*}، ملیحه ایزدی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- مدرس و محقق پسادکتری، گروه برنامه‌ریزی شهری، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، ایران.

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۰۹

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲

کلید واژگان:

ضریب انتقال حرارت

جامدات

دستگاه آزمایشگاهی

پارامتر فیزیکی

ضریب انتقال حرارت جامدات، یکی از پارامترهای متداول فیزیکی مواد است که برای تشخیص میزان هدایت حرارتی یا میزان عایق‌بودن جنس موردنظر در مقابل حرارت اندازه‌گیری می‌شود. هدف اصلی این مطالعه، طراحی، ساخت و بررسی عملکرد دستگاه اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارتی جامدات بر اساس روش مقایسه‌ای و ارزیابی آن نسبت به روش مطلق می‌باشد. این دستگاه با قابلیت تنظیم روی دو وضعیت مطلق و مقایسه‌ای، امکان این ارزیابی و مقایسه را فراهم کرده است. در این دستگاه، تغییرات دما به‌صورت نمودار ثبت شده، با تعریف پارامترهای مستقیم، امکان محاسبه ضریب انتقال حرارت نمونه جامد فراهم شده است. در بخش سخت‌افزاری، تجهیزات الکترونیکی (دیمر، ترموستات دمایی، ریزپردازنده، حسگر دمایی و رابط‌ها) و مکانیکی (دافع حرارت آلومینیومی، عایق‌های حرارتی، بدنه فولادی و اتصالات) مورد استفاده قرار گرفته است. پس از طراحی بخش نرم‌افزاری برای نظارت و محاسبه ضریب انتقال حرارت رسانی، دو بخش سخت‌افزاری و نرم‌افزاری با یکدیگر مرتبط و هماهنگ‌سازی شده‌اند تا دستگاه به‌صورت یک بسته کاربردی ارائه شود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش نمونه‌های جامد انجام‌شده با دستگاه ارائه شده و مقایسه و تحلیل آنها نسبت به مقادیر موجود در منابع، این نتیجه به‌دست آمد که عملکرد دستگاه در بازه خطایی کمتر از ۵ درصد واقع شده است. همچنین بر اساس پارامتر دمایی ΔT_V مشخص شد که پایداری روش مقایسه‌ای به‌کارگرفته‌شده تا حدود ۷۱ درصد بالاتر از روش مطلق می‌باشد.

***نویسنده مسئول:** مهدی جعفری وردنجانی

پست الکترونیکی:

m-jafari@tvu.ac.ir



©2024 the authors. Published by Technical and Vocational University, Tehran, Iran.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

مقدمه

ضریب انتقال حرارت رسانشی جامدات، یکی از پارامترهای متداول فیزیکی در مواد به‌شمار می‌رود که در مباحث علمی-پژوهشی و صنعتی مورد توجه قرار دارد. با توجه به دقت موردنیاز در اندازه‌گیری این پارامتر و روش‌های مختلف مختص مواد، طراحی و ساخت دستگاه‌های اندازه‌گیری این پارامتر دقت بالایی را می‌طلبد. همچنین انتخاب یک روش اندازه‌گیری مناسب برای انجام آزمایش اندازه‌گیری این پارامتر نیاز به بررسی موارد مختلفی دارد که سه مورد مهم آن در اینجا اشاره شده است:

- ۱- اطلاعات نمونه‌ای که ویژگی‌های حرارتی- فیزیکی آن باید تعیین شود که شامل هندسه نمونه و روش تهیه مواد می‌شود.
- ۲- اصول و رویه آزمایش که مربوط به ویژگی‌های فیزیکی (مایع، جامد، گاز) می‌شوند.
- ۳- شناخت منابع خطای احتمالی که ممکن است نتایج نهایی را تحت تأثیر قرار دهد (اتلاف حرارتی همرفت و تابش).

آنچه طبق مطالعات انجام‌شده تا به حال مشخص شده است این است که به‌طور کلی تکنیک‌های اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند: روش‌های حالت پایدار و ناپایدار (گذرا). در روش حالت پایدار یک اختلاف دمای ثابت روی نمونه ایجاد می‌شود در حالی که در روش گذرا اتلاف انرژی نمونه اندازه‌گیری می‌شود (همیلتون و کروسر، ۱۹۶۲؛ لی و یو، ۲۰۲۲؛ رضوی دهکردی و همکاران، ۲۰۲۳؛ تریت، ۲۰۲۳؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۲۴).^۱ با توجه به اینکه پارامترهای جنس، پیکربندی نمونه و محدوده دمای قابل‌اندازه‌گیری، مزایا و محدودیت‌های خاصی برای این روش‌ها فراهم می‌آورد، تلاش‌های وسیعی در راستای دستیابی به بهترین نتیجه در زمینه پارامترهای رسانش حرارتی و مقاومت تماسی حرارتی به کمک این دو روش روی مواد صورت گرفته است (کرمس و همکاران، ۱۹۹۰؛ همیلتون و کروسر، ۱۹۶۲؛ مدهوسودانا، ۲۰۱۴؛ تریت، ۲۰۰۵).^۲ روش‌های گذرا شامل تکنیک‌های توان پالسی (ملدونادو، ۱۹۹۲)^۳ برگرفته از روش آنگستروم^۴ (ساندکویست، ۱۹۹۱)^۵، تکنیک مفتول گرم (تیان، ۲۰۱۴)^۶، تکنیک منبع صفحه‌ای ناپایدار (موسسه آزمون و مواد آمریکا، ۲۰۲۱)^۷ و تکنیک پرتوی لیزر برای نفوذ حرارتی (مین و همکاران، ۲۰۰۷؛ پارکر و همکاران، ۱۹۶۱)^۸ می‌شود.

آنچه در این مطالعه مد نظر قرار داده شده است روش پایدار است که خود شامل چهار شیوه مطلق، مقایسه‌ای، شار شعاعی و تکنیک شار موازی می‌شود (فلیضی، ۲۰۲۳؛ اوتارو و آیوتا، ۲۰۲۴؛ ژائو و همکاران، ۲۰۱۶).^۹ عمل اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جامدات برای ضخامت‌های مختلف نمونه‌های جامد از چند نانومتر تا چند سانتی‌متر انجام شده است که در راستای بهبود عملکرد صناعی چون ریزپردازنده‌ها (ماچلین، ۲۰۱۰)^{۱۰}، اپتیک (لی، ۲۰۱۴)^{۱۱}، سلول‌های خورشیدی (دریسلهاوس و همکاران، ۲۰۰۷)^{۱۲} و سایر موارد بوده است. تحقیقات انجام‌شده در ۳۰ سال گذشته در زمینه

¹ Hamilton & Crosser; Li & Yu; Tritt; Zhang

² Cremers; Madhusudana

³ Maldonado

⁴ Angstrom

⁵ Sundqvist

⁶ Tian

⁷ American Society for Testing and Materials

⁸ Min; Parker

⁹ Otaru & Auta; Zhao

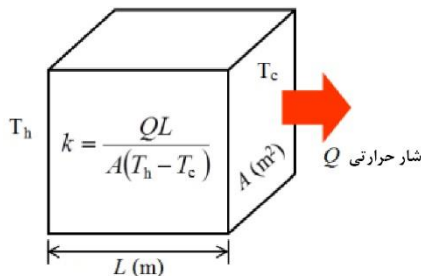
¹⁰ Machlin

¹¹ Lee

¹² Dresselhaus

انتقال حرارت فیلم‌های نازک نیز پیشرفت‌های وسیعی را جهت اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت این نوع مواد فراهم آورده است (مرکنت و همکاران، ۲۰۱۳؛ شی و همکاران، ۲۰۱۵؛ توبرر و همکاران، ۲۰۱۲).^۱ روش‌های اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت فیلم نازک شامل تکنیک‌های اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت قائم بر صفحه، تکنیک اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت داخل صفحه (ولکلین و همکاران، ۲۰۱۳)،^۲ تکنیک 3ω (کهیل، ۱۹۹۰؛ کهیل، ۱۹۸۹)^۳ و تکنیک بازتاب حرارتی ناپایدار (روزنکوویگ، ۱۹۸۲؛ روزنکوویگ و گرشو، ۱۹۷۶)^۴ می‌شود. از آن‌جا که بررسی ضریب انتقال حرارت فیلم‌های نازک روابط متفاوتی را می‌طلبد، در این مطالعه به بررسی نمونه‌هایی با ضخامت‌های بالاتر پرداخته شده است. از آن‌جا که دستگاه تشریح‌شده در مطالعه حاضر بر اساس روش پایدار مقایسه‌ای برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت رسانشی عمل می‌کند، مقایسه عملکرد این روش، نسبت به شیوه پایدار مطلق اهمیت پیدا می‌کند؛ بنابراین در اینجا اصول کار روش مطلق و مقایسه‌ای تشریح می‌شود.

اصول انتقال حرارت رسانشی تک‌بعدی پایدار داخل جامدات در شکل به صورت شماتیک نشان داده شده است که در آن Q به‌عنوان انرژی حرارتی منتقل شده از طول یا ضخامت L در جهت قائم به یک سطح A ، تحت یک اختلاف دمای ثابت $T_h - T_c$ می‌باشد. مقدار ضریب هدایت حرارتی یک ماده جامد می‌تواند با توجه به جنس موردبررسی بین مقدار $0.015 \frac{W}{m \cdot K}$ (آئروژل) تا $3000 \frac{W}{m \cdot K}$ (گرافن تک‌لایه) در دمای اتاق قرار گیرد. این اصل در هر دو روش مطلق و مقایسه‌ای صادق بوده، تفاوت این دو روش در زیر اشاره شده است:



شکل ۱. نمایش رسانایی گرمایی یک ماده جامد با استفاده از قانون هدایت گرما توسط قانون فوریه^۵؛ دما در سمت چپ و راست نمونه به ترتیب T_h و T_c ، و سطح مقطع انتقال حرارت A می‌باشد. جریان حرارت یک‌بعدی و بدون اتلاف گرمای جانبی فرض شده است.

روش مطلق

این روش عمدتاً برای نمونه‌های مکعبی یا استوانه‌ای استفاده می‌شود. نمونه طبق شکل بین صفحه گرم و دافع حرارت قرار می‌گیرد. در این روش نمونه توسط یک منبع حرارتی، مثل گرم‌کن الکتریکی، با توان ورودی مشخص گرم شده، افت دمای حاصل، در زمان پایداری دما به کمک حسگرهای دما اندازه‌گیری می‌شود. در این وضعیت ضریب رسانایی حرارت طبق رابطه فوریه^۶ (تویت، ۲۰۰۵) به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

¹ Marconnet; Shi; Toberer

² Völklein

³ Cahill; Cahill

⁴ Rosencwaig; Rosencwaig & Gersho

⁵ Fourier law

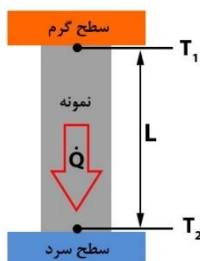
⁶ Fourier

$$k = \frac{\dot{Q}L}{A\Delta T} \quad (1)$$

که در آن L ضخامت نمونه، ΔT تفاضل دمای دو حسگر، A سطح مقطع نمونه، و \dot{Q} توان مؤثر حرارتی گرم‌کن است، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{Q} = P - \dot{Q}_L \quad (2)$$

که در آن P توان حرارتی اعمال‌شده روی گرم‌کن و \dot{Q}_L اتلاف حرارتی ناشی از همرفت و تشعشع است.



شکل ۲. پیکربندی روش مطلق: نمونه بین یک منبع حرارتی و یک دافع حرارت قرار گرفته، توان خروجی مشخص است. افت دمای ایجادشده در راستای ضخامت نمونه اندازه‌گیری می‌شود.

معضل اصلی در روش مطلق، تشخیص نرخ انتقال حرارت در نمونه است که این امر به دلیل وجود اتلاف حرارتی محیطی دشوارتر هم خواهد بود. عموماً این اتلاف باید کمتر از ۲ درصد کل توان حرارتی انتقالی باشد. به‌منظور کاهش این نوع اتلاف، معمولاً در محیط مورد‌آزمایش خلأ ایجاد می‌کنند که خود هزینه‌بر خواهد بود. استانداردهای این روش شامل ASTM C1۷۷ و EN ۱۲۶۶۷ است. بنابراین در مجموع، محدودیت‌های روش مطلق شامل موارد زیر خواهد بود:

- ۱- دشواری اندازه‌گیری دقیق توان حرارتی عبورکننده
- ۲- ابعاد نمونه و افت دمای ایجادشده باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا خطای ایجادشده قابل چشم‌پوشی باشد.

روش موازی

در این روش که یکی دیگر از انواع روش مطلق ابداعی (زویلسکی و همکاران، ۲۰۰۱)^۱ است، نمونه‌های سوزنی شکل تحت بررسی قرار می‌گیرند. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، در این روش یک عضو نگهدارنده بین منبع حرارتی و دافع حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین پیش از انجام عمل اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی، انتقال حرارت این عضو نگهدارنده به‌منظور تعیین اتلاف حرارت ناشی از این عضو، اندازه‌گیری می‌شود. سپس نمونه متصل‌شده، عمل اندازه‌گیری مجدداً صورت می‌گیرد. به این ترتیب ضریب انتقال حرارت نمونه با محاسبه تفاضل این دو مقدار به‌دست می‌آید. بنابراین نیاز به محاسبه سطح مقطع نمونه برای انجام این محاسبه نیز می‌باشد. در مجموع، محدودیت‌های روش موازی شامل موارد زیر خواهد بود:

- ۱- نیاز به تکرار عمل اندازه‌گیری برای هر نمونه، برای محاسبه ضریب انتقال حرارت رسانشی

¹ Zawilski

۲- نیاز به محاسبه سطح مقطع نمونه سوزنی شکل که احتمال بروز خطا را در محاسبه بالا می‌برد.

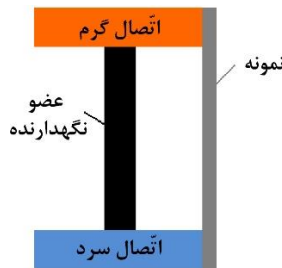
روش شعاعی

سایر روش‌های مذکور برای محدوده‌های دمایی نسبتاً پایین مناسب است اما محدوده‌های دمایی بالا (1000 K و بیشتر) را نمی‌توان به دلیل اتلاف حرارتی قابل توجه ناشی از تابش، به کمک روش‌های فوق برای بررسی ضریب انتقال حرارت مورد استفاده قرار داد. از این رو فلین^۱ (مگلیک و همکاران، ۱۹۸۴)^۲ برای غلبه بر این مشکل از شار حرارتی شعاعی در نمونه‌های استوانه‌ای استفاده کرده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود نمونه از داخل گرم شده، شیب دمایی ثابتی در جهت شعاعی ایجاد می‌شود. به این ترتیب می‌توان از رابطه زیر برای محاسبه ضریب انتقال حرارت رسانشی استفاده کرد:

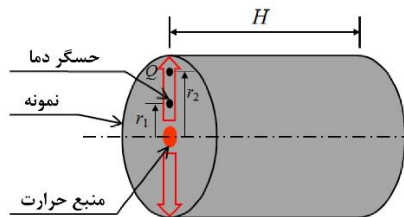
$$k = \frac{Q \cdot \ln(r_2/r_1)}{2\pi H \cdot \Delta T} \quad (3)$$

که در آن r_2 و r_1 شعاع مربوط به موقعیت حسگرهای دمایی و H ارتفاع نمونه است. در مجموع، محدودیت‌های روش شعاعی شامل موارد زیر می‌شود:

- ۱- همان‌طور که در این پیکربندی (شکل) نمونه مورد بررسی باید به شکل استوانه باشد.
- ۲- طبق رابطه (۳)، نیاز به محاسبه Q می‌باشد که بنابراین این روش را در گروه روش‌های مطلق قرار می‌دهد.



شکل ۳. پیکربندی روش موازی.



شکل ۴. پیکربندی روش شعاعی.

¹ Flynn

² Maglič

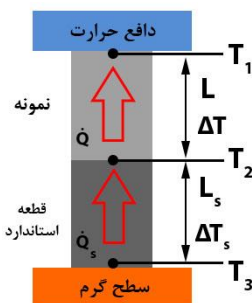
روش مقایسه‌ای

در این روش به‌واسطه وجود یک قطعه استاندارد (مرجع) با ضریب انتقال حرارت رسانایی معلوم، ضرورت اندازه‌گیری نرخ انتقال حرارت از نمونه از بین می‌رود. همان‌طور که در شکل نمایش داده شده است از سه حسگر برای اندازه‌گیری اختلاف دمای نمونه و قطعه استاندارد استفاده شده است. از آن جایی که نرخ حرارت عبوری از قطعه استاندارد و نمونه (با توجه به پیکربندی سری) برابر است، ضریب انتقال حرارت را می‌توان به کمک رابطه زیر محاسبه کرد:

$$k = k_s \cdot \frac{A_s \cdot \Delta T_s \cdot L}{A \cdot \Delta T \cdot L_s} \quad (۴)$$

که در آن زیرنویس S نمایانگر قطعه استاندارد است. در روش مقایسه‌ای نه تنها نیازی به محاسبه نرخ انتقال حرارت عبوری از قطعه نیست بلکه خطای ناشی از محاسبه این پارامتر از بین می‌رود.

در مطالعه حاضر پس از بررسی و مقایسه دو روش کلی مقایسه‌ای و مطلق در اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جامدات، برتری‌های روش مقایسه‌ای مد نظر قرار داده شده، نحوه به‌کارگیری آن در دستگاه موردنظر اشاره شده است. سپس سخت‌افزار و نرم‌افزار طراحی و ساخته شده مورد تشریح قرار گرفته است. در پایان نیز چند نمونه آزمایشی در دستگاه ارائه شده آزمایش شده و نتایج آزمایش برای دو روش مطلق و مقایسه‌ای تحلیل شده است.

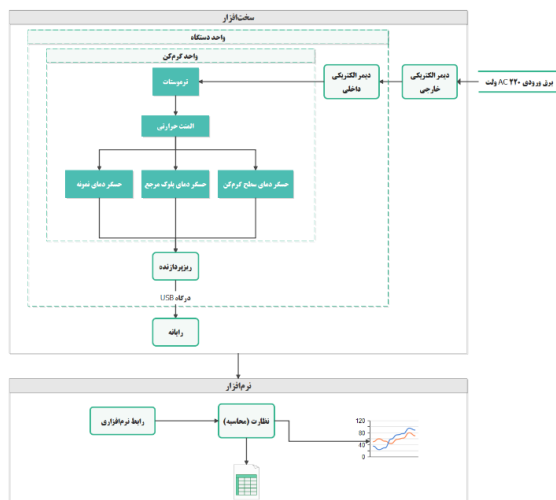


شکل ۵. پیکربندی روش مقایسه‌ای: یک جنس استاندارد (مرجع) با ضریب انتقال حرارت رسانشی معلوم، به‌طور سری با نمونه نصب می‌شود و عمل اندازه‌گیری و محاسبه ضریب انتقال حرارت انجام می‌شود.

روش کار

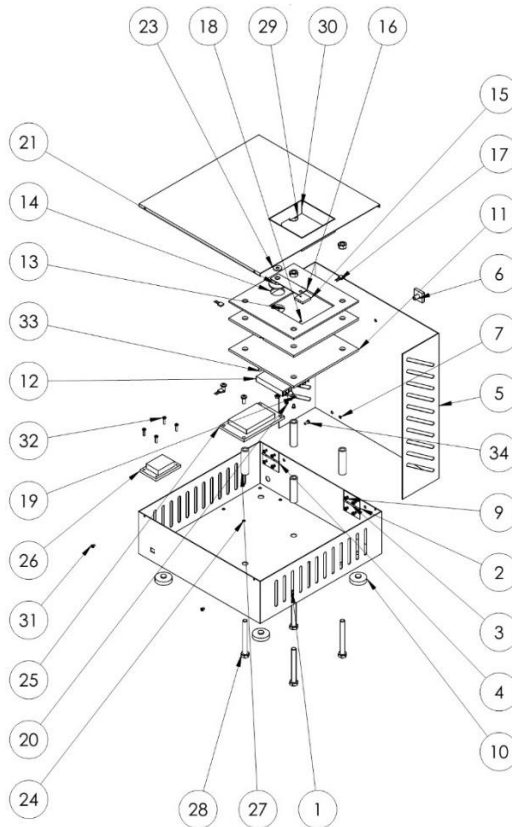
سخت‌افزار

شکل ۶ نمای انفجاری دستگاه را که شامل قطعات مذکور در سعی شده است تا در دستگاه ارائه شده (شکل) علاوه بر حفظ ایمنی الکتریکی و حرارتی با به‌کارگیری عایق‌های مناسب، قابلیت حمل، داده‌برداری کامپیوتری، و امکان تولید انبوه آن فراهم آید.



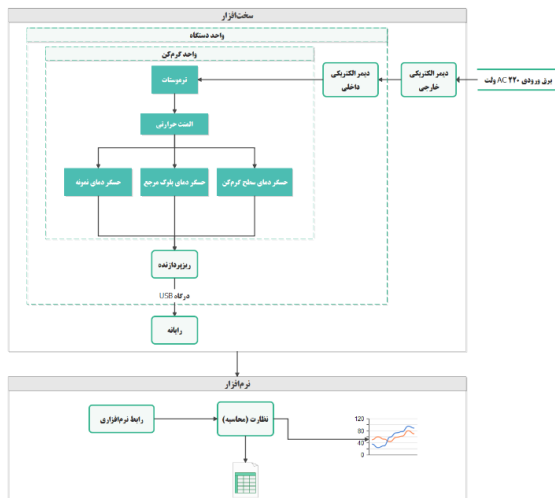
شکل ۷. ارتباط منطقی اجزای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری دستگاه.

جدول می‌باشد، نشان می‌دهد. نحوه عملکرد دستگاه به این صورت است که المنت حرارتی (قطعه شماره ۱۱) که توان مصرفی آن به کمک دیمر داخلی (قطعه شماره ۲۵) و دمای حداکثر آن به کمک ترموستات (قطعه شماره ۱۹) روی محدوده 80°C تا 90°C تنظیم می‌شود، شروع به کار می‌کند و دمای موردنظر را ایجاد می‌کند. سطوح فوقانی و تحتانی قطعه مرجع (قطعه شماره ۱۳) نیز در این موقعیت روی دمای معین ثابت شده، نمونه به کمک زیرمجموعه نگهدارنده نمونه (قطعات شماره ۱۵، ۱۶ و ۲۱) روی صفحه مرجع (قطعه شماره ۱۳) به یک دمای ثابت می‌رسد. پس از پایداری دما، ضریب انتقال حرارت رسانشی نمونه به کمک رابطه (۳)، با توجه به پارامترهای مساحت، ضخامت و تفاضل دمایی نمونه و قطعه مرجع و ضریب انتقال حرارت رسانشی قطعه مرجع محاسبه می‌شود. شایان ذکر است که زمان دستیابی تعادل (زمان پایداری) در نرم‌افزار قابل تنظیم است. در طول این فرایند، هر سه دمای T_1 تا T_3 به کمک حسگرهای دمایی مماسی (قطعه شماره ۱۷) اندازه‌گیری و ثبت شده است که این کار از طریق ریزپردازنده (قطعه شماره ۲۶) و ارتباط با کامپیوتر انجام می‌شود. ارتباط منطقی اجزای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری دستگاه در فلوچارت شکل ارائه شده است.



شکل ۶. نمای انفجاری دستگاه طراحی و ساخته شده برای اندازه گیری ضریب انتقال حرارت جامدات به روش مقایسه ای.

سعی شده است تا در دستگاه ارائه شده (شکل) علاوه بر حفظ ایمنی الکتریکی و حرارتی با به کارگیری عایق های مناسب، قابلیت حمل، داده برداری کامپیوتری، و امکان تولید انبوه آن فراهم آید.



شکل ۷. ارتباط منطقی اجزای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری دستگاه.

جدول ۱. اجزای دستگاه مورد مطالعه (شکل ۶).

شماره عضو	عنوان عضو
۱	بدنه (جزء تحتانی)
۲	لولا (جزء ۱)
۳	لولا (جزء ۲)
۴	پین لولا
۵	بدنه (جزء فوقانی)
۶	دستگیره
۷	ISO ۷۰۴۵ - M۳ x ۶ - Z - ۶N
۸	ISO ۷۰۹۳ - ۳ - ISO واشر
۹	ISO - ۴۰۳۶ - M۲ - N
۱۰	پایه
۱۱	المنت حرارتی
۱۲	دافع حرارت
۱۳	بلوک مرجع
۱۴	عایق فوقانی گرم‌کن
۱۵	کلگی تجهیز نگهدارنده حسگر
۱۶	پایه تجهیز نگهدارنده حسگر
۱۷	حسگر دما
۱۸	ISO ۴۷۶۲ M۲ x ۶ - ۶N
۱۹	ترموستات
۲۰	ISO ۷۰۴۵ - M۳ x ۵ - Z - ۵N
۲۱	فاصله‌دهنده گرم‌کن

شماره عضو	عنوان عضو
۲۲	ISO ۴۰۱۵ - M۵ x ۲۵ x ۱۶ - N
۲۳	ISO ۷۰۹۳ - ۵ و اشرف
۲۴	ISO - ۴۰۳۶ - M۵ - N
۲۵	واحد دیمر الکتریکی داخلی
۲۶	واحد ریزپردازنده
۲۷	بوش نگه‌دارنده
۲۸	ISO ۴۰۱۶ - M۸ x ۷۰ x ۲۲ - WN
۲۹	ISO - ۴۰۳۲ - M۸ - W - N
۳۰	بدنه (جزء میانی)
۳۱	ISO ۷۰۴۵ - M۳ x ۴ - Z - ۴N
۳۲	ISO ۷۰۴۵ - M۳ x ۱۲ - Z - ۱۲N
۳۳	ISO ۷۰۴۵ - M۳ x ۱۲ - Z - ۱۲N
۳۴	ISO ۷۰۴۵ - M۳ x ۸ - Z - ۸N



شکل ۸. نمای خارجی دستگاه به همراه کابل‌های اتصال و تغذیه.

نرم‌افزار

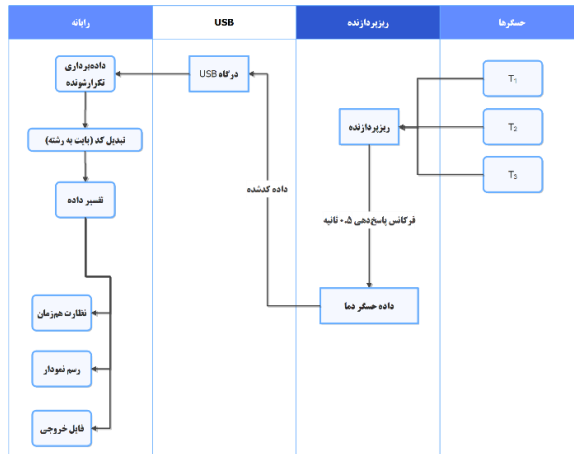
بسته نرم‌افزاری تحت عنوان سامانه هوشمند اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت رسانشی^۱ در بستر ویندوز و به زبان برنامه‌نویسی C#، در قالب یک نرم‌افزار کاربردی^۲ طراحی و ارائه شده است. داده‌های موردنیاز بخش نرم‌افزار در ابتدا توسط حسگرهای دمای تماسی به داده‌های الکتریکی (ولتاژ) تبدیل شده، سیگنال‌های تولیدشده وارد ریزپردازنده می‌شوند. ریزپردازنده مقادیر دریافتی را به داده‌های بایتهی تبدیل می‌کند. داده‌های بایت از طریق خروجی ریزپردازنده، با فرکانس پاسخ ۰/۵ ثانیه وارد کامپیوتر می‌شود. در نرم‌افزار طراحی‌شده، داده‌های بایتهی پس از کدگشایی به رشته، و پس از آن به مقادیر عددی دسیمال^۳ تبدیل می‌شوند. این مقادیر با فرکانس پاسخ ۰/۱ ثانیه خوانده شده، در قالب داده‌های

^۱ Smart system (Thermal Conductivity Coefficient Indicator)

^۲ Application

^۳ Decimal

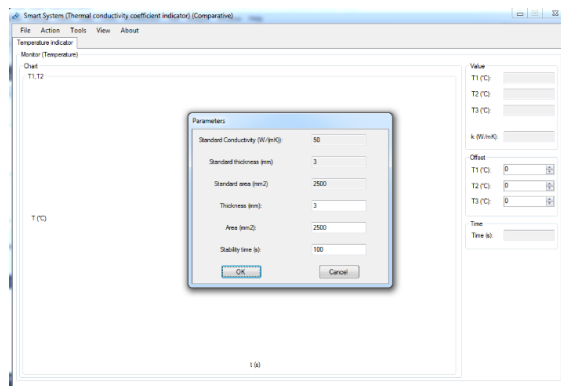
عددی، نمودار و در نهایت فایل قابل استفاده در نرم‌افزار پردازشگر کاربرد تبدیل می‌شوند. دیگرام بلوکی این فرایند در شکل نمایش داده شده است. رابطه مورد استفاده برای محاسبه ضریب انتقال حرارت رسانش (روابط (۱)، (۲)، و (۴)) در نرم‌افزار گنجانده شده است. همچنین پارامترهای موجود در این رابطه شامل ضخامت قطعه، مساحت قطعه، و زمان پایداری قابل تنظیم است (شکل). شکل نمونه‌ای از نمودار ارائه شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد. شکل قابلیت تنظیم نرم‌افزار را روی دو وضعیت مطلق و مقایسه‌ای نشان می‌دهد. **Error! Reference source not found.** نمونه‌ای از فایل گزارش استخراج شده را شامل پارامترهای تعریف شده و محاسبه شده به همراه داده‌های دمای تماسی و نمودار مبتنی بر آنها نشان می‌دهد.



شکل ۹. دیگرام بلوکی عملیات نرم‌افزار.

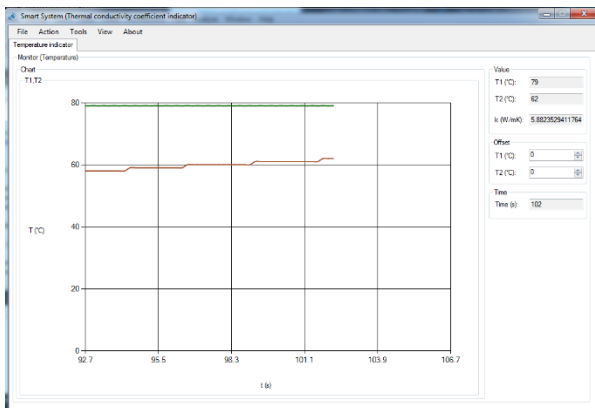
آزمایش‌ها

برای ارزیابی عملکرد دستگاه و مقایسه دو روش، آزمایش اندازه‌گیری و محاسبه ضریب انتقال حرارت برای ۵ نمونه با جنس‌های مختلف، برای هر دو وضعیت مطلق و مقایسه‌ای انجام شد. ابعاد این نمونه‌ها همگی به صورت یکسان و برابر $30 \times 30 \times 3 \text{ mm}^3$ در نظر گرفته شد. مقدار ضریب انتقال حرارت اسمی هر یک از این نمونه‌ها در **Error!** *Reference source not found.* اشاره شده است.

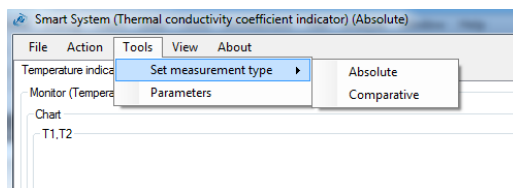


شکل ۱۰. پارامترهای قابل تنظیم نرم‌افزار در حالت مقایسه‌ای.

آزمایش در دمای محیط 25°C انجام شد و زمان انجام این آزمون برای تمام نمونه‌ها برابر 200 s در نظر گرفته شده است تا تعادل دمایی با توجه به پیکربندی دستگاه به دست آید.



شکل ۱۱. نمودار ثبت تغییرات دما در نرم‌افزار در حین داده‌برداری و محاسبه پارامتر ضریب انتقال حرارت (k).



شکل ۱۲. قابلیت تنظیم نرم‌افزار برای دو پیکربندی مطلق و مقایسه‌ای دستگاه.

جدول ۱. ضریب انتقال حرارت اسمی نمونه‌های تحت آزمایش.

نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵	k
۱۰	۵۶	۴۸	۶۳	۹	

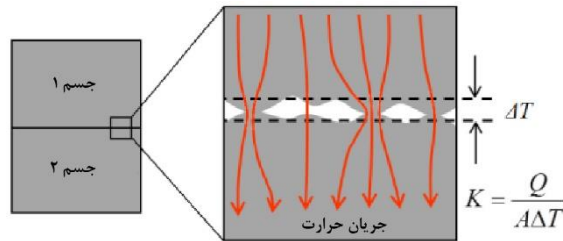
از موارد مهمی که در بحث آزمایش‌ها مد نظر قرار داده شده است، افت دمای ایجادشده در سطح تماس جامدات به دلیل ناهمواری سطوح بین آنها می‌باشد زیرا به‌طور کلی طبق شکل تماس اتمی کامل بین سطوح مواد جامد غیرممکن است. همچنین هدایت حرارتی تماسی تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند زبری سطح، سختی سطح، ناخالصی‌ها، آلودگی‌ها و فشار تماس قرار دارد (سویجا و همکاران، ۲۰۰۳)^۱. بنابراین از آنجایی که شرایط سطح تماس در روش‌های اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت از اهمیت بالایی برخوردار است، باید تماس کافی بین حسگرها و سطح نمونه یا مرجع برقرار باشد. بنابراین سعی شده است تا علاوه بر حفظ پاکیزگی سطح تماس قطعه مرجع، صافی سطح آن نیز در حد استاندارد قرار گیرد. شایان ذکر است که بخش نگهدارنده نمونه نیز طراحی شده است که فشار لازم را برای حفظ تماس حسگر

¹ Savija

فوقانی و سطح مرجع ایجاد کند. البته باید توجه کرد که شرایط نمونه از لحاظ کیفیت تماس (صافی سطح، پاکیزگی، ...)، باید در هنگام تهیه نمونه مورد آزمایش فراهم شود.

نتایج و بحث

نتایج کلی به‌دست‌آمده برای انجام آزمایش روی ۵ نمونه با جنس مختلف در جدول اشاره شده است. شکل و شکل منحنی اختلاف دمایی به‌دست‌آمده از حسگرهای طرفین نمونه را برای این آزمایش‌ها، در هر دو روش مطلق و مقایسه‌ای نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. رسانایی حرارتی تماسی در تماس بین دو جسم جامد که تحت تأثیر شرایط تماس سطحی زبری سطح قرار دارد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در شکل و شکل و مواد مورد استفاده در نمونه‌ها و مقادیر مربوط به ویژگی‌های فیزیکی جنس مورد استفاده، این نتیجه به‌دست می‌آید که روش مقایسه‌ای به‌واسطه حذف خطاهای مربوط به تأثیر محیط آزمایش، جنس صفحه المنت حرارتی و توان مصرفی دستگاه، نتایج دقیق‌تری را نسبت به روش مطلق ارائه می‌دهد. این مسئله با بررسی نتایج

جدول مشاهده می‌شود. همان‌طور که نتایج کمی

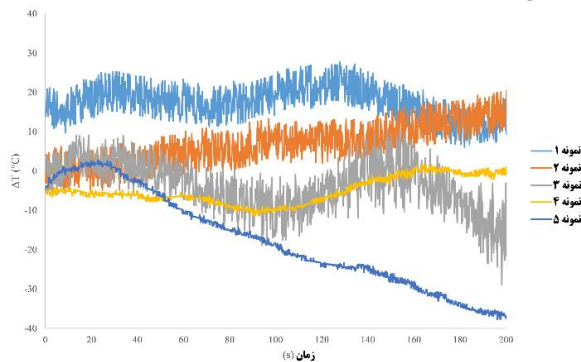
جدول نشان می‌دهد، مقادیر نتایج روش مقایسه‌ای به مقادیر اسمی ضریب انتقال حرارتی هر یک از نمونه‌ها نسبت به روش مطلق نزدیک‌تر است. از سوی دیگر با مقایسه شکل و شکل، ثبات پایین مقادیر دمایی به‌دست‌آمده در روش مطلق، هم در مقیاس ماکروسکوپی (به‌صورت انحراف دمایی بلندمدت)، و هم در مقیاس ریز به‌صورت نوسان‌های کوتاه‌مدت، نسبت به روش مقایسه‌ای دیده می‌شود. این به معنای پایداری دمایی کمتر روش مطلق در بازه زمانی مورد اندازه‌گیری، نسبت به روش مقایسه‌ای می‌باشد. این امر در روش نسبی (شکل ۱)، در هر دو مقیاس اصلاح شده است. از دلایل مهم این امر می‌توان به حذف اثر شرایط محیطی و یکسان بودن قطعه مرجع در تمام اندازه‌گیری‌ها اشاره کرد. برای بررسی کمی این موضوع، پارامتر ΔT_V ، با عنوان تغییرات تفاضل دما به‌صورت زیر تعریف شده است.

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های روش مطلق و نسبی برای ۵ نمونه (k_A : ضریب انتقال حرارت رسانشی در روش مطلق، k_C : ضریب انتقال حرارت رسانشی در روش نسبی (مقایسه‌ای)، k : ضریب انتقال حرارت اسمی نمونه (اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه))

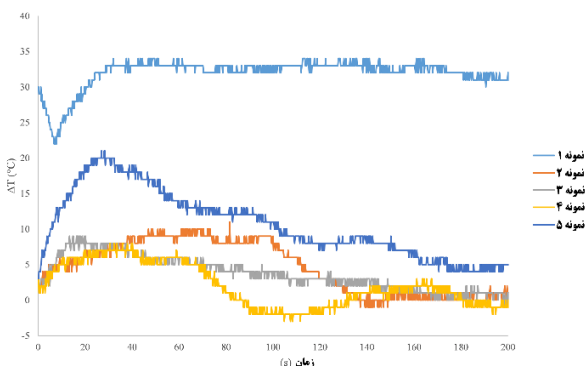
نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵	
۴۶	۲۶	۴۹.۵	۱۶۰	۱.۲	k_A
۳۹	۶۸	۴۶.۵	۸۶	۵.۶	k_C
۱۰	۵۶	۴۸	۶۳	۹	k

$$\Delta T_V = \frac{|\Delta T_{Max} - \Delta T_{Min}|}{\Delta t} \quad (5)$$

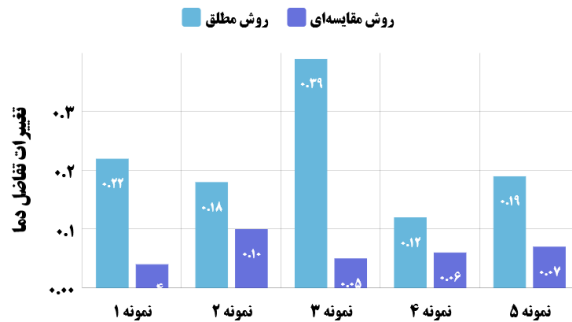
که در آن ΔT_{Max} مقدار تفاضل دمایی حداکثر و ΔT_{Min} مقدار تفاضل دمایی حداقل در بازه زمانی Δt است که برای این آزمایش، برای تمام نمونه‌ها برابر ۱۰۰ s دوم آزمایش در نظر گرفته شده است. دلیل در نظر گرفتن این بازه زمانی، نوسانات نسبتاً پایین دما طبق شکل و شکل، پس از گذشت مدت زمان معین برای دستیابی به تعادل دمایی می‌باشد. مقدار این پارامتر برای نمونه‌ها در شکل نمایش داده شده است. واضح است که هرچه این مقدار به ۰ نزدیک‌تر باشد، تعادل دمایی بالاتر روش اندازه‌گیری را در بازه زمان تعادل انجام آزمون نشان می‌دهد؛ در نتیجه ΔT_V بالاتر به معنای دقت بالاتر آن روش خواهد بود. همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، مقدار ΔT_V برای تمام نمونه‌ها در روش مقایسه‌ای نسبت به روش مطلق پایین‌تر است. مقدار میانگین به‌دست‌آمده برای روش مقایسه‌ای برابر ۰.۰۶۴ و برای روش مطلق برابر ۰.۲۲ به‌دست می‌آید. اگر پارامتر ΔT_V را به نوعی بیان‌کننده میزان پایداری روش اندازه‌گیری فرض کنیم، این تفاوت مقدار نشان می‌دهد که روش مقایسه‌ای به میزان ۷۱ درصد نسبت به روش مطلق پایدارتر می‌باشد.



شکل ۱۵. منحنی اختلاف دمایی به‌دست‌آمده در روش مطلق.



شکل ۱۶. منحنی اختلاف دمایی به‌دست‌آمده در روش مقایسه‌ای.



شکل ۱۷. مقایسه پارامتر ΔT_V در دو روش مطلق و مقایسه‌ای برای ۵ نمونه تحت آزمایش.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، فرایند طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارتی جامدات بر اساس روش مقایسه‌ای انجام شده، نسبت به روش مطلق ارزیابی گردید. این دستگاه با تنظیم روی دو وضعیت مطلق و مقایسه‌ای، ارزیابی و مقایسه را امکان‌پذیر کرده است. محاسبه ضریب انتقال حرارت نمونه جامد با ثبت نمودار تغییرات دما و تعریف پارامترهای مستقیم انجام شده است. همچنین امکان برنامه‌ریزی مجدد، تغییر، اصلاح، و ارتقای برنامه‌ریزی‌پردازنده و نرم‌افزار برحسب نیاز وجود دارد. در بخش سخت‌افزاری، تجهیزات الکترونیکی (دیمر، ترموستات دمایی، ریزپردازنده، حسگر دمایی، و رابطها) و مکانیکی (دافع حرارت آلومینیومی، عایق‌های حرارتی، بدنه فولادی، و اتصالات) مورد استفاده و مونتاژ قرار گرفته است. به علاوه، طراحی نرم‌افزار به منظور نظارت مستمر بر تغییرات دما، دریافت نمودار تغییرات دمای حسگرهای تماسی و انجام محاسبات و دریافت پارامتر خروجی، با قابلیت تنظیم برخی پارامترها انجام شده است. با توجه به آزمایش‌ها و ارزیابی نمونه‌های جامد توسط دستگاه مزبور و مقایسه و تحلیل آنها نسبت به مقادیر موجود، این نتیجه به دست آمد که عملکرد دستگاه در بازه خطایی کمتر از ۵ درصد واقع شده است. همچنین پایداری و تکرارپذیری روش اندازه‌گیری مقایسه‌ای به کار گرفته شده با توجه به پارامتر ΔT_V ، به میزان ۷۱ درصد بالاتر است.

References

- American Society for Testing and Materials. (2021). *Standard Test Method for Measurement of Thermal Effusivity of Fabrics Using a Modified Transient Plane Source (MTPS) Instrument* (ASTM D7984-21). ASTM. <https://www.astm.org/d7984-21.html>
- Cahill, D. (1990). Thermal conductivity measurement from 30 to 750 K: the 3omega method. *Review of Scientific Instruments*, 61, 802-808. <https://doi.org/10.1063/1.1141498>
- Cahill, D. G., Fischer, H. E., Klitsner, T., Swartz, E. T., & Pohl, R. O. (1989). Thermal conductivity of thin films. *Measurements and understanding*, 7(3), 1259-1266. <https://doi.org/10.1116/1.576265>
- Cremers, C. J., Fine, H. A., & Fine, H. A. (1990). *Thermal conductivity*. Springer. <https://link.springer.com/book/9780306436727>
- Dresselhaus, M. S., Chen, G., Tang, M. Y., Yang, R. G., Lee, H., Wang, D. Z., Ren, Z. F., Fleurial, J-P., & Gogna, P. (2007). New Directions for Low-Dimensional Thermoelectric Materials. *Advanced Materials*, 19(8), 1043-1053. <https://doi.org/10.1002/adma.200600527>
- Falizi, P., Parhoodeh, S., & Afsari, A. (2023). Comparing the effects of undoped and cobalt doped copper oxide nanoparticles on the enhancement of water thermal conductivity coefficient.

- Materials Science and Engineering: B*, 297, 116713. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116713>
- Hamilton, R. L., & Crosser, O. K. (1962). Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1(3), 187-191. <https://doi.org/10.1021/i160003a005>
- Lee, C. C. (2014). *The Current Trends of Optics and Photonics*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9392-6>
- Li, J., & Yu, B. (2022). Gas properties, fundamental equations of state and phase relationships. In D. A. Wood & J. Cai (Eds.), *Sustainable Natural Gas Reservoir and Production Engineering* (pp. 1-28). Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824495-1.00004-8>
- Machlin, E. (2010). *Materials Science in Microelectronics I: The Relationships Between Thin Film Processing and Structure*. Elsevier Science. <https://books.google.com/books?id=92-yeaGWZAYC>
- Madhusudana, C. V. (2014). *Thermal contact conductance* (2 ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01276-6>
- Maglič, K. D., Cezairliyan, A., & Peletsky, V. E. (1984). *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods: Recommended measurement techniques and practices*. Plenum Press. <https://books.google.com/books?id=YChBAQAIAAJ>
- Maldonado, O. (1992). Pulse method for simultaneous measurement of electric thermopower and heat conductivity at low temperatures. *Cryogenics*, 32(10), 908-912. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(92\)90358-H](https://doi.org/10.1016/0011-2275(92)90358-H)
- Marconnet, A. M., Panzer, M. A., & Goodson, K. E. (2013). Thermal conduction phenomena in carbon nanotubes and related nanostructured materials. *Reviews of Modern Physics*, 85(3), 1295-1326. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.85.1295>
- Min, S., Blumm, J., & Lindemann, A. (2007). A new laser flash system for measurement of the thermophysical properties. *Thermochimica Acta*, 455(1-2), 46-49. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.11.026>
- Otaru, A. J., & Auta, M. (2024). Machine learning backpropagation network analysis of permeability, Forchheimer coefficient, and effective thermal conductivity of macroporous foam–fluid systems. *International Journal of Thermal Sciences*, 201, 109039. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.109039>
- Parker, W. J., Jenkins, R. J., Butler, C. P., & Abbott, G. L. (1961). Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity. *Journal of Applied Physics*, 32(9), 1679-1684. <https://doi.org/10.1063/1.1728417>
- Razavi Dehkordi, M. H., Alizadeh, A. A., Zekri, H., Rasti, E., Kholoud, M. J., Abdollahi, A., & Azimy, H. (2023). Experimental study of thermal conductivity coefficient of GNSs-WO3/LP107160 hybrid nanofluid and development of a practical ANN modeling for estimating thermal conductivity. *Heliyon*, 9(6), e17539. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17539>
- Rosenzweig, A. (1982). Thermal-Wave Imaging. *Science*, 218(4569), 223-228. <https://doi.org/10.1126/science.218.4569.223>
- Rosenzweig, A., & Gersho, A. (1976). Theory of the photoacoustic effect with solids. *Journal of Applied Physics*, 47(1), 64-69. <https://doi.org/10.1063/1.322296>
- Savija, I., Culham, J. R., Yovanovich, M. M., & Marotta, E. E. (2003). Review of Thermal Conductance Models for Joints Incorporating Enhancement Materials. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 17(1), 43-52. <https://doi.org/10.2514/2.6732>

- Shi, L., Dames, C., Lukes, J. R., Reddy, P., Duda, J., Cahill, D. G., Lee, J., Marconnet, A., Goodson, K. E., Bahk, J.-H., Shakouri, A., Prasher, R. S., Felts, J., King, W. P., Han, B., & Bischof, J. C. (2015). Evaluating Broader Impacts of Nanoscale Thermal Transport Research. *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 19(2), 127-165. <https://doi.org/10.1080/15567265.2015.1031857>
- Sundqvist, B. (1991). Thermal diffusivity measurements by Ångström's method in a fluid environment. *International Journal of Thermophysics*, 12(1), 191-206. <https://doi.org/10.1007/BF00506131>
- Tian, H. H. (2014). New Method of Measurement of Coefficient of Thermal Conductivity. In C. Chen, G. Li, Q. Shena, & B. Jiang (Eds.), *Architecture, Building Materials and Engineering Management IV* (pp. 2133-2136). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.584-586.2133>
- Toberer, E. S., Baranowski, L. L., & Dames, C. (2012). Advances in Thermal Conductivity. *Annual Review of Materials Research*, 42(1), 179-209. <https://doi.org/10.1146/annurev-mat-sci-070511-155040>
- Tritt, T. M. (2005). *Thermal conductivity :theory, properties, and applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/b136496>
- Völklein, F., Reith, H., & Meier, A. (2013). Measuring methods for the investigation of in-plane and cross-plane thermal conductivity of thin films. *physica status solidi (a)*, 210(1), 106-118. <https://doi.org/10.1002/pssa.201228478>
- Zawilski, B. M., Littleton, R. T., & Tritt, T. M. (2001). Description of the parallel thermal conductance technique for the measurement of the thermal conductivity of small diameter samples. *Review of Scientific Instruments*, 72(3), 1770-1774. <https://doi.org/10.1063/1.1347980>
- Zhang, Y., Lei, Y., Ma, W., & Ren, Y. (2024). Evaluation of thermal conductivities and thermal expansion coefficients of TiSi₂ and Ti₅Si₃ ceramics prepared from Ti- and Si-rich wastes. *Ceramics International*, 50(2), 3373-3380. <https://doi.org/10.1016/j.cerami.2023.11.083>
- Zhao, D., Qian, X., Gu, X., Jajja, S. A., & Yang, R. (2016). Measurement Techniques for Thermal Conductivity and Interfacial Thermal Conductance of Bulk and Thin Film Materials. *Journal of Electronic Packaging*, 138(4), 040802. <https://doi.org/10.1115/1.4034605>