

# بررسی انواع روش‌ها و بهینه‌سازی یک آزمایش گذرا برای اندازه‌گیری ضریب انتقال گرما در عایق دما بالای فیبری

امین ترابی\*

دکتری، دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، amin.torabi.sharif@gmail.com

سید داوود موسویان

استادیار، دانشکده هوافضا، دانشگاه شهید ستاری، تهران، ایران، davood.moosavian@gmail.com

## چکیده

اندازه‌گیری رسانایی گرمایی به دو روش پایا و گذرا انجام می‌شود. روش‌های گذرا به دلیل هزینه پایین‌تر و محدوده دمایی بالا در سال‌های اخیر تقریباً به طور کامل جایگزین روش‌های حالت پایا شده است. با این وجود در عایق‌های گرمایی فیبری دما بالا به ندرت از روش‌های گذرا استفاده می‌شود. به همین دلیل با وجود هزینه بالا، روش پایا صفحه داغ حفاظدار هنوز پرکاربردترین روش به منظور اندازه‌گیری رسانایی گرمایی در عایق‌های فیبری است. هدف از این مقاله معرفی انواع روش‌های اندازه‌گیری رسانایی گرمایی و طراحی یک آزمایش گذرا برای اندازه‌گیری رسانایی گرمایی است. در آزمایش‌های گذرا دما در نقاط مختلف عایق در طول زمان اندازه‌گیری می‌شود و رسانایی گرمایی با توجه به تغییرات دما بر حسب زمان محاسبه می‌شود. آزمایش بهینه معمولاً با هدف به حداقل رساندن داده‌های تجربی که از پارامترهای ورودی تأثیر نمی‌پذیرند طراحی می‌شود. در این پژوهش مکان بهینه حسگرهای گرمایی با فرض قرارگیری ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ حسگر مختلف در فاصله {۶}، {۴ و ۷}، {۱ و ۶ و ۷}، {۱ و ۵ و ۶ و ۷}، {۱ و ۵ و ۶ و ۷ و ۸} و {۱ و ۴ و ۵ و ۶ و ۷ و ۸} سانتیمتری از لبه سرد عایق محاسبه شده است.

واژه‌های کلیدی: طراحی آزمایش، عایق گرمایی دما بالا، آزمایش گذرا، مکان حسگر گرمایی، رسانایی گرمایی، عایق‌های فیبری.

## Investigating various methods and optimizing a transient test to measure the heat transfer coefficient in high temperature fibrous insulation

A. Torabi

Aerospace faculty, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

S. M. Nikooei

Aerospace faculty, Shahid Sattari University, Tehran, Iran

## Abstract

Thermal conductivity measurement is conducted using two methods: steady-state and transient. In recent years, transient methods have almost completely replaced steady-state approaches due to their lower cost and wider temperature range. However, in high-temperature fibrous thermal insulations, transient methods are rarely used. As a result, despite its high cost, the guarded hot plate steady-state method remains the most widely used approach for measuring thermal conductivity in fibrous insulations. The purpose of this article is to introduce various methods for measuring thermal conductivity and to design a transient experiment for this purpose. In transient experiments, the temperature at different points of the insulation is measured over time, and thermal conductivity is calculated based on temperature variations. Optimized experiments are typically designed to minimize experimental data that are unaffected by input parameters. In this study, the optimal placement of thermal sensors is determined assuming 1, 2, 3, 4, 5, and 6 sensors positioned at distances of {6}, {4 and 7}, {1, 6, and 7}, {1, 5, 6, and 7}, {1, 5, 6, 7, and 8}, and {1, 4, 5, 6, 7, and 8} centimeters from the cold edge of the insulation.

**Keywords:** Experiment design, High Temperature insulator, Transient experiment, Temperature sensor Location, Thermal Conductivity, Fibrous insulation.

به عنوان تابعی از دما محاسبه می‌گردد [۵-۲].

با وجود کاربرد وسیع روش‌های گذرا در اندازه‌گیری رسانایی گرمایی، از این روش‌ها در اندازه‌گیری رسانایی گرمایی عایق‌های فیبری دما بالا کمتر استفاده می‌شود. در مراجع بررسی شده موضوع طراحی و بهینه‌سازی آزمایش گذرا برای اندازه‌گیری رسانایی گرمایی عایق‌های فیبری بررسی نشده است. در این مقاله انواع روش‌های تجربی اندازه‌گیری ضرایب رسانایی گرمایی معرفی می‌شوند و یک گزینه قابل قبول برای آزمایش گذرا معرفی می‌گردد. در مرحله بعد این روش تجربی با هدف اندازه‌گیری رسانایی گرمایی در عایق‌های فیبری دما بالا طراحی و بهینه می‌شود.

## ۲- روش‌های تجربی

روش‌های تجربی اندازه‌گیری رسانایی گرمایی معادل متنوع هستند. این روش‌ها در طیف گسترده‌ای از کاربردها، از جمله طراحی

## ۱- مقدمه

رویکرد اصلی برای بررسی عملکرد گرمایی عایق‌های فیبری اندازه‌گیری تجربی رسانایی گرمایی معادل است. رسانایی گرمایی معادل اثر روش‌های رسانایی گرمایی تابشی، همرفتی و رسانشی را در خود دارد. در حقیقت به منظور سهولت در مقایسه عملکرد عایق‌های مختلف از این پارامتر معادل استفاده می‌شود [۱].

روش‌های آزمایشگاهی مختلفی برای محاسبه رسانایی گرمایی معادل عایق ارائه شده است. این روش‌ها به دو دسته پایا و گذرا تقسیم‌بندی می‌شوند. کاربرد روش‌های گذرا به دلیل هزینه کمتر نسبت به روش‌های پایا بیشتر است. در روش‌های گذرا بارگذاری گرمایی به روشی به عایق اعمال می‌شود. سپس توزیع دما توسط حسگرهایی در طول عایق ثبت می‌شود. نهایتاً با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی یا حل معکوس معادلات رسانایی گرمایی، رسانایی گرمایی

\* نویسندگان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: amin.torabi.sharif@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵

کوره‌های دما بالا، توسعه‌ی پوشش‌های سد گرمایی برای توربین‌های گازی و طراحی مواد برای سیستم‌های ذخیره انرژی در دمای بالا استفاده می‌شوند. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری رسانایی گرمایی مؤثر وجود دارد که هر روش برای طیف مخصوصی از مواد و درجه گرما مناسب است. این روش‌ها به دو دسته پایا و گذرا تقسیم‌بندی می‌شوند [۶].

### ۳- روش‌های پایا<sup>۱</sup>

در روش پایا دما در هر نقطه از نمونه ثابت است و با زمان تغییر نکند. یکی از معایب این روش زمان طولانی آن به منظور دستیابی به تعادل مورد نظر است. در این روش از قانون رانشن فوریه یک بعدی برای اندازه‌گیری رسانایی گرمایی استفاده می‌شود. از مزایای روش حالت پایا می‌توان به مواردی چون بیان ساده ریاضی، مناسب برای نمونه‌های با رسانایی کم، صرف زمان قابل قبول و تاحدی مناسب برای عایق‌های ریز دانه‌ای و یا فیبری اشاره کرد و معایب آن شامل پیچیدگی دستگاه با دقت بالا، صرف زمان طولانی، خطای غیرقابل اندازه‌گیری به دلیل مقاومت گرمایی ناشی از تماس، دشواری اندازه‌گیری نمونه‌هایی با اشکال پیچیده هندسی و خطای استفاده از نمونه‌های حاوی رطوبت می‌باشد [۷].

#### ۳-۱- روش صفحه داغ حفاظدار

این روش رایج‌ترین و مؤثرترین روش برای اندازه‌گیری رسانایی گرمایی مؤثر عایق گرمایی است. این روش متکی بر اختلاف دمای ثابت در طول ضخامت یک نمونه می‌باشد و هدف اصلی آن کنترل جریان گرما است. از معایب این روش می‌توان به صرف زمان طولانی، نیاز به گرادیان دمای نسبتاً زیاد، نمونه بزرگ و همچنین وجود مقاومت تماس بین ترموکوپل و سطح نمونه اشاره نمود. این روش بر مبنای رسانایی گرمایی ثابت بین صفحه داغ و صفحه سرد است. پس از رسیدن به حالت پایا، رسانایی گرمایی را براساس قانون فوریه تعیین کرد. این دستگاه برای نمونه‌های همگن خشک بسیار مناسب است ولی برای موادی که مقداری رطوبت دارند مناسب نیست. این روش می‌تواند برای عایق‌های گرمایی مثل شیشه‌های پلیمری، سرامیک‌ها و همچنین مایعات و گازها در محدوده دمایی ۸۰ تا ۸۰۰ کلوین استفاده شود [۲].

عدم قطعیت روش صفحه داغ حفاظدار برای اندازه‌گیری رسانایی گرمایی در دمای اتاق، حدود ۲٪ است ولی در دمای بسیار بالاتر، مانند ۶۰۰ درجه سلسیوس، به دلیل اتلاف گرما اضافی به محیط، عدم قطعیت به حدود ۵٪ افزایش می‌یابد [۸].

#### ۳-۲- روش جریان سنج گرمایی

روش جریان سنج گرمایی بر اساس اصول روش صفحه داغ حفاظدار است، اما با آن یکسان نیست. عیب اصلی روش صفحه داغ حفاظدار این است که همانطور که در بالا گفته شد بسیار وقت‌گیر است. در مقابل، جریان سنج‌های گرمایی تجهیزاتی دقیق و سریع هستند و عملکرد این دستگاه‌ها برای اندازه‌گیری رسانایی گرمایی مواد

با رسانایی پایین مناسب است. حداکثر دمای این روش حدود ۱۰۰ درجه سلسیوس در کاربردهای عملی است. ایده اصلی جریان سنج گرمایی بدست آوردن شار گرمایی از روی اندازه‌گیری افت دما در طول عایق گرمایی می‌باشد. اندازه‌گیری شار گرمایی با استفاده از یک نمونه مرجع معتبر شناخته شده یا یک حسگر شار گرمایی انجام می‌شود [۷].

عدم قطعیت این روش نسبت به روش صفحه داغ حفاظدار بیشتر است. عدم قطعیت در کالیبراسیون دستگاه اندازه‌گیری جریان گرمایی یکی از عواملی است که تاثیر بسزایی بر عدم قطعیت این روش می‌گذارد. در دمای بسیار بالا، عدم قطعیت اندازه‌گیری به دلیل از رسانایی گرمایی به محیط افزایش می‌یابد. این می‌تواند منجر به عدم قطعیت‌هایی در حدود ۵٪ شود [۹و۸].

#### ۳-۳- روش گرمایش مستقیم

از نقاط ضعف روش‌های پایا، صرف زمان طولانی و دشواری تعیین تلفات گرمایی بویژه در دمای بالا است. این معایب را می‌توان با روش گرمایش مستقیم برطرف کرد که می‌تواند برای مواد رسانای الکتریکی مانند فلزات استفاده شود. در این روش نمونه سیم، لوله و یا میله شکل در محفظه خلا و در میان دو سینک گرمایی که توسط مایع خنک می‌شوند قرار می‌گیرد و نمونه تا دمای بین ۳۰۰ تا ۴۰۰۰ کلوین گرم می‌شود. افت ولتاژ و دما در وسط میله و در هر انتها میله اندازه‌گیری می‌شود و از این داده ها، رسانایی گرمایی و مقاومت الکتریکی ویژه بدست می‌آید [۱۰و۱۱].

#### ۳-۴- نتیجه‌گیری روش‌های پایا

بررسی روش‌های مختلف نشان داد که برای اندازه‌گیری خواص رسانایی گرمایی دما بالای عایق‌های سرامیکی به روش پایا بهترین روش "روش صفحه داغ حفاظدار" است که در مراجع [۱۲و۱۳] از این روش استفاده شده است.

#### ۴- روش‌های گذرا

در این روش دما در نقاط مختلف و در طول فرایند گرمایش ثبت شده و خواص رسانایی گرمایی با استفاده از اطلاعات ثبت شده تعیین می‌شود. این روش بر پایه اندازه‌گیری تغییرات دما در طول زمان است، بنابراین تغییرات کوچک در سیگنال دمای حسگرهای دما باید بررسی شود. این روش بر پایه ارزیابی دمای اندازه‌گیری شده با تغییر شار گرمایی وارد بر عایق گرمایی در مدتی کوتاه است. بنابراین بازه زمانی آزمایش می‌تواند از چند ثانیه و تا چند دقیقه باشد، این مهم بر مدت زمان آزمایش و در نتیجه هزینه آن تاثیر گذار است [۱۴].

محاسبه خواص رسانایی گرمایی از داده‌های گرمایی ثبت شده، به چندین روش مختلف انجام می‌شود. روش‌های Levenberg-Marquardt، گرادیان مزدوج و گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی سه روش اصلی حل معکوس معادلات انتقال گرما هستند [۱۵].

#### ۴-۱- روش سیم داغ

روش سیم داغ یک تکنیک گذرا است که براساس اندازه‌گیری

<sup>1</sup> Steady

افزایش دما در یک فاصله مشخص از منبع گرما خطی (سیم داغ) انجام می‌شود. اگر فرض شود منبع گرما خروجی ثابت و یکنواختی دارد، رسانایی گرمایی را می‌توان مستقیماً از تغییر دما در یک بازه زمانی مشخص بدست آورد.

روش سیم داغ کاربرد وسیعی در تعیین رسانایی گرمایی سیالات دارند. در حالت جامد، قرار گرفتن سیم داغ بین دو نمونه باعث بروز خطای ناشی از مقاومت گرمایی محل تماس دو نمونه خواهد شد. در روش سیم داغ معمولاً از دو سیم استفاده می‌شود. سیم‌ها نقش متفاوتی دارند، سیم گرمکن و سیم حسگر دما. آرایش‌های مختلف چینش سیم‌ها آرایش متقاطع و آرایش موازی هستند [۱۶].

#### ۴-۲- روش دیسک داغ

روش دیسک داغ برای اندازه‌گیری دقیق رسانایی گرمایی از ۰/۰۰۵ تا ۵۰۰ w/m.k در بازه دمایی ۳۰ تا ۱۲۰۰ کلون طراحی شده است. این روش برای مواد عایق و مواد رسانای الکتریکی استفاده می‌شود. از مزایای اصلی این روش استخراج سریع نتایج (معمولاً حدود کمتر از ۱۰ دقیقه) است. دیسک داغ از یک حسگر به شکل مارپیچ استفاده می‌نماید. این حسگر از تعدادی دایره متحدالمرکز تشکیل شده که جریان از یک سر به سر دیگر آن منتقل می‌شود. حسگر بین دو قطعه قرار می‌گیرد، جریان از مارپیچ نیکل عبور می‌کند و باعث افزایش دما می‌شود. با اندازه‌گیری دما در طول زمان، رسانایی گرمایی را می‌توان به دقت محاسبه کرد. در شکل زیر حسگر دیسک داغ نشان داده شده است. بر اساس مطالعات، روش دیسک داغ می‌تواند به دقتی حدود  $\pm 5\%$  دست یابد. این سطح از عدم قطعیت به دلیل مدل‌های ریاضی پیچیده استفاده شده در این روش است [۱۷].

#### ۴-۳- روش فلش لیزری

این روش رایج‌ترین روش برای تعیین خواص گرمایی جامدات است و می‌تواند خواص گرمایی شیشه‌ها، فلزات و سرامیک‌ها را در محدوده دمایی ۱۰۰- تا ۳۰۰۰ درجه سلسیوس اندازه‌گیری کند در این روش رسانایی گرمایی با در نظر گرفتن ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی در شرایط آدیاباتیک محاسبه می‌شود. در این روش یک پالس لیزر به جلوی نمونه ارسال و تغییرات دمایی در عقب نمونه اندازه‌گیری می‌شود و رسانایی گرمایی براساس تغییر دما نسبت به زمان محاسبه می‌شود [۱۸].

#### ۴-۴- روش ۳ امگا<sup>۱</sup>

روش ۳ امگا یک روش اندازه‌گیری الکتروترمال برای تعیین رسانایی گرمایی، پخشندگی گرمایی و گرمای ویژه است. این روش برای اندازه‌گیری رسانایی گرمایی مواد حجیم توسعه یافت، ولی بعداً استفاده از این روش به اندازه‌گیری رسانایی گرمایی در لایه‌های نازک تا ضخامت چند نانومتر گسترش یافت. سپس، از روش ۳ امگا برای اندازه‌گیری رسانایی گرمایی درون صفحه و خارج از صفحه مواد غیر آیزوتروپیک استفاده شد.

در روش ۳ امگا عایق با عبور جریان متناوب از یک نوار فلزی گرم می‌شود. این روش مشابه روش سیم داغ است. یک جریان AC با فرکانس  $\omega$  از سیم عبور می‌کند. سیم به طور همزمان به عنوان گرمکن و دماسنج استفاده می‌شود. گرمایی تولید شده توسط این فرآیند در داخل نمونه منتشر می‌شود. از آنجایی که جریان با فرکانس  $\omega$  هدایت می‌شود و مقاومت با فرکانس  $2\omega$  تغییر می‌کند، ولتاژ با فرکانس  $3\omega$  اندازه‌گیری می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که عدم قطعیت در اندازه‌گیری رسانایی گرمایی با استفاده از روش ۳ امگا بین ۵٪ تا ۸٪ است [۱۹].

#### ۴-۵- روش فیچ

در این روش خواص گرمایی مواد با رسانایی گرمایی پایین با استفاده از یک منبع گرمایی سطحی اندازه‌گیری می‌شود. این روش از یک منبع گرما و یک گیرنده گرما تشکیل شده است. منبع گرما ظرفی است که از یک مایع با دمای ثابت پر شده است و گیرنده گرما یک پلاگین مسی است. نمونه بین قطعه مسی و ظرف قرار می‌گیرد. دمای بلوک مسی و نمونه در ابتدای آزمایش یکسان است. رسانایی گرمایی نمونه بدون در نظر گرفتن مقاومت گرمایی تماسی محاسبه می‌شود [۸].

#### ۴-۶- روش سه نقطه

روش سه نقطه برای اندازه‌گیری رسانایی گرمایی عایق گرمایی توسعه داده شده است. در این روش عایق استوانه‌ای شکل بین دو صفحه فلزی نازک قرار گرفته است. سطح فلزی بیرونی در معرض تابش شدید یک لامپ رشته‌ای قرار می‌گیرد تا یک اغتشاش گرمایی ایجاد کند. دما در سه مکان در امتداد نمونه آزمایش اندازه‌گیری می‌شود. دو ترموکوپل بر روی دو سطح فلزی قرار می‌گیرند و ترموکوپل سوم در داخل نمونه و در محل مشخصی قرار می‌گیرد. دمای سطح‌های بیرونی فلزی به عنوان شرایط مرزی استفاده می‌شوند و رسانایی گرمایی با توجه به تغییرات دمای حسگر سوم بر حسب زمان محاسبه می‌شود [۱۲].

#### ۴-۷- جمع بندی روش‌های گذرا

روش‌های گذرا در سال‌های اخیر تقریباً به طور کامل جایگزین روش‌های پایا شده و به ابزار غالب برای تعیین رسانایی گرمایی بسیاری از انواع مواد جامد تبدیل شده است. با این وجود از این روش‌ها به ندرت برای عایق‌های فیبری استفاده می‌شود. از جمله مزایای این روش می‌توان به نمونه‌های بسیار کوچک‌تر، اندازه‌گیری در مدت زمان کوتاه و محدوده وسیع‌تر دمای کاری اشاره نمود. دریاپیگی از روش گذرایی مشابه با صفحه داغ حافظدار به منظور اندازه‌گیری رسانایی گرمایی عایق چند لایه استفاده نموده است. بنابراین در این پژوهش از مدل ارائه شده برای صفحه داغ حافظدار به عنوان مدل برای آزمایش گذرای رسانایی گرمایی استفاده می‌شود [۱۲].

#### ۵- طراحی آزمایش بهینه

هدف از آزمایش بهینه حصول اطمینان از این است که پارامترهای برآورد شده حداقل واریانس را دارند. آزمایش بهینه معمولاً با هدف به

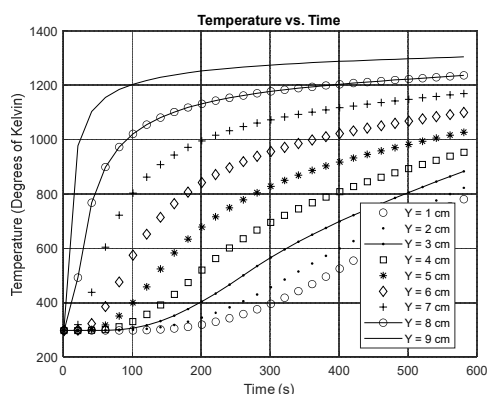
<sup>۱</sup> 3 omega

جدول ۱- تخمین اولیه رسانایی گرمایی [۲۳]

| ردیف | دما (°C) | رسانایی گرمایی (W/m°C) |
|------|----------|------------------------|
| ۱    | ۲۳۱      | ۰/۰۵۴۷                 |
| ۲    | ۵۵۳      | ۰/۱۰۴                  |
| ۳    | ۷۱۹      | ۰/۱۳۷                  |
| ۴    | ۹۳۳      | ۰/۱۹۳                  |

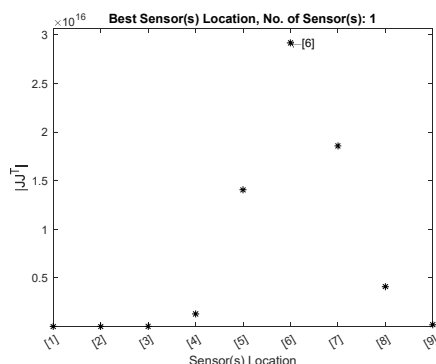
## ۶- بررسی اثر تعداد و مکان حسگرها

به منظور بررسی مکان حسگرهای گرمایی و تعداد آنها، دما در وسط عرض عایق و ۹ نقطه در طول ضخامت آن در طول زمان ثبت شده است.



شکل ۲- تغییرات دما بر حسب زمان در ۹ نقطه در طول ضخامت عایق

شکل ۲ نشان دهنده تغییرات دما بر حسب زمان در این ۹ نقطه است. ماتریس حساسیت با محاسبه اثر تغییر رسانایی گرمایی بر توزیع دما در طول زمان محاسبه می‌شود. حالت بهینه در صورتی رخ می‌دهد که مقدار دترمینان ماتریس  $JJ^T$  بیشینه باشد. با فرض وجود فقط یک حسگر در طول ضخامت عایق گرمایی، این حسگر در ۹ مکان مختلف می‌تواند قرار گیرد.



شکل ۳- اثر مکان یک حسگر بر دترمینان ماتریس  $JJ^T$

با توجه به شکل ۳ بهترین مکان برای یک حسگر گرمایی در ۶ سانتی‌متری کف عایق است. با افزایش تعداد حسگرها به ۲ عدد، ۳۶ حالت ( $C_2^9 = \frac{9!}{7! \times 2!}$ ) مختلف

حداقل رساندن داده‌های تجربی که از پارامترهای ورودی تأثیر نمی‌پذیرند طراحی می‌شود. بدین منظور آزمایش به گونه‌ای طراحی می‌شود که دترمینان گرام ماتریس حساسیت ( $JJ^T$ ) بیشینه باشد.

$$J = \left[ \frac{\partial T^T(P)}{\partial P} \right]^T \quad (1)$$

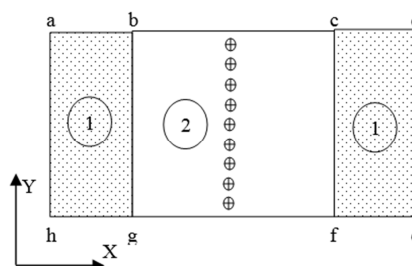
ماتریس حساسیت ( $J$ ) در معادله (۱) معرفی شده است. المان‌های ماتریس حساسیت با محاسبه توزیع دمای گذرا و در نظر گرفتن تخمین اولیه برای پارامترهای مجهول  $P_i$  تعیین می‌شود [۲۲-۲۰].

## ۵-۱- صحنه‌گذاری

در مرجع [۲۱] بهینه‌سازی آزمایش‌های مختلف رسانایی گرمایی در شرایط مرزی مختلف انجام شده است. در مورد آزمایش رسانایی گرمایی یک بعدی با شرایط مرزی یک سر آدیاباتیک و سر دیگر در مقابل شار ثابت گرمایی، دترمینان ماتریس  $JJ^T$  محاسبه شده است. به منظور صحنه‌گذاری نتایج، در این پژوهش نیز دترمینان ماتریس فوق محاسبه شد. زمان بی بعد بهینه برای انجام آزمایش در محاسبات عددی حاضر ۲/۸۶ محاسبه شده است و این مقدار در مرجع [۲۱] ۲/۷۶ است.

## ۵-۲- مدل آزمایش

مدل در نظر گرفته شده برای آزمایش گذرا شبیه به مدل صفحه داغ حفاظ دار است. شکل زیر نشان دهنده مدل مورد استفاده است.



شکل ۱- مدل آزمایش به منظور شبیه سازی آزمایش ۱- عایق گرمایی، ۲- نمونه آزمایش، ۳- مکان حسگر

در مدل ارائه شده در شکل ۶ نمونه آزمایش بین دو عایق قرار گرفته است. دمای اولیه مدل فوق ۲۵ درجه سلسیوس فرض شده است. دمای خط bc (سطح فوقانی نمونه آزمایش) در حین انجام آزمایش ۱۱۰۰ درجه سلسیوس است. مدت زمان آزمایش ۱۰ دقیقه (۶۰۰ ثانیه) فرض شده است. عرض نمونه آزمایش ۵۰۰ میلی‌متر و ارتفاع آن ۰/۱ متر فرض شده است. مکان مبدا مختصات در شکل فوق نمایش داده شده است. حل معادلات رسانایی گرمایی گذرا به صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار ANSYS 2024 R1 انجام می‌شود. در این تحلیل از المان plane55 استفاده و اندازه المان‌ها برابر ۵ میلی‌متر فرض شده است.

تخمین اولیه رسانایی گرمایی عایق گرمایی فیبری آلومینایی استفاده شده در مدل فوق در جدول ۱ ارائه شده است.

- Properties: A Review. *Energies* [Internet]. 2022 Nov 22 [cited 2024 Nov 1];15(23):8807–7. Available from: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/23/8807>
- [6] Chang CW, Liu CH, Wang CC. Review of Computational Schemes in Inverse Heat Conduction Problems. *Smart Science*. 2017 Dec 7;6(1):94–103.
- [7] Hammerschmidt U, Hameury J, Strnad R, Turzó-Andras E, Wu J. Critical Review of Industrial Techniques for Thermal-Conductivity Measurements of Thermal Insulation Materials. *International Journal of Thermophysics*. 2015 Apr 23;36(7):1530–44.
- [8] Yang I, Kim D. Uncertainty of thermal conductivity measurement at high temperatures using guarded hot plate apparatus. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [Internet]. 2022 Dec 1 [cited 2023 Apr 28];198:123434.
- [9] D Fustinoni, Vitali L, Gramazio P, Niro A. Accurate contact resistance characterization for thermal conductivity measurement with the Heat Flow Meter method. *Journal of Physics Conference Series*. 2021 Apr 1;1868(1):012005–5.
- [10] ▷ Overview: 15 methods of thermal analysis [Internet]. Available from: <https://www.linseis.com/en/methods/>
- [11] Shorten BA. Thermal Property Determination Using Optimization of One-side Known Radiant Exposure [dissertation]. Blacksburg (VA): Virginia Tech; 2024.
- [12] J. Gembarovic, M. Löffler. An Application of DHW Algorithm for the Solution of Inverse Heat Conduction Problem. *International journal of thermophysics*. 2006 Jul 1;27(4):1264–73.
- [13] Kamran Daryabeigi. Thermal analysis and design of multi-layer insulation for re-entry aerodynamic heating. NASA STI Repository (National Aeronautics and Space Administration). 2001 Jun 11;
- [14] Pan W, Yi F, Zhuo L, Meng S. Identification of temperature-dependent thermal conductivity and experimental verification. *Measurement Science and Technology*. 2016;27(7):075005.
- [15] M. Necat Ozisik. *Inverse Heat Transfer*. Routledge; 2018.
- [16] Assael MJ, Antoniadis K, Danai Velliadou, Wakeham WA. Correct Use of the Transient Hot-Wire Technique for Thermal Conductivity Measurements on Fluids. *International Journal of Thermophysics*. 2023 Apr 17;44(6).
- [17] Heisig LM, Wulf R, Fieback TM. Investigation and Optimization of the Hot Disk Method for Thermal Conductivity Measurements up to 750 °C. *International Journal of Thermophysics*. 2023 Apr 12;44(6).
- [18] Ramos NP, Mariana, Gilmar Guimarães, Silva. Simultaneous Bayesian estimation of the temperature-dependent thermal properties of a metal slab using a three-dimensional transient experimental approach. *International Journal of Thermal Sciences*. 2022 May 7;179:107671–1.
- [19] Sekimoto Y, Abe R, Kojima H, Hiroaki Bente, Nakamura M. Error factors in precise thermal conductivity measurement using 3ω method for wire samples. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023 Jan 5;148(6):2285–96.
- [20] Sagheby SH, Kowsary F. Experimental Design and Methodology for Estimation of Local Heat Transfer Coefficient in Jet Impingement Using Transient Inverse Heat Conduction Problem. *Experimental Heat Transfer*. 2009 Sep 30;22(4):300–15.
- [21] I.R. Taktak, Beck JV, Scott EP. Optimal experimental design for estimating thermal properties of composite materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1993 Aug 1;36(12):2977–86.
- [22] Özisik MN, Orlande HRB. *Inverse Heat Transfer*. CRC Press; 2021.
- [23] Zhao S, Zhang B, He X. Temperature and pressure dependent effective thermal conductivity of fibrous insulation. *International Journal of Thermal Sciences*. 2009 Feb;48(2):440–8.

برای قرارگیری این حسگرها قابل تصور است و مکان بهینه در صورت انتخاب دو حسگر، در فاصله ۴ و ۷ سانتی‌متری کف عایق خواهد بود. با افزایش تعداد حسگرها مکان بهینه حسگرها تغییر خواهد کرد.

جدول ۲- مکان بهینه حسگرها)

| تعداد حسگرها | محل بهینه حسگرها (cm) |
|--------------|-----------------------|
| ۱            | {6}                   |
| ۲            | {47}                  |
| ۳            | {167}                 |
| ۴            | {1567}                |
| ۵            | {15678}               |
| ۶            | {145678}              |

جدول ۲ نشان دهنده مکان بهینه حسگرها در صورت انتخاب ۲، ۴، ۵ یا ۶ حسگر است.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله انواع روش‌های تجربی اندازه‌گیری خواص رسانایی گرمایی معرفی شده‌اند. به منظور کاهش هزینه‌های آزمایش، روش‌های گذرا کاربرد وسیعی در آزمایش‌های تجربی دارند. ولی کاربرد این روش آزمایش در مورد عایق‌های فیبری محدود است. به همین دلیل در این پژوهش از مدل ارائه شده برای روش پایای صفحه داغ حفاظ دار به عنوان مدل برای آزمایش گذرای رسانایی گرمایی استفاده می‌شود. مکان حسگرها در طول ضخامت عایق گرمایی به گونه‌ای بهینه شده است که بتواند با بالاترین دقت رسانایی گرمایی عایق‌های فیبری را پیش بینی نماید. با توجه به مطالعه انجام شده در صورتی که از یک حسگر استفاده شود، محل بهینه برای اندازه گیری دما در فاصله ۶ سانتیمتری از لبه سرد عایق است. در صورتی که از دو، سه، چهار، پنج یا شش حسگر استفاده شود، محل بهینه برای اندازه گیری دما به ترتیب در فاصله {۴ و ۷}، {۱ و ۶ و ۷}، {۱ و ۵ و ۶ و ۷}، {۱ و ۵ و ۶ و ۷ و ۸} و {۱ و ۴ و ۵ و ۶ و ۷ و ۸} سانتیمتری از لبه سرد عایق است.

## ۸- مراجع

- [1] Torabi A, Abedian A, Mohammad Ali Farsi. An approximate methodology to simulate combined conduction-radiation heat transfer for multi-layer insulator. *Scientia Iranica*. 2019 Oct 13;0(0).
- [2] Yüksel N. The Review of Some Commonly Used Methods and Techniques to Measure the Thermal Conductivity of Insulation Materials [Internet]. [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com). IntechOpen; 2016. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/51497>
- [3] Liu H, Liu J, Tian Y, Wu X, Li Z. Investigation of high temperature thermal insulation performance of fiber-reinforced silica aerogel composites. *International Journal of Thermal Sciences*. 2023 Jan;183:107827.
- [4] de Oliveira AFM, Magalhães E dos S, Zilnyk KD, Le Masson P, Nascimento EJG do. Numerical Estimation of Nonlinear Thermal Conductivity of SAE 1020 Steel. *Computation*. 2024 May 4;12(5):92.
- [5] Giampaolo D'Alessandro, Potenza M, Corasaniti S, Stefano Sfarra, Coppa P, Gianluigi Bovesecchi, et al. Modeling and Measuring Thermodynamic and Transport Thermophysical