

## Original Research Paper

# Comparison of G-Hot Plate and Three Point Methods to Measure Thermal Conductivity of Fibrous Insulation

Amin Torabi\*  and Seyed Mohammad Nikouei 

Department of Engineering Aerospace, Shahid Sattari Aeronautical University, Tehran, Iran

**ARTICLE INFO****Article History:**

Received 17 November 2024

Revised 16 May 2025

Accepted 25 May 2025

Available Online 15 July 2025

**Keywords:**

Experiment design

High temperature insulator

Transient experiment

3 Point method

Guarded hot plate method

**ABSTRACT**

Laboratory methods for steady-state and transient testing are two well-known approaches for measuring the heat transfer coefficient. Transient methods are more widely used due to their lower cost and broader temperature range. However, their application in fibrous insulation is more limited due to the low thermal conductivity and non-homogeneous nature of these materials. Guarded hot plate and three-point methods are two significant transient techniques for measuring the heat transfer coefficient in fibrous insulations. This paper compares these two testing methods, with the primary evaluation criterion being the minimum variance in the final experimental results. The variance of the final results is inversely proportional to the determinant of the sensitivity matrix. To compute the sensitivity matrix, the transient temperature distribution across the insulation thickness is first calculated using an initial estimate of the heat transfer coefficient, obtained from other experimental sources. Changes in the number and placement of thermal sensors, the insulation geometry, and the test duration affect the determinant of the sensitivity matrix. The optimal experiment is determined by identifying the maximum determinant of this matrix. Studies show that in the three-point method, the optimal setup consists of two thermal sensors placed on an insulation layer with a thickness of 2 cm, over a duration of 100 seconds. In contrast, in the guarded hot plate method, the optimal setup includes two thermal sensors on insulation with a height of 5 cm, over a 300-second testing period. The analysis indicates that the variance of the final results in the three-point method is lower than in the guarded hot plate method, which can significantly enhance the accuracy of heat transfer coefficient measurements.

\* Corresponding Author's E-mail: [amin.torabi.sharif@gmail.com](mailto:amin.torabi.sharif@gmail.com)**How to Cite this Article:**A. Torabi and S. M. Nikouei, "Comparison of G-Hot plate and three point methods to measure thermal conductivity of fibrous insulation," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 10-23, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2025.1508>.**COPYRIGHTS**© 2025 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

# مقایسه روش‌های آزمایش صفحه داغ حفاظدار و سه نقطه برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارتی در عایق‌های فیبری

امین ترابی<sup>۱\*</sup> و سیدمحمد نیکویی<sup>۲</sup>

۱-دکتری مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید ستاری، تهران، ایران

## اطلاعات مقاله

## چکیده

### تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۷ آبان ۱۴۰۳  
بازنگری ۲۶ اردیبهشت ۱۴۰۴  
پذیرش ۰۴ خرداد ۱۴۰۴  
اولین انتشار ۲۴ تیر ۱۴۰۴

### واژه‌های کلیدی:

طراحی آزمایش  
عایق حرارتی دما بالا  
آزمایش گذرا  
روش سه نقطه  
روش صفحه داغ حفاظدار

روش‌های آزمایشگاهی پایا و گذرا دو روش شناخته شده برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت هستند. روش‌های گذرا به دلیل هزینه پایین و طیف دمایی گسترده‌تر کاربرد بیشتری دارند. ولی در مورد عایق‌های فیبری کاربرد روش‌های گذرا کمتر است. این موضوع به دلیل رسانایی ضعیف، نمونه‌های غیرهمگن، شفاف با سطوح نامشخص و بسته‌بندی شل در این عایق‌ها است. صفحه داغ حفاظدار و سه نقطه، دو روش مهم در اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت در عایق‌های فیبری محسوب می‌شوند. این مقاله به مقایسه این دو روش آزمایش پرداخته و معیار اصلی بررسی، حداقل واریانس در نتیجه نهایی آزمایش است. واریانس نتیجه نهایی نسبت معکوس با دترمینان ماتریس حساسیت دارد. برای محاسبه ماتریس حساسیت، ابتدا توزیع دما در ضخامت عایق حرارتی به صورت گذرا و با در نظر گرفتن تخمین اولیه برای ضرایب انتقال حرارت محاسبه می‌شود. این تخمین اولیه از داده‌های آزمایشگاهی منابع دیگر به دست آمده است. تغییر در تعداد سنسورهای حرارتی، محل قرارگیری آن‌ها، هندسه عایق و مدت زمان آزمایش باعث تغییر در مقدار دترمینان ماتریس حساسیت خواهد شد. آزمایش بهینه با یافتن مقدار بیشینه این دترمینان مشخص می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهند که در روش آزمایش گذرای سه نقطه، حالت بهینه استفاده از دو سنسور حرارتی بر روی عایق با ضخامت ۲ سانتی‌متر طی ۱۰۰ ثانیه است، در حالی که در روش صفحه داغ حفاظدار، حالت بهینه شامل دو سنسور حرارتی روی عایق با ارتفاع ۵ سانتی‌متر طی ۳۰۰ ثانیه می‌باشد. تحلیل‌ها نشان می‌دهند که واریانس نتیجه نهایی در روش سه نقطه، کمتر از روش صفحه داغ حفاظدار است، که می‌تواند تأثیر مهمی بر دقت اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت داشته باشد.

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [amin.torabi.sharif@gmail.com](mailto:amin.torabi.sharif@gmail.com)

## How to Cite this Article:

A. Torabi and S. M. Nikouei, "Comparison of G-Hot plate and three point methods to measure thermal conductivity of fibrous insulation," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 10-23, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2025.1508>.



## COPYRIGHTS

© 2025 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



## اختصارات

J	ماتریس حساسیت ( $^{\circ}\text{K/s}$ )
M	تعداد سنسورها
T	دما ( $^{\circ}\text{K}$ )
t	زمان (s)
t <sub>f</sub>	زمان آزمایش (s)

## مقدمه

ساختارهای فیبری کاربردی وسیع در عایق‌های حرارتی مختلف از دمای کرایوژنیک<sup>۱</sup> تا دمای بسیار بالا دارند. کاربرد عایق‌های فیبری<sup>۲</sup> با تخلخل بالا از عایق‌های ارزان ساختمانی تا عایق‌های بسیار گران استفاده شده در شاتل فضایی است. بیش از ۲۰ هزار آجر سرامیکی، حدود ۷۰٪ از سطح شاتل فضایی را پوشانده است. وظیفه اصلی این آجرها محافظت از سازه آلومینیومی شاتل در برابر بارهای شدید حرارتی است که در حین صعود یا فرود به سازه آلومینیومی وارد می‌آید. آجرهای سرامیکی از فیبرهای سیلیکایی ساخته شده‌اند و در زمان طراحی شاتل فضایی، بهترین عایق حرارتی دما بالا در شرایط خلا بودند [۱].

انتقال حرارت در عایق‌های فیبری موضوع مقالات مختلف در طول سالیان اخیر بوده است. انتقال حرارت به سه روش رسانش، همرفت و تابش است. با توجه به اینکه هوا ضریب انتقال حرارت بسیار پایینی دارد عایق‌های حرارتی با تخلخل بسیار بالا تولید می‌شوند. روش انتقال حرارت همرفت در صورتی اتفاق می‌افتد که اندازه حفره‌های موجود در عایق متخلخل از مسافت آزاد حرکت ملکول‌های گاز موجود در عایق بیشتر باشد. معمولاً عایق‌های حرارتی به‌گونه‌ای طراحی می‌گردند که امکان حرکت هوا در آن‌ها وجود نداشته باشد. بنابراین انتقال حرارت تابشی اصلی‌ترین روش انتقال حرارت در این عایق‌های فیبری دما بالا است [۲]. انتقال حرارت تابشی را می‌توان با استفاده از ضریب انتقال حرارت تابشی ( $K_{\text{rad}}$ ) مدل‌سازی نمود. ضریب انتقال حرارت مؤثر نشان دهنده اثر همزمان ضریب انتقال حرارت رسانشی و انتقال حرارت تابشی است بنابراین  $K_{\text{eff}} = K_{\text{cond}} + K_{\text{rad}}$  [۳].

روش‌های آزمایشگاهی مختلفی برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت مؤثر عایق ارائه شده است. این روش‌ها به دو دسته پایا و گذرا تقسیم بندی می‌شوند. معمولاً هزینه روش‌های پایا بیشتر است بنابراین در حال حاضر روش‌های گذرا کاربرد بیشتری دارند. در روش‌های گذرا

بارگذاری حرارتی به‌روشی بر عایق حرارتی اعمال می‌شود. سپس توزیع دما توسط حسگرهایی در طول عایق حرارتی ثبت می‌شود. با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی یا حل معکوس معادلات انتقال حرارت ضریب انتقال حرارت به‌عنوان تابعی از دما محاسبه می‌گردد [۴-۶].

ضریب انتقال حرارت عایق‌های فیبری معمولاً با استفاده از روش‌های حالت پایا اندازه‌گیری می‌شود. به‌عنوان مثال، روش صفحه داغ حفاظدار [۷]، تکنیک جریان‌سنج حرارتی [۸، ۹] و غیره از جمله روش‌های پایا به‌منظور محاسبه ضریب انتقال حرارت مؤثر هستند. معایب روش‌های پایا، نمونه‌های بزرگ و زمان آزمایش طولانی است. روش‌های گذرای سریع (مانند روش فلاش<sup>۳</sup> [۱۰]، روش سیم داغ<sup>۴</sup> [۱۱، ۱۲]، نوار داغ گذرا [۱۳]، روش دیسک داغ گذرا<sup>۵</sup> [۱۴، ۱۵]، ۳ امگا<sup>۶</sup> [۱۶] و غیره)، در ۵۰ سال گذشته تقریباً به‌طور کامل جایگزین روش‌های پایا شده است. رسانایی ضعیف، نمونه‌های غیرهمگن شفاف با سطوح نامشخص، بسته‌بندی شل، عایق‌های متخلخل، آئروژل‌ها و غیره، هنوز چالش‌های واقعی برای آزمایشگران است. به‌همین دلیل با وجود هزینه بالا، روش پایای صفحه داغ حفاظدار هنوز پرکاربردترین روش به‌منظور اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت در عایق‌های فیبری است [۱۷، ۱۸].

لاکروویکس<sup>۷</sup> ضریب انتقال حرارت مؤثر ماتریس متخلخل را اندازه‌گیری نمود. به‌منظور حصول اطمینان از عدم تاثیرگذاری پدیده انتقال حرارت همرفت و به‌منظور بررسی عملکرد عایق حرارتی در شرایط نزدیک به خلاء، فشار هوای داخل این ابزار تا ۰/۰۰۱ میلی بار کاهش می‌یابد. در این مطالعه سنسورهای دما در فاصله صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلیمتری سطح داغ عایق قرار می‌گیرد [۱۹].

دریابگی از دو ابزار مختلف به‌منظور بررسی انتقال حرارت در عایق‌های فیبری دما بالا استفاده نموده است. ضریب انتقال حرارت مؤثر در حالت پایا برای عایق‌های فیبری به‌روش صفحه داغ حفاظدار اندازه‌گیری شده است. دریابگی از این تجهیز برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت عایق فیبری آلومینایی به چگالی (۲/۲۴، ۶/۴۸ و ۲۲/۷۲ kg/m<sup>3</sup>) استفاده نموده است. همچنین دریابگی از تجهیز مشابهی به‌منظور اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت گذرا در عایق‌های چند لایه فیبری بازتابنده استفاده نموده است [۲۰، ۲۱].

ژانگ<sup>۸</sup> در سال ۲۰۰۸ از یک تجهیز آزمایشگاهی به‌منظور اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی مؤثر در دما و فشار ورود مجدد به جو یک پرتابگر استفاده کرده است. بالاترین دمای نمونه آزمایش در تجهیز ذکر شده ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد است. برای گرم کردن صفحه سرامیکی از گرمکن مادون قرمز ۲۴ کیلو وات استفاده شده است. صفحه خنک شده

5. Hot Disk  
6. 3 Omega  
7. Lacroix  
8. Zhang

1. Cryogenic  
2. Fibrous Insulation  
3. Flash  
4. Hot Wire

می‌گیرد. صفحات فلزی نمونه آزمایش را در بین خود نگه می‌دارند، انرژی تابشی گرمکن را جذب می‌کنند و به قرارگیری ترموکوپل در موقعیت مورد نظر و برقراری تماس آن با عایق کمک می‌کنند. دما بر روی سطح داغ، سطح داخلی و یک نقطه مشخص در طول ضخامت عایق حرارتی اندازه‌گیری می‌شود. دمای سطح‌های بیرونی و داخلی به‌عنوان شرایط مرزی حل معادلات انتقال حرارت در نظر گرفته می‌شود و خواص هدایت حرارتی مورد نظر با توجه به دمای نقطه میانی محاسبه خواهد شد [۱۸].

پس از ثبت داده‌های حرارتی، خواص هدایت حرارتی را باید استخراج نمود. روش‌های حل معکوس معادلات انتقال حرارت و بهینه‌سازی دو دسته روش شناخته شده برای برآوردن این مهم هستند. روش‌های Levenberg-Marquardt، گرادیان مزدوج و گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی سه روش اصلی حل معکوس معادلات انتقال حرارت هستند [۲۵، ۲۶] در بایبگی از الگوریتم ژنتیک به‌منظور استخراج خواص حرارتی استفاده نموده است [۲۱].

با وجود شباهت‌ها، مسائل حل معکوس معادلات انتقال حرارت و بهینه‌سازی متفاوت هستند. در مسائل معکوس پارامترهای ناشناخته با استفاده از داده‌های تجربی به‌دست می‌آیند درحالی‌که در مسائل بهینه‌سازی، کمینه یا بیشینه یک تابع هدف معین پیدا می‌شود. در این حالت پارامترهای طراحی با کمترین خطا محاسبه می‌شود. در مسئله حل معکوس، علل از اثرات استنتاج می‌شود و اغلب با عدم قطعیت در اندازه‌گیری‌ها و پارامترها سروکار دارد. ولی این موارد در مسائل بهینه‌سازی مورد توجه نیستند [۲۷].

در این پژوهش طراحی آزمایش با هدف حصول اطمینان از حداقل واریانس برای مطلوب نهایی آزمایش (ضریب انتقال حرارت) انجام می‌شود. به‌همین منظور باید سعی شود که حداقل داده برداری تجربی با بالاترین دقت ممکن صورت پذیرد. علاوه بر این داده‌های تجربی که از پارامترهای مورد نظر تاثیر نمی‌پذیرند نیز باید حذف گردند. این موضوع با عنوان طراحی آزمایش بهینه در مراجع مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۲۵-۳۳].

بک<sup>۲</sup> در فصل ۸ کتاب "تخمین پارامترها در علوم مهندسی و علم" روش‌های مختلف طراحی آزمایش بهینه را معرفی و بررسی نموده است. همانطور که پیشتر بیان شد، آزمایش باید به‌گونه‌ای طراحی شود که داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده بیشترین تاثیر را از پارامترهای مجهول بپذیرند، به‌منظور برآوردن این مهم، ماتریس حساسیت (J) تشکیل می‌شود. به‌منظور حصول اطمینان از بیشترین حساسیت داده‌های اندازه‌گیری شده، سه روش پیشنهاد می‌شود. روش اول: طراحی

با آب در زیر نمونه آزمایش نصب شده است. سیستم کنترل فشار دستگاه شامل یک سیستم تولید خلاء، یک سیستم نظارت بر خلاء و یک سیستم اصلاح‌کننده خلاء است که فشار دستگاه را تامین می‌نماید. حداکثر اندازه نمونه تا ۴۵۰ در ۴۵۰ میلی‌متر مربع است [۲۲].

ژانویه در سال ۲۰۰۹ به دو روش پایا و گذرا خواص انتقال حرارت عایق‌های فیبری را استخراج نموده است. به‌منظور مشخص کردن رفتار حرارتی گذرای عایق، از یک گرمکن تابشی لامپ کوارتز با ظرفیت حرارتی کم استفاده می‌شود. منبع گرمایش تابشی می‌تواند دمای سطح داغ عایق حرارتی را تغییر دهد. یک نمونه آزمایش فیبری آلومینوسیلیکاتی به ضخامت ۴۰ میلی‌متر و چگالی ۱۲۸ کیلوگرم بر متر مربع در تجهیز آزمایش قرار می‌گیرد. عایق محافظ در اطراف مجموعه آزمایش قرار می‌گیرد تا اتلاف را به حداقل برساند. ترموکوپل‌ها برای نظارت بر تغییر توزیع دما در هنگام گرمایش و سرمایش نصب می‌شوند. سه سنسور حرارتی در ۰، ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر سطح داغ نمونه آزمایش خواهند بود [۲۳].

همچنین ژانویه در سال ۲۰۰۹ به‌منظور بررسی انتقال حرارت مؤثر عایق فیبری آلومینایی یک تجهیز آزمایشگاهی پایا طراحی و تولید کرده است. یک گرمکن تابشی گرافیتی دمای سطح داغ عایق را به ۱۸۷۳ کلوین می‌رساند. نمونه آزمایش بین سطح داغ و صفحه خنک شده با آب قرار می‌گیرد. برای به حداقل رساندن اتلاف گرمای جانبی و ایجاد توزیع دمای یکنواخت، عایق محافظ در اطراف مجموعه آزمایش قرار می‌گیرد. هشت ترموکوپل نوع K برای اندازه‌گیری دما استفاده می‌شود. دو گیج شار حرارتی روی صفحه خنک‌شده با آب قرار می‌گیرد تا شار انرژی گرمایی جریان یافته از نمونه را اندازه‌گیری نماید. داده‌های ترموکوپل‌ها و گیج‌های شار حرارتی برای محاسبه هدایت حرارتی موثر نمونه استفاده می‌شود. یک سنسور فشار برای اندازه‌گیری فشار در محفظه خلاء استفاده می‌شود. هنگامی که نمونه عایق وارد دستگاه آزمایش می‌شود، گاز داخل محفظه خلاء خارج می‌گردد. در صورت نیاز به افزایش فشار محفظه، محفظه با نیتروژن پر می‌شود. دلیل اصلی انتخاب نیتروژن، حذف بخار آب و کاهش اکسیداسیون گرافیت در دمای بالا است. با استفاده از شار حرارتی و دمای اندازه‌گیری شده، هدایت حرارتی مؤثر نمونه عایق را می‌توان از قانون هدایت گرمایی فوریه محاسبه نمود [۲۴].

روش سه نقطه یک روشی گذرا برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت مؤثر در عایق‌های حرارتی فیبری است. در این روش نمونه آزمایش به‌صورت استوانه‌ای بین دو صفحه فلزی نازک قرار می‌گیرد. سطح داغ بیرونی در معرض انرژی تابشی یک گرمکن تابشی قرار

$$J_{ij} = \frac{\partial T_i}{\partial P_j} \quad (2)$$

در معادله فوق  $T_i$  معرف دما در سنسور  $i$ ام و  $P_j$  مجهول (ضریب انتقال حرارت) زامی است که باید با استفاده از دمای اندازه‌گیری شده محاسبه شود.

همانطور که در بخش قبلی بیان شد، آزمایش در صورتی بهینه است که  $|JJ^T|$  بیشینه باشد.  $| |$  نشان دهنده دترمینان ماتریس است. درایه‌های ماتریس  $F$  به روش زیر محاسبه می‌شود.

$$F_{ij} = [JJ^T]_{ij} = \sum_{k=1}^M J_{ki} J_{kj} = \sum_{k=1}^M \frac{\partial T_k}{\partial P_i} \frac{\partial T_k}{\partial P_j} \quad (3)$$

در آزمایش‌های گذرا دما به صورت تابعی از زمان اندازه‌گیری می‌شود و در نتیجه معادله (۳) به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$F_{ij} = \frac{1}{M t_f} \sum_{k=1}^M \int_{t=0}^{t_f} \frac{\partial T_k}{\partial P_i} \frac{\partial T_k}{\partial P_j} dt \quad (4)$$

در رابطه فوق  $t$  زمان و  $t_f$  زمان آزمایش است و مقادیر  $i$  و  $j$  از ۱ تا  $N$  تغییر می‌کنند. متغیرهای آزمایش مانند مدت زمان آزمایش، مکان و تعداد حسگرها را می‌توان بر اساس معیار فوق انتخاب نمود. از رابطه زیر محاسبه خواهد شد.

$$\frac{\partial T}{\partial P_i} = \frac{T(P_1, \dots, P_i + \varepsilon, \dots, P_M) - T(P_1, \dots, P_i, \dots, P_M)}{\varepsilon} \quad (6)$$

به منظور انجام فرآیند فوق باید توزیع دمای گذرا در حین انجام آزمایش با در نظر گرفتن تخمین اولیه برای پارامترهای مجهول (ضرایب انتقال حرارت) محاسبه شود. با تغییر هر یک از پارامترهای مجهول به اندازه  $\varepsilon$  توزیع دما مجدداً محاسبه می‌شود و نهایتاً  $\frac{\partial T}{\partial P_i}$  در مکان سنسورها محاسبه خواهد شد [۲۵، ۲۶].

### صحه گذاری

در مرجع [۳۳] بهینه‌سازی روش‌های آزمایش مختلف انجام شده است. در مورد آزمایش انتقال حرارت یک بعدی با شرایط مرزی یک سر آدیاباتیک و سر دیگر در مقابل شار ثابت حرارتی، دترمینان ماتریس حساسیت محاسبه شده است. به منظور صحه‌گذاری نتایج، در این پژوهش نیز دترمینان ماتریس فوق محاسبه شد. شکل ۱ نشان دهنده اختلاف بسیار کم (کمتر از ۰.۵٪) نتایج این پژوهش در مقایسه با مطالعه مشابه است.

آزمایش به‌گونه‌ای که دترمینان ماتریس  $JJ^T$  بیشینه باشد، روش دوم: بهینه‌سازی آزمایش به‌گونه‌ای که کمترین مقدار اصلی ماتریس  $JJ^T$  بیشینه باشد و روش سوم: یافتن آزمایشی که بیشترین اثر (مجموع درایه‌های قطر اصلی) را داشته باشد. در پژوهش حاضر از روش اول به منظور بهینه‌سازی آزمایش استفاده می‌شود [۲۸].

با توجه به آنچه تا به اینجا ارائه شده است، دو روش آزمایش شناخته شده برای اندازه‌گیری گذرای خواص انتقال حرارت عایق‌های فیبری وجود دارد. این روش‌ها به نام سه نقطه و صفحه داغ حفاظدار شناخته می‌شوند. هدف از این پژوهش مقایسه این دو روش آزمایش براساس حداقل واریانس در مطلوب نهایی آزمایش (ضریب انتقال حرارت) است. به همین منظور ابتدا باید پارامترهای مختلف آزمایش مانند زمان آزمایش، هندسه، تعداد سنسورها و محل قرارگیری آن‌ها را در هر کدام از دو روش فوق بهینه نمود. تا این دو روش آزمایش در شرایط برابر با هم مقایسه شوند. ضخامت عایق مورد قبول برای دو آزمایش ۲ الی ۲۰ سانتیمتر و مدت زمان آزمایش مورد قبول ۱۰۰ ثانیه الی ۱۰ دقیقه است. پس از بهینه‌سازی این دو آزمایش در این محدوده، می‌توان این دو آزمایش را با هم مقایسه نمود.

### تئوری طراحی آزمایش بهینه

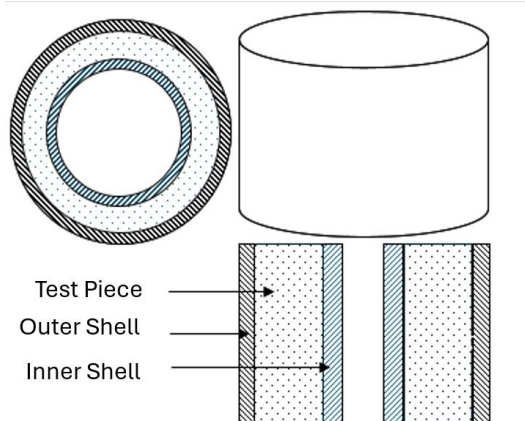
هدف از بهینه‌سازی آزمایش در این پژوهش، اندازه‌گیری پارامتر مورد نظر (ضریب انتقال حرارت) با حداقل واریانس است. بدین منظور باید داده‌هایی اندازه‌گیری شوند که بیشترین تاثیر را از ضریب انتقال حرارت می‌پذیرند. تاثیر پارامتر مجهول (ضریب انتقال حرارت) بر داده‌های (دمای) اندازه‌گیری شده به زبان ریاضی  $\frac{\partial T}{\partial P}$  است. که  $T$  دمای اندازه‌گیری شده و  $P$  پارامتر مجهول (ضریب انتقال حرارت) است.

دما توسط چند سنسور اندازه‌گیری می‌شود و ضریب انتقال حرارت در دماهای مختلف متفاوت است. ماتریس حساسیت ( $J$ ) معرف اثر ضرایب انتقال حرارت مختلف بر دماهای اندازه‌گیری شده مختلف خواهد بود. بیان ریاضی این ماتریس به صورت معادله (۱) است.

$$J = \left[ \frac{\partial T^T(P)}{\partial P} \right]^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial P_1} \\ \frac{\partial}{\partial P_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial}{\partial P_N} \end{bmatrix} [T_1 \quad T_2 \quad \dots \quad T_M] \quad (1)$$

در معادله (۱)  $N$  تعداد ضرایب انتقال حرارت و  $M$  تعداد سنسورهای آزمایش است. نمایش صریح ماتریس حساسیت به صورت معادله (۲) خواهد بود.

روش برای موادی مانند عایق‌های حرارتی، مواد مرکب و پلیمرها بسیار موثر است. شکل ۳ شماتیک تجهیز روش آزمایش سه نقطه را نشان می‌دهد.



شکل ۳- شماتیک روش آزمایش سه نقطه.

Fig. 3. Schematic diagram of the three-point test method.

حفظ دمای سطح سرد صفحه آلومینیومی باعث پیچیدگی مضاعف روش صفحه داغ حفاظدار نسبت به روش سه نقطه می‌شود. به همین دلیل روش سه نقطه کم هزینه‌تر خواهد بود. هدف از این پژوهش مقایسه این روش‌ها از نظر حداقل واریانس در مطلوب نهایی آزمایش (ضریب انتقال حرارت) است.

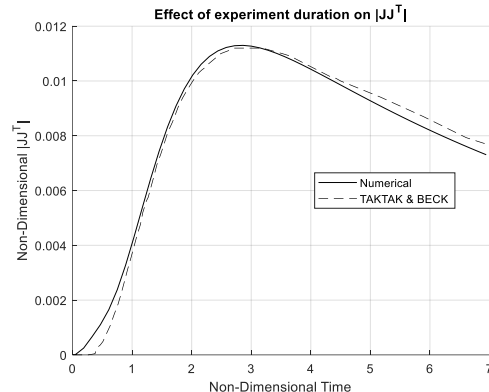
### مدل آزمایش

همانطور که در بخش تئوری بیان شد، به منظور طراحی و بهینه‌سازی روش آزمایش، در مرحله اول باید توزیع انتقال حرارت در طول ضخامت عایق حرارتی محاسبه شود. در ادامه مدل‌های مورد استفاده برای حل معادلات انتقال حرارت و محاسبه توزیع دما معرفی می‌شود.

#### سه نقطه

در این روش فرض می‌شود که نمونه عایق مورد نظر حول یک میله توپر آلومینیومی پیچیده شده است و دو طرف (بالا و پایین) مجموعه به منظور محافظت از میله آلومینیومی در برابر حرارت و اطمینان از انتقال حرارت یک بعدی عایق‌کاری شده است. مقطع مدل آزمایشگاهی این روش به صورت نشان داده شده در شکل ۴ خواهد بود.

مدل واقعی به صورت استوانه‌ای است و تقارن محوری حول محور استوانه دارد بنابراین خطوط  $af$  و  $fe$  شرط مرزی تقارن محوری دارند. دمای اولیه کل نمونه ۲۵ درجه سانتیگراد و دمای خطوط  $cd$  و  $cb$  از لحظه اول تا پایان مدت زمان آزمایش ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد خواهد بود. در حقیقت فرض بر این است که کل سطح بیرونی استوانه



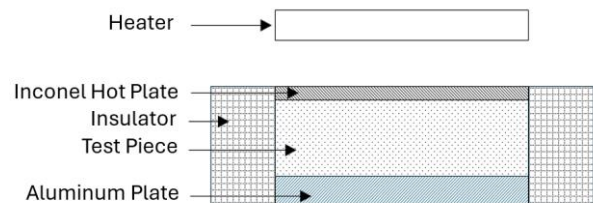
شکل ۱- صحنه‌گذاری نتایج.

Fig. 1. Results verification.

### معرفی روش‌های آزمایش

روش‌های سه نقطه و صفحه داغ حفاظدار دو روش آزمایشگاهی گذرا برای اندازه‌گیری دما در طول ضخامت عایق‌های حرارتی فیبری با هدف محاسبه ضریب انتقال حرارت هستند.

روش صفحه داغ حفاظدار یک تکنیک تجربی شناخته شده برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی مواد است. کاربرد اصلی این روش برای با هدایت حرارتی پایین مانند عایق‌های حرارتی است. دمای سطح داغ توسط یک گرمکن الکتریکی کنترل می‌شود. حسگرهای دما، تغییرات دما در نمونه را اندازه‌گیری می‌کنند و با حل معکوس معادله انتقال حرارت، هدایت حرارتی تعیین می‌شود. اندازه‌گیری دما در این روش در شرایط پایا انجام می‌شود. ولی همانطور که در مقدمه بیان شد در یابگی و ژائو از این روش آزمایشگاهی در حالت گذرا استفاده نموده‌اند. شکل ۲ شماتیک تجهیز صفحه داغ حفاظدار را نشان می‌دهد [۲۱،۲۳].



شکل ۲- شکل شماتیک روش آزمایش صفحه داغ حفاظدار.

Fig. 2. Schematic diagram of guarded hot plate test method.

روش سه نقطه روش دیگر برای تعیین نفوذ حرارتی است. یوزف گمباروویچ در مرجع [۱۸] این روش آزمایش را شرح داده است. این روش شامل آماده‌سازی نمونه آزمایش استوانه‌ای، قرار دادن آن بین دو صفحه فلزی و استفاده از ترموکوپل‌ها برای اندازه‌گیری دما در راستای نفوذ حرارت است. این

دمای اولیه این مدل ۲۵ درجه سانتیگراد فرض شده است. دمای خط bc (سطح فوقانی نمونه آزمایش) در حین انجام آزمایش ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد است و دمای لبه‌های ah و de (لبه‌های کناری عایق حرارتی) در طول آزمایش ۲۵ درجه سانتیگراد خواهد بود. مکان مبدا مختصات در نقطه h شکل فوق است. دمای لبه زیرین صفحه آلومینیومی (خط gf) برابر ۲۵ درجه سانتیگراد است. چهار پارامتر هندسی عرض نمونه ( $W_t$ )، ارتفاع نمونه ( $H_t$ )، ارتفاع صفحه آلومینیومی ( $H_m$ ) و عرض عایق ( $W_{in}$ ) در شکل فوق نمایش داده شده‌اند. علاوه بر موارد فوق در این دو آزمایش تعداد و مکان سنسورهای حرارتی و مدت زمان انجام آزمایش نیز بهینه می‌شوند.

### خواص مواد

به منظور حل معادلات انتقال حرارت باید تخمین اولیه از ضرایب انتقال حرارت وجود داشته باشد. نمونه آزمایش عایق حرارتی فیبری در آزمایش‌های فوق از جنس آلومینا است. تخمین اولیه از خواص انتقال حرارت آلومینا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی مرجع [۲۳] به دست آمده و در جدول ۱ ارائه شده است. خواص انتقال حرارت صفحه آلومینیومی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- خواص انتقال حرارت نمونه عایق فیبری آلومینایی [۲۳].

Table 1. Heat transfer properties of alumina fiber insulation samples [23].

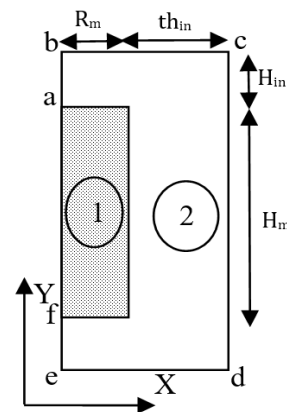
Temperature (°C)	933	719	553	231
Thermal Conductivity (Initial Estimation) ( $W/m^{\circ}C$ )	0.193	0.137	0.104	0.0547

جدول ۲- خواص انتقال حرارت صفحه آلومینیومی [۳۴].

Table 2. Heat transfer properties aluminum plate [34].

Temperature (°C)	227	127	77	27	0
Thermal Conductivity ( $W/m^{\circ}C$ )	237	240	240	237	236
Temperature (°C)	660	627	527	427	327
Thermal Conductivity ( $W/m^{\circ}C$ )	211	213	220	226	232

آلومینیومی پوشیده شده توسط عایق حرارتی از لحظه اول به ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. مکان مبدا مختصات در نقطه e شکل فوق است. چهار پارامتر هندسی ضخامت نمونه ( $th_{in}$ )، ارتفاع عایق محافظ ( $H_{in}$ )، ارتفاع سیلندر آلومینیومی ( $H_m$ ) و شعاع سیلندر آلومینیومی ( $R_m$ ) در شکل فوق نمایش داده شده‌اند.

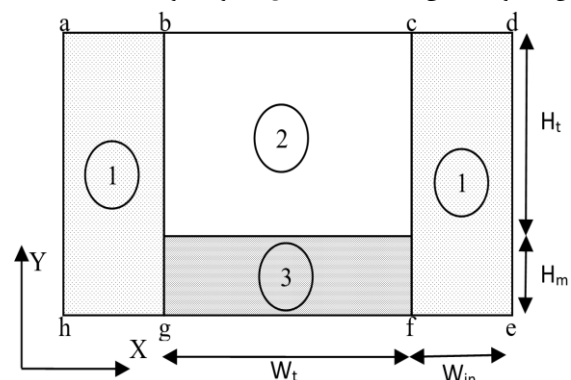


شکل ۴- مدل آزمایش سه نقطه. (۱) آلومینیوم (۲) نمونه آزمایش.

Fig. 4. 3 Point test model. (1) Aluminum (2) Test sample

### صفحه داغ حفاظدار

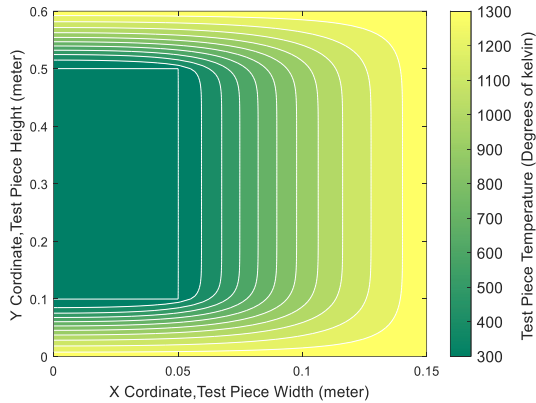
در روش صفحه داغ حفاظدار نمونه عایق بر روی صفحه آلومینیومی مستطیلی قرار می‌گیرد و سطح زیرین صفحه آلومینیومی توسط آب خنک می‌شود تا دمای آن همواره مقدار ثابت ۲۵ درجه سانتیگراد باقی بماند. اطراف مجموعه صفحه آلومینیومی و نمونه عایق توسط عایق حرارتی پوشیده می‌شود تا از اتلاف حرارت جلوگیری شود و از انتقال حرارت یک بعدی در راستای ضخامت عایق حرارتی اطمینان حاصل شود. مدل آزمایشگاهی این روش به صورت نشان داده شده در شکل ۵ خواهد بود.



شکل ۵- مدل آزمایش صفحه داغ حفاظدار. (۱) عایق حرارتی (۲) نمونه آزمایش (۳) آلومینیوم.

Fig. 5. Guarded hot plate test model. (1) Thermal insulation (2) Test sample (3) Aluminum.

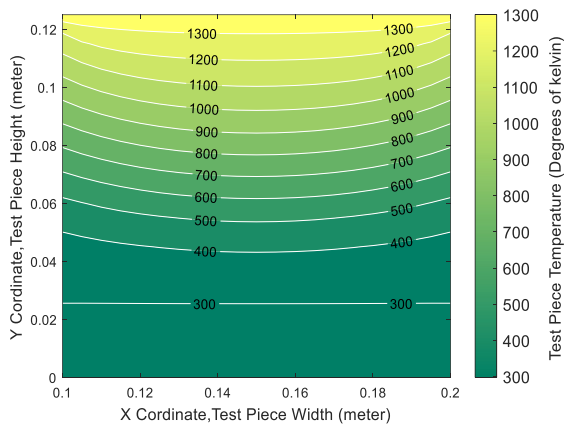
شکل ۸ نشان دهنده کانتور دما در مقطع نمونه آزمایش سه نقطه پس از گذشت ۳۰۰ ثانیه است. در این نمونه آزمایشگاهی ضخامت نمونه ۱۰ سانتیمتر، ارتفاع عایق محافظ ۱۰ سانتیمتر، ارتفاع سیلندر آلومینیومی ۴۰ سانتیمتر و شعاع سیلندر آلومینیومی ۵ سانتیمتر فرض شده است.



شکل ۸- کانتور دما در مقطع عایق در روش سه نقطه.

**Fig. 8.** Temperature contour through insulator thickness for guarded-hot plate.

در مورد روش صفحه داغ حفاظدار نیز توزیع دما پس از ۳۰۰ ثانیه اعمال بار حرارتی به صورت شکل ۹ خواهد بود. در این نمونه آزمایشگاهی عرض نمونه ۱۰ سانتیمتر، عرض عایق محافظ ۱۰ سانتیمتر، ارتفاع صفحه آلومینیومی ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع عایق نمونه ۱۰ سانتیمتر فرض شده است.



شکل ۹- کانتور دما در مقطع عایق در روش صفحه داغ حفاظدار.

**Fig. 9.** Temperature contour through insulator thickness for 3 point model.

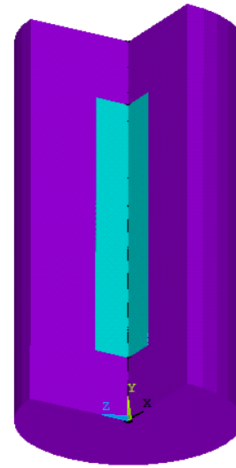
### بررسی اثر تعداد و مکان سنسورها

به منظور یافتن تعداد و مکان بهینه سنسورهای حرارتی، ده نقطه در طول ضخامت عایق حرارتی به عنوان کاندید برای قرارگیری سنسور در نظر گرفته

## نتایج

### توزیع دمای گذرا

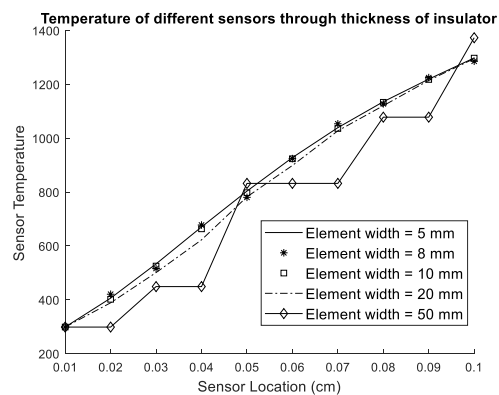
توزیع دما در مدل‌های فوق با حل معادلات انتقال حرارت گذرا به صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار ANSYS2024-R1 انجام می‌شود. همانطور که پیشتر بیان شد، مدل سه نقطه یک مدل استوانه‌ای با تقارن محوری حول محور اصلی استوانه است. نمونه  $\frac{3}{4}$  مدل اجزاء محدود در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶- نمونه  $\frac{3}{4}$  مدل اجزاء محدود روش سه نقطه.

**Fig. 6.**  $\frac{3}{4}$  finite element model of 3 point experiment.

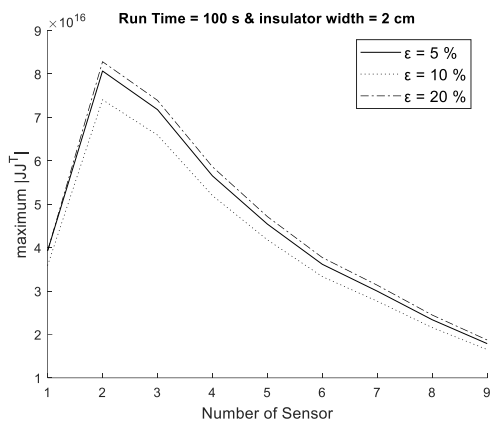
برای مدل‌سازی روش سه نقطه از المان متقارن محوری Plane77 و برای مدل‌سازی روش صفحه داغ حفاظدار از المان Plane55 استفاده شده است. شکل زیر نشان دهنده اثر اندازه المان بر توزیع دما پس از ۳۰۰ ثانیه اعمال بار حرارتی به نمونه آزمایشگاهی به ضخامت ۱۰ سانتیمتر است. با توجه به شکل ۷ طول المان برابر ۵ میلی‌متر فرض شده است.



شکل ۷- اثر اندازه المان بر توزیع دما پس از اعمال بار حرارتی.

**Fig. 7.** Effect of element size on temperature distribution after applying thermal load.

با افزایش یا کاهش مقدار ضریب انتقال حرارت به اندازه  $\varepsilon$  توزیع درجه حرارت تغییر خواهد کرد و در نتیجه ماتریس  $J$  را می‌توان محاسبه نمود. با محاسبه دترمینان ماتریس  $JJ^T$  می‌توان در مورد تعداد و محل سنسورهای حرارتی تصمیم‌گیری نمود. در ادامه تعداد و محل بهینه سنسورها در آزمایش سه نقطه محاسبه می‌شود. در پژوهش حاضر مقدار  $\varepsilon$  برابر با ۲٪ فرض شده است. با توجه به شکل ۱۲ مقدار  $\varepsilon$  اثری بر پارامترهای بهینه آزمایش ندارد.



شکل ۱۲- بررسی اثر مقدار  $\varepsilon$  بر پارامترهای بهینه آزمایش.

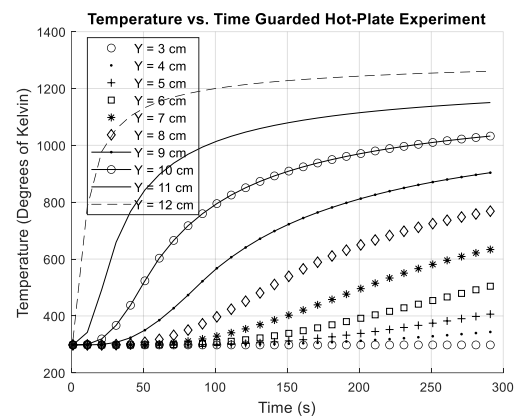
**Fig. 12.** Analysis of the effect of  $\varepsilon$  value on optimal test parameters.

در صورتی که ۱۰ نقطه فوق‌کاندید برای قرارگیری سنسور حرارتی باشد، تنها ۱۰ حالت مختلف برای قرارگیری یک سنسور در طول ضخامت عایق حرارتی قابل تصور است. با محاسبه دترمینان ماتریس  $JJ^T$  در این ده حالت، می‌توان بهترین مکان برای قرارگیری آن را به‌دست آورد. بهترین مکان برای سنسور حرارتی در فاصله ۱۲ سانتیمتری از محور تقارن است.

محاسبات فوق‌را برای دو سنسور نیز می‌توان تکرار نمود. در صورتی که از ۲ سنسور در طول ضخامت عایق استفاده شود، ۴۵ حالت مختلف ( $C_2^{10} = \frac{10!}{8!2!}$ ) برای قرارگیری سنسورها قابل تصور است. با محاسبه دترمینان ماتریس  $JJ^T$  در این ۴۵ حالت، می‌توان بهترین مکان برای قرارگیری این دو سنسور را به‌دست آورد. بهترین مکان برای دو سنسور حرارتی در فاصله ۱۰ و ۱۲ سانتیمتری از محور تقارن است.

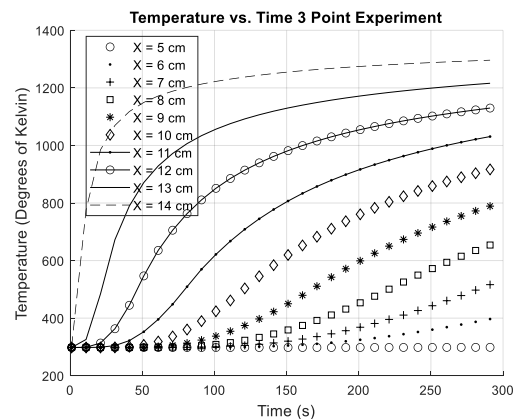
محاسبات فوق‌را برای تعداد بیشتر سنسور نیز می‌توان تکرار نمود. جدول ۳ نشان‌دهنده مکان بهینه سنسورها و مقدار دترمینان ماتریس  $JJ^T$  در این حالت‌ها است. لازم‌به‌ذکر است که برای تشکیل جدول ۳ دترمینان ماتریس  $JJ^T$  در ۱۰۲۳ حالت مختلف ( $\sum_{i=1}^{10} C_i^{10}$ ) محاسبه شده است.

می‌شود. مکان این سنسورها در فاصله ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصدی ضخامت عایق حرارتی و از سطح سرد عایق خواهد بود. در راستای عرضی نیز این سنسورها در مرکز عایق قرار خواهند گرفت (در مورد روش صفحه داغ حفاظدار در  $W_{in}+W_v/2$  و در مورد روش سه نقطه نیز در  $(H_m+H_{in}/2)$ ). به‌منظور مقایسه نمونه‌های آزمایشگاهی مختلف باید تغییرات دما بر حسب زمان را در این ۱۰ نقطه ثبت نمود. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان‌دهنده تغییرات دما بر حسب زمان در این ۱۰ نقطه است.



شکل ۱۰- تغییرات دما بر حسب زمان در ۱۰ نقطه در طول ضخامت عایق حرارتی در روش صفحه داغ حفاظدار.

**Fig. 10.** Temperature vs time at 10 points through insulation thickness in guarded hot plate method.



شکل ۱۱- تغییرات دما بر حسب زمان در ۱۰ نقطه در طول ضخامت عایق حرارتی در روش سه نقطه.

**Fig. 11.** Temperature vs time at 10 points through insulation thickness in 3 point method.

**اثر تعداد و محل قرارگیری سنسورها در آزمایش سه نقطه**  
هدف از آزمایش یافتن ضریب انتقال حرارت است بنابراین به‌منظور تشکیل ماتریس حساسیت باید مقدار ضریب انتقال حرارت را تغییر داد.

مکان برای ۳ سنسور حرارتی در فاصله ۹، ۱۰ و ۱۱ سانتیمتری از سطح سرد صفحه آلومینیومی است.

جدول ۴ نشان دهنده تعداد حالت‌ها، مکان بهینه سنسورها و مقدار بیشینه دترمینان ماتریس JJT در هنگامی است که از یک تا ۱۰ سنسور در عایق حرارتی استفاده شود. مشابه با حالت قبل برای تشکیل جدول ۴ دترمینان ماتریس JJT در ۱۰۲۳ حالت مختلف محاسبه شده است.

**جدول ۴-** مکان بهینه سنسور(ها) و دترمینان ماتریس JJT در روش صفحه داغ حفاظدار.

**Table 4.** Optimum location of sensors and relative determinant of JJ<sup>T</sup> for Guarded Hot Plate method.

Sensor No.	State No.	Optimum Location (cm)	Det(JJ <sup>T</sup> )
1	10	10	$2.2 \times 10^{16}$
2	45	9, 11	$3.5 \times 10^{16}$
3	120	9, 10, 11	$3.3 \times 10^{16}$
4	210	8, 9, 10, 11	$2.6 \times 10^{16}$
5	252	8, 9, 10, 11, 12	$2.2 \times 10^{16}$
6	210	7, 8, 9, 10, 11, 12	$1.9 \times 10^{16}$
7	120	6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	$1.3 \times 10^{16}$
8	45	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	$0.9 \times 10^{16}$
9	10	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	$0.6 \times 10^{16}$
10	1	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	$0.5 \times 10^{16}$

با توجه به جدول ۴، در روش آزمایش صفحه داغ حفاظدار نیز تعداد بهینه سنسور حرارتی دو عدد است که محل بهینه آن‌ها در فاصله ۹ و ۱۱ سانتی‌متری از سطح سرد صفحه آلومینیومی می‌باشد.

#### اثر هندسه و مدت زمان تست در آزمایش سه نقطه

در بخش قبل تعداد و مکان بهینه سنسور در آزمایش سه نقطه محاسبه شد. در این بخش اثر ضخامت عایق حرارتی و مدت زمان آزمایش بر تعداد سنسورها بررسی می‌شود. به همین منظور محاسبات فوق برای عایق‌های با ضخامت ۲، ۵ و ۲۰ سانتیمتر و مدت زمان آزمایش ۱۰۰ و ۶۰۰ ثانیه مجدداً تکرار می‌شود.

**جدول ۳-** مکان بهینه سنسور(ها) و دترمینان ماتریس JJ<sup>T</sup> در روش سه نقطه.

**Table 3.** Optimum location of sensors and relative determinant of JJ<sup>T</sup> for 3 point method.

Sensor No.	State No.	Optimum Location (cm)	Max(Det(JJ <sup>T</sup> ))
1	10	12	$3.7 \times 10^{16}$
2	45	10, 12	$3.9 \times 10^{16}$
3	120	10, 11, 12	$3.8 \times 10^{16}$
4	210	10, 11, 12, 13	$3.8 \times 10^{16}$
5	252	9, 10, 11, 12, 13	$3.4 \times 10^{16}$
6	210	8, 9, 10, 11, 12, 13	$2.7 \times 10^{16}$
7	120	8, 9, 10, 11, 12, 13, 14	$2.4 \times 10^{16}$
8	45	7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14	$1.8 \times 10^{16}$
9	10	6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14	$1.3 \times 10^{16}$
10	1	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14	$0.9 \times 10^{16}$

به‌منظور یافتن تعداد بهینه سنسورها باید مقادیر بیشینه دترمینان ماتریس JJT را به‌ازای هر تعداد سنسور با هم مقایسه نمود. این مقدار در جدول فوق ارائه شده است. بنابراین تعداد بهینه سنسور برای روش آزمایش سه نقطه ۲ عدد است.

در روش سه نقطه از سه سنسور استفاده می‌شود. سنسورهای اول و دوم بر روی سطوح سرد و گرم عایق حرارتی فرار می‌گیرند و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط آن‌ها صرفاً به‌منظور ثبت شرایط مرزی معادله انتقال حرارت است و تنها از نتایج یک سنسور به‌منظور تخمین ضریب انتقال حرارت استفاده می‌شود [۱۳]. در آزمایش حاضر دمای سطح داغ عایق ثابت است و شرط مرزی خط تقارن استوانه آلومینیومی تقارن محوری است.

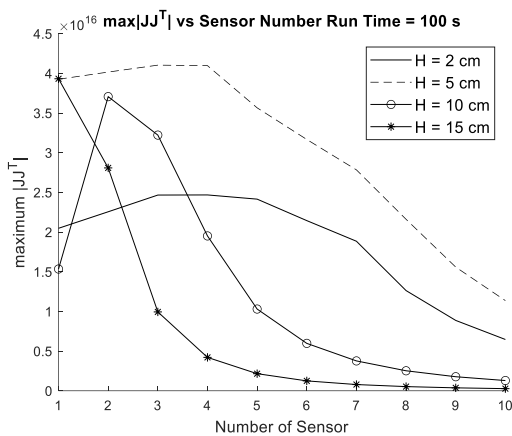
#### اثر تعداد و محل قرارگیری سنسورها در آزمایش صفحه داغ حفاظدار

محاسبات فوق را برای آزمایش صفحه داغ حفاظدار نیز می‌توان تکرار نمود. به‌عنوان نمونه در صورتی که از ۳ سنسور در طول ضخامت عایق استفاده شود، ۱۲۰ حالت مختلف برای قرارگیری سنسورها قابل تصور است. با محاسبه دترمینان ماتریس JJ<sup>T</sup> در این ۱۲۰ حالت، می‌توان بهترین مکان برای قرارگیری این ۳ سنسور را به‌دست آورد. بهترین

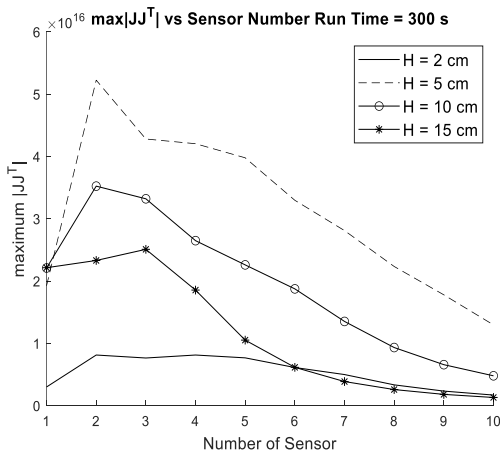
یک عدد است. اما در حالت‌های دیگر تعداد بهینه سنسور ۲ عدد خواهد بود. با توجه به شکل ۱۲ مشخص است که در بین حالت‌های بررسی شده، حالت بهینه استفاده از دو سنسور حرارتی بر روی عایق با ضخامت ۲ سانتیمتر در مدت زمان آزمایش ۱۰۰ ثانیه است و در این حالت مقدار دترمینان ماتریس حساسیت برابر با  $8.0 \times 10^{16}$  است. پارامترهای دیگر هندسی شامل ارتفاع عایق محافظ، ارتفاع سیلندر آلومینیومی و شعاع سیلندر تاثیر چندانی بر نتایج ندارند.

### اثر هندسه و مدت زمان تست در آزمایش صفحه داغ حفاظدار

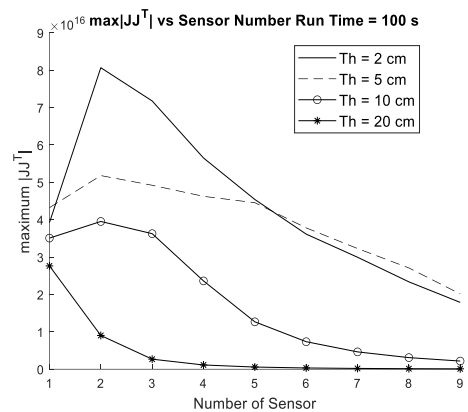
در بخش قبل تعداد و مکان بهینه سنسور محاسبه شد. در این بخش اثر ضخامت عایق حرارتی و مدت زمان آزمایش بر تعداد سنسورها بر آزمایش صفحه داغ حفاظدار بررسی می‌شود. به همین منظور محاسبات فوق برای عایق‌های با ضخامت ۲، ۵ و ۱۵ سانتیمتر و مدت زمان آزمایش ۱۰۰ و ۶۰۰ ثانیه مجدداً تکرار می‌شود. نتایج این بررسی‌ها در شکل ۱۴ ارائه شده است.



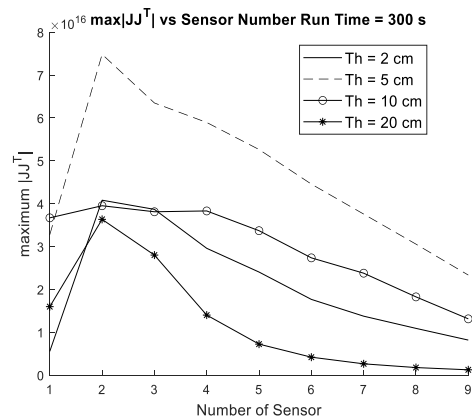
(A)



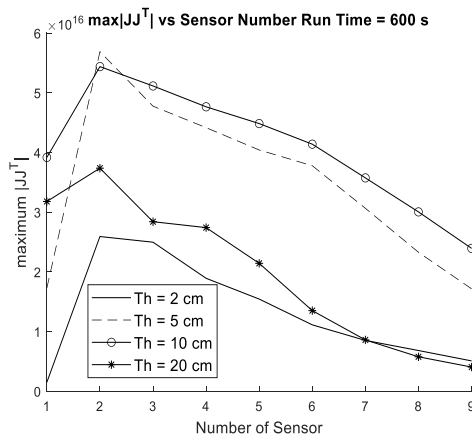
(B)



(A)



(B)



(C)

شکل ۱۳- اثر ضخامت عایق و مدت زمان آزمایش بر دترمینان ماتریس  $JJ^T$  در آزمایش سه نقطه. مدت زمان آزمایش: (A) ۱۰۰ ثانیه، (B) ۳۰۰ ثانیه، (C) ۶۰۰ ثانیه.

Fig. 13. Insulation thickness and test duration effect on determinant of the  $JJ^T$  matrix in the three-point test. Test duration: (A) 100 s (B) 300 s (C) 600 s.

با توجه به شکل ۱۳، در صورتی که ضخامت عایق حرارتی ۲۰ سانتیمتر و مدت زمان آزمایش ۱۰۰ ثانیه باشد، تعداد بهینه سنسور حرارتی

با توجه به نتایج فوق، حالت بهینه استفاده از دو سنسور حرارتی بر روی عایق به ارتفاع ۵ سانتیمتر در مدت زمان آزمایش ۳۰۰ ثانیه است و در این حالت مقدار دترمینان ماتریس حساسیت برابر با  $5.1 \times 10^{16}$  است.

پارامترهای دیگر هندسی شامل عرض عایق محافظ و ارتفاع و عرض صفحه آلومینیومی تاثیر چندانی بر نتایج ندارند.

### نتیجه‌گیری

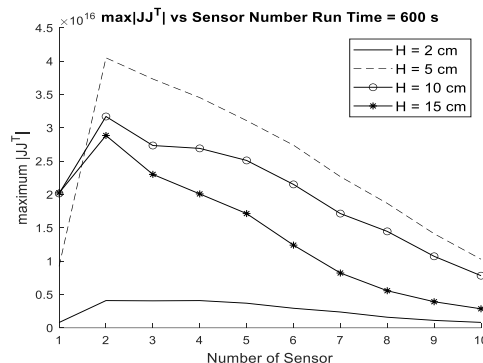
با وجود کاربرد وسیع روش‌های گذرا در اندازه‌گیری تجربی ضریب انتقال حرارت، استفاده از این روش‌ها در مورد عایق‌های فیبری محدود است. با توجه به بررسی انجام شده دو روش تجربی صفحه داغ حفاظدار و سه نقطه تنها روش‌های گذرا به‌منظور بررسی انتقال حرارت در عایق‌های دما بالای فیبری هستند. در این مقاله این دو روش تجربی با هم مقایسه شده‌اند. معیار مقایسه حداقل واریانس در نتیجه نهایی آزمایش است. به‌همین منظور داده‌هایی باید اندازه‌گیری شوند که بیشترین تاثیر را از پارامترهای مجهول بپذیرند. در پژوهش حاضر ابتدا این روش‌ها به‌همین‌سازی شدند و مشخص شد که در روش سه نقطه حالت بهینه استفاده از دو سنسور حرارتی بر روی عایق با ضخامت ۲ سانتیمتر در مدت زمان آزمایش ۱۰۰ ثانیه است ولی در روش صفحه داغ حفاظدار حالت بهینه استفاده از دو سنسور حرارتی بر روی عایق به ارتفاع ۵ سانتیمتر در مدت زمان آزمایش ۳۰۰ ثانیه است. دترمینان ماتریس حساسیت در آزمایش سه نقطه  $8.0 \times 10^{16}$  و در آزمایش صفحه داغ حفاظدار  $5.1 \times 10^{16}$  است. بنابراین واریانس نتیجه نهایی در روش آزمایش سه نقطه کمتر خواهد بود.

### تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده‌است.

### مراجع

- [1] S. C. Lee and G. R. Cunnington, "Conduction and radiation heat transfer in high-porosity fiber thermal insulation," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 14, no. 2, pp. 121–136, 2000, <https://doi.org/10.2514/2.6508>.
- [2] R. Arambakam, H. Vahedi Tafreshi, and B. Pourdeyhimi, "A simple simulation method for designing fibrous insulation materials," *Materials & Design*, vol. 44, pp. 99–106, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.058>.
- [3] A. Torabi, A. Abedian, M. A. Farsi, and R. Kalantarinezhad, "Axiomatic design of a reflective



(C)

شکل ۱۴- اثر ضخامت عایق و مدت زمان آزمایش بر دترمینان ماتریس  $JJ^T$  در آزمایش صفحه داغ حفاظدار. مدت زمان آزمایش: (A) ۱۰۰ ثانیه (B) ۳۰۰ ثانیه (C) ۶۰۰ ثانیه.

Fig. 14. Insulation thickness and test duration effect on determinant of the  $JJ^T$  matrix in Guarded Hot Plate method. Test duration: (A) 100 s (B) 300 s (C) 600 s.

جدول ۵ نشان دهنده تعداد سنسور بهینه و دترمینان ماتریس حساسیت متناظر آن در حالت‌های مختلف است.

جدول ۵- اثر مدت زمان آزمایش و ارتفاع عایق حرارت بر تعداد بهینه سنسور و دترمینان ماتریس  $JJ^T$  متناظر در روش آزمایشگاهی صفحه داغ حفاظدار (الف) تعداد سنسور و (ب) دترمینان ماتریس متناظر.

Table 5. Effect of test duration and insulation height on the optimal number of sensors and the determinant of the corresponding  $JJ^T$  matrix in the guarded hot plate method (A) Sensor No. (B)  $\text{Det}(JJ^T)$ .

(A)

		Test Time (s)		
		100	300	600
Insulation Height (Cm)	2	4	4	4
	5	3	2	2
	10	2	2	2
	15	1	3	2

(B)

		Test Time (s)		
		100	300	600
Insulation Height (Cm)	2	$2.5 \times 10^{16}$	$8.2 \times 10^{15}$	$4.1 \times 10^{15}$
	5	$4.1 \times 10^{16}$	$5.1 \times 10^{16}$	$3.9 \times 10^{16}$
	10	$3.8 \times 10^{16}$	$3.4 \times 10^{16}$	$3.1 \times 10^{16}$
	15	$3.9 \times 10^{16}$	$2.5 \times 10^{16}$	$2.8 \times 10^{16}$

- transient experimental approach." *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 179, 2022, Art. no. 107671, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107671>.
- [14] L. M. Heisig, R. Wulf, and T. M. Fieback, "Investigation and optimization of the hot disk method for thermal conductivity measurements up to 750°C," *International Journal of Thermophysics*, vol. 44, 2023, Art. no. 82, <https://doi.org/10.1007/s10765-023-03190-6>.
- [15] B. M. Mihiretie *et al.*, "Finite element modeling of the hot disc method," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 115, Part B, pp. 216-223, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.036>.
- [16] Y. Sekimoto, R. Abe, H. Kojima, H. Benten, and M. Nakamura, "Error factors in precise thermal conductivity measurement using 3  $\omega$  method for wire samples," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 148, pp. 2285-2296, 2023, <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11892-6>.
- [17] U. Hammerschmidt, J. Hameury, R. Strnad, E. Turzó-Andras, and J. Wu, "Critical review of industrial techniques for thermal-conductivity measurements of thermal insulation materials," *International Journal of Thermophysics*, vol. 36, no. 7, pp. 1530-1544, 2015, <https://doi.org/10.1007/s10765-015-1863-x>.
- [18] J. Gembarovic and R. E. Taylor, "A method for thermal diffusivity determination of thermal insulators," *International Journal of Thermophysics*, vol. 28, no. 6, pp. 2164-2175, 2007, <https://doi.org/10.1007/s10765-007-0279-7>.
- [19] M. Tychanicz-Kwiecień, J. Wilk, and P. Gil, "Review of high-temperature thermal insulation materials," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 33, no. 1, pp. 271-284, 2019, <https://doi.org/10.2514/1.T5420>.
- [20] K. Daryabeigi, "Heat transfer in high-temperature fibrous insulation," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 17, no. 1, pp. 10-20, 2003, <https://doi.org/10.2514/2.6746>.
- [21] Kamran Daryabeigi, "Thermal analysis and design of multi-layer insulation for re-entry aerodynamic heating," in *35th AIAA Thermophysics Conference*, Anaheim, CA, USA, 2001, Paper 2834 <https://doi.org/10.2514/6.2001-2834>.
- [22] B. M. Zhang, W. H. Xie, S. yi. Du, and S. Y. Zhao, "An experimental study of effective thermal conductivity of high temperature insulations," *Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 130, no. 3, 2008, Art. no. 034504, <https://doi.org/10.1115/1.2804946>.
- [23] S. Y. Zhao, B. M. Zhang, and S. Y. Du, "An inverse analysis to determine conductive and radiative properties of a fibrous medium," *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, vol. 110, no. 13, pp. 1111-1123, 2009, multilayer high-temperature insulator," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 233, no. 2, pp. 457-471, 2017, <https://doi.org/10.1177/0954410017737576>.
- [4] A. Torabi, A. Abedian, and M. A. Farsi, "An approximate methodology to simulate combined conduction-radiation heat transfer for multi-layer insulator," *Scientia Iranica*, vol. 27, no. 6, pp. 2924-2932, 2020, [10.24200/sci.2019.53008.3003](https://doi.org/10.24200/sci.2019.53008.3003).
- [5] N. Yüksel, "The Review of Some Commonly Used Methods and Techniques to Measure the Thermal Conductivity," in *Insulation Materials in Context of Sustainability*, A. Almusaed and A. Almssad, Eds. Croatia: IntechOpen, 2016, pp. 113-138.
- [6] H. Liu, J. Liu, Y. Tian, X. Wu, and Z. Li, "Investigation of high temperature thermal insulation performance of fiber-reinforced silica aerogel composites," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 183, 2023, Art. no. 107827, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107827>.
- [7] *Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*, C177-19E01, ASTM, 2019.
- [8] *Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*, C0518-21, ASTM, 2020.
- [9] D. Fustinoni, L. Vitali, P. Gramazio, and A. Niro, "Accurate contact resistance characterization for thermal conductivity measurement with the heat flow meter method," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1868, 2021, Paper 012005, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1868/1/012005>.
- [10] R. E. Taylor, J. Gembarovic, and K. D. Maglic, "Thermal diffusivity by the laser flash technique," in *Characterization of Materials*, E. N. Kaufman, Ed. vol. 1, United States: John Wiley & Sons, 2002, <https://doi.org/10.1002/0471266965.com102>.
- [11] G. C. Glatzmaier and W. Fred Ramirez, "Simultaneous measurement of the thermal conductivity and thermal diffusivity of unconsolidated materials by the transient hot wire method," *Review of Scientific Instruments*, vol. 56, no. 7, pp. 1394-1398, 1985, <https://doi.org/10.1063/1.1138491>.
- [12] M. J. Assael, K. D. Antoniadis, D. Velliadou, and W. A. Wakeham, "Correct use of the transient hot-wire technique for thermal conductivity measurements on fluids," *International Journal of Thermophysics*, vol. 44, 2023, Art. no. 85, <https://doi.org/10.1007/s10765-023-03195-1>.
- [13] N. P. Ramos, M. de Melo Antunes, G. Guimarães, and S. M. M. de Lima e Silva, "Simultaneous Bayesian estimation of the temperature-dependent thermal properties of a metal slab using a three-dimensional

- [29] O. M. Alifanov, *Inverse Heat Transfer Problems*, Springer Berlin Heidelberg, 1994.
- [30] K. A. Woodbury, *Inverse Engineering Handbook*, 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2002, <https://doi.org/10.1201/9781420041613>.
- [31] H. R. B. Orlande, O. Fudym, D. Mailliet, and R. M. Cotta, *Thermal Measurements and Inverse Techniques*, Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [32] H. R. Alimohammadi, H. Naseh, and F. Ommi, "A new synthetic metamodel methodology for liquid-propellant engine's cooling system optimization," *Heat Transfer*, vol. 50, no. 1, pp. 907–941, 2020, <https://doi.org/10.1002/htj.21911>.
- [33] R. Taktak, "Design and validation of optimal experiments for estimating thermal properties of composite materials," Ph.D. dissertation, Department of Mechanical Engineering, Michigan State University, USA, 1992.
- [34] P. G. Klemens and R. K. Williams, "Thermal conductivity of metals and alloys," *International Metals Reviews*, vol. 31, no. 1, pp. 197–215, 1986, <https://doi.org/10.1179/imtr.1986.31.1.197>.
- <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2009.03.022>.
- [24] S. Y. Zhao, B. M. Zhang, and X. D. He, "Temperature and pressure dependent effective thermal conductivity of fibrous insulation," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 48, no. 2, pp. 440–448, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.05.003>.
- [25] A. J., Kassab, Review of the book *Inverse Heat Transfer: Fundamentals and Applications*, by M.N. Ozisik and H. R. B. Orlande, *Applied Mechanics Reviews*, vol. 55, no. 1, pp. B18-B19, 2002, <https://doi.org/10.1115/1.1445337>.
- [26] H. R. B. Orlande, *Inverse Heat Transfer: Fundamentals and Applications*, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2021, <https://doi.org/10.1201/9781003155157>.
- [27] P. C. Sabatier, *Applied Inverse Problems: Lectures presented at the RCP 264 "Etude Interdisciplinaire des Problemes Inverses"*, 1st. Hamburg, Germany: Springer, 1978.
- [28] J. V. Beck and K. J. Arnold, *Parameter Estimation in Engineering and Science*, New York: John Wiley & Sons, 1977.