



# دستور کار آزمایشگاه انتقال حرارت

تحت نظر:

دکتر محمد باقر آیانی

نگارندگان:

علی اسماعیلی

سید محمد وحید حسینی

سید علی ناقدی فر

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
خَلَقَ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ  
وَالَّذِي يُضَوِّبُ الْمَوْتَى  
إِنَّ رَبَّهُ لَسَدِيدٌ  
إِلَىٰ عَرْشِهِ الرَّحِيمُ  
الَّذِي يُخْرِجُ الْمَوْتَىٰ  
مِنَ الْقُبُورِ وَيَكْتُبُ  
لِكُلِّ نَفْسٍ مَّا كَسَبَتْ  
وَهُوَ عَلِيمٌ فَصِيعٌ  
وَالَّذِي يُنَزِّلُ الْمَطَرَ  
وَالَّذِي يَبْدَأُ الْحَيَاةَ  
وَالَّذِي يُحْيِي الْمَوْتَىٰ  
إِنَّ رَبَّهُ لَسَدِيدٌ  
إِلَىٰ عَرْشِهِ الرَّحِيمُ  
الَّذِي يُخْرِجُ الْمَوْتَىٰ  
مِنَ الْقُبُورِ وَيَكْتُبُ  
لِكُلِّ نَفْسٍ مَّا كَسَبَتْ  
وَهُوَ عَلِيمٌ فَصِيعٌ  
وَالَّذِي يُنَزِّلُ الْمَطَرَ  
وَالَّذِي يَبْدَأُ الْحَيَاةَ  
وَالَّذِي يُحْيِي الْمَوْتَىٰ  
إِنَّ رَبَّهُ لَسَدِيدٌ  
إِلَىٰ عَرْشِهِ الرَّحِيمُ

## فهرست مطالب

۱- هدایت گرمایی سیال .....	۱
۱-۱- هدف .....	۲
۲-۱- مقدمه .....	۲
۳-۱- تئوری .....	۲
۱-۳-۱- هدایت گرمایی در مختصات استوانه‌ای .....	۲
۴-۱- شرح دستگاه .....	۳
۵-۱- روش آزمایش .....	۴
۶-۱- خواسته‌های آزمایش .....	۶
۲- تشعشع گرمایی (قانون استفان-بولتزمن) .....	۸
۱-۲- هدف .....	۹
۲-۲- مقدمه .....	۹
۳-۲- تئوری .....	۹
۴-۲- شرح دستگاه .....	۱۰
۵-۲- روش آزمایش .....	۱۲
۱-۵-۲- بررسی رابطه عکس مجذور فاصله در تشعشع گرمایی .....	۱۲
۲-۵-۲- بررسی رابطه استفان بولتزمن .....	۱۳
۶-۲- خواسته‌های آزمایش .....	۱۴
۱-۶-۲- آزمایش رابطه عکس مجذور فاصله در تشعشع گرمایی .....	۱۴
۲-۶-۲- آزمایش رابطه استفان بولتزمن .....	۱۵
۳- جابه‌جایی اجباری برای جریان داخلی .....	۱۷
۱-۳- هدف .....	۱۸
۲-۳- مقدمه .....	۱۸
۳-۳- شرح دستگاه .....	۱۸
۴-۳- روش آزمایش .....	۲۰
۵-۳- تئوری .....	۲۱
۱-۵-۳- اندازه‌گیری دبی جریان هوا با استفاده از صفحه اوریفیس .....	۲۱
۲-۵-۳- اندازه‌گیری افت فشار ناشی از اصطکاک .....	۲۲
۳-۵-۳- تحلیل انتقال حرارت گذرا در دستگاه .....	۲۳
۴-۵-۳- محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی هوا به دیواره .....	۲۴
۵-۵-۳- بررسی صحت تشابه رینولدز-کلبرن .....	۲۵
۶-۵-۳- محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی هوا به آب .....	۲۶
۶-۳- خواسته‌های آزمایش .....	۲۹
۱-۶-۳- خواسته‌های آزمایش برای حالت گرمایش .....	۲۹
۲-۶-۳- خواسته‌های آزمایش برای حالت سرمایش .....	۲۹

۳۴	۴- هدایت گرمایی اجسام جامد
۳۵	۴-۱- هدف
۳۵	۴-۲- مقدمه
۳۵	۴-۳- شرح دستگاه
۳۷	۴-۴- روش انجام آزمایش
۳۸	۴-۵- تئوری
۴۱	۴-۶- خواسته‌های آزمایش
۴۲	۵- مراجع

## فهرست جداول

جدول ۱-۱ ثبت داده‌های آزمایش هدایت سیال ..... ۶

جدول ۲-۱ ثبت داده‌های آزمایش هدایت سیال ..... ۷

جدول ۱-۲ ثبت داده‌های آزمایش رابطه عکس مجذور فاصله در تشعشع گرمایی ..... ۱۴

جدول ۲-۲ ثبت داده‌های آزمایش رابطه استفان-بولتزمن ..... ۱۵

جدول ۱-۳ ثبت داده‌های آزمایش جابه‌جایی اجباری برای جریان داخلی ..... ۳۰

جدول ۱-۴ ثبت داده‌های آزمایش هدایت گرمایی اجسام جامد ..... ۳۸

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ المان استوانه‌ای ..... ۳
- شکل ۲-۱ مقطعی از دستگاه ..... ۳
- شکل ۳-۱ نمودار کالیبراسیون ..... ۵
- شکل ۱-۲ شماتیک دستگاه آزمایش تشعشع گرمایی ..... ۱۱
- شکل ۲-۲ از راست به چپ: منبع گرمایی، صفحه تخت فلزی و حسگر شار تشعشع گرمایی ..... ۱۲
- شکل ۳-۲ نمودار محاسبه ضریب دید [۱] ..... ۱۶
- شکل ۱-۳ اجزاء تشکیل‌دهنده دستگاه ..... ۳۱
- شکل ۲-۳ دیاگرام مودی ..... ۳۲
- شکل ۳-۳ نمای ظاهری از تغییرات دما با زمان در طول آزمایش ..... ۳۳
- شکل ۱-۴ نمای ظاهری از قطعات فلزی استوانه‌ای شکل ..... ۳۶
- شکل ۲-۴ نمای ظاهری از تغییرات دما با مکان در داخل جسم ..... ۳۸

# هدایت گرمایی سیال

## ۱-۱- هدف

اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی ( $K$ ) سیالات (هوا) و بررسی اثر دما بر ضریب هدایت گرمایی.

## ۱-۲- مقدمه

هدایت گرمایی انتقال انرژی در محیط بر اثر وجود شیب دما است. سازوکار این نوع انتقال گرما بر اساس جنبش اتمی یا مولکولی است [۱]. هدایت گرما در بسیاری از پدیده‌های طبیعی و صنعتی وجود دارد.

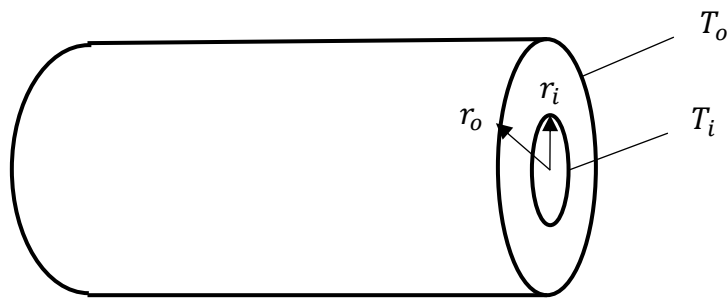
## ۱-۳- تئوری

برای بررسی هدایت در گازها، گازی را در نظر بگیرید که در آن گرادیان دما وجود داشته باشد و فرض کنید که توده گاز حرکتی ندارد. گاز فضای بین دو سطح با دمای متفاوت را پر می‌کند. دمای هر نقطه به انرژی مولکول‌های گاز در همسایگی آن نقطه وابسته است. این انرژی به حرکت انتقالی مولکول‌ها و نیز به حرکت‌های چرخشی و ارتعاشی درونی مولکول‌ها بستگی دارد. هرچه دما بالاتر باشد انرژی مولکولی بیشتر است. از آنجا که مولکول‌ها به طور دائم در حال برخورد با یکدیگر هستند، انرژی از مولکول‌های پر انرژی به مولکول‌های کم انرژی انتقال می‌یابد. در صورت وجود گرادیان دما (وجود گرادیان انرژی مولکولی) انتقال انرژی توسط هدایت در جهت کاهش دما صورت می‌گیرد. در مایعات نیز وضعیت تقریباً مشابهی اتفاق می‌افتد با این تفاوت که فاصله مولکول‌ها نزدیک‌تر بوده و فعل و انفعال مولکولی قوی‌تر و بیش‌تر می‌باشد.

## ۱-۳-۱- هدایت گرمایی در مختصات استوانه‌ای

مطابق شکل ۱-۱ استوانه‌ای به شعاع داخلی  $r_i$  و دمای  $T_i$  و شعاع خارجی  $r_o$  و دمای  $T_o$  و طول  $L$  را در نظر بگیرید.





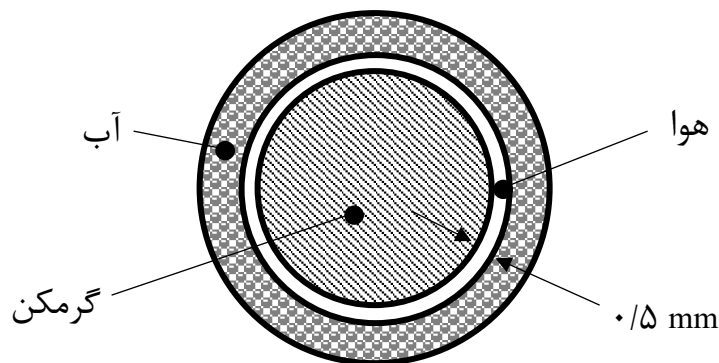
شکل ۱-۱ المان استوانه‌ای

معادله فوریه در دستگاه مختصات استوانه‌ای در راستای  $r$  به شکل زیر قابل بیان است:

$$\left. \begin{aligned} Q_r &= -k A_r \frac{\partial T}{\partial r} \\ A_r &= 2\pi r L \end{aligned} \right\} \Rightarrow Q_r = -k 2\pi r L \frac{\partial T}{\partial r} \quad (1-1)$$

#### ۴-۱- شرح دستگاه

این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی انواع سیالات (گازها و مایعات) را دارا می‌باشد. دستگاه شامل ۳ لایه استوانه‌ای شکل است که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱ مقطعی از دستگاه

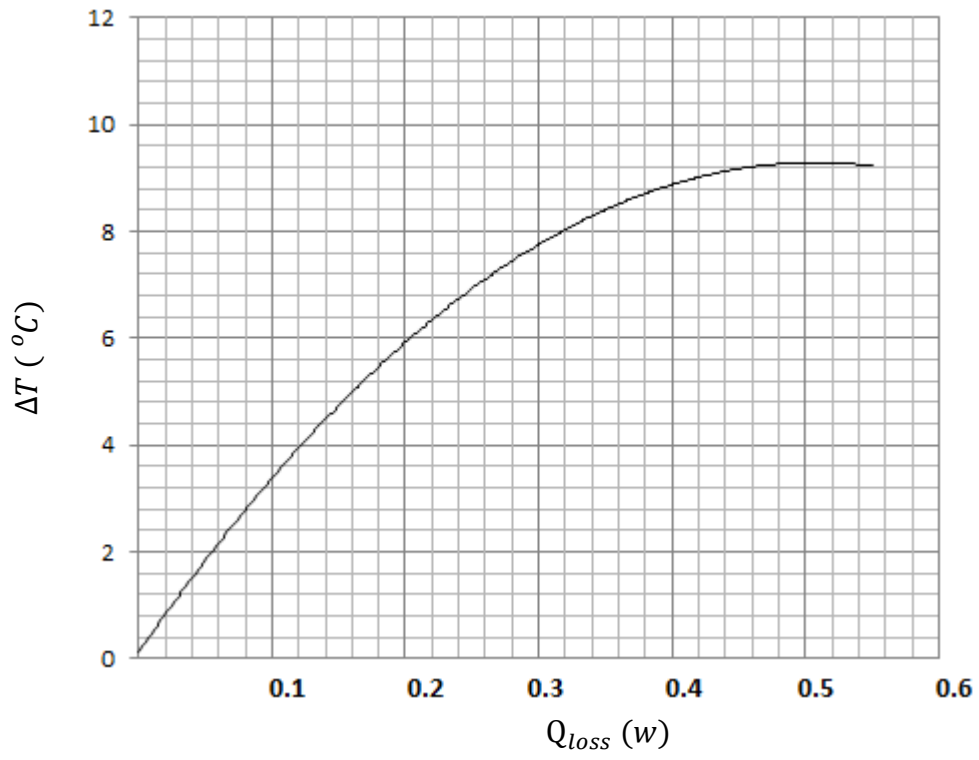
درونی‌ترین لایه گرمکنی است که با توجه به توان تنظیم شده توسط کاربر، مقدار گرمای لازم را فراهم می‌سازد. در مرکز گرمکن ترموکوپلی تعبیه شده است که امکان مشاهده دمای آن را روی صفحه نمایشگر را میسر می‌سازد. لایه بعدی استوانه‌ای به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر (Theater) است که سیال موردنظر در این قسمت محبوس می‌گردد. با توجه به نازک بودن ضخامت لایه

سیال مورد آزمایش می‌توان دمای سیال را با تقریب خوبی برابر با دمای هیتر در نظر گرفت. علاوه بر این، می‌توان انتقال گرما را یک بعدی فرض نمود. در آخرین لایه، آب شهر جریان می‌یابد. در مسیر آب شهر نیز یک ترموکوپل برای اندازه‌گیری دما قرار داده شده است و دمای آب روی نمایشگر دستگاه نشان داده می‌شود.

## ۱-۵- روش آزمایش

در این آزمایش ضریب هدایت گرمایی هوا اندازه‌گیری می‌شود. قبل از انجام هر آزمایش باید دستگاه را کالیبره کرد. برای این منظور شیر ورودی و خروجی هوا را باز کنید. از پمپ باد استفاده کنید تا هوا درون سیستم جریان داشته باشد. چند بار این عمل را تکرار کنید تا از خروج هر گونه ناخالصی و یا سیال باقی مانده از آزمایش قبل مطمئن شوید. پاک بودن دستگاه از هر گونه آلودگی از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا وجود مقادیر بسیار کم از هرگونه ناخالصی می‌تواند تأثیر بسیار زیادی در نتیجه آزمایش داشته باشد.

حال شیر خروجی هوا را ببندید، سپس شیر ورودی هوا را بسته تا هوا درون استوانه حبس شود. شیر آب شهر را باز کنید تا آب درون سیستم جریان داشته باشد. کلید on دستگاه را زده و گرمکن را روشن کنید. ولتاژ دستگاه را روی حداقل ۶۰ ولت تنظیم کنید و به سیستم حدود ۲۰ دقیقه زمان دهید تا به حالت پایدار برسد و دما ثابت گردد. حال دمای هوا ( $T_{heater}$ ) و دمای آب ( $T_{cooler}$ ) را از دستگاه یادداشت کنید. با توجه به این که مقداری اتلاف گرما وجود دارد و تمام انرژی بین آب و هوا منتقل نمی‌گردد، باید مقدار گرمای خالص انتقال یافته را به دست آورد. برای این منظور اختلاف دمای بین آب و هوا را محاسبه کرده و با استفاده از شکل ۱-۳ میزان گرمای هدر رفته ( $Q_{loss}$ ) محاسبه می‌شود. حال با داشتن مقدار گرمای خالص انتقال یافته و با استفاده از قانون فوریه مقدار ضریب هدایت گرمایی هوا محاسبه می‌گردد. مساحت خارجی استوانه بین آب و هوا  $0.17$  مترمربع و مقاومت گرمکن  $950$  اهم می‌باشد.



شکل ۳-۱ نمودار کالیبراسیون

## ۱-۶- خواسته‌های آزمایش

۱- برای بررسی تأثیر دما بر ضریب هدایت گرمایی هوا آزمایش شرح داده شده در بخش ۱-

۵- را برای چند ولتاژ دیگر نیز تکرار کنید. نتایج را در جدول ۱-۱ وارد کنید.

جدول ۱-۱ ثبت داده‌های آزمایش هدایت سیال

$P_{gage}(psi) =$								
ولتاژ (V)	دمای آب ( $^{\circ}C$ )	دمای گرمکن ( $^{\circ}C$ )	اختلاف دمای آب و گرمکن ( $^{\circ}C$ )	گرمای هدررفته (W)	گرمای خالص (W)	K محاسبه شده از آزمایشات	K موجود در منابع	درصد خطا

۲- با افزایش توان مقدار ضریب هدایت گرمایی هوا افزایش می‌یابد یا کاهش؟ چرا؟

۳- به کمک پمپ هوا فشار را افزایش داده و برای چند ولتاژ، آزمایش را تکرار نمایید. تأثیر

فشار بر ضریب هدایت گرمایی هوا چگونه است؟

جدول ۲-۱ ثبت داده‌های آزمایش هدایت سیال

$P_{gage}(psi) =$								
ولتاژ (V)	دمای آب ( $^{\circ}C$ )	دمای گرمکن ( $^{\circ}C$ )	اختلاف دمای آب و گرمکن ( $^{\circ}C$ )	گرمای هدررفته (W)	گرمای خالص (W)	K محاسبه شده از آزمایشات	K موجود در منابع	درصد خطا

۴- چرا با وجود این که سیستم استوانه‌ای است می‌توان از قانون فوریه در سیستم کارترین

برای محاسبات استفاده کرد؟

# تَشْعِشَع ٲَرْمَايِي (قَانُونِ اسْتِفَانِ – بُولْتَرْمَنْ)

## ۲-۱- هدف

مطالعه رابطه استفان بولتزمن، ضریب دید و بررسی رابطه معکوس شدت گسیل با مجذور فاصله از منبع تشعشع.

## ۲-۲- مقدمه

در انتقال گرمای تشعشعی، برخلاف سازوکار هدایت و جابه‌جایی که انتقال انرژی از طریق ماده واسط صورت می‌گیرد، گرما می‌تواند از ناحیه‌ای که خلأ کامل وجود دارد نیز عبور نماید. بسیاری از فرآیندهای گرمایش، سرمایش، خشک کردن صنعتی و همچنین روش‌های تبدیل انرژی نظیر احتراق سوخت فسیلی با فرآیند تشعشع سروکار دارند. از طرفی تابش سهم مهمی در تولید و یا جذب انرژی دارد، خورشید به‌عنوان یک منبع انرژی، در سال‌های اخیر مورد توجه خاص قرار گرفته است. ساخت وسایل و ابزارهایی که به‌توانند انرژی خورشید را جذب کرده و به صورت‌های متعارف تبدیل کنند نیازمند شناخت کامل پدیده تابش است.

## ۲-۳- تئوری

جسمی را در نظر بگیرید که ابتدا در دمای  $T_s$  که از دمای اطراف ( $T_{surr}$ ) بیش‌تر است قرار دارد و پیرامون آن خلأ می‌باشد. وجود خلأ مانع دفع انرژی از طریق سازوکار رسانش و یا جابه‌جایی است. به تدریج جسم سرد می‌شود و سرانجام با اطراف به تعادل گرمایی می‌رسد. این سرمایش باعث کاهش انرژی داخلی ذخیره شده در جسم و کاهش دمای آن می‌گردد.

تشعشع گرمایی را آهنگ گسیل انرژی از ماده بر اثر دمای آن می‌دانیم. سازوکار گسیل به انرژی آزاد شده ناشی از نوسان‌ها یا انتقال الکترون‌های بسیاری که ماده را تشکیل می‌دهند مربوط می‌شود. این نوسان‌ها ناشی از دمای ماده هستند. در تمام حالت‌های ماده، تشعشع ایجاد می‌شود. در گازها و اجسام نیمه شفاف مانند شیشه و بلورهای نمک‌دار در دماهای زیاد، گسیل تشعشع یک پدیده حجمی است.

هر جسم جامد، کسری از تابش فرودی بر سطح خود را جذب کرده و بقیه این تابش‌ها را بازتاب می‌کند. یک جسم سیاه ایده‌آل به ماده‌ای اطلاق می‌شود که تمامی تابش فرودی را، بدون هیچ بازتابشی دریافت می‌کند.

واکاوهای ترمودینامیکی نشان می‌دهد که یک جسم گسیلنده ایده‌آل یا جسم سیاه، انرژی را با نرخی متناسب با توان چهارم درجه حرارت مطلق جسم و نیز متناسب با سطح آن منتشر می‌سازد:

$$Q = \sigma AT^4 \quad (1-2)$$

که در آن  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن برابر  $5.674 \times 10^{-8} \text{ w/(m}^2\text{k}^4)$  است.

در سطوحی نظیر یک سطح رنگ شده براق یا صفحه فلزی پرداخت شده، به اندازه یک جسم سیاه تشعشع صورت نمی‌گیرد بنابراین، ضریب دیگری در معادله انتقال گرما وارد می‌شود که موسوم به ضریب انتشار ( $\epsilon$ ) است که تشعشع جسم خاکستری را به جسم سیاه ایده‌آل مربوط می‌سازد.

علاوه بر این باید این حقیقت را هم در نظر داشت که تمام تشعشع خروجی از یک سطح به یک سطح دیگر نمی‌رسد زیرا تشعشعات الکترومغناطیسی در خط مستقیم حرکت کرده و قسمتی از آن‌ها در محیط پراکنده می‌شوند. لذا دو ضریب جدید دیگر برای محاسبات هر دو موقعیت مذکور در معادله انتقال گرما وارد می‌شود به طوری که:

$$Q = F_s \sigma \epsilon A (T_1^4 - T_2^4) \quad (2-2)$$

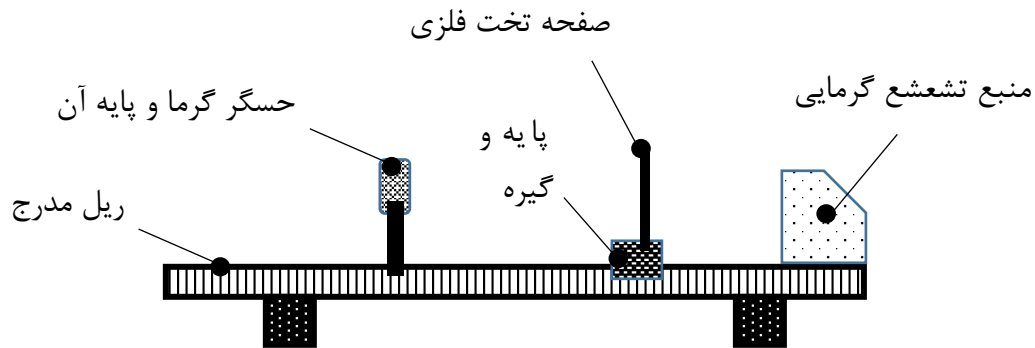
در معادله فوق  $F_s$  ضریب دید است. ضریب دید را برای محاسبه تبادل تشعشع بین دو سطح (که به آن ضریب وضعیت یا ضریب شکل نیز می‌گویند) تعریف می‌کنیم.

## ۲-۴- شرح دستگاه

این دستگاه شامل دو بخش اصلی است که یکی مربوط به آزمایش تشعشع نوری و دیگری مربوط به تشعشع گرمایی است. در این آزمایش از بخش مربوط به تشعشع گرمایی استفاده



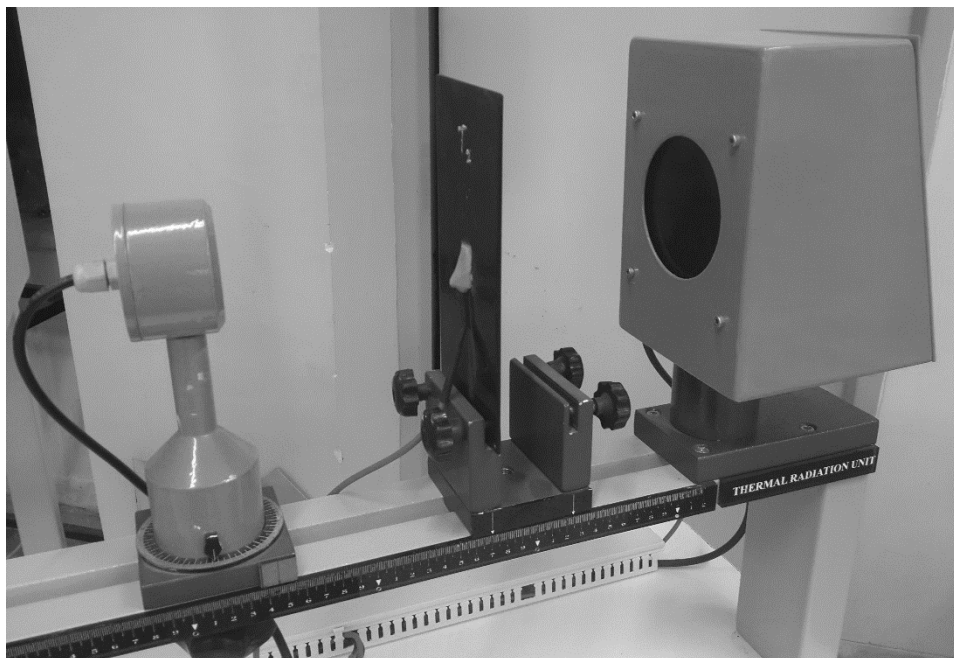
می‌شود. منبع تشعشع گرمایی، ریل مدرج، حسگر شار گرمایی، دو صفحه تخت فلزی همراه با دو حسگر دما متصل به آن دو، صفحه کنترل و گزارش داده‌ها، پایه و گیره قسمت‌های اصلی این بخش از دستگاه را تشکیل می‌دهند (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۲ شماتیک دستگاه آزمایش تشعشع گرمایی

صفحات تخت فلزی توسط گیره بر روی پایه استقرار یافته و این مجموعه، بر روی ریل مدرج، بین منبع تشعشع گرمایی و حسگر قرار می‌گیرد. پایه حسگر علاوه بر امکان جابه‌جایی بر روی ریل مدرج، قابلیت چرخش در زوایای مختلف را نیز داراست. توان گسیل شده توسط منبع گرما، توسط صفحه کنترل قابل تنظیم بوده و دمای منبع قابل مشاهده است. حسگرهای نصب شده بر روی صفحات تخت فلزی، دمای آن‌ها را در هر لحظه گزارش می‌کنند. حسگر گرمایی، شار رسیده به حسگر را بر حسب  $w/m^2$  گزارش می‌کند.

لازم به ذکر است که دستگاه به کمک دانگل، قابلیت اتصال به رایانه را داشته و توسط نرم‌افزار مربوطه، امکان کنترل و داده‌برداری وجود دارد.



شکل ۲-۲ از راست به چپ: منبع گرمایی، صفحه تخت فلزی و حسگر شار تشعشع گرمایی

## ۲-۵- روش آزمایش

### ۲-۵-۱- بررسی رابطه عکس مجذور فاصله در تشعشع گرمایی

در این آزمایش، هدف بررسی رابطه شار تشعشع رسیده به یک سطح با فاصله آن سطح از منبع گسیل کننده تشعشع گرمایی است. دستگاه را کالیبره کرده و توان دستگاه را بر روی عددی مشخص و ثابت (بالای ۰.۵٪) قرار داده و چند دقیقه منتظر بمانید تا دمای منبع تشعشع گرمایی به حالت پایا برسد. حسگر گرما را در فاصله‌ای مشخص تنظیم نموده و شار گرمایی رسیده به آن را در جدول ۲-۱ درج نمایید. سپس حسگر را جابه‌جا کرده و شار گرما را یادداشت نمایید. این کار را برای چند فاصله مختلف انجام دهید. عملیات فوق را برای توان دیگری نیز تکرار کرده و جدول ۲-۱ را کامل نمایید.

توجه داشته باشید که حسگر گرمایی و منبع تشعشع با یکدیگر زاویه نداشته باشند.

## ۲-۵-۲- بررسی رابطه استفان بولتزمن

این مرحله از آزمایش به بررسی قانون استفان-بولتزمن اختصاص دارد. ابتدا دستگاه را با توانی بیش از ۵۰٪ روشن کرده و یکی از صفحات تخت فلزی را در فاصله نسبتاً کوتاه نسبت به منبع، بر روی ریل تنظیم نمایید. حدود ۳۰ دقیقه زمان لازم است تا مجموعه به حالت پایا برسد. دمای منبع تشعشع گرمایی ( $T_s$ )، صفحه تخت ( $T_{plate}$ )، شار گرمایی منبع و مکان صفحه تخت نسبت به آن را در جدول ۲-۲ یادداشت نمایید. لازم به ذکر است که برای اندازه‌گیری شار توسط سنسور گرمایی، ابتدا باید آن را به مکان صفحه تخت منتقل کرد و سپس مقدار شار را اندازه گرفت. عملیات اخیر را برای مکان دیگر صفحه تخت و توان گرمایی دیگری نیز تکرار نمایید.

توجه شود که پیش از انجام مراحل آزمایش لازم است شار رسیده به سنسور گرمایی، جهت کالیبراسیون دستگاه، یادداشت شود.

## ۶-۲- خواسته‌های آزمایش

### ۶-۲-۱- آزمایش رابطه عکس مجذور فاصله در تشعشع گرمایی

۱- تکمیل جدول ۱-۲ مطابق با دستورالعمل شرح داده شده در بخش ۲-۵-۱-

جدول ۱-۲ ثبت داده‌های آزمایش رابطه عکس مجذور فاصله در تشعشع گرمایی

شار اولیه اندازه‌گیری شده توسط سنسور گرمایی، پیش از شروع مراحل آزمایش ( $w/m^2$ ):			
توان منبع حرارتی (/)	$q'' (w/m^2)$	$r (m)$	$1/r^2 (1/m^2)$

۲- مطلوبست رسم منحنی شدت تابش بر حسب عکس مجذور فاصله و خط برازش مربوطه.

۳- چگونه می‌توان منحنی را خطی کرد؟ پس از خطی کردن آن را رسم کرده و از روی شیب

نمودار صحت نتایج را ارزیابی نمایید.

## ۲-۶-۲- آزمایش رابطه استفان-بولتزمن

۱- مطابق دستورالعمل ذکر شده در بخش ۲-۵-۲، جدول زیر را کامل نمایید.

جدول ۲-۲ ثبت داده‌های آزمایش رابطه استفان-بولتزمن

توان دستگاه (/.)	$T_s (K)$	$T_{plate} (K)$	$q'' (w/m^2)$	$r (m)$

۲- منبع حرارتی و صفحه تخت را جسم سیاه فرض نموده و شار رسیده از منبع گرمایی به

صفحه تخت را به کمک دماهای اندازه‌گیری شده، با توجه به رابطه استفان-بولتزمن ( $q'' =$

$\sigma \varepsilon (T_s^4 - T_{plate}^4)$ ) محاسبه کنید. این مقدار را با شار گرمایی اندازه‌گیری شده توسط سنسور

گرمایی مقایسه نمایید.

۳- عملیات فوق را تکرار کرده ولی این‌بار در رابطه استفان-بولتزمن ضریب دید بین منبع و

صفحه تخت را نیز دخالت دهید ( $q'' = F_{12} \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_{plate}^4)$ ). نتیجه را با شار گرمایی

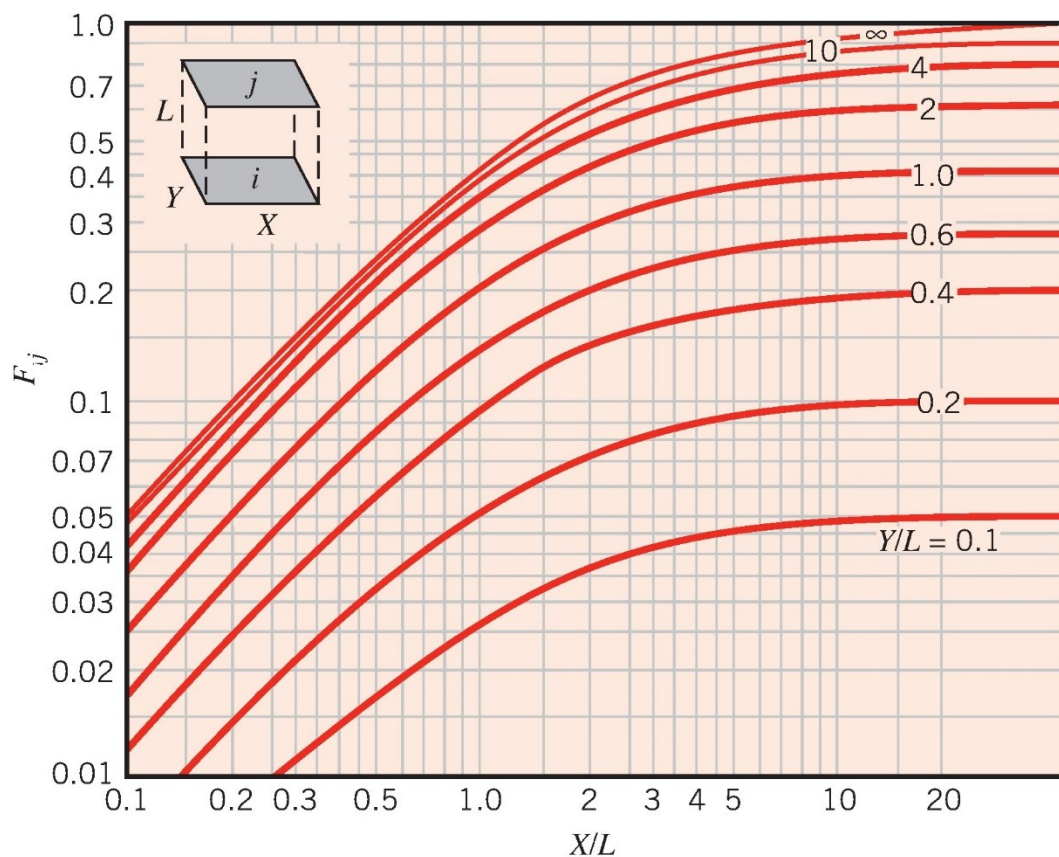
اندازه‌گیری شده توسط سنسور گرمایی مقایسه نمایید. کدامیک از دو حالت اخیر خطای کمتری

دارد؟ لازم به ذکر است که برای محاسبه ضریب دید می‌توان از ابعاد میانگین صفحه تخت و منبع حرارتی استفاده نمود و به کمک روابط و یا نمودارهای موجود برای ضریب دید دو صفحه مستطیل شکل، بهره جست.

۴- خواسته‌های فوق را برای توان دیگر منبع و مکان دیگر صفحه تخت نیز انجام داده و داده‌ها را مقایسه نمایید..

۵- چرا شار گرمایی اندازه‌گیری شده توسط حسگر، با شار خروجی از صفحه گرم برابر است؟

۶- چرا لازم است صفحه تخت را به عنوان جسم سیاه پخشنده فرض نمود؟



شکل ۲-۳ نمودار محاسبه ضریب دید [۱]

**جابه‌جایی اجباری برای جریان داخلی**

### ۳-۱- هدف

هدف از انجام این آزمایش، به دست آوردن ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری درون لوله برای هوا به دیواره و هوا به آب می‌باشد.

### ۳-۲- مقدمه

انتقال گرمای جابه‌جایی از دو مکانیزم حرکت تصادفی مولکولی (پخش) و حرکت توده‌ای (ماکروسکوپیک) سیال تشکیل می‌شود. این انتقال گرما میان سیالی متحرک و سطحی محدودکننده، که در دماهای مختلف‌اند، روی می‌دهد. در واقع، گرمایی که با هدایت در فصل مشترک سطح و سیال، به سیال انتقال می‌یابد توسط جابه‌جایی در فرودست روبیده می‌شود [۱]. جریان سیال ممکن است به صورت اجباری و یا در حضور میدان‌های گرانشی توسط نیروهای رانشی ایجاد شود. در مورد اول، سیال با استفاده از پمپ، توربین یا وسایل مکانیکی دیگر برای جریان یافتن تحت اجبار قرار می‌گیرد.

### ۳-۳- شرح دستگاه

دستگاه مورد استفاده در این آزمایش به منظور انجام طیف وسیعی از آزمایش‌های مربوط به دینامیک سیالات و پدیده‌های انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری برای یک گاز (هوا) که در داخل یک لوله جریان دارد، طراحی شده است. این دستگاه همچنین امکان تحلیل انتقال حرارت بین آب و هوا را فراهم می‌کند.

مطابق شکل ۱-۱، دستگاه از اجزاء زیر تشکیل شده است:

۱- دمنده گریز از مرکز با مشخصات: نرخ جریان  $5 \text{ m}^3/\text{min}$  و هد فشاری  $1000 \text{ Pa}$ .

۲- تعدیل‌کننده<sup>۱</sup> نصب‌شده در ورودی هوا به منظور کنترل نرخ جریان هوا.

---

<sup>۱</sup> Damper



۳- جریان سنج (صفحه اوریفیس) و مانومتر دیفرانسیلی مربوط به آن.

۴- لوله فولادی با قطر داخلی  $64/2 \text{ mm}$ .

۵- لوله مسی با قطر داخلی  $32 \text{ mm}$  که در طول تقریبی  $1200 \text{ mm}$  با گرم کن الکتریکی گرم می‌شود.

۶- تعداد هجده المنت (مقاومت) الکتریکی به منظور گرم کردن (با توان کل  $2 \text{ kW}$ ).

۷- تعداد دوازده ترموکوپل برای اندازه‌گیری دمای هوا، دیواره گرم شده و آب که در موقعیت‌هایی که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، نصب شده‌اند. شماره‌گذاری ترموکوپل‌ها بر این اساس است:

$T_1$ : دمای دیواره دقیقاً قبل از بخش گرم کن.

$T_2$  الی  $T_6$ : دمای دیواره در داخل بخش گرم کن.

$T_7$ : دمای دیواره بلافاصله بعد از بخش گرم کن.

$T_8$ : دمای هوا در خروجی بخش گرم کن و در ورودی مبدل حرارتی هوا-آب.

$T_9$ : دمای هوا در خروجی مبدل حرارتی.

$T_{10}$ : دمای آب در مبدل حرارتی.

$T_{11}$ : دمای هوا در ورودی دمنده.

$T_{12}$ : دمای هوا در خروجی دمنده و ورودی به بخش گرم کن.

۸- لوله پیتوت و مانومتر دیفرانسیلی مربوط به آن به منظور اندازه‌گیری مقادیر محلی سرعت هوا. لوله پیتوت می‌تواند در جهت شعاعی نسبت به محور تقارن لوله در بازه  $\pm 10 \text{ mm}$  جابه‌جا شود.

۹- مانومتر دیفرانسیلی به منظور اندازه‌گیری افت فشار ناشی از اصطکاک در بخش مسی لوله که طول آن  $1700 \text{ mm}$  می‌باشد.

۱۰- مبدل حرارتی هوا-آب که شامل یک لوله مسی داخلی (با قطر داخلی  $32 \text{ mm}$ ) و یک پوسته خارجی استوانه‌ای عایق می‌باشد. ظرفیت مبدل حرارتی برابر با یک کیلوگرم آب

می باشد که عملیات پر کردن و تخلیه آن از طریق دو شیر انجام می شود.

۱۱- صفحه کنترل که شامل موارد ذیل می باشد:

11a: کلید برقراری اتصال مقاومت های الکتریکی.

11b: کلید برقراری اتصال دمنده.

11c: کلید انتخاب ترموکوپل.

11d: نمایشگر سه رقمی دما (با دقت یک درجه سانتی گراد).

11e: ولت سنج و آمپرسنج به منظور اندازه گیری ولتاژ و شدت جریان تولید شده توسط مقاومت های الکتریکی.

11f: پیچ تنظیم مقدار توان اعمال شده توسط مقاومت های الکتریکی.

۱۲- صفحه مانومتر که شامل موارد ذیل می باشد:

12a: اندازه گیری فشار نسبی خروجی دمنده بر حسب میلی متر جیوه ( $\Delta P_m$ ).

12b: اندازه گیری افت فشار در طول صفحه اوریفیس بر حسب میلی متر آب ( $\Delta P_d$ ).

12c: اندازه گیری افت فشار در طول لوله مسی (با قطر داخلی  $32\text{ mm}$  و طول  $1700\text{ mm}$ ) بر حسب میلی متر آب ( $\Delta P_t$ ).

12d: اندازه گیری اختلاف فشار کل (فشار استاتیک + فشار دینامیک) و فشار استاتیک، اندازه گیری شده توسط لوله پیتوت بر حسب میلی متر آب ( $\Delta P_p$ ).

### ۳-۴- روش آزمایش

در این دستگاه ضرایب انتقال حرارت جابجایی اجباری درون لوله برای هوا به دیواره و هوا به آب اندازه گیری می شوند. بدین منظور مراحل ذیل را به ترتیب انجام دهید:

۱- دمنده دستگاه را با استفاده از کلید START روشن کنید.

۲- حدود ۳۰ ثانیه پس از زدن کلید START و پس از پایا شدن شرایط دمنده، دماهای  $T_1$  تا

$T_{12}$  را به عنوان دماهای اولیه در جدول ۳-۱ ثبت داده های آزمایش جابه جایی اجباری برای جریان

داخلی یادداشت کنید.

۳- گرم کن را با استفاده از کلید اتصال آن روشن کنید و همزمان، زمان سنج خود را روشن

- کنید و با فواصل زمانی ۳ دقیقه، به ترتیب دماهای  $T_1$  تا  $T_{12}$  را در جدول ۱-۳ ثبت داده‌ها ثبت کنید. دقت کنید که مقدار ولتاژ دستگاه حدود  $140 V$  الی  $150 V$  باشد.
- ۴- مقادیر ولتاژ، شدت جریان و همچنین ارتفاع مانومترها را در جدول ۱-۳ ثبت داده‌ها یادداشت کنید.
- ۵- مرحله ۳ را ادامه دهید تا زمانی که شرایط به حالت پایا برسد و دماها تغییر نکنند.
- ۶- پس از پایا شدن شرایط، گرم کن را خاموش کنید. دقت داشته باشید که این آخرین دماهای یادداشت شده برای مرحله گرمایش، شرایط اولیه برای حالت سرمایش می‌باشند.
- ۷- باز هم با فاصله زمانی ۳ دقیقه دماها را یادداشت کنید تا تمام دماها به شرایط پایا برسند.
- ۸- پس از پایا شدن دماها در حالت سرمایش، دمنده را خاموش کنید.

### ۳-۵- تئوری

در این بخش روابط حاکم و فرضیات استفاده شده جهت محاسبه ضرایب انتقال حرارت همرفت اجباری ارائه می‌شود.

#### ۳-۵-۱- اندازه‌گیری دبی جریان هوا با استفاده از صفحه اوریفیس

نرخ جریان جرمی هوا با اندازه‌گیری اختلاف فشار  $\Delta P_d$  بین دو نقطه بالادست و پایین دست صفحه اوریفیس (با استفاده از مانومتر  $12b$ )، به دست می‌آید. دبی جرمی با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\dot{m} = 0.67 A_d \sqrt{2\rho \Delta P_d} \quad (1-3)$$

که در این رابطه:

$A_d$ : مساحت بخش محصور شده صفحه اوریفیس که برابر با  $\pi d^2/4$  می‌باشد که  $d$  قطر داخلی صفحه اوریفیس می‌باشد که در مورد اوریفیس استفاده شده در این دستگاه برابر با  $40 \text{ mm}$  است.

$\rho$ : چگالی سیال بر حسب  $kg/m^3$ .

برای به دست آوردن چگالی هوا، از معادله حالت گاز ایده آل استفاده می‌شود:

$$\rho = \frac{P_m}{RT} \quad (2-3)$$

که در این رابطه:

$P_m$ : فشار مطلق هوا در ورودی صفحه اوریفیس ( $Pa$ ).

$R$ : ثابت گازها برای هوا ( $287 J/kg^\circ C$ ).

$T$ : دمای مطلق هوا ( $K$ ).

به منظور به دست آوردن فشار مطلق  $P_m$ ، می‌توان با اندازه‌گیری فشار جو،  $P_{atm}$  و هد

فشاری در خروجی دمنده،  $\Delta P_m$  (با استفاده از مانومتر  $12a$ )، فشار مطلق را محاسبه کرد:

$$P_m = P_{atm} + \Delta P_m \quad (3-3)$$

### ۳-۵-۲- اندازه‌گیری افت فشار ناشی از اصطکاک

در واقع اختلاف فشار استاتیک  $\Delta P_t$  در لوله مسی به طول  $1700 mm$ ، به دلیل اصطکاک

جریان است که از لزجت هوا ناشی می‌شود. با استفاده از افت فشار  $\Delta P_t$  (اندازه‌گیری شده توسط

مانومتر  $12c$ ) و دبی جریان هوا (اندازه‌گیری شده توسط صفحه اوریفیس)، می‌توان ضریب

اصطکاک  $f$  را مطابق رابطه زیر به دست آورد:

$$f = \frac{\Delta P_t}{(L/d)\rho(u^2/2)} \quad (4-3)$$

که در این رابطه:

$L$ : طول لوله ( $1700 mm$ ).

$d$ : قطر لوله ( $32 mm$ ).

$\rho$ : چگالی هوا.

$u$ : سرعت متوسط هوا.

چگالی هوا بر اساس معادله (۲-۳) و با توجه به مقدار میانگین دماهای اندازه‌گیری شده  $T_{12}$

و  $T_8$ ، به دست می‌آید. همچنین میانگین سرعت هوا بدین صورت محاسبه می‌شود:

$$u = \frac{4\dot{m}}{\pi d^2 \rho} \quad (5-3)$$

همچنین، روش دیگر برای به دست آوردن ضریب اصطکاک، استفاده از دیاگرام مودی (شکل ۲-۳ دیاگرام مودی) است که در آن ضریب اصطکاک به عنوان تابعی از عدد رینولدز و زبری نسبی است. در مورد لوله‌های صاف (که یک فرض منطقی برای لوله‌های مسی است)، ضریب اصطکاک را می‌توان با استفاده از معادله (۶-۳) به دست آورد:

$$f = 0.316 Re_d^{-0.25} \quad (6-3)$$

### ۳-۵-۳- تحلیل انتقال حرارت گذرا در دستگاه

اندازه‌گیری‌های جریان سیال گرم باید در شرایط پایا (دماهای ثابت با گذشت زمان) انجام شوند. به منظور رسیدن به شرایط پایای گرمایش، یک انتقال حرارت گذرا باید انجام شود. یک روش مناسب برای تحلیل انتقال حرارت گذرا، رسم دما بر حسب زمان است (شکل ۳-۳ نمای ظاهری از تغییرات دما با زمان در طول آزمایش). توزیع دما با تغییرات زمان رفتار نمایی دارد:

$$T(t) = T_f + (T_0 - T_f) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (7-3)$$

که در این رابطه:

$T(t)$ : دما در زمان  $t$ .

$T_f$ : دمای نهایی و پایا ( $t \rightarrow \infty$ ).

$T_0$ : دمای اولیه ( $t = 0$ ).

$\tau$ : ثابت زمانی.

از این رابطه می‌توان ثابت زمانی را محاسبه کرد.

همچنین ثابت زمانی دستگاه را می‌توان با استفاده از روش ترسیمی (مطابق شکل ۳-۳ نمای ظاهری از تغییرات دما با زمان در طول آزمایش) محاسبه نمود:

- یک خط مماس بر منحنی گرمایش در زمان  $t = 0$  رسم کنید.

- نقطه تقاطع خط مماس رسم شده در مرحله قبل و مجانب افقی برای  $T_f$  را بیابید.
- مقدار زمان نقطه تقاطع به دست آمده، نشان‌دهنده ثابت زمانی  $\tau$  می‌باشد.

برای هر دستگاهی (به طور مثال برای دماهای دیواره لوله متفاوت) مقدار ثابت زمانی تقریباً ثابت است. همچنین ثابت زمانی برای موادی با ظرفیت گرمایی بیشتر، مقدار بزرگ‌تری است.

### ۳-۵-۴- محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی هوا به دیواره

به منظور محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی هوا به آب، قانون پایستگی انرژی برای بخشی از لوله که شامل المنت‌های گرم کن می‌باشد، باید بررسی شود. با در نظر گرفتن قانون اول ترمودینامیک برای دستگاه، معادله زیر برای تعادل انرژی حاصل می‌شود:

$$\dot{Q}_c = \dot{m} C_p (T_{12} - T_8) \quad (۸-۳)$$

که در این رابطه،  $\dot{Q}_c (W)$ ، نشان‌دهنده توان گرمایی مبادله شده از طریق جابه‌جایی از دیواره به هوا است. مقدار ضریب  $C_p$  را می‌توان با توجه دمای میانگین هوا،  $(T_{12} + T_8)/2$ ، به دست آورد. مقدار  $\dot{Q}_c$  را همچنین می‌توان با توجه به قانون سرمایش نیوتن، طبق رابطه زیر، به دست آورد:

$$\dot{Q}_c = h_{ap} S \Delta T_{ap} \quad (۹-۳)$$

که در این رابطه:

$S$ : مساحت سطح انتقال حرارت استوانه‌ای با قطر  $d$  و طول  $L$  ( $S = \pi dL$ ).

$h_{ap}$ : ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ).

$\Delta T_{ap}$ : اختلاف دمای میانگین دیواره و هوا.

در این آزمایش از آن جایی که انتقال حرارت بیشتر در بخش گرم کن رخ می‌دهد (دماهای

دیواره از  $T_2$  تا  $T_6$ )، می‌توان اختلاف دمای میانگین دیواره و هوا را به صورت زیر تعریف نمود:

$$\Delta T_{ap} = \frac{(T_2 - T_{12}) + (T_6 - T_8)}{2} \quad (۱۰-۳)$$

با جاگذاری معادله (۸-۳) در معادله (۹-۳)، می‌توان ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی هوا به

آب را از رابطه زیر به دست آورد:

$$h_{ap} = \frac{\dot{m} C_p (T_8 - T_{12})}{\pi d L \Delta T_{ap}} \quad (11-3)$$

### ۳-۵-۵- بررسی صحت تشابه رینولدز-کلبرن

با استفاده از تشابه رینولدز می‌توان یک رابطه کمی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی،  $h$  و ضریب اصطکاک  $f$ ، بیان نمود. این تشابه بر اساس ارتباط فیزیکی بین دو پدیده انتقال حرارت (جابه‌جایی) و انتقال اندازه حرکت (اصطکاک جریان) برای یک سیال لزج در جابه‌جایی اجباری در داخل یک لوله پایه‌گذاری شده است. بخش از یک لوله با قطر  $d$  و طول  $L$  را در نظر بگیرید. حال فرض کنید که دو مقدار زیر برای کل این بخش از لوله برابر می‌باشند: (۱) کسری از مقدار انرژی حرارتی سیال که توسط انتقال حرارت جابه‌جایی مبادله شده است و (۲) کسری از اندازه حرکت سیال که توسط اصطکاک از بین رفته است. با نشان دادن تغییرات دما با  $\Delta T$ ، افت فشار با  $\Delta P$  و همچنین با نمایش دمای میانگین سیال و لوله به ترتیب با  $T_s$  و  $T_f$  و نمایش مساحت سطح مقطع لوله با  $A$ ، می‌توان به رابطه زیر رسید:

$$\frac{\dot{m} C_p \Delta T}{\dot{m} C_p (T_s - T_f)} = \frac{A \Delta P}{\dot{m} u} \quad (12-3)$$

که در این رابطه  $\dot{m}$  و  $u$  به ترتیب دبی جرمی و سرعت می‌باشند. صورت کسر سمت چپ معادله (۱۲-۳)، بیان‌کننده کاهش آنتالپی سیال است، در حالی که، صورت کسر سمت راست نشان‌دهنده اعمال نیروهای فشاری روی سیال در حجم کنترل مورد نظر است. با استفاده از روابط  $\dot{m} C_p \Delta T = h_{ap} (\pi d L) (T_s - T_f)$  و  $\Delta P = f \left(\frac{L}{D}\right) \rho \left(\frac{u^2}{2}\right)$  و جاگذاری این روابط در معادله (۱۲-۳)، معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{h}{\rho C_p u} = \frac{f}{8} = St \quad (13-3)$$

که در این رابطه،  $St$ ، نشان‌دهنده عدد استانتون<sup>۱</sup> است. معادله (۱۳-۳) را می‌توان به شکل بدون

<sup>۱</sup> Stanton number

بعد معادله (۱۴-۳) نوشت.

$$Nu_d = \left(\frac{f}{8}\right) Re_d Pr \quad (14-3)$$

کاربرد معادلات (۱۳-۳) و (۱۴-۳) به سیالاتی با عدد پرانتل حدود یک (مانند هوا که برای آن:  $Pr = 0.7$ ) محدود می‌شود.

### ۳-۵-۶- محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی هوا به آب

انتقال حرارت بین هوا و آب در مبدل حرارتی (بخش شماره ۱۰ در **Error! Reference**

**source not found.**) از طریق سه پدیده متمایز رخ می‌دهد:

۱- انتقال حرارت جابه‌جایی بین هوا و سطح داخلی لوله

۲- هدایت گرمایی در داخل جداره لوله

۳- انتقال حرارت جابه‌جایی بین سطح خارجی لوله و هوا

در شرایط پایا، با توجه به بقای انرژی، سه شار حرارتی هوا به دیواره، هدایت داخل جداره و

دیواره به آب با یکدیگر برابرند و می‌توانند در شکل عمومی زیر ظاهر شوند:

$$\dot{Q} = \frac{\pi d L \Delta T}{R} \quad (15-3)$$

که در این رابطه،  $R$ ، نشان‌دهنده مقاومت گرمایی ( $m^2C/W$ ) است. بنابراین برای انتقال حرارت جابه‌جایی بین هوا و سطح داخلی جداره لوله رابطه زیر برقرار است:

$$\dot{Q} = \frac{\pi d L (T_a - T_{p,i})}{R_{ap}} \quad (16-3)$$

که در این رابطه:

$T_a$ : دمای هوا.

$T_{p,i}$ : دمای سطح داخلی لوله.

$R_{ap}$ : مقاومت گرمایی جابه‌جایی بین هوا و دیواره که برابر است با  $\frac{1}{h_{ap}}$ .

برای هدایت گرمایی در داخل جداره لوله نیز می‌توان رابطه زیر را نوشت:



$$\dot{Q} = \frac{\pi d L (T_{p,i} - T_{p,e})}{R_p} \quad (17-3)$$

که در این رابطه:

$T_{p,e}$ : دمای سطح خارجی لوله.

$R_p$ : مقاومت هدایت گرمایی دیواره که برابر است با  $\frac{s}{k}$ ، ضخامت دیواره که  $0.002 m$  است

و  $k$ ، ضریب هدایت گرمایی برای مس است که  $386 W/m^{\circ}C$  می باشد.

برای انتقال حرارت جابه‌جایی بین دیواره و آب نیز رابطه‌ای مشابه برقرار است:

$$\dot{Q} = \frac{\pi d L (T_{p,e} - T_w)}{R_{pw}} \quad (18-3)$$

که در این رابطه:

$T_w$ : دمای آب.

$R_{pw}$ : مقاومت گرمایی جابه‌جایی بین دیواره و آب که برابر است با  $\frac{1}{h_{pw}}$  و ضریب انتقال

حرارت جابه‌جایی بین دیواره و آب است.

با توجه به معادلات (۱۶-۳)، (۱۷-۳) و (۱۸-۳) می‌توان به رابطه زیر رسید:

$$\dot{Q} = \frac{\pi d L (T_a - T_w)}{R} = \pi d L H (T_a - T_w) \quad (19-3)$$

که در این رابطه  $R$ ،  $(R = 1/H)$  مقاومت گرمایی کل است که برابر است با  $R_{ap} + R_p + R_{pw}$  و

$H$  نیز ضریب انتقال حرارت کل بین هوا و آب است. مقدار  $T_a - T_w$  را می‌توان از رابطه زیر به

دست آورد:

$$T_a - T_w = \frac{T_8 + T_9}{2} - T_{10} \quad (20-3)$$

از آن جایی که در دستگاه این آزمایش، آب داخل مبدل حرارتی مقدار ثابتی است، مقدار کل

گرمایی که بین آب و هوا مبادله شده است از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q = M C_w (T_{10,final} - T_{10,initial}) \quad (21-3)$$

که در این رابطه:

$M$ : جرم آب که یک کیلوگرم است.

$c_w$ : ظرفیت گرمای ویژه آب که مقدار آن برابر  $4186 J/kg^{\circ}C$  است.

میانگین نرخ انتقال حرارت کل بین هوا و آب را می‌توان با تقسیم معادله (۳-۲۱) به زمان کل

مرحله گرمایش به دست آورد:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} \quad (۳-۲۲)$$

با توجه به مقدار به دست آمده برای  $\dot{Q}$ ، می‌توان ضریب انتقال حرارت کل بین هوا و آب را به

دست آورد:

$$H = \frac{\dot{Q}}{\pi d L (T_a - T_w)} \quad (۳-۲۳)$$

همچنین مقاومت گرمایی بین دیواره و آب را می‌توان با استفاده از مقدار محاسبه‌شده برای

$H$  (از معادله (۳-۲۳))، به صورت زیر محاسبه کرد:

$$R_{pw} = \frac{1}{H} - R_p - \frac{1}{h_{ap}} \quad (۳-۲۴)$$

که در این رابطه، مقدار  $h_{ap}$  از معادله (۳-۱۱) به دست آمد.

### ۳-۶- خواسته‌های آزمایش

#### ۳-۶-۱- خواسته‌های آزمایش برای حالت گرمایش

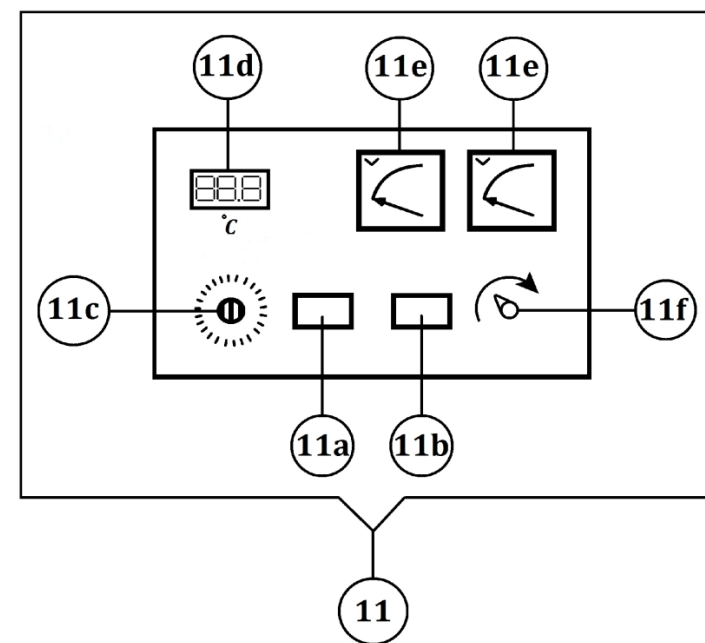
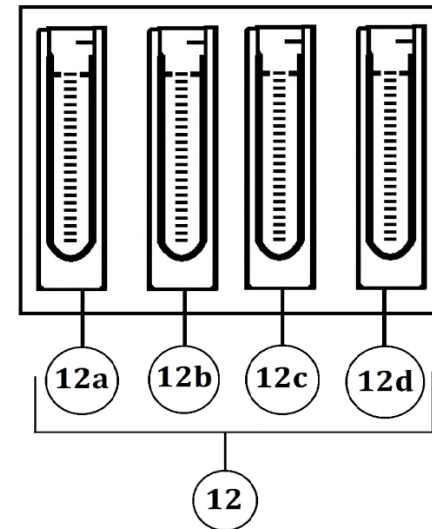
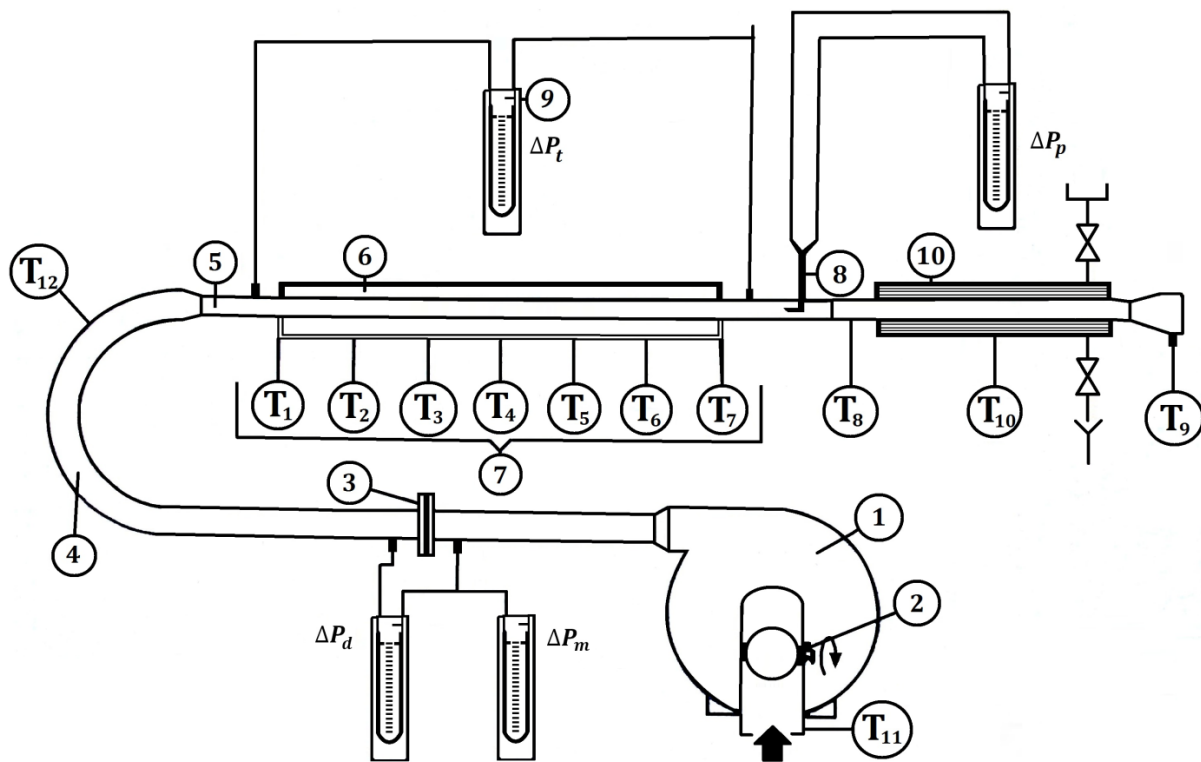
- ۱- ضریب اصطکاک لوله را به دست آورید.
- ۲- زبری نسبی لوله را به دست آورید.
- ۳- ضریب اصطکاک لوله را با توجه به این که جنس لوله مسی است ( $\epsilon = 0.05 \text{ mm}$ )، با استفاده از دیاگرام مودی به دست آورید و با ضریب اصطکاک لوله صاف (با توجه به معادله موجود در دستور کار) و مقدار به دست آمده از آزمایش مقایسه کنید.
- ۴- ضریب انتقال حرارت هوا به دیواره را به دست آورید.
- ۵- ضریب انتقال حرارت هوا به آب را به دست آورید.
- ۶- صحت تشابه رینولدز را در آزمایش انجام شده بررسی نمایید.
- ۷- منحنی‌های  $T_8$ ،  $T_9$  و  $T_{10}$  را بر حسب زمان رسم کنید (بر روی یک محور).
- ۸- منحنی‌های  $T_{11}$ ،  $T_{12}$ ،  $T_1$ ،  $T_2$ ،  $T_4$ ،  $T_6$  و  $T_7$  را بر حسب زمان رسم کنید (بر روی یک محور).
- ۹- در حالت پایدار، منحنی‌های  $T_1$  الی  $T_7$  را بر حسب طول لوله رسم و روی آن بحث کنید.
- ۱۰- ثابت زمانی سیستم را از دو روش ذکر شده در دستور کار (ترسیمی و استفاده از روابط) به دست آورید.

#### ۳-۶-۲- خواسته‌های آزمایش برای حالت سرمایش

- تمامی خواسته‌های ۷ الی ۱۰ در بخش گرمایش را برای سرمایش نیز تکرار کرده و با آنها مقایسه کنید.

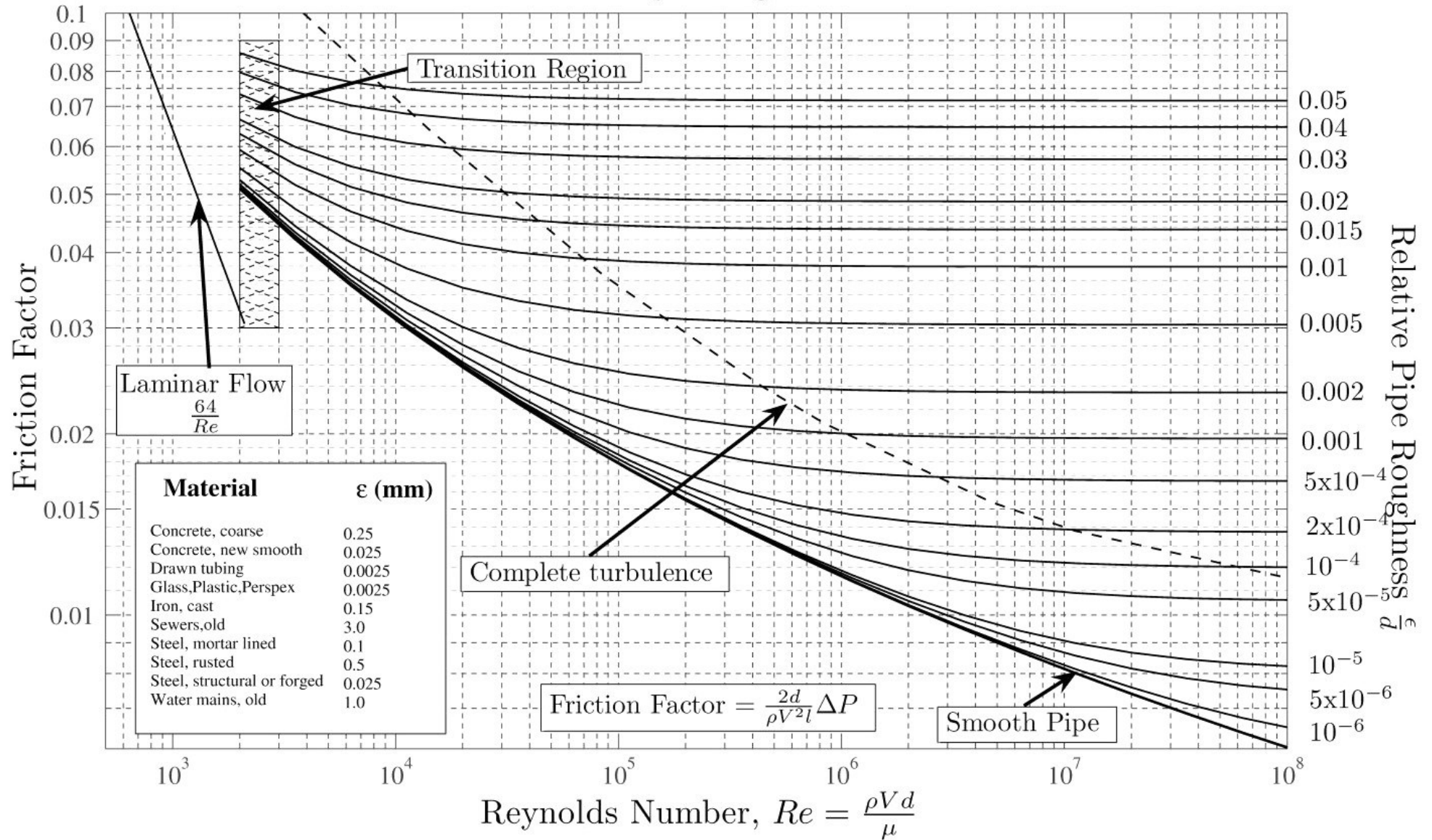
جدول ۱-۳ ثبت داده‌های آزمایش جابه‌جایی اجباری برای جریان داخلی

$t$ (min)	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$	$T_4(^{\circ}\text{C})$	$T_5(^{\circ}\text{C})$	$T_6(^{\circ}\text{C})$	$T_7(^{\circ}\text{C})$	$T_8(^{\circ}\text{C})$	$T_9(^{\circ}\text{C})$	$T_{10}(^{\circ}\text{C})$	$T_{11}(^{\circ}\text{C})$	$T_{12}(^{\circ}\text{C})$
۰												
۳												
۶												
۹												
۱۲												
۱۵												
۱۸												
۲۱												
۲۴												
۲۷												
۳۰												
۳۳												
۳۶												
۳۹												
۴۲												
۴۵												
۴۸												
۵۱												
۵۴												
۵۷												
۶۰												
۶۳												
۶۶												
۶۹												
۷۲												
۷۵												
$\Delta P_m(\text{mmHg})$ - 12a												
$\Delta P_d(\text{mmH}_2\text{O})$ - 12b								$\times 0.81 =$				
$\Delta P_t(\text{mmH}_2\text{O})$ - 12c								$\times 0.81 =$				
$I(A) =$							$V(V) =$					

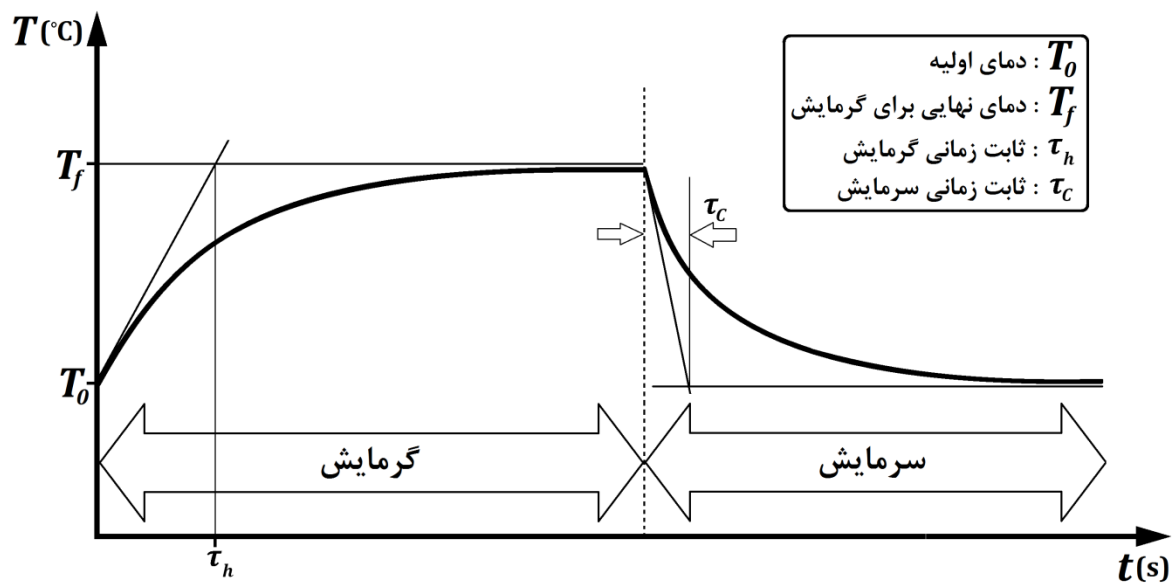


شکل ۳-۱ اجزاء تشکیل دهنده دستگاه

# Moody Diagram



شکل ۲-۳ دیاگرام مودی



شکل ۳-۳ نمای ظاهری از تغییرات دما با زمان در طول آزمایش

# هدایت گرمایی اجسام جامد



## ۴-۱- هدف

پی بردن به چگونگی انتقال حرارت به شیوه هدایت در اجسام جامد و نقش جسم جامد بر شدت انتقال حرارت در داخل آن.

## ۴-۲- مقدمه

انتقال گرما به شیوه هدایت به انتقال انرژی ناشی از شیب دما گفته می‌شود و سازوکار فیزیکی آن از نوع فعالیت اتمی یا مولکولی است [۱]. در اکثر موارد، انتقال گرما به شیوه هدایت با قانون فوریه<sup>۱</sup> بیان می‌شود که بیان‌کننده تناسب مقدار گرمای منتقل‌شده با گرادیان دما است. البته جهت این انتقال گرما در خلاف جهت گرادیان دما است و در واقع گرما از دمای بیشتر به دمای کمتر منتقل می‌شود. ضریبی که این تناسب را به تساوی تبدیل می‌کند، رسانندگی گرمایی<sup>۲</sup> ( $W/m \cdot K$ ) نام دارد. این ضریب وابسته به نوع ماده بوده و در واقع رفتار ماده را می‌سنجد. در اکثر موارد این ضریب وابستگی ناچیزی به دما دارد که می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد.

## ۴-۳- شرح دستگاه

این دستگاه برای تعیین رسانندگی گرمایی اجسامی که از نظر گرمایی هادی‌های به نسبت خوبی هستند، طراحی شده است. دستگاه شامل اجزاء اصلی زیر می‌باشد:

- ۱- گرم کن الکتریکی به عنوان منبع گرمایی.
- ۲- یک محفظه با سطح داخلی از جنس آینه به منظور جلوگیری از هدررفت گرما به شیوه‌های جابه‌جایی و تشعشع و در نتیجه یک بعدی نمودن گرمای منتقل‌شده.
- ۳- یک دبی سنج جهت تنظیم دبی آب خنک‌کننده.
- ۴- شش دماسنج برای اندازه‌گیری دما در نقاط سرد و گرم قطعات استوانه‌ای شکل فلزی و

---

<sup>۱</sup> Fourier's law

<sup>۲</sup> Thermal conductivity

دمای آب خنک کن در ورود و خروج با نام‌گذاری ذیل:

$T_1$ : دمای نقطه گرم نمونه بلند.

$T_2$ : دمای نقطه سرد نمونه بلند.

$T_3$ : دمای نقطه گرم نمونه کوتاه.

$T_4$ : دمای نقطه سرد نمونه کوتاه.

$T_i$ : دمای ورودی آب خنک کن.

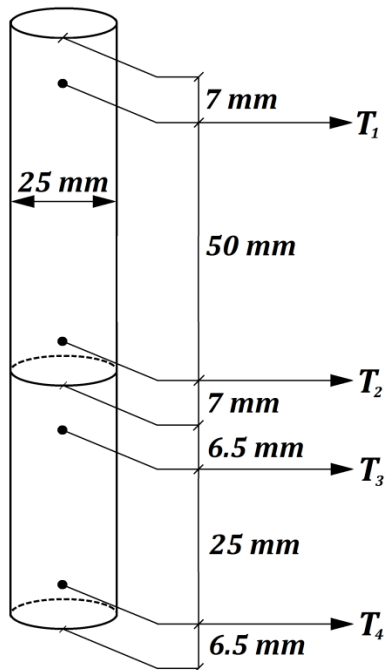
$T_o$ : دمای خروجی آب خنک کن.

۵- پتانسیومتر برای خواندن دمای دو قطعه فلزی از طریق دماسنج‌ها.

۶- دو قطعه فلزی که به صورت عمودی روی هم و در تماس باهم قرار گرفته‌اند (شکل ۱-۴)

نمای ظاهری از قطعات فلزی استوانه‌ای شکل) و انرژی حرارتی تولیدشده توسط گرم کن

الکتریکی را به آب خنک کن منتقل می‌کنند.



شکل ۱-۴ نمای ظاهری از قطعات فلزی استوانه‌ای شکل

## ۴-۴- روش انجام آمایش

۱- محفظه آینه‌ای را روی قطعات فلزی قرار دهید.

۲- شیر آب را باز کنید و با استفاده از تنظیم‌کننده دبی، مقدار دبی آب خنک کن را روی یک دبی خاص مانند  $6 L/h$  تنظیم کنید. توجه داشته باشید که با توجه به ثابت بودن مقدار انرژی تولیدشده در گرم کن الکتریکی، هرچه مقدار دبی جریان آب خنک کن کمتر باشد، اختلاف دمای ورودی و خروجی آب خنک کن بیشتر شده و در نتیجه آزمایش با دقت بیشتری انجام می‌شود.

۳- دوشاخه برق دستگاه را به برق شهر وصل کنید و با قرار دادن کلید اصلی دستگاه بر روی حالت ON، دستگاه را روشن کنید.

۴- پیچ ترانسفرمر متغیر را در جهت عقربه‌های ساعت به آرامی بچرخانید تا عقربه شدت جریان روی  $300 mA$  قرار گیرد.

۵- در این حالت باید دستگاه حدود نود دقیقه کار کند تا حالت پایا برقرار گردد.

۶- پس از گذشت نود دقیقه، بافاصله زمانی بیست دقیقه دماهای  $T_1$  تا  $T_4$  را در جدول ۴-۱ یادداشت کنید و این عمل را چهار بار دیگر تکرار کنید تا از برقراری حالت پایدار در دستگاه اطمینان حاصل نمایید.

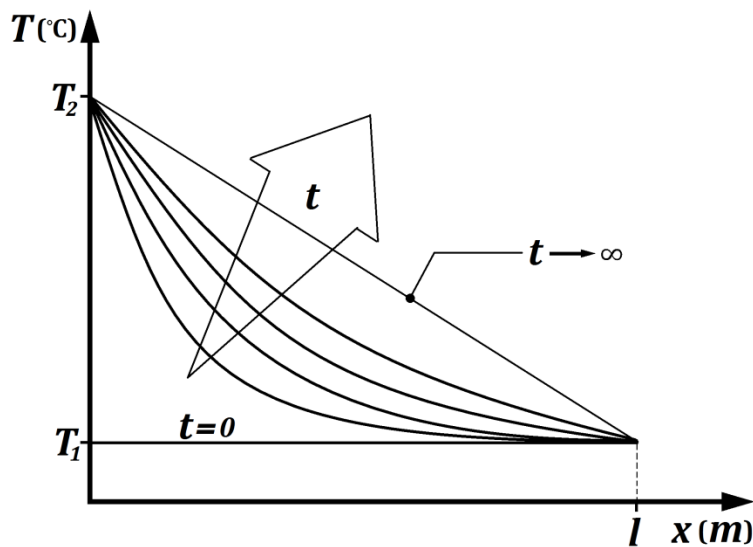
۷- مقدار دبی، شدت جریان و دماهای ورودی و خروجی جریان آب خنک‌کن را بخوانید و در جدول ۴-۱ یادداشت کنید.

جدول ۱-۴ ثبت داده‌های آزمایش هدایت گرمایی اجسام جامد

$t$ (min)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)
$\dot{q}$ (L/h) =		$I$ (A) =		
$T_i$ (°C) =		$T_o$ (°C) =		

#### ۴-۵- تئوری

میله‌ای به طول  $L$  و سطح مقطع  $A$  را در نظر بگیرید که تمام نقاط آن دارای دمای  $T_1$  می‌باشند. در یک لحظه سمت چپ میله را در تماس با منبعی با دمای  $T_2$  (در آزمایشگاه این عمل با استفاده از برق شهری و گرم کن الکتریکی انجام می‌شود) قرار دهید. شکل ۲-۴ نمای ظاهری از منحنی تغییرات دما را در طول میله و در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴ نمای ظاهری از تغییرات دما با مکان در داخل جسم

پس از گذشت زمان کافی ( $t \rightarrow \infty$ )، دمای تمام نقاط ثابت می‌ماند. در این حالت میله به

شرایط پایا رسیده است. با فرض یک بعدی بودن هدایت گرمایی در داخل جسم و در جهت محور تقارن آن، می‌توان مقدار حرارت انتقال یافته از سطح مقطع میله در واحد زمان را با استفاده از قانون فوریه به دست آورد:

$$\dot{Q} = -KA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1-4)$$

که در این رابطه:

$\dot{Q}$ : حرارت انتقال یافته از سطح مقطع میله در واحد زمان ( $W$ ).

$K$ : رسانندگی گرمایی ( $W/m \cdot K$ ).

$A$ : سطح مقطع میله ( $m^2$ ).

$\frac{\Delta T}{\Delta x}$ : شیب منحنی دما بر حسب طول میله در شرایط پایا ( $K/m$ ).

همچنین با توجه به اینکه این مقدار گرما توسط آب خنک کن دفع می‌شود، می‌توان مقدار

آن را از رابطه زیر نیز به دست آورد:

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_o - T_i) \quad (2-4)$$

که در این رابطه:

$\dot{m}$ : دبی جرمی آب ( $kg/s$ ).

$C_p$ : ظرفیت گرمایی ویژه آب ( $4186 J/kg \cdot K$ ).

با جاگذاری معادله (۲-۴) در معادله (۱-۴) و استفاده از دماهای  $T_1$  تا  $T_4$  جهت محاسبه

شیب منحنی دما بر حسب طول در دو قطعه فلزی، می‌توان به روابط زیر جهت محاسبه ضرایب

رسانندگی گرمایی دو قطعه دست یافت:

$$K_1 = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{A \frac{(T_1 - T_2)}{l_1}}, \quad K_2 = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{A \frac{(T_3 - T_4)}{l_2}} \quad (3-4)$$

که در این رابطه:

$l_1$ : فاصله بین دو دماسنج در قطعه بلند ( $0/05 m$ ).

$l_2$ : فاصله بین دو دماسنج در قطعه کوتاه ( $0/025 m$ ).

لازم به ذکر است جهت برقراری انتقال گرما به صورت یک بعدی، تمهیدات ذیل در آزمایش لحاظ شده است:

در مرز جسم (در جهت شعاعی)، گرما از طریق دو سازوکار مجزا انتقال می‌یابد: (۱) جابه‌جایی و (۲) تشعشع. به منظور داشتن هدایت گرمایی در جسم به صورت یک بعدی، این دو سازوکار انتقال گرما در مرز جسم (در راستای عمود بر محور تقارن جسم) باید حذف شوند. در این آزمایش به منظور حذف جابه‌جایی، باید اختلاف دما بین سطح جسم و محیط اطراف حذف شود. این عمل با قرار دادن محفظه‌ای در اطراف جسم و با گذشت زمان لازم جهت هم شدن سطح جسم و محیط اطراف انجام می‌شود. همچنین برای حذف تشعشع، سطح داخلی محفظه به صورت آینه طراحی شده است تا عمل جذب گرما از طریق تشعشع حذف شود.

## ۴-۶- خواسته‌های آزمایش

۱- ضریب هدایت گرمایی دو نمونه بر حسب  $W/m \cdot K$ .

۲- منحنی دما را بر حسب مکان برای شرایط پایا رسم کنید و از روی آن دمای گرم‌ترین نقطه ( $T_h$ ) و سردترین نقطه ( $T_c$ ) در میله‌ها را به دست آورید. بر روی منحنی بحث کنید.

۳- ثابت کنید شدت انتقال حرارت در نمونه‌ها مطابق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\dot{Q} = \frac{T_h - T_c}{\frac{L_1}{AK_1} + \frac{L_2}{AK_2}} \quad (۴-۴)$$

که در این رابطه:

$L_1$ : طول قطعه بلند.

$L_2$ : طول قطعه کوتاه.

۴- با استفاده از رابطه (۴-۴)، شدت انتقال حرارت را در نمونه‌ها پیدا کنید.

۵- چنانچه مقاومت گرم کن الکتریکی  $1000 \Omega$  باشد، درصد اتلاف حرارتی چقدر است؟

۶- عوامل مؤثر در خطای این آزمایش کدام‌اند؟ پیرامون میزان تأثیر عوامل بحث کنید.

۷- علت وجود علامت منفی در قانون فوریه چیست؟

مراجع



- [1] Bergman, T.L., F.P. Incropera, and A.S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 2011: Wiley.