ISSN: 2476-6909; Modares. Mech. Eng. *2026;26(02):81-90.*

Modares Mechanical Engineering

DOI: 10.48311/mme.2025.117644.82889
journal homepage: mme.modares.ac.ir

Development of the Transient Plane Source Method for Measuring Thermal Conductivity and Diffusivity of Graphite Composite under Geometric Constraints

Sahar Kermani, Isar Dashti gohari, Saeed Asghari*

Institute of Materials and Energy, Iranian Space Research Center, Isfahan, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History
Received: November 16, 2025
Revised: December 27, 2025
Accepted: December 30, 2025
ePublished: January 30, 2026

ABSTRACT

The Transient Plane Source (TPS) method is one of the most accurate techniques for analyzing the thermal properties of materials, including solids, liquids, and powders. This method enables the evaluation of thermal parameters of anisotropic materials in both radial and axial directions, providing precise and non-destructive measurements for conductive and insulating materials. Temperature control during experiments further improves measurement accuracy. However, a key limitation of this method is the requirement to satisfy specific conditions between the thermal penetration depth and the sensor radius, which can be challenging depending on specimen geometry. In this study, the TPS method was used to determine the thermal conductivity and thermal diffusivity of a graphite composite as an anisotropic material. Despite geometric limitations, the measurement requirements were fulfilled by connecting multiple specimens and eliminating additional thermal contact resistance. Owing to the anisotropic nature of the sample, accurate determination of the specific heat capacity of graphite was also necessary; therefore, a novel measurement approach with an error of less than 7% was proposed. The thermal conductivity of graphite was measured as 20.792 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ in the axial direction and 51.390 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ in the radial direction. To validate the methodology, aluminum was used as a reference material assuming isotropic behavior. The results confirm that the TPS method is a powerful tool for analyzing the thermal behavior of materials and can contribute to optimizing the design of engineering and energy systems to improve performance and durability.

Keywords: Thermal Conductivity, Anisotropic Materials, Transient Plane Source Method, Specific heat Capacity

How to cite this article
Kermani S, Dashti gohari I, Asghari S, Development of the Transient Plane Source Method for Measuring Thermal Conductivity and Diffusivity of Graphite Composite under Geometric Constraints. Modares Mechanical Engineering; *2026;26(02):81-90*.

*Corresponding author's email: s.asghari@isrc.ac.ir
*Corresponding ORCID ID: 0000-0002-6695-4785

Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

شاپا: ۶۹۰۹-۲۴۷۶؛ مهندسی مکانیک مدرس. ۹۰-۸۱:(۰۲)۲۶؛۱۴۰۴

مهندسی مکانیک مدرس

DOI: 10.48311/mme.2025.117644.82889

صفحه اصلی مجله: mme.modares.ac.ir

توسعه روش منبع صفحه‌ای گذرا برای اندازه‌گیری هدایت و نفوذ حرارتی کامپوزیت گرافیت با وجود محدودیت‌های هندسی

سحر کرمانی، ایثار دشتی گوهری، سعید اصغری*

پژوهشکده مواد و انرژی، پژوهشگاه فضایی ایران، اصفهان، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰

چکیده

روش منبع صفحه‌ای گذرا (Transient Plane Source) به عنوان یکی از دقیق‌ترین روش‌های موجود، تحلیل خواص حرارتی مواد گوناگون از جمله جامدات، مایعات و پودرها را فراهم می‌سازد. این روش با قابلیت بررسی پارامترهای حرارتی مواد ناهمسانگرد در دو راستای شعاعی و محوری، امکان اندازه‌گیری دقیق و بدون تخریب نمونه را برای طیف وسیعی از مواد رسانا و عایق فراهم می‌سازد. همچنین، کنترل دما در طول آزمایش، شرایط بهینه را برای اندازه‌گیری دقیق‌تر فراهم می‌کند. با این وجود، محدودیت اصلی این روش، لزوم رعایت شرایط خاص بین عمق نفوذ حرارتی و شعاع سنسور است که در برخی از موارد با توجه به ابعاد هندسی قطعه، چالش‌برانگیز خواهد بود. در این پژوهش، از روش منبع صفحه‌ای گذرا برای تعیین هدایت و نفوذ حرارتی کامپوزیت گرافیت به عنوان ماده‌ای ناهمسانگرد استفاده شده است. علی‌رغم محدودیت‌های هندسی در اندازه‌گیری، با اتصال چند نمونه و حذف مقاومت حرارتی اضافی، الزامات این روش اندازه‌گیری برآورده شد. با توجه به ناهمسانگرد بودن نمونه، اندازه گیری مقدار ظرفیت گرمایی ویژه گرافیت نیز ضروری بود که روش نوینی برای این اندازه گیری با خطای کمتر از ۷ درصد ارائه شده است. رسانایی حرارتی گرافیت در راستای محوری برابر با $۲۰/۷۹۲ W·m^{-1}·K^{-1}$ و در راستای شعاعی برابر با $۵۱/۳۹۰ W·m^{-1}·K^{-1}$ اندازه‌گیری شد. برای اعتبارسنجی روش، از آلومینیوم به عنوان ماده‌ای با فرض ناهمسانگردی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهند که منبع صفحه‌ای گذرا ابزاری قدرتمند برای تحلیل رفتار حرارتی مواد بوده و می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی طراحی سیستم‌های مهندسی و انرژی با هدف بهبود عملکرد و افزایش دوام ایفا کند.

کلیدواژه‌ها:

رسانایی حرارتی، مواد ناهمسانگرد، روش منبع صفحه ای گذرا، ظرفیت گرمایی ویژه

نحوه ارجاع به این مقاله

کرمانی سحر، دشتی گوهری ایثار، اصغری سعید، توسعه روش منبع صفحه‌ای گذرا برای اندازه‌گیری هدایت و نفوذ حرارتی کامپوزیت گرافیت با وجود محدودیت‌های هندسی، مهندسی مکانیک مدرس. ۹۰-۸۱:(۰۲)۲۶؛۱۴۰۴

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: s.asghari@isrc.ac.ir

*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۰۰۰۰-۰۰۰۲-۶۶۹۵-۴۷۸۵

Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

اندازه‌گیری خواص حرارتی مواد در بسیاری از صنایع از جمله ساخت‌وساز، انرژی و پزشکی اهمیت فراوان دارد. یکی از مهم‌ترین این خواص، ضریب هدایت حرارتی است که روش‌های اندازه‌گیری آن به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند: روش‌های حالت پایا و روش‌های حالت گذرا.

روش‌های حالت پایا: در این دسته، نمونه تحت شرایط پایدار حرارتی قرار می‌گیرد و انتقال حرارت بر اساس قانون فوریه محاسبه می‌شود. این روش‌ها اگرچه ساده هستند، اما زمان‌بر بوده و بیشتر برای مصالح ساختمانی و عایق‌ها به کار می‌روند.

روش‌های حالت گذرا: در این روش‌ها، تغییرات دما در طول زمان ثبت و تحلیل می‌شود. مزیت آن‌ها نسبت به روش‌های پایا، سرعت بالا و امکان استفاده برای مواد مختلف است. مهم‌ترین روش‌های گذرا عبارت‌اند از:

- **روش منبع صفحه‌ای گذرا (Transient Plane Source – TPS)**

از یک حسگر دیسکی استفاده می‌شود که به طور هم‌زمان نقش منبع حرارتی و دماسنج را ایفا می‌کند؛ با ثبت تغییرات دما در این حسگر، ضریب هدایت حرارتی محاسبه می‌گردد. این روش، با دقت بالا برای جامدات، مایعات و پودرها قابل استفاده بوده و همچنین امکان بررسی ناهمسانگردی حرارتی را فراهم می‌آورد[۱].

- **روش منبع خطی گذرا(Transient Line Source – TLS)**

بر پایه یک پروب سوزنی شکل مجهز به سنسور دما است. پروب داخل نمونه قرار می‌گیرد و هم‌زمان منبع حرارت و حسگر محسوب می‌شود. با تحلیل تغییرات دما نسبت به زمان، ضریب هدایت حرارتی محاسبه می‌شود. سادگی و قابل‌حمل بودن از مزایای این روش است[۱].

- **روش فلش لیزر(Laser Flash Analysis – LFA)**

در این روش، یک پالس لیزر سطح جلویی نمونه را به طور لحظه‌ای گرم می‌کند و تغییرات دما در سطح پشتی با آشکارساز مادون‌قرمز ثبت می‌شود. ابتدا ضریب نفوذ حرارتی محاسبه شده و سپس با داشتن چگالی و گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی به‌دست می‌آید. این روش غیرتماسی بوده، خطاهای ناشی از مقاومت حرارتی تماس را کاهش می‌دهد و برای فلزات، سرامیک‌ها و مواد با هدایت حرارتی بالا در دماهای مختلف بسیار مناسب است[۲].

در روش منبع صفحه‌ای گذرا مزایای قابل توجهی از جمله دقت بالا، سرعت بالا در اندازه‌گیری و قابلیت اندازه‌گیری در هر دو جهت محوری و شعاعی را ارائه می‌دهد. همچنین روش منبع صفحه‌ای گذرا امکان اندازه‌گیری بدون تخریب نمونه را فراهم کرده و برای مواد مختلف از جمله رساناها و عایق‌ها قابل استفاده بوده و دارای استاندارد ایزو [۳] است. این روش می‌تواند به تحلیل دقیق‌تر رفتار حرارتی و طراحی بهینه‌تر سیستم‌های مولد انرژی و کنترل حرارت کمک کند که در نهایت منجر به بهبود عملکرد و افزایش دوام سیستم‌های انرژی پاک می‌شود. پالاسیوس و همکاران [٤] در بررسی روش‌های مختلف اندازه‌گیری ضرایب هدایت حرارتی، چالش اصلی این آزمایش‌ها را نبود استانداردهای یکپارچه و قابل‌اطمینان عنوان کرده‌اند. آن‌ها روش منبع صفحه‌ای گذرا را به‌عنوان یکی از جامع‌ترین روش‌ها معرفی کرده‌اند که قادر به اندازه‌گیری ضرایب هدایت حرارتی در گسترده‌ترین بازه ممکن، از ۰/۰۰۱ تا ۱۸۰۰ وات بر متر کلوین است. ما و همکاران [۵] به اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیالات با استفاده از روش منبع صفحه‌ای گذرا پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند اثرات انتقال حرارت جابه جایی آزاد و ظرفیت حرارتی نقش عمده ای در انتخاب توان و مدت زمان گرمایش دارد. مالیناریچ و همکاران [٦] با استفاده از روش‌های گذرا از جمله روش منبع صفحه‌ای گذرا، روش منبع صفحه دینامیکی (Dynamic Plane Source)، روش سیم کوتاه گذرا (Short Wire Transient) و روش منبع صفحه دینامیکی توسعه‌یافته (Extended Dynamic Plane Source) ، به بررسی خواص حرارتی شیشه سیلیکاتی و فولاد پرداختند. آن‌ها برای بهبود دقت اندازه‌گیری، از روش عددی اجزای محدود (FEM) بهره گرفتند تا اثر ظرفیت گرمایی حسگر را اصلاح کنند. نتایج نشان داد که روش منبع صفحه‌ای گذرا، به‌ویژه با مدل‌سازی ناهمسانگردی، توانایی بالایی در ارزیابی هدایت حرارتی در راستاهای مختلف دارد و اختلاف آن با سایر روش‌ها کمتر از یک درصد است که بیانگر رفتار تقریباً همسانگرد نمونه‌هاست. این مطالعه دقت بالا و قابلیت اعتماد روش روش منبع صفحه‌ای گذرا را در تحلیل حرارتی مواد جامد تأیید می‌کند. تاراسوفز و همکاران [۷] روشی را برای شناسایی هدایت حرارتی ناهمسانگرد مواد با استفاده از روش منبع صفحه‌ای گذرا (TPS) و حل معکوس ارائه کردند. در این رویکرد، سه اندازه‌گیری مستقل روی صفحات عمود بر هم از نمونه‌های مکعبی انجام شد و انتقال حرارت سه‌بعدی با کمک تحلیل اجزای محدود گذرا مدل‌سازی گردید. همچنین با استفاده از نمونه‌های چاپ سه‌بعدی با ریزساختار ناهمسانگرد، تانسور هدایت حرارتی ماده استخراج و نتایج با شبیه‌سازی سلول واحد تناوبی اعتبارسنجی شد که تطابق مناسبی را نشان داد. لاندری و همکاران [۸] نشان دادند که روش منبع صفحه‌ای گذرا به‌طور گسترده برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی، نفوذپذیری حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه مواد مختلف استفاده می‌شود. آنها دریافتند که کاهش جزئی توان مؤثر حسگر به دلیل ضریب دمایی مقاومت و ظرفیت گرمایی آن می‌تواند اثر محدودی بر دقت اندازه‌گیری‌ها داشته باشد، که با اصلاحات مناسب قابل جبران است.

در پژوهش حاضر، به اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی و ضریب نفوذ گرافیت مورد استفاده در صفحات دوقطبی پیل‌های سوختی، به دلیل لزوم آگاهی از خواص حرارتی این قطعه و نیازمندی آن در پروژه‌ها همچنین به عنوان نماینده نمونه های ناهمسانگرد جهت

بررسی دستگاه اندازه‌گیری خواص حرارتی پرداخته شده است. برخلاف روش‌های معمول که تنها به بررسی خواص حرارتی در یک جهت بسنده می‌کنند، در تحقیق حاضر از روش منبع صفحه‌ای گذرا برای اندازه¬گیری خواص حرارتی در دو راستا استفاده شده است. در این مطالعه، با در اختیار داشتن مقدار گرمای ویژه مواد، امکان تعیین ضرایب هدایت و نفوذ حرارتی در دو راستای شعاعی و محوری برای مواد همگن و ناهمگن بارعایت شرایط هندسی موردنیاز، به کمک روش منبع صفحه‌ای گذرا فراهم می‌شود. بدین منظور، نمونه‌های گرافیت، آلومینیوم و مس تا دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد در آون گرم شده و سپس در دمای محیط خنک می‌شوند. ابتدا از طریق تحلیل داده‌های سرمایشی آلومینیوم و با بهره‌گیری از مدل ظرفیت متمرکز (Lumped Capacitance)، ضریب انتقال حرارت تعیین می‌گردد. در ادامه، با استفاده از این مقدار، گرمای ویژه گرافیت محاسبه می‌شود. شایان ذکر است که نمونه مس به منظور صحه‌سنجی صحت داده‌های سرمایشی آلومینیوم به کار گرفته شده است.

۴- تحلیل تئوری

روش منبع صفحه‌ای گذرا یکی از روش‌های دقیق و غیرمخرب برای اندازه‌گیری خواص حرارتی مواد، به‌ویژه هدایت حرارتی و نفوذ حرارتی است. این روش برای مواد جامد، مایع و حتی پودرها و مواد متخلخل کاربرد دارد. این روش یک تکنیک اندازه‌گیری خواص حرارتی مواد است که بر اساس پاسخ حرارتی یک منبع گرما با هندسه صفحه‌ای نازک عمل می‌کند. در این روش، یک حسگر با دونوع کارایی به‌کار می‌رود به گونه ای که به‌طور همزمان نقش گرم‌کننده و دماسنج را ایفا می‌کند. این حسگر معمولاً از سیم نیکل به شکل مارپیچ متقارن تشکیل شده و بین دو صفحه از ماده مورد آزمایش قرار می‌گیرد (شکل۱). در حین آزمایش، با عبور جریان الکتریکی از حسگر، گرما تولید می‌شود و به درون نمونه پخش می‌شود. تغییرات دمایی حسگر در زمان های مختلف، ناشی از انتقال حرارت به محیط اطراف، ثبت شده و برای محاسبه خواص حرارتی ماده، مورد استفاده قرار می‌گیرد[۶]. همچنین فرض می‌شود منبع گرما یک صفحه نازک است که در آن نرخ تولید گرما به صورت ثابت است. در شرایط ایده‌آل، هدایت حرارت شعاعی درون ماده، در پاسخ به تولید گرمای آنی توسط منبع، قابل توصیف توسط معادله کلاسیک انتقال حرارت در مختصات استوانه‌ای است [۹].

$$k\nabla^2 T(r,t)-\rho c\frac{\partial T(r,t)}{\partial t}=-Q(r,t) \qquad (۱)$$

که درآن:

$$Q(r,t)=\frac{P}{A}u(a-r)u(t)(z) \qquad (۲)$$

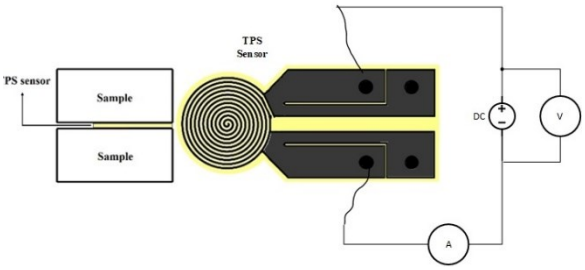
در آن P توان حرارتی اعمالی به سنسور، A سطح مقطع سنسور، u تابع هویساید، t زمان، a شعاع سنسور، r متغیر شعاع مختصات استوانه‌ای ، z متغیر مکانی مختصات استوانه‌ای و δ تابع دیراک است. حل تحت تصدیق شرایط و فرضیات زیر قابل قبول است:

- ضخامت لایه عایق الکتریکی سنسورها در تحلیل‌ها وارد نشده و از آن صرف نظر می‌شود.
- ابعاد نمونه نیمه بی‌نهایت فرض می‌شود که پس از تست در زمان مشخص می‌بایست مشخصات ابعادی خاصی را برآورده سازد.
- پروب دو فیلامنتی را می‌توان با مجموعه‌ای از دایره‌های متحد المرکز با فواصل مساوی تقریب زد.

برای اطمینان از آن که حرارت در طول آزمایش به مرزهای بیرونی جسم نمی‌رسد لازم است ابعاد نمونه و زمان آزمایش مناسب انتخاب شوند. بدین منظور پارامتر عمق نفوذ حرارتی در انتهای آزمون می‌بایست چک شود. رابطه ۳ عمق نفوذ را نشان می‌دهد [۱۰]:

$$X = 2\sqrt{\alpha t} \qquad (۳)$$

در رابطه بالا α معرف ضریب نفوذ گرمایی و t بیانگر زمان است.



(ب) (الف)

شکل۱ اجزاء مورد استفاده در آزمایش به روش TPS الف سنسور TPS ب دو قطعه نمونه مورد آزمایش به صورت متقارن k

Fig. 1 Components used in the TPS method

مطابق با فرض دوم، تفاضل مقدار شعاع سنسور و شعاع نمونه باید حداقل برابر با متغیر عمق نفوذ باشد تا بتوان تاثیر اندازه محدود نمونه را نادیده گرفت. متغیر عمق نفوذ برای نمونه‌های ناهمسانگرد در جهت شعاعی و محوری متفاوت است لذا زمان باید به گونه ای انتخاب شود که متغیر عمق نفوذ کمتر از فاصله حلقه‌های بیرونی سنسور تا لبه های بیرونی نمونه در هر دو راستا باشد (تثبیت شرایط مرزی جهت استفاده از روابط تحلیلی موجود). بوهاک و همکاران [۱۱] برای زمان آزمایش نمونه‌های ناهمسانگرد بازه‌ای مشخص به صورت رابطه ۴ را گزارش کردند:

$$0.3 \le \frac{\alpha t}{r^2} \le 1 \qquad (۴)$$

برای محاسبه ضرایب هدایت حرارتی و نفوذ برای مواد همسانگرد و ناهمسانگرد از حل معادلات موجود در روابط ۵ و ۶ استفاده می‌شود [۳]:

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial \tau}=k\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2}\right)+Q \quad (۵)$$

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial \tau}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(k_r r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+k_z\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2}+Q \quad (۶)$$

در روابط ۵ و ۶ پارامترهای ρ، τ، c و T به ترتیب بیانگر چگالی، زمان بی بعد شده، گرمای ویژه و دما است. متغیر r نشان‌دهنده راستای شعاعی و z راستای محوری را نشان می‌دهد. متغیر k و q نیز به ترتیب معرف ضریب هدایت حرارتی و منبع حرارتی است.

برای مواد همسانگرد معادله ۵ و برای مواد ناهمسانگرد معادله ۶ حل می‌شوند؛ با این تفاوت که برای مواد ناهمسانگرد مقدار ضریب هدایت حرارتی در راستاهای شعاعی و محوری متفاوت است و تعداد مجهولات معادله افزایش می یابد لذا در این دسته از مواد بایست مقدارC (ظرفیت گرمایی ویژه) برای شروع تست و محاسبه، مشخص گردد.

برای محاسبه مقدار C، از تئوری سرد شدن در دمای محیط برای جسمی با ابعاد مشخص (حداقل ابعاد مؤثر) استفاده شده است. مطابق این تئوری، اگر جسمی با دمای اولیه T_s وارد محیطی با دمای T_∞ شود و شرط لازم کمتر بودن عدد بایوت (رابطه ۷) از ۰/۱ را داشته باشد می‌توان از این مدل برای تحلیل فرایند انتقال حرارت استفاده کرد.

$$Bi=\frac{h}{k}\left(\frac{V}{A}\right) \quad (۷)$$

در معادله ۷، h ضریب انتقال جابجایی آزاد و k ضریب انتقال حرارت جسم و $\left(\frac{V}{A}\right)$ نسبت حجم قطعه به سطح جانبی آن است. تغییرات دمای جسم تحت مکانیزم جابجایی آزاد از رابطه ۸ تبعیت می‌کند که همان روش ظرفیت متمرکز است. در این پژوهش، ابتدا عدد بایوت برای نمونه‌های مس و آلومینیوم با ابعاد یکسان محاسبه شد و نتایج نشان داد که مطابق جدول ۱ مقدار Bi برای هر دو ماده کمتر از ۰/۱ بوده و در نتیجه شرط اعتبار روش ظرفیت متمرکز برقرار است. با توجه به آگاهی اولیه از مقدار نسبتاً بالای هدایت حرارتی گرافیت، نمونه گرافیتی نیز با همان ابعاد برش داده شد و آزمایش مشابه انجام گرفت. در نهایت، پس از تعیین هدایت حرارتی گرافیت از نتایج آزمایش، عدد بایوت آن محاسبه و بررسی شد تا اعتبار فرض ظرفیت متمرکز برای این ماده نیز مورد بررسی و تأیید قرار گیرد.

جدول ۱ عدد بایوت نمونه‌های مس و آلومینیوم و پارامترهای محاسباتی

Table 1 Biot Number of Copper and Aluminum Samples and Computational Parameter

Sample	Area (m²)	Volume (m³)	Heat transfer coefficient $(\frac{W}{m^2K})$	Conductivity $(\frac{W}{mK})$	Biot number
Aluminum 6063	6e-4	1.25e-6	13.5	202.207	1.4e-4
Copper				400	7e-5

$$\frac{hA}{\rho VC}t=-Ln\left(\frac{T(t)-T_\infty}{T_s-T_\infty}\right) \quad (۸)$$

برای اطمینان از صحت مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی در محیط آزمایشگاه، ابتدا ضریب جابجایی آزاد هوا با استفاده از یک نمونه با ظرفیت گرمایی ویژه شناخته‌شده (مانند آلومینیوم) تعیین می‌شود. سپس با به‌کارگیری همین مقدار h، ظرفیت گرمایی ویژه نمونه‌ی دیگری (مانند مس) محاسبه می‌گردد؛ تطابق نتایج به‌دست‌آمده با مقادیر مرجع، در محدوده‌ی خطای قابل قبول، نشان‌دهنده‌ی درستی مقدار h تعیین‌شده است. لازم به ذکر است آزمایشات برای همه قطعات با شرایط محیطی یکسان انجام گرفته که به صورت میانگین اندازه‌گیری (۲۳ درجه سانتیگراد) و لحاظ شده است. رابطه ۹ شکل بازنویسی‌شده‌ای از رابطه ۸ است که بر مبنای شیب خط حاصل از آن، ظرفیت گرمایی ویژه محاسبه می‌گردد. طریقه محاسبه به صورت تجربی در بخش ۳ آورده شده است.

$$Ln(T(t)-T_\infty)=\frac{-hA}{\rho VC}t+Ln(T_s-T_\infty) \quad (۹)$$

۳. روش تجربی

نمونه‌های آلومینیوم، مس و کامپوزیت گرافیت به ابعاد یکسان آماده شده که مشخصات آن‌ها در جدول ۲ مشاهده می‌شود. کامپوزیت گرافیت استفاده شده از محصولات شرکت Entegris (صفحات دوقطبی) بوده است [۱۳]. مس با خلوص ۹۹/۹ درصد بوده و آلومینیوم نیز گرید ۶۰۶۳ است.

نتایج آزمون کوانتومتری مس و آلومینیوم در جدول های ۳ و ٤ آورده شده است.

جدول ۲ مشخصات ابعادی قطعات مورد آزمایش در دمای ۲۵°c

Table 2 Specifications of Copper, Aluminum, and Graphite

Test Material	C (J/g°C)	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Weight (g)
Aluminum	0.9	25	10	5	2.75
Copper	0.385	25	10	5	9.81
Graphite Composite	-	25	10	5	2.39

جدول ۳ نتایج آزمون کوانتومتری آلومینیوم ۶۰۶۳

Table 3 Results of 6063 aluminum quantometer test

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ni	Cr	Pb
Rem	0.471	0.285	0.206	0.88	0.012	0 < 0.001	0.137	0 < 0.001
Ti	Be	Ca	Sr	Bi	V	Zr	Sn	Na
0.023	0 < 0.001	0.002	0.001	0 < 0.001	0.016	0 < 0.001	0.002	0.001
P	B	Ag	P	Co	Li			
0.012	0.002	0< 0.001	0.012	0 < 0.001	0.001			

جدول ٤ نتایج آزمون کوانتومتری مس

Table 4 Results of copper quantometer test

Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Mn	Al	Ni	Si
99.9	0<0.001	0< 0.001	0.027	0.017	0< 0.001	0 < 0.001	0.002	0 < 0.0
Ag	Co	Cr	P	Mg	Sb	Cd	Bi	S
0< 0.001	0< 0.003	0.001	0.018	0<0.001	0< 0.002	0 < 0.001	0.002	_
Be	Zr	B	C	Ti	As			
0< 0.001	0< 0.001	0< 0.001	0.013	_	_			

ظرفیت گرمایی ویژه آلومینیوم و مس نیز با تغییرات دما متغیر بوده که با استفاده از جداول استاندارد موجود [۱۲] تابع های معادلات ۱۰ و ۱۱ برای هردو استخراج شده است. خطای این معادلات تا داده استاندارد کمتر از ۲ درصد می‌باشد.

$$C_{Al} = 0.8772 + 5.433 \times 10^{-4} \times T - 3.1958 \times 10^{-7} T^2 \quad (۱۰)$$

$$C_{Cu} = 0.3530 + 3.291 \times 10^{-4} \times T - 9.733 \times 10^{-8} T^2 \quad (۱۱)$$

در معادلات ۱۰ و ۱۱، T برحسب درجه سلسیوس بوده و C_{Al} یا C_{cu} برحسب ژول بر گرم درجه سلسیوس خواهد بود. شکل ۲ الف، ب و ج به ترتیب مس، گرافیت و آلومینیوم آماده شده جهت تست ظرفیت گرمایی ویژه را نشان می‌دهد. به هر کدام از این سه نمونه سنسورهای دمای ترموکوپل نوع K از شرکت OMEGA با قطر سیم ۰/۵ میلی‌متر با استفاده از چسب حرارتی (EPO-TEK Part Number: PB207261) اتصال داده شد. سنسورهای نوع K دارای بازه دمایی وسیع از ۲۰۰°C- تا ۱۲۶۰°C و همچنین دقت ۱/۱°C هستند؛ همچنین پاسخ زمانی این سنسورها در بین انواع سنسورهایی دمایی از جمله PT100 بسیار کوتاه است.

این سه نمونه به صورت همزمان در آون برند Shimaz قرار گرفتند و پس از رسیدن به دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس، از آون خارج و تغییرات دمای هر نمونه نسبت به زمان ثبت شد.با توجه به ظرفیت گرمایی ویژه‌ی شناخته‌شده‌ی آلومینیوم، ضریب انتقال حرارت جابجایی محیط بر اساس رابطه ۸ تعیین گردید. این ضریب سپس برای محاسبه‌ی ظرفیت گرمایی ویژه‌ی مس به‌کار گرفته شد؛ تطابق مقادیر به‌دست‌آمده برای مس با داده‌های مرجع [۱۲] بررسی می‌شود تا صحت ضریب انتقال حرارت محاسبه‌شده تأیید گردد تا در نهایت ظرفیت گرمایی ویژه‌ی گرافیت نیز با استفاده از همین روش تعیین شود. زمان کل آزمایش برای اندازه‌گیری ظرفیت گرمایی، شامل مراحل گرمایش نمونه‌ها در آون، سرمایش آن‌ها و بررسی تکرارپذیری آزمایش طی شش اجرای مستقل با سطح اطمینان ۹۵٪، در مجموع تقریباً ۱۰ ساعت به طول انجامید.. عواملی همچون شرایط محیطی حین تست تا حد امکان تحت کنترل بوده و نهایتا میانگین دما در محاسبات لحاظ گردید.

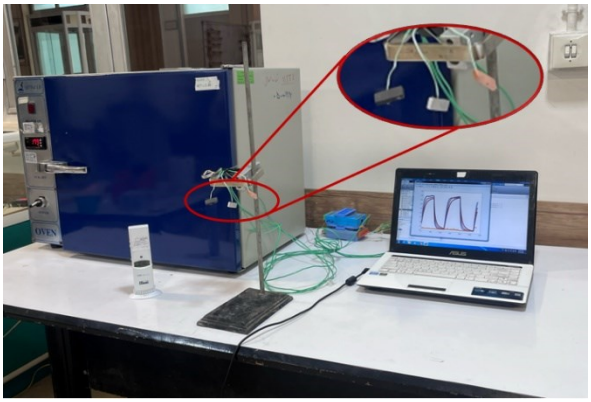
شکل ۳ چیدمان آزمایشگاهی مورد استفاده برای انجام آزمون را نشان می‌دهد که شامل آون، سنسورهای اندازه‌گیری دما از نوع K، سه نمونه مسی، گرافیتی و آلومینیومی، نگه‌دارنده نمونه‌ها، دماسنج و یک لپ‌تاپ جهت ثبت و ذخیره‌سازی تغییرات دما بر حسب زمان است. نگه‌دارنده نمونه‌ها صرفاً نقش تثبیت مکانیکی قطعات را بر عهده داشته و دارای ویژگی عملکردی خاصی نمی‌باشد. دماسنج محیطی مورد استفاده از برند TFA بوده و فرآیند داده‌برداری دما از سنسورها توسط یک کد نوشته‌شده در نرم‌افزار متلب انجام شده است.

داده‌های تغییرات دما برحسب زمان برای سه ماده (آلومینیوم، گرافیت و مس) توسط ماژول جمع آوری داده ICPDOS در کامپیوتر ذخیره گردید تا در بازه‌های مختلف دمایی مطابق دستورالعمل بخش قبل مورد تحلیل قرارگرفته و بتوان ظرفیت گرمایی ویژه گرافیت را استخراج نمود.

(الف) (ب) (ج)

شکل ۲ قطعات مورد آزمایش برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محیط و گرمای ویژه گرافیت الف مس ب گرافیت ج آلومینیوم

Fig. 2 Test specimens for measuring convective heat transfer coefficient and specific heat of materials



شکل۳ چیدمان آزمایشگاهی آزمایش تعیین ضریب انتقال حرارت محیط و گرمای ویژه گرافیت

Fig. 3 Experimental setup for determining the convective heat transfer coefficient of the environment and the specific heat capacity of graphite

سپس با داشتن ظرفیت گرمای ویژه گرافیت، تست اندازه گیری آنالیز ضرایب حرارتی آن با دستگاه روش منبع صفحه‌ای گذرا انجام گردید. در این روش هر آزمایش ٦ بار تکرار شده و صحت آن بررسی گردید. با داشتن مقدار گرمای ویژه کامپوزیت گرافیت، به عنوان یک ماده ناهمسانگرد، مقادیر ضرایب هدایت حرارتی و نفوذ آن با استفاده از این روش استخراج شد. جهت تامین شرایط مرزی دستگاه اندازه گیری، بایستی هر دو متغیر زمان آزمایش و هندسه نمونه اصلاح گردد. در این مطالعه، به دلیل ضخامت ۵ میلی‌متری کامپوزیت گرافیتی و بزرگ‌تر بودن متغیر عمق نفوذ محوری نسبت به مقدار آن، استفاده از نمونه‌ای با ضخامت بیشتر ضرورت داشت؛ به همین منظور سه قطعه گرافیتی با بهره‌گیری از خمیر سیلیکون به‌عنوان ماده‌ای با مقاومت تماسی بسیار پایین به یکدیگر متصل شدند، به‌گونه‌ای که ضخامت کل نمونه به سه برابر افزایش یافت و شرایط مرزی مورد نظر محقق گردید. برای حذف اثر خمیر سیلیکون،

مقاومت حرارتی ایجاد شده توسط خمیر از مقاومت حرارتی کل کاسته شد تا ضریب انتقال حرارتی گرافیت معین گردد.

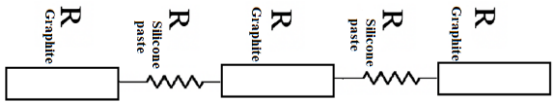
شکل ٤ مقاومت‌های ایجاد شده توسط خمیر سیلیکون و خود قطعه را نشان می‌دهد.

با استفاده از رابطه ۱۲ مقاومت لایه های خمیر سیلیکون از مقاومت حرارتی کل بدست آمده از روش صفحه گذرا کاسته شده و ضریب انتقال حرارت هدایتی در راستای عمق گرافیت مشخص می‌گردد.

$$\frac{\Delta x_{\text{کل}}}{k_{\text{کل}}A} = \frac{3\Delta x_{\text{گرافیت}}}{k_{\text{گرافیت}}A} + \frac{2\Delta x_{\text{خمیر}}}{k_{\text{خمیر}}A} \qquad (۱۲)$$

در رابطه ۱۲ $\frac{\Delta x_{\text{کل}}}{k_{\text{کل}}A}$ نشان‌دهنده مقاومت حرارتی محوری کل و عبارات سمت چپ به ترتیب بیانگر مقاومت حرارتی ایجاد شده توسط گرافیت و خمیر سیلیکون است. Δx ضخامت و A سطح را نشان می‌دهد. در جدول۵ مشخصات فنی خمیر سیلیکون آورده شده است.

برای اعتبارسنجی روش و اطمینان از صحت تغییر هندسه به این شیوه، دو قطعه آلومینیوم ٦٠٦٣ به‌عنوان یک ماده همسانگرد، با استفاده از روش اتصال مشابه و آزمون منبع صفحه‌ای گذرا برای مدل ناهمسانگرد مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ٥ الف و ب به ترتیب نمای دو قطعه آماده شده گرافیتی و آلومینیومی برای تست اندازه‌گیری خواص حرارتی با استفاده از این روش را نشان می‌دهد. در هنگام تست می‌بایست دو نمونه به صورت متقارن در دو طرف سنسور قرار گیرد، لذا ابعاد و ضخامت آن‌ها یکسان بوده و در صورت اکسید بودن سطح قطعات، به صورت سطحی سمباده‌زنی می‌گردد. بدیهی است که ضریب هدایت حرارتی برای مواد همسانگرد در هر دو راستای شعاعی و محوری یکسان است، که این نتیجه در مورد آلومینیوم نیز مورد بررسی قرار گرفته است.



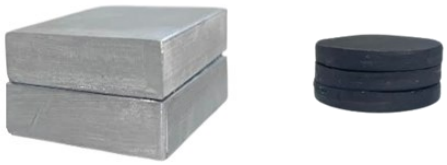
شکل ۴ شماتیک مقاومت‌های حرارتی گرافیت به صورت یکطرفه تا حسگر

Fig. 4 Schematic of unidirectional thermal resistances of graphite up to the sensor

جدول ۵ مشخصات فیزیکی خمیر سیلیکون [۱۳]

Table 5 Physical Properties of Silicone Paste

Property	Unit	Value
Color	–	White
Viscosity	cp	542
Thermal Conductivity	W/m·K	1
Shelf Life	–	60 months at 38 °C
Volume Resistivity	ohm·cm	$\approx 2 \times 10^{15}$



(الف) (ب)

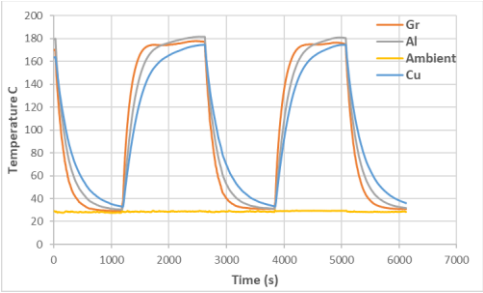
شکل ۵ هندسه اتصال یافته الف) ۳ قطعه گرافیت ب) ۲ قطعه آلومینیوم ٦٠٦٣

Fig. 5 Assembled geometry

جدول ۶ ابعاد نمونه های آزمایش شده به روش منبع صفحه‌ای گذرا

Table 6 Dimensions of the specimens tested by the transient plane source method

Sample	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Diameter (mm)	Weight (g)
Aluminum 6063	54	54	10	-	79
Graphite	-	-	5	36.5	9



شکل ٦ نتایج داده های دمایی سرد و گرم شدن سه قطعه آلومینیوم، مس و گرافیت

Fig. 6 Temperature data results for heating and cooling of three specimens: Aluminum, Copper, and Graphite

ابعاد و وزن قطعات مورد آزمایش در روش صفحه‌ای گذرا مطابق جدول ٦ است.

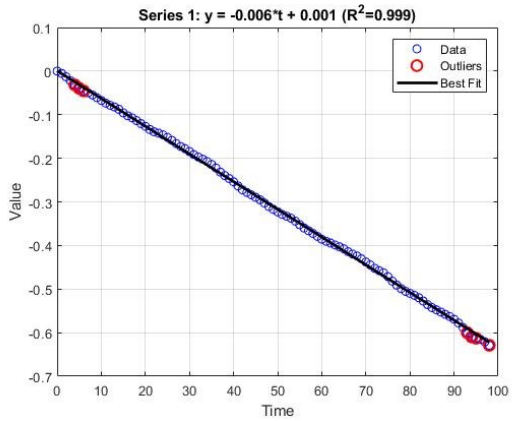
۴. نتایج

ابتدا نتایج اندازه گیری ظرفیت گرمایی ویژه کامپوزیت گرافیتی بیان می‌شود. پس از انجام آزمایشات مربوطه مطابق شرح بخش ۳، داده های دمایی سه قطعه جمع آوری شده که چگونگی تغییرات آن ها در شکل ٦ مشخص است.

همان‌گونه که پیش‌تر توضیح داده شد، ظرفیت گرمایی ویژه آلومینیوم به عنوان شاهد معین درنظر گرفته شد و سپس با استفاده از آن در معادله ۸ ضریب انتقال حرارت جابجایی محیط محاسبه گردید. از نتیجه این مقدار برای محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه گرافیت و مس استفاده شد. در واقع محاسبه برای مس صرفاً جهت اطمینان از روش بدست آوردن ظرفیت گرمایی ویژه بوده است. مقادیرظرفیت گرمایی ویژه مس از مرجع [۱۲] بدست آمده

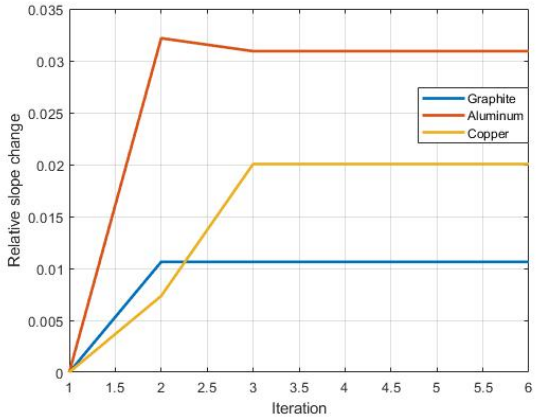
است و همچنین جهت اطمینان از مقدار محاسبه شده برای کامپوزیت گرافیت، مقادیر آن با نتیجه استخراج شده ازدستگاه کالری‌سنجی روبشی تفاضلی پژوهشگاه مواد وانرژی مقایسه شده است. همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود تعداد زیادی داده در بازه های مختلف زمانی جمع آوری شده است. توسط برنامه نویسی در نرم‌افزار MATLAB هر بخشی از این داده ها در دامنه های دمایی مختلف انتخاب شده و داده های پرت آن، ناشی از خطاهای اندازه گیری، حذف گردیده‌اند. شناسایی داده‌های پرت با استفاده از تشخیص‌های رگرسیونی (Regression Diagnostics) انجام شد. در این روش، نقاط داده‌ای تأثیرگذار بر اساس مقادیر اهرم (Leverage) و فاصلهٔ کوک (Cook's Distance) تعیین گردیدند. شناسایی داده‌های پرت در این پژوهش به‌صورت تکراری و بر اساس معیار فاصله کوک انجام شده است؛ به‌طوری‌که در هر تکرار، نقاطی که مقدار Cook's Distance آن‌ها بیش از سه برابر میانگین بود حذف و مدل رگرسیونی مجدداً برازش گردید (معیار آستانه). این فرآیند تا زمانی ادامه یافت که یا داده پرت معناداری باقی نماند و یا سهم داده‌های حذف‌شده ناچیز گردد. به‌منظور بررسی وابستگی نتایج به تعداد نقاط حذف‌شده، تحلیل حساسیت با پایش تغییرات نسبی شیب رگرسیون در تکرارهای متوالی انجام شد[۱۵]. در شکل ۷ نمونه ای از رگرسیون انجام شده منطبق با معادله ۹ با استفاده از داده های واقعی نمایش داده شده است. داده های پرت بر روی نمودار مشخص هستند و معادله رگراسیون نیز آورده شده است، که از مقدار شیب این نمودار می‌توان ظرفیت گرمایی ویژه کامپوزیت گرافیتی را بدست آورد.

در شکل ۸ نتایج نشان می‌دهد که حتی پس از سه تکرار، تغییر نسبی شیب‌ها برای تمامی سنسورها کمتر از ۳/۵٪ باقی مانده است که بیانگر پایداری مدل و عدم وابستگی معنادار نتایج به حذف داده‌های پرت می‌باشد.



شکل۷ نتایج رگرسیون معادله ۸ بر داده های واقعی برای گرافیت دردمای میانگین ۶۰ درجه سلسیوس

Fig.7 Regression results of Equation (8) on the experimental data for graphite at an average temperature of 60 °C



شکل۸ تحلیل حساسیت نتایج نسبت به فرآیند حذف داده‌های پرت؛ تغییرات نسبی شیب پارامتر مورد بررسی در تکرارهای متوالی

Fig.8 Sensitivity analysis of the results to the outlier removal procedure, the relative slope variation of the investigated parameter across successive iterations

جدول ۷ نتایج ظرفیت گرمایی ویژه کامپوزیت گرافیتی و مس و مقایسه آن با مقادیر مرجع

Table 7 Results of the specific heat capacity of graphite–copper composite and its comparison with reference values

Test Material	Temperature (C)	- C (J/g·°C)	Ref.- C (J/g·°C)	Error%
Graphite	38.9	0.77	0.74	3.7
	66.4	0.85	0.89	3.8
	61.4	0.87	0.86	1.07
	81.2	0.87	0.937	7.1
Copper	65.4	0.36	0.37	4.1
	102.3	0.37	0.39	4.4
	95.5	0.38	0.38	1.4
	113.7	0.38	0.39	2.1

این عمل در بازه های دمایی مختلف تکرار گردید و نتایج آن در جدول ۷ آورده شده است.

همانگونه که در جدول ۷ مشهود است خطای اندازه‌گیری برای گرافیت کمتر از ۸ درصد بوده و این مشخصه برای مس حداکثر ۵ درصد خواهد بود. عدد اندازه گیری شده ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد محیط آزمایشگاه نیز بین ۱۳ - ۱٤ وات بر مجذور متر کلوین بدست آمده است که از لحاظ فیزیکی منطقی است. با توجه به نتایج حاصل شده با اطمینان از مقدار عددی ظرفیت گرمایی ویژه کامپوزیت گرافیتی از این مقدار در اندازه گیری ضریب انتقال حرارت هدایتی ناهمسانگرد این ماده (در دو جهت صفحه‌ای و عمقی) استفاده گردید.

جدول۸ خواص حرارتی گرافیت در راستای محوری و شعاعی

Table 8 Thermal properties of graphite in axial and radial directions

Material	Test	k_a	k_r	α_a	α_r
Graphite composite	1	21.972	49.631	10.986	24.815
	2	20.149	52.631	10.074	26.317
	3	20.746	51.354	10.373	25.677
	4	21.905	49.425	10.952	24.713
	5	20.503	51.488	10.252	25.744
	6	19.481	53.810	9.741	26.905
Average		20.792	51.390	10.396	25.695
Standard deviation		0.984	1.695	0.492	0.847
Uncertainty		±0.353		±0.395	

جدول۹ خواص حرارتی آلومینیوم در راستای محوری و شعاعی

Table 9 Thermal properties of aluminum in axial and radial directions

Material	Test	k_a	k_r	α_a	α_r
Aluminium 6063	1	206.028	199.537	84.785	82.114
	2	206.438	196.081	84.954	80.692
	3	209.787	194.671	86.332	80.112
	4	212.309	190.809	87.370	78.522
	5	205.606	197.905	84.611	81.443
	6	212.308	190.628	87.374	78.448
Average		209.747	194.938	85.904	80.221
Standard deviation		3.134	3.659	1.289	1.506
Uncertainty		±0.353		±0.395	

پس از آزمایش اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت هدایتی ناهمسانگرد کامپوزیت گرافیت به کمک روش صفحه‌ای گذرا، نتایج آن در جدول ۸ گزارش شده است. گرافیت به دلیل ساختار لایه‌ای خود ماهیتی ناهمسانگرد دارد؛ به این معنا که خواص حرارتی آن در راستای محوری با راستای عمود بر صفحات متفاوت است. این تفاوت ناشی از پیوندهای کووالانسی قوی درون صفحات و پیوندهای ضعیف واندروالسی بین لایه‌ها است. نتایج حاصل از ٦ تست، از انحراف استاندارد قابل قبولی برخوردار است که نشانگر تکرارپذیر بودن نتایج است. میزان عدم قطعیت دستگاه آنالیز خواص حرارتی برای ضریب رسانایی حرارتی برابر۰/۳۵۳ وات بر متر کلوین و برای ضریب نفوذ برابر ۰/۳۹۵ مجذور میلی‌متر برثانیه است.

اعتبارسنجی روش با استفاده از آلومینیوم انجام شد. یعنی مشابه تست قبل، برای آلومینیوم های روی هم قرارگرفته همان تست تکرار شد. مقادیر خواص حرارتی بدست آمده در جدول ۹ ارائه شده‌اند. همان‌طور که انتظار می‌رود، به دلیل همسانگرد بودن این ماده، مقادیر ضریب رسانایی حرارتی و ضریب نفوذ گرمایی در راستاهای شعاعی و محوری برابر هستند.

عدد بایوت گرافیت با استفاده از مقدار هدایت حرارتی ارائه‌شده در جدول ۸ محاسبه شد که برابر با ۰/۰۰۰۸٦ است. با توجه به کمتر بودن این مقدار از ۰/۱، شرط اعتبار روش ظرفیت متمرکز برای گرافیت نیز برقرار است.

مقدار عدم قطعیت کل دستگاه اندازه‌گیری ضرایب حرارتی مطابق جداول ۸ و ۹ برای ضریب هدایت حرارتی برابر ۰/۳۵۳ و برای ضریب نفوذ حرارتی برابر ۰/۳۹۵ است که شامل تفکیک‌پذیری، انحراف معیار تست‌های انجام شده با بلوک مرجع و خطای بلوک مرجع بوده و با درصد اطمینان ۹۵ درصد و ضریب پوشش ۲ گزارش می‌شود.

ضخامت خمیر سیلیکون ۰/۰۱ میلی‌متر، ضخامت هر کدام از قطعات گرافیتی ٦ میلی‌متر و ضریب هدایت حرارتی محوری برای خمیر ۱ وات بر متر کلوین مطابق با کاتالوگ آن است[١٤]. ضخامت خمیر سیلیکون با محاسبه اختلاف ضخامت قطعات قبل و بعد از اعمال خمیر تعیین شد. رسانایی حرارتی آلومینیوم ٦٠٦٣ برابر ۲۰۰ وات بر متر کلوین است، بدیهی است وجود خمیر سیلیکون باعث افزایش مقدار آن تا ۲۰۹/۷٤۷ وات بر مترکلوین شده و باعث ایجاد خطای ٤/٥ درصدی می‌شود که طبق استاندارد ISO22007-2 در بازه حد مجاز خطا برای رسانایی حرارتی قرار می‌گیرد.

۵. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، از روش منبع صفحه‌ای گذرا برای اندازه‌گیری ضرایب هدایت حرارتی و نفوذ حرارتی در مواد ناهمسانگرد استفاده شد. بررسی‌های انجام‌شده بر روی کامپوزیت گرافیت، که به‌عنوان یک ماده ناهمسانگرد مورد استفاده قرار می‌گیرد، نتایج مهمی را ارائه کرد:

- اندازه گیری ظرفیت گرمایی ویژه گرافیت به روش ذکر شده خطایی کمتر از ۷ درصد دارد و روش نوینی است که در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است.
- مقدار رسانایی حرارتی کامپوزیت گرافیت در راستای محوری برابر ۲۰/۷۹۲$W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$ و در راستای شعاعی برابر۵۱/۳۹۰$W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$ اندازه‌گیری شد.

- روش منبع صفحه‌ای گذرا امکان اندازه‌گیری ضرایب هدایت و نفوذ حرارتی را در دو راستای محوری و شعاعی برای مواد ناهمسانگرد مانند گرافیت فراهم می‌کند.
- اندازه‌گیری‌های انجام‌شده نشان داد که ضریب هدایت حرارتی در راستای شعاعی و محوری کامپوزیت گرافیت تفاوت دارد که این مسئله در طراحی و عملکرد حرارتی سامانه های انرژی نظیر پیل‌های سوختی نقش مهمی ایفا می‌کند.
- نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که روش منبع صفحه‌ای گذرا، علاوه بر دقت بالا، قابلیت انجام اندازه‌گیری بدون تخریب نمونه را دارد و می‌تواند برای طیف وسیعی از مواد، از جمله رساناها و عایق‌ها، مورد استفاده قرار گیرد.
- اعتبارسنجی روش با استفاده از آلومینیوم به‌عنوان یک ماده همسانگرد انجام شد و نشان داد که این روش دارای دقت و تکرارپذیری بالایی در تعیین خواص حرارتی است.
- داده‌های استخراج‌شده از این تحقیق می‌توانند در بهینه‌سازی طراحی سیستم‌های انرژی، بهبود عملکرد حرارتی و افزایش دوام آن‌ها مؤثر باشند.

این مطالعه تأیید می‌کند که روش منبع صفحه‌ای گذرا ابزاری کارآمد برای بررسی رفتار حرارتی مواد ناهمسانگرد است و می‌تواند به توسعه فناوری‌های پیشرفته در زمینه انتقال حرارت و طراحی بهینه سیستم‌های انرژی کمک کند. به‌عنوان پیشنهاد برای تحقیقات آتی، انتخاب و بررسی مواد پودری با رفتار حرارتی ناهمسانگرد می‌تواند مسیر پژوهشی ارزشمندی باشد. با توجه به قابلیت روش منبع صفحه‌ای گذرا در اندازه‌گیری خواص حرارتی در راستاهای شعاعی و محوری، استفاده از این روش برای تحلیل هدایت حرارتی و نفوذ حرارتی مواد پودری که به دلیل شکل ذرات، نحوه فشرده‌سازی یا جهت‌گیری ساختاری، رفتار ناهمسانگرد از خود نشان می‌دهند، پیشنهاد می‌شود. بررسی تأثیر پارامترهایی نظیر اندازه ذرات، توزیع اندازه، میزان تخلخل و فشار فشرده‌سازی بر میزان ناهمسانگردی حرارتی این مواد می‌تواند به درک دقیق‌تر مکانیزم‌های انتقال حرارت در محیط‌های پودری منجر شود و کاربردهای صنعتی و پژوهشی روش منبع صفحه‌ای گذرا را گسترش دهد.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

مراجع و منابع

[1] J. Yao, "Transient Plane and Line Source Methods for Soil Thermal Conductivity Measurement," Geotechnical Testing Journal, vol. 40, no. 5, pp. 858–868, 2017. DOI:10.1520/GTJ20160094

[2] M. Kövér, M. Behúlová, M. Drienovský, and P. Motyčka, "Determination of the specific heat using laser flash apparatus," J. Therm. Anal. Calorim., vol. 122, no. 1, pp. 151–156, 2015. DOI:10.1007/s10973-015-4748-0

[3] ISO 22007-2: Plastics—Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity, Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method, ISO, Geneva, 2008

[4] A. Palacios, L. Cong, M. E. Navarro, Y. Ding, and C. Barreneche, "Thermal conductivity measurement techniques for characterizing thermal energy storage materials–A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 108, pp. 32–52, 2019, Doi: DOI: 10.1016/j.rser.2019.03.020

[5] B. Ma, N. Kumar, A. Kuchibhotla, and D. Banerjee, "Estimation of measurement uncertainties for thermal conductivity of nanofluids using transient plane source (TPS) technique," in *2018 17th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*, May 2018, pp.178–186. DOI: 10.1109/ITHERM.2018.8419622

[6] S. Malinarič, "Measurement of the thermal conductivity and diffusivity of steel and glass using transient methods," *International Journal of Thermophysics*, vol. 46, no. 2, Article 64, 2025. DOI: 10.1007/s10765-025-03564-y

[7] S. Tarasovs and A. Aniskevich, "Identification of the anisotropic thermal conductivity by an inverse solution using the transient plane source method," *Measurement*, vol. 206, Art. no. 112252, 2023. doi: DOI: 10.1016/j.measurement.2022.112252

[8] D. Landry and R. Flores, "Power Corrections in the Transient Plane Source Method," *J. Heat Mass Transfer*, vol. 147, no. 5, Art. no. 051701, May 2025. DOI: 10.1115/1.4067604

[9] M. N. Ozisik, *Heat Transfer: A Basic Approach*, New York: McGraw-Hill, 1985.

[10] Zhang, H., Li, Y. M., & Tao, W. Q. (2017). Theoretical accuracy of anisotropic thermal conductivity determined by transient plane source method. International Journal of Heat and Mass Transfer, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.025..

[11] V. Boháč, M. Gustavsson, L. Kubicar, and S. Gustafsson, "Parameter estimations for measurements of thermal transport properties with the hot disk thermal constants analyzer," *Review of Scientific Instruments*, vol. 71, 2000. DOI: 10.1063/1.1150635

[12] The Engineering ToolBox. (2003). Specific Heat of Metals. [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-metals-d_152.html. [Accessed: 28-Sep-2025]

[13] Entegris, Inc., "Pyrolytic Sealed Bipolar Plates — Data Sheet (POCO)," [Online]. Available: https://www.entegris.com/.../datasheet-pyrocell-bipolar-plates-11044.pdf. [Accessed: Oct. 6, 2025].

[14] Dow Silicones Corporation, *DOWSIL™ 340 Heat Sink Compound – Product Information Sheet*, Dow Silicones Corporation, 2021.

[15] J. Fox and S. Weisberg, *An R Companion to Applied Regression*, 3rd ed. Thousand Oaks, CA, USA: SAGE Publications, 2019.