



## مطالعه تجربی تعیین نقطه بهینه تحریک لایه مرزی مغشوش با موانع مختلف با هدف افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی

سعید وحیدی<sup>۱</sup>، محسن کهرم<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

\*مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۹۴۸۹۴۴، mkahrom@um.ac.ir

### چکیده

تاثیرپذیری ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی روی یک صفحه تخت در حضور یک مانع در مجاورت صفحه، به‌صورت تجربی مطالعه شده است. در مقایسه اثر تحریک، ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط در مجاورت صفحه تخت در سه حالت بدون مانع، با یک مانع مربعی و یک مانع بهینه‌سازی شده، در داخل لایه مرزی جریان مغشوش اندازه‌گیری شده‌اند. در اندازه‌گیری آزمایشگاهی، از یک تونل باد، یک صفحه تخت مجهز به گرمکن حرارتی با شار ثابت به‌عنوان بستر اصلی آزمون استفاده گردیده است. از نتایج عددی برای تنظیم آزمایش‌های تجربی و در صورت هم‌خوانی این دو با یکدیگر، از نتایج عددی برای تفسیر رفتار جریان در نتیجه تحریک لایه مرزی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که با تغییر فاصله مانع از صفحه، اثرپذیری ضریب انتقال حرارت از وجود مانع متغیر است به‌طوری که تا فاصله خاصی از قرارگیری مانع از دیواره ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد و پس از آن فاصله رو به کاهش می‌گذارد و در نهایت به مقدار مربوط به صفحه تخت میل می‌کند. برای موانع با سطح مقطع مربعی و مانع بهینه شده فاصله متناظر با حداکثر ضریب انتقال حرارت استخراج گردیده است.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۲

پذیرش: ۲۸ خرداد ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۳

کلیدواژگان:

تحریک لایه مرزی

ضریب جابه‌جایی لایه مرزی مغشوش

مانع مربعی

## Experimental study of turbulent layers with different obstacles to stimulate optimal point augmentation in heat transfer coefficient

Saeid Vhidifar<sup>1</sup>, Mohsen Kahrom<sup>2\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

\* P.O.B. 9177948944 Mashhad, mkahrom@um.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 11 May 2013  
Accepted 18 June 2013  
Available Online 11 May 2014

#### Keywords:

Heat Transfer Enhancement  
Turbulent Boundary Layer  
Square Rod

### ABSTRACT

Experimental evaluation of overall convection heat transfer coefficient of a rectangular bar in the vicinity of a flat plate is investigated. A quad of rectangular shape and later a quad with the cause of optimal heat transfer are placed at the near and the inside of a turbulent boundary layer over a flat plate. The overall convection heat transfer coefficient of the flat plate are measured and compared to the case similar to a single flat plate. A low speed wind tunnel is employed to maintain main flow field at the requested speed and special electrical circuit is prepared to provide heat and measure heat losses from the flat plate. Conclusion is made that when the obstacle closes to the flat plate, the total convective heat transfer coefficient increases to a maximum and then reduces again by moving towards the plate. Distance from the flat in which the maximum heat transfer coefficient occurs is reported.

### ۱- مقدمه

حرارتی تا حدود ۸۰٪ مقاومت حرارتی در سمت هوا می‌باشد، بنابراین به دنبال روش‌هایی هستیم که میزان انتقال حرارت در سمت هوا را افزایش دهیم [۳]. اخیراً تکنیک‌های تحریک لایه مرزی، باعث بهینه‌سازی مصرف انرژی، کوچک شدن و افزایش نرخ انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی گردیده است [۴]. اولین بحث‌ها مربوط به فرایند شکل‌گیری و توسعه امواج تولمین-شلسنتینگ و بالاخره کنترل طول لایه مرزی گذرا بوده است [۵]. حق‌پرست [۵] در یک مطالعه عددی با قرار دادن یک مانع چهار گوش در کنار یک صفحه تخت و تغییر شکل دائم مقطع چهار گوش و فاصله آن از صفحه، تغییر ضریب اصطکاک روی صفحه تخت را بررسی کرد. در

افزایش کارایی سیستم‌های انتقال و تبدیل انرژی مهندسی را تشویق به بررسی و کنترل فرایندها، از جمله کنترل ضریب انتقال حرارت، کرده است. در بسیاری از کاربردهای صنعتی، یافتن شیوه‌هایی برای افزایش ضریب انتقال حرارت، مانند خنک‌کاری پره‌های توربین، سرمایش اجزای الکترونیکی، افزایش انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی، راکتورها و سیستم‌های بازیافت حرارت، از موضوعات مهم تحقیقاتی بوده است. در طی دهه‌های گذشته تکنیک‌های مختلفی برای تحریک انتقال حرارت جابه‌جایی از یک دیواره ابداع گردیده است [۱،۲]. در مبدل‌های

Please cite this article using:

S. Vhidifar, M. Kahrom, Experimental study of turbulent layers with different obstacles to stimulate optimal point augmentation in heat transfer coefficient, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 43-50, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

قرار دادند. سپس مانع مستطیلی را به سمت صفحه تخت که با جریان اصلی در حال تبادل گرما است، حرکت دادند و اثر فاصله از صفحه تخت و نسبت ابعادی مانع چهارگوش را روی لایه مرزی و شکل‌گیری گردابه‌ها مطالعه نمودند. آن‌ها همچنین نشان دادند که یکی از روش‌های موثر تحریک لایه مرزی مغشوش بر روی یک دیواره، استفاده از یک جسم خارجی در داخل لایه مرزی است. کهرم و همکارانش [۹] همچنین یک چهارگوش و شکل‌های دیگر را در درون لایه مرزی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند جریان پس از رسیدن به مانع و برخورد با آن ابتدا یک نقطه سکون تشکیل داده و در ادامه در مسیر خود از دو طرف مانع می‌گذرد. قسمت هدایت شده به مجرای میان مانع و صفحه‌ی تخت، به صورت یک جت، لایه مرزی روی صفحه تخت را تحت تاثیر قرار می‌دهد. سرعت این جت تا دو برابر سرعت جریان برخوردی به مانع می‌رسد و در شستشوی لایه مرزی بسیار موثر است. قسمت دیگر که به سمت دورتر جسم از صفحه تخت حرکت کرده است، با توجه به طول مانع ابتدا منطقه جدایش روی مانع و سپس تعدادی گردابه روی دیواره مانع تشکیل داده و بالاخره در ادامه راه خود در پشت مانع تشکیل یک گردابه می‌دهد. این گردابه به نوبه‌ی خود در تحریک لایه مرزی پس از جسم موثر می‌باشد. به طور خلاصه در چنین فرایندی در بالا دست مانع یک نقطه سکون، در زیر مانع در حد فاصل صفحه تخت و مانع یک جت و در پایین دست مانع یک منطقه و یک تشکیل می‌شود. هر یک از این عوامل به شکل خاصی در تغییر رفتار لایه مرزی موثر هستند. بسیاری از نتایج نشان می‌دهند که در نتیجه انجام پرش و سپس بازچسب لایه مرزی در لبه آغازین مانع، و در ادامه روی بدنه مانع، گردابه‌هایی تشکیل می‌شوند که بر روی دیواره حرکت کرده به پشت مانع راه می‌یابند. طول ناحیه‌ی پرش، تابع اندازه ضلع مانع مواجه با جریان و تعداد گردابه‌ها تابع طول مانع در امتداد جریان است. لاکت و همکارانش [۱۰] جریان روی صفحه تخت در حضور یک مانع با مقطع مربعی و دایروی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که توزیع انتقال حرارت برای سطح مقطع دایره وابسته به عدد رینولدز بوده و برای مقطع مربعی مستقل از رینولدز است. لیو و همکارانش [۱۱] در یک مطالعه بر روی جریان کاملاً توسعه یافته با سه مانع مربعی، نیم دایره، و مثلثی نشان دادند که سطح مقطع مربع بهترین گزینه در کاهش نواحی گرم شده پشت موانع است. اهن [۱۲] اثر موانع مختلف در جریان مغشوش توسعه یافته را بررسی نمود. نتایج او نشان داد که مانع مربعی بیشترین ضریب اصطکاک افزایشی و مانع مثلثی بالاترین نرخ انتقال حرارت را دارد. همچنین ژانگ [۱۳] گزارش داد که افزودن شیار بین دو مانع مربعی، ضمن افزایش قابل توجه ضریب انتقال حرارت مقدار نیروی اصطکاک را کاهش می‌دهد.

کهرم و همکارانش [۱۴] نشان دادند با تغییر اضلاع چهارگوش و چهار گوش بهینه شده توسط ژنتیک الگوریتم و در نتیجه کنترل موقعیت نقطه سکون و جت تشکیل شده در اطراف مانع می‌توان ضریب انتقال حرارت کلی را تا ۵۱٪ افزایش دهند.

در این مقاله افزایش ضریب انتقال حرارت متوسط وارد بر صفحه از طریق قرار دادن یک مانع در مجاورت یک صفحه مورد مطالعه تجربی قرار گرفته است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد با تغییر فاصله مانع از صفحه، تا فاصله خاصی ضریب انتقال حرارت متوسط افزایش و از آن نقطه به بعد رو به کاهش می‌گذارد تا اینکه اثر مانع از بین می‌رود. برای مانع مربعی و مانع بهینه حداکثر ضریب انتقال حرارت در ۲ میلی‌متری صفحه مشاهده شده ولی مانع بهینه بیشترین اثر را در افزایش ضریب انتقال حرارت متوسط نشان داده است، در پایان نتایج آزمایشگاهی گزارش گردیده است.

این مطالعه از تکنیک الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. در پایان سطح مقطع چهار گوش را به دست آورد که حداقل ضریب اصطکاک روی صفحه تخت را دارد. نتایج حق‌پرست [۵] نشان داد که یک مقطع خاص از چهار گوش ضمن نتیجه دادن بیشترین ضریب انتقال حرارت از صفحه تخت، ضریب اصطکاک روی صفحه تخت را به حداقل می‌رساند. این مقطع چهار گوش مانع بهینه نامیده شد. با توجه به مشکلات پژوهش‌های آزمایشگاهی، آزمون مانع بهینه‌ی حاصل از مطالعه حق‌پرست دو قسمت گردید. یک قسمت شامل اندازه‌گیری ضریب اصطکاک صفحه‌ی تخت در حضور مانع بهینه و دیگری شامل اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی صفحه‌ی تخت در حضور مانع بهینه می‌باشد. سرکار [۶] دینامیک گردابه‌های ناشی از تعامل یک استوانه را با قرار دادن مقطع دایروی در مجاورت دیواره و با استفاده از یک مدل LES سه‌بعدی مورد مطالعه قرار داد. او اثر برهم کنش لایه مرزی یک صفحه تخت با گردابه‌های ساطع شده از استوانه را مورد بررسی قرار داد و ساختار جریان و دینامیک گردابه‌ها و تاثیر آن بر روی انتقال حرارت را بررسی و تحلیل کرد. بوش و همکارانش [۷] تحقیقاتی در مورد جریان حول یک استوانه‌ی با مقطع مربعی در کنار دیواره انجام دادند. بررسی‌های آن‌ها در عدد رینولدز ۲۲۰۰۰ (بر مبنای قطر چهار گوش  $D$ ) انجام شد. آن‌ها دریافتند که در نسبت فاصله  $G/D=0.35-0.5$  در کسری از زمان حرکت تناوبی صدور گردابه‌ها تغییر وضعیت می‌دهد. در نسبت فاصله‌ی کمتر از این مقدار صدور گردابه‌ها کاملاً سرکوب شده و فقط گردابه موجود در پشت جسم متناوباً تغییر اندازه می‌دهد و در نسبت فاصله‌ی با مقدار بیشتر، صدور گردابه‌ها به صورت منظمی و از دو سمت چهارگوش انجام می‌گیرد. فریور [۸] در تحقیقی لایه مرزی آشفته روی صفحه‌ی تخت که توسط یک مقطع مستطیلی تحریک شده را بررسی کرد و نشان داد تحریک لایه مرزی توسط مانع مربعی که پشت آن توسط یک جداکننده به دو قسمت فوقانی و تحتانی تقسیم شده باشد تاثیر زیادی بسته به شرایط بر افزایش و یا کاهش ضریب انتقال حرارت خواهد داشت. کهرم و همکارانش [۹]، یک مانع با مقطع چهارگوش را در مسیر جریان آزاد قرار دادند و تاثیر نسبت ابعادی چهارگوش در شکل‌گیری و تعداد گردابه‌های رها شده از انتهای مانع بر حسب تغییرات نسبت ابعادی را مورد بحث و بررسی قرار دادند و آن‌ها همچنین با کاهش فاصله‌ی مانع تا صفحه تخت و قرار دادن آن به صورت کامل در داخل لایه مرزی نشان دادند که در ابتدا گردابه‌ها روی مانع تشکیل شده و سپس در امتداد طول آن جابه‌جا می‌شوند ولی بعد از مدت زمانی که جریان به حالت پایدار می‌رسد گردابه‌ها روی لبه پایینی مانع دیگر تشکیل نمی‌شوند و فقط در لبه بالایی مانع و در لبه پایین دست آن گردابه‌ای ساکن و با ضریب وجود دارد. در این آزمون نشان داده می‌شود که گردابه در لبه بالایی مانع بر روی سطح آن جابه‌جایی ندارد و رها شدن گردابه در پشت مانع نیز بسیار ضعیف می‌شود. در همین مرجع به منظور قابل مقایسه کردن نتایج این تحقیق با برخی نتایج دیگر، جریان هوا با سرعت  $14 \text{ m/s}$  (عدد رینولدز مقطع مورد مطالعه  $1.05 \times 10^5$ ) و دمای  $20^\circ\text{C}$  به موازات صفحه تخت با دمای ثابت  $58^\circ\text{C}$  را مورد بررسی قرار دادند و یک مانع چهارگوش به ضخامت  $t=8 \text{ mm}$  و طول‌های ۱۶، ۳۲، ۴۰، ۵۲ میلی‌متر در فاصله  $L=135 \text{ cm}$  از ابتدای صفحه تخت در فواصل عمودی متفاوت ۲، ۶، ۱۱، ۲۲ و ۵۰ میلی‌متر از صفحه تخت قرار دادند. کهرم و همکارانش [۹] یک مانع مستطیلی در مسیر جریان آزاد قرار داده و تاثیر نسبت ابعادی مانع چهارگوش و همچنین فاصله آن از سطح صفحه تخت در شکل‌گیری و تعداد گردابه‌ای رها شده از انتهای مانع را مورد بحث و بررسی

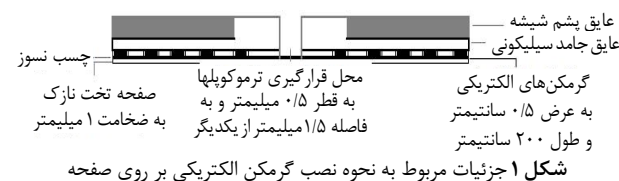
## ۲- تجهیزات آزمایش

جهت مقایسه و مطابقت با سایر تحقیقات مشابه صورت گرفته در این زمینه، بدنه تونل از MDF با ضخامت ۱۶mm و مقطع تونل مستطیلی، به ابعاد ۲۹/۵cm×۳۳/۵ و طول ۲m انتخاب شده است. همچنین برای این که بتوان به فضای داخل تونل دسترسی داشت، یک دریچه سراسری در دیواره‌های کناری تونل ایجاد شده و سطح بالای تونل از جنس شیشه ساخته شده تا فرایندهای داخل قابل رویت باشند. این شیشه‌ها به صورت کشویی قابلیت باز و بسته شدن دارند. لذا با توجه به سه تکه بودن سطح بالایی تونل امکان دسترسی به کلیه مقاطع تونل مهیا گردیده است.

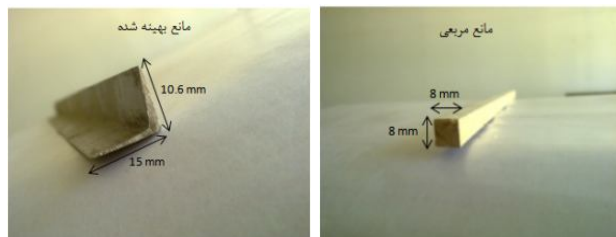
جهت اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت نیاز به ساخت یک سطح شار ثابت و اندازه‌گیری دما بر روی این سطح و متعاقب آن محاسبه ضریب انتقال حرارت وجود داشته است. از این رو تلاش‌های بسیاری برای طراحی و ساخت چنین سطحی به منظور دسترسی به بالاترین دقت صورت پذیرفت جنس سقف ورق فلزی به ضخامت ۱mm انتخاب و برش داده شد تا این ورق به صورت کشویی در شیارهایی که از قبل در بدنه تعبیه شده بود قرار گیرد. به دلیل احتمال تاثیرگذاری انتقال حرارت رسانشی در طول صفحه، از فاصله ۱۴۰cm به بعد صفحه به صورت عرضی شیاردار گردید و ما بین شیارها توسط مواد عایق پر شد. قسمت در معرض جریان ورق کاملاً رنگ‌آمیزی شد تا سطح یکنواخت و صیقلی به دست آید. شایان ذکر است که اندازه‌گیری‌ها در این آزمایش در فواصل  $x=110\text{cm}$  و  $x=140\text{cm}$  صورت می‌گیرد، به جهت درصد موثر بودن شیاردار کردن صفحه و بررسی اثر رسانشی در طول صفحه صرفاً از  $x=140\text{cm}$  به بعد شیاردار و عایق کاری شده است. پس از آماده‌سازی صفحه برای ایجاد گرما در این سطح از المنت‌های حرارتی استفاده شده است (شکل ۱). لذا از المنت‌های تخت خام استفاده گردید. ابعاد این المنت‌ها  $20\text{cm} \times 0.5\text{cm}$  بوده و کاملاً انعطاف‌پذیر لذا با اندکی فشار کاملاً بر روی سطح با حداقل فاصله هوایی به صورت طولی نصب گردیده است.

برای اندازه‌گیری دمای سطح صفحه از ترموکوپل استفاده شده است. بر روی بدنه تونل در قسمت‌هایی که قرار بوده ترموکوپل قرار گیرد عایق جامد سیلیکونی به کار گرفته شده، و این عایق‌ها به ابعاد  $65\text{cm} \times 10\text{cm}$  بریده شده و در مرکز آن سوراخ‌هایی به قطر  $1.5\text{mm}$  و با فاصله  $5\text{mm}$  از یکدیگر ایجاد شده است. پایه ترموکوپل داخل این سوراخ‌ها و دقیقاً بر روی صفحه قرار گرفته و برای اطمینان از هم دما شدن با دمای صفحه، به مدت یک دقیقه بر روی صفحه ثابت شده و سپس داده‌ها برای ۵ بار برداشت شده و میانگین دماها به عنوان دمای آن نقطه ثبت شده است.

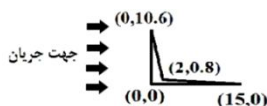
برای تامین جریان هوا از یک دستگاه فن مکشی با دبی  $7950\text{ m}^3/\text{h}$  استفاده شده است. علت نصب فن مکشی افزایش دقت و کاهش ابزاری چون هانی کامب<sup>۱</sup> و اسکرینز<sup>۲</sup> در مسیر ورودی جریان هوا بوده است. همچنین برای اتصال فن به تونل از یک شیبوره از ورق گالوانیزه با هدف یکنواخت کردن سرعت در ورودی هوا استفاده شده است.



1- Honeycomb  
2- Screens



شکل ۲ ابعاد مانع مربعی و بهینه شده برحسب میلی‌متر



شکل ۳ ابعاد دقیق مانع بهینه شده برحسب میلی‌متر [۵]

از یک ترانس با قابلیت تنظیم ولتاژ و توان خروجی متغیر جهت تامین توان مورد نظر المنت‌ها استفاده گردیده است. خروجی این ترانس متغیر بوده و قابلیت تامین ولتاژ ۲۷ تا ۲۴۷ را دارا بود. در این آزمایش ولتاژ ۱۷۷ انتخاب گردید.

ولتاژ خروجی بین ۱۷/۱ V تا ۱۷/۲ V و میزان جریان (I) مصرفی در این ولتاژ ۳۰/۱ Amp تا ۳۰/۵ Amp اندازه‌گیری گردیده است به دلیل نوسانات ولتاژ در برق شهری شاهد نوسان در توان مصرفی بودیم که ممکن است اندکی خطا در آزمایش‌ها ایجاد نماید. از آنجایی که در نمودارها داده‌ها با مقادیر صفحه تخت بی بعد گردیده است. انتظار می‌رود اثر این-گونه خطاها بسیار کمتر شود.

جهت اندازه‌گیری میزان جریان و ولتاژ مصرفی از آمپر ولت متر با دقت ۰/۱۷ و ۰/۱ Amp استفاده گردیده است.

دبی جریان به کمک یک سرعت سنج با دقت  $0.1\text{ m/s}$  اندازه‌گیری شده است. همچنین برای اطمینان از یکنواخت بودن سرعت در مقطع ورودی، سرعت در وسط و نزدیکی‌های دیواره‌های تونل اندازه‌گیری شده است. برای اطمینان از هم مرکزی تونل باد و فن، ارتفاع مرکز هر یک از آن‌ها از کف آزمایشگاه (مرجع اندازه‌گیری) اندازه‌گیری و با هم تراز شده‌اند. برای اندازه‌گیری دمای هوای آزمایشگاه، از یک دماسنج ST-۶۱۲ با دقت  $0.1^\circ\text{C}$  استفاده شده است. اندازه‌گیری دمای هوا در محاسبه‌ی عدد رینولدز مورد نیاز می‌باشد.

برای انجام آزمایش‌های لازم بر روی صفحه تخت یک مانع مربعی با ابعاد  $292\text{mm} \times 8\text{mm} \times 8\text{mm}$  از جنس چوب و برای مانع چهارگوش بهینه از جنس فولاد (شکل ۲) و با ابعاد ذکر شده (شکل ۳) که با عملیات تراشکاری دقیق تهیه گردیده استفاده می‌شود.

## ۳- شرح مساله

هوا با دمای  $T_\infty$  و در فشار  $669\text{ mmHg}$  با سرعت  $14.5\text{ m/s}$  وارد یک تونل بـاد به طول  $2000\text{ mm}$  گردیده و ابتدا مانع مربعی و سپس مانع بهینه شده در فواصل مختلف از صفحه تخت و در رینولدزهای مختلف قرار گرفته و سپس ضریب انتقال حرارت اندازه‌گیری می‌شود.  $T_\infty$  برای هر آزمایش مستقلاً اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. مشخصات هندسی بستر آزمایش مطابق شکل ۴ است.

## ۴- روش انجام آزمایش

تونل باد جهت تست مانع مربعی و مانع بهینه به دست آمده از مرجع [۵] ساخته شده است. سقف این تونل مجهز به سیستم حرارتی با شار ثابت گردید و در حالت بدون مانع داده برداری جهت اعتبار سنجی و همچنین مقایسه نتایج با حالت مانع‌دار انجام شد.

که  $x$  فاصله طولی صفحه می باشد.

شایان ذکر است چون اندازه گیری ها برای هر رینولدز جداگانه انجام شده است و شرایط آزمایش (دمای محیط و توان الکتریکی) در هر رینولدز مقداری متفاوت است.

### ۶- شرایط آزمایش

مشخصات محل آزمایش، لزجت و سرعت هوا در جدول ۱ آورده شده است. برای تعیین چگالی هوا از رابطه گاز کامل استفاده گردیده است. آزمایش ها در دو فاصله  $x=110\text{ cm}$ ،  $x=140\text{ cm}$  از ابتدای ورودی تونل باد انجام گرفت. جدول ۲ عدد رینولدز مربوط به هر فاصله را به همراه ضخامت لایه مرزی در ناحیه تحریک نشان می دهد. ضخامت لایه مرزی از رابطه (۵) محاسبه گردیده است.

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0.37}{\text{Re}_x^{1/5}} \quad (5)$$

اگر چه رابطه (۵) برای صفحه تخت صادق است و با وجود قرارگیری موانع نیز اعتبار خود را از دست می دهد و معادلات لایه مرزی باید به صورت کامل حل شود، ولی این موضوع بر روی نتایج تحقیق تاثیرگذار نخواهد بود. همچنین با مقایسه ضخامت لایه مرزی صفحه تخت، ابعاد دو مانع و فاصله موانع از صفحه واضح است که برای هر دو حالت جریان مغشوش، موانع کاملا در داخل لایه مرزی قرار دارند.

همچنین برای محاسبه  $h$  موضعی از رابطه مشهور انتقال حرارت جابه جایی زیر استفاده شده است.

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (6)$$

و نسبت ضریب انتقال حرارت با مانع و بدون مانع برای صفحه تخت با فرض ثابت بودن  $q''$  برابر است با:

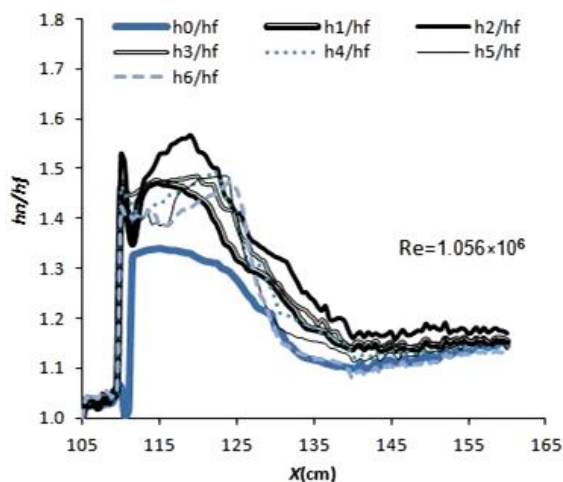
$$\frac{h_f}{h_n} = \frac{T_s - T_\infty}{T_n - T_\infty} \quad (7)$$

جدول ۱ خواص فیزیکی هوا

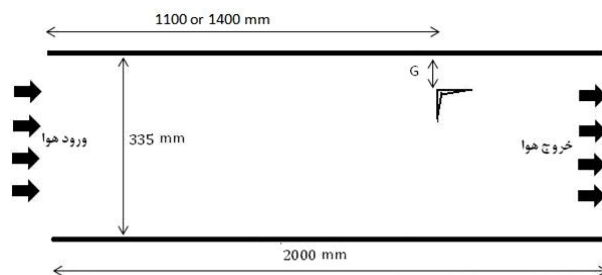
دما	فشار	سرعت جریان	ویسکوزیته دینامیکی
۱۵°C	۶۶۹ mmHg	۱۴/۵ m/s	۱۵/۱۱ × ۱۰ <sup>-۶</sup> m <sup>2</sup> /s

جدول ۲ عدد رینولدز و فاصله طولی از تونل باد و ضخامت لایه مرزی

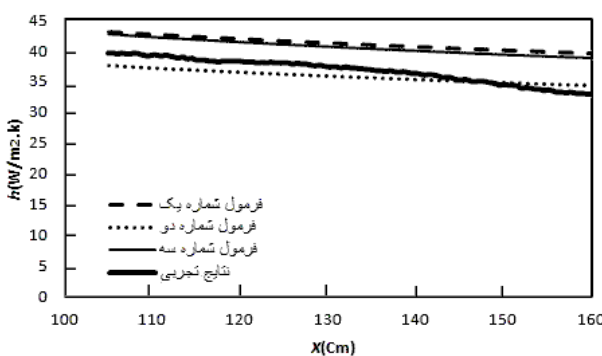
Re <sub>x</sub>	فاصله (cm)	ضخامت لایه مرزی δ (mm)
۱/۰۵۶ × ۱۰ <sup>۶</sup>	۱۱۰	۲۵/۴
۱/۳۴۳ × ۱۰ <sup>۶</sup>	۱۴۰	۳۰/۸



شکل ۶ تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه جایی موضعی با فاصله طولی صفحه



شکل ۴ مشخصات هندسی تونل باد و موقعیت مانع در جریان



شکل ۵ مقایسه بین نتایج بستر آزمون و قانون تجربی در فاصله ۱۰۵ تا ۱۶۰ سانتی متر

موانع در دو عدد رینولدز متفاوت و در فواصل عمودی به ترتیب ۰، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ میلی متری از سقف قرار داده شد. با توجه به اینکه آزمایشگاه مجهز به سیستمی جهت ثابت نگه داشتن دمای محیط آزمایشگاه نبوده لذا آزمایشات در ساعات مشخصی از روز که دما مشابه روز قبل بوده دنبال شده است. در عین حال تغییرات در دمای محیط اجتناب ناپذیر است و ممکن است خطاهای احتمالی را سبب شده باشد. از سویی دیگر ترانس مورد استفاده صرفا ولتاژ برق شهر را کاهش می داد و ولتاژ تبدیل شده به دلیل نوسانات برق نیز دارای نوسان بود که تغییرات اندکی را در توان داده شده به المنتها موجب می شود. از آنجایی که نتایج به صورت مقایسه ای با یکدیگر آورده شده اند انتظار می رود اثر این گونه خطاها به حداقل برسد. سرعت متوسط جریان هوا در داخل تونل ۱۴/۵ m/s اندازه گیری شد.

### ۵- اعتبارسنجی نتایج

جهت اطمینان از صحت جواب های حاصل از بستر آزمون برای جریان روی صفحه تخت در حالت بدون موانع ضریب انتقال حرارت استخراج و با مراجع معتبر [۱۵] مقایسه گردیده است. برای محاسبه ضریب انتقال حرارت (شار ثابت) در جریان مغشوش از رابطه ذیل استفاده گردیده است. همچنین برای اطمینان بیشتر از نتایج حاصل از بستر آزمون با استفاده از روابط ارائه شده در مراجع [۱۶] که همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است همبستگی خوبی را نشان می دهد.

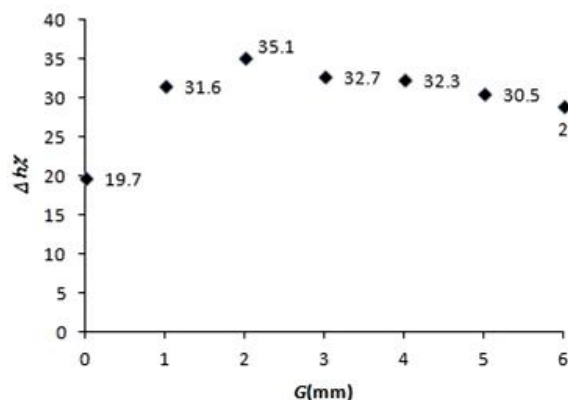
$$\text{Nu}_x = 0.0308 \text{Re}_x^{1/4} \text{Pr}^{1/3} \quad 0.6 \leq \text{Pr} \leq 60 \quad (1)$$

$$\text{Nu}_x = \frac{0.029 \text{Re}_x^{1/4} \text{Pr}}{\left[1 + \frac{2}{\text{Re}_x^{1/4}} (\text{Pr} - 1)\right]} \quad (2)$$

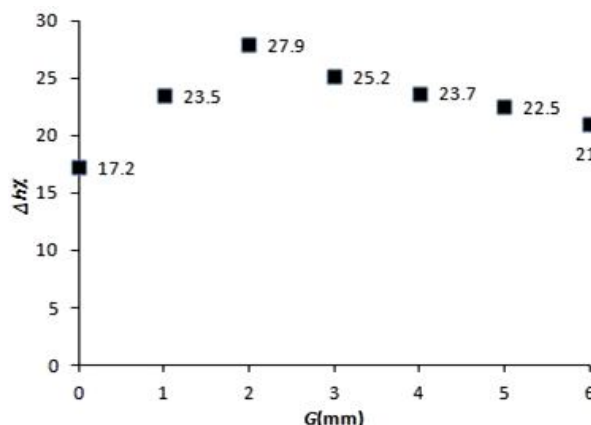
$$\text{Nu}_x = \frac{0.029 \text{Re}_x^{1/4} \text{Pr}}{\sqrt{\frac{0.029}{\text{Re}_x^{1/4}} \left[5 \text{Pr} + 5 \ln \left(\frac{1+5 \text{Pr}}{5}\right) - 5\right] + 1}} \quad (3)$$

که در روابط بالا عدد رینولدز به صورت زیر تعریف شده است:

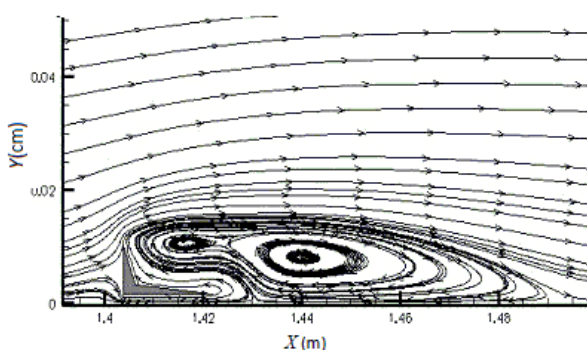
$$\text{Re} = \frac{\rho v x}{\mu} \quad (4)$$



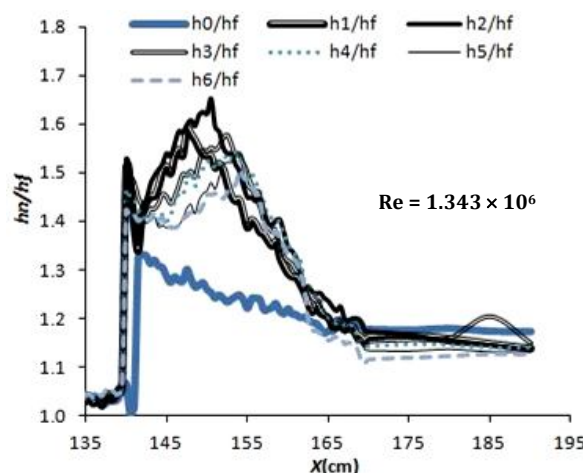
شکل ۹ درصد افزایش ضریب انتقال حرارت متوسط بر حسب فاصله مانع مربعی از صفحه



شکل ۷ درصد افزایش ضریب انتقال حرارت متوسط بر حسب فاصله مانع مربعی از صفحه



شکل ۱۰ خطوط جریان در اطراف مانع بهینه با هدف افزایش در انتقال حرارت و گردابه تشکیل شده در اطراف مانع



شکل ۸ تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی موضعی با فاصله طولی صفحه

#### ۷-۱-۲- مانع در فاصله ۱۴۰cm و رینولدز $1.343 \times 10^6$

نمودارهای (۸) و (۹) چگونگی تغییرات ضریب انتقال حرارت موضعی و متوسط را در فواصل مختلف از صفحه نشان می‌دهند.

همان‌گونه که در نمودارها مشخص است، همانند بخش ۷-۱-۱، با افزایش فاصله عمودی مانع از سقف تا ۲ میلی‌متر، میزان جهش اولیه ضریب انتقال حرارت موضعی در اثر جت افزایش می‌یابد و گردابه‌ها نیز قوی‌تر عمل نمودند.

نمودار (۹) درصد افزایش ضریب انتقال حرارت متوسط نسبت به حالت بدون مانع در مقابل تغییر فاصله از سقف را نشان می‌دهد.

از مقایسه اشکال ۷ و ۹ واضح است که افزایش ضریب انتقال حرارت متوسط در فاصله ۲ میلی‌متری با افزایش عدد رینولدز افزایش یافته است.

#### ۷-۲- مانع بهینه

#### ۷-۲-۱- مانع در فاصله ۱۱۰cm و رینولدز $1.056 \times 10^6$

نتایج حاصل از مطالعه عددی حق پرست [۵] و هندسه حاصل از ژنتیک الگوریتم (مانع بهینه) و خطوط جریان در شکل ۱۰ آورده شده است.

در این شکل گردابه‌ها و جت سیال تشکیل شده به دلیل هندسه خاص مانع مشخص است. این گردابه‌ها و جت سیال نقش بسزایی در ضرایب اصطکاک و انتقال حرارت دارند.

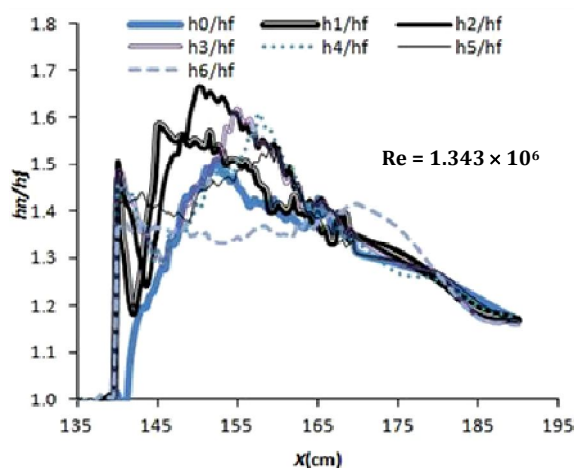
همچنین نمودار (۱۱) درصد افزایش ضریب انتقال حرارت متوسط در ناحیه تحریک نسبت به صفحه تخت را در فواصل مختلف مانع از سقف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، پس از مانع در اثر جت سیال زیر مانع جهش ناگهانی در ضریب انتقال حرارت موضعی مشاهده می‌شود و سپس بر هم کنش بین گردابه‌ها باعث افزایش ضریب انتقال حرارت گردیده است.

## ۷- بررسی و تحلیل نتایج

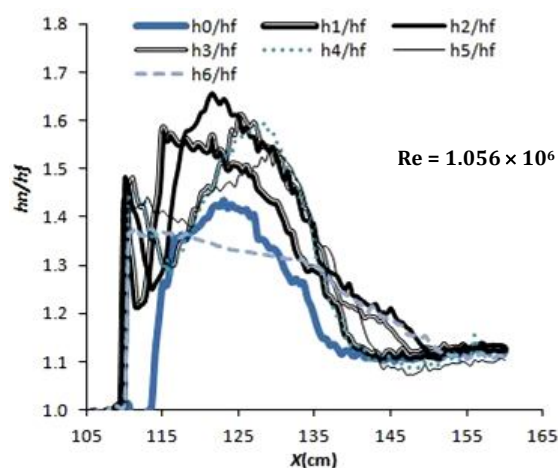
### ۷-۱- مانع مربعی

#### ۷-۱-۱- مانع در فاصله ۱۱۰cm و رینولدز $1.056 \times 10^6$

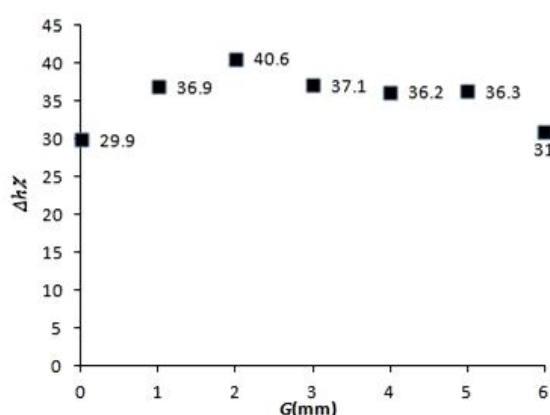
نتایج مربوط به آزمون مانع مربعی در نمودارهای (۶) و (۷) آورده شده است. پس از مانع جهش ناگهانی در میزان ضریب انتقال حرارت به وجود آمده و پس از کمی نوسان مقداری افزایش می‌یابد و به تدریج که در راستای جریان پیش می‌رویم اثر مانع کمتر می‌شود. نتایج محاسبات عددی نشان می‌دهند که پرش ناگهانی در ضریب انتقال حرارت ناشی از جت تشکیل شده در فاصله بین مانع و صفحه تخت و افزایش پس از آن ناشی از گردابه‌های کارمن تشکیل شده پس از مانع می‌باشد. با افزایش فاصله از سقف میزان پرش اولیه و مقدار ماکزیمم ضریب انتقال حرارت تا فاصله ۲ میلی‌متری افزایش می‌یابد و پس از آن رو به کاهش می‌گذارد. در فاصله صفر میلی‌متری به دلیل اینکه مانع به صفحه چسبیده است اثر جت وجود نداشته و افزایش ضریب انتقال حرارت صرفاً به وسیله گردابه‌های تشکیل شده می‌باشد. با فاصله گرفتن مانع اثر جت که در فاصله بین مانع و صفحه شکل می‌گیرد، رو به افزایش می‌گذارد و در فاصله ۲ میلی‌متری این اثر به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. همچنین به نظر می‌رسد در این فاصله گردابه‌ها نیز قوی‌تر عمل نموده‌اند. نمودار (۷) میزان درصد افزایش ضریب انتقال حرارت متوسط در ناحیه تحریک نسبت به حالت بدون مانع را نشان می‌دهد. در این نمودار هم، همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالتی که مانع مربعی در فاصله ۲ میلی‌متری از صفحه قرار دارد ضریب انتقال حرارت متوسط بیشترین مقدار را دارد.



شکل ۱۳ تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی موضعی با فاصله طولی صفحه



شکل ۱۱ تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی موضعی با فاصله طولی صفحه



شکل ۱۴ درصد افزایش ضریب انتقال حرارت متوسط برحسب فاصله مانع از صفحه

از مقایسه نمودارهای (۷)، (۹)، (۱۲) و (۱۴) می‌توان مشاهده نمود که مانع بهینه عملکرد بهتری در افزایش ضریب انتقال حرارت داشته است.

### ۸- عدم قطعیت آزمایش

با توجه به وجود خطا در سیستم‌های اندازه‌گیری بین مقداری که سنسور نشان می‌دهد و مقدار واقعی اختلاف داریم. اصولاً تمام اندازه‌گیری‌ها دارای حد مجازی از خطا هستند. انواع خطاها می‌تواند به‌صورت زیر تقسیم بندی شود:

الف: خطای کاربردی ناشی از تغییرات حالت دستگاه

ب: خطای شخصی

ج: خطای محیط

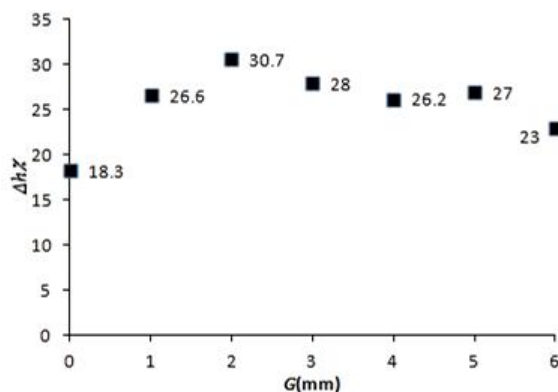
د: خطای دینامیکی

خطاها از نظر منشاء به دو دسته تقسیم می‌شوند:

الف: خطاهای قابل کنترل

ب: خطاهای تصادفی

همه خطاهای گروه اول باید تعیین و سپس جمع جبری آن‌ها نباید از مقدار خطای مجاز بیشتر شود. علت گروه دوم دقیقاً قابل تشخیص نیست ولی به روش آماری می‌توان مقدار متوسط و انحراف استاندارد آن‌ها را مشخص نمود. به لحاظ آماری مشخصات خطای یک سنسور را برای هر اندازه‌گیری پیدا می‌کنیم اگر اندازه‌گیری را به‌صورت یک مساله تخمین بیان کنیم هدف تعیین مقدار خطا از روی  $N$  مقدار اندازه‌گیری می‌باشد. ویژگی‌های آماری مقدار خطا را با یک تابع توزیع احتمال می‌توان نشان داد. تابع توزیع گوسی



شکل ۱۲ درصد افزایش ضریب انتقال حرارت متوسط برحسب فاصله مانع از صفحه

با بهینه‌سازی صورت گرفته روی مانع توسط مرجع ۵ و مطابق شکل ۱۰ واضح است که تعداد و قدرت گردابه‌ها نسبت به حالت مربعی افزایش پیدا کرده لذا ضریب انتقال حرارت برای مانع بهینه افزایش بیشتری را نشان می‌دهد.

همچنین پس از جت کاهش ناگهانی در ضریب انتقال حرارت دیده می‌شود که به‌دلیل دو جت سیالی است که مطابق شکل ۱۰ در خلاف جهت هم در حرکت بوده که در نقطه برخورد دو جت باعث کاهش ضریب انتقال حرارت گردیده است و همان‌طور که در امتداد صفحه پیش می‌رویم اثر مانع کم می‌شود.

برای مانع بهینه نیز مانند مانع مربعی با افزایش فاصله تا ۲ میلی‌متری ضریب انتقال حرارت افزایش و از این نقطه به بعد کاهش می‌یابد. این موضوع توسط نمودار ۱۲ نیز قابل مشاهده می‌باشد. از مقایسه نمودارهای (۶) و (۱۱) می‌توان مشاهده نمود که مانع بهینه عملکرد بهتری در افزایش ضریب انتقال حرارت داشته است.

### ۷-۲-۲- مانع در فاصله ۱۴۰cm و رینولدز $1.343 \times 10^6$

نمودارهای (۱۲) و (۱۴) چگونگی تغییرات ضریب انتقال حرارت موضعی و متوسط را در نقاط مختلف نشان می‌دهند. در شکل ۱۳ نیز همانند شکل ۱۱ مشخص است که نقطه ۲ میلی‌متری از صفحه بیشترین تاثیر را در افزایش ضریب انتقال حرارت دارد.

نمودار (۱۴) تغییرات درصد افزایش ضریب انتقال حرارت متوسط در ناحیه تحریک را در فواصل مختلف مانع از سقف نشان می‌دهد.

در نمودار ۱۴ مشخص است که با افزایش عدد رینولدز جریان میزان افزایش ضریب انتقال حرارت به‌دلیل تقویت جت‌های سیال و گردابه‌ها کمی افزایش یافته است.

خواص ریاضی بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد.	I	آمپر (Amp)
عدم قطعیت متغیر با توزیع خطای گوسی به صورت زیر خواهد بود:	L	طول صفحه (m)
$u_b = \frac{a}{\sqrt{3}}$ (8)	Nu <sub>x</sub>	نوسلت موضعی
که در این رابطه $a$ بیانگر دقت متغیر می‌باشد. دقت هر وسیله اندازه‌گیری،	Pr	پرانتل
نصف کوچک‌ترین واحد اندازه‌گیری آن می‌باشد. همچنین شایان ذکر است	Re <sub>x</sub>	رینولدز موضعی
که بسته به دقت مورد نیاز برای گزارش، نتایج به صورت زیر گزارش می‌شوند.	t	ضخامت مانع (mm)
$F = F \pm K_{iu} u_F$ (9)	T	دما (K)
که در آن $u_F$ عدم قطعیت مربوط به $F$ و $K_{iu}$ مقدار ضریب اطمینان پوششی	V	ولت (V)
است که با توجه به سطح اطمینان گزارش، مطابق جدول ۳، متغیر می‌باشد.	x	فاصله طول صفحه (m)
	Y	ضخامت لایه مرزی صفحه (cm)
	$\Delta h/\%$	در صد افزایش ضریب انتقال حرارت ( $Wm^{-2} K^{-1}$ )
	A	سطح ( $m^2$ )
	$T_\infty$	دمای محیط $^{\circ}C$
	$T_s$	دمای صفحه بدون مانع $^{\circ}C$
	$T_n$	دمای سطح با مانع $^{\circ}C$
	F	تابعی که عدم قطعیت آن محاسبه می‌شود
	$u_F$	عدم قطعیت
	$K_{iu}$	فاکتور پوششی
	a	دقت متغیر
	$u_b$	عدم قطعیت متغیر با توزیع خطای گوسی
		<b>علائم یونانی</b>
	$\mu$	لزجت دینامیکی (Pas)
	$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
	v	سرعت هوا (m/s)
	$\delta$	ضخامت لایه مرزی (mm)
		<b>زیر نویس‌ها</b>
	N	تعداد دفعات اندازه‌گیری
	n	خواص با حضور مانع
	s	خواص در سطح صفحه بدون حضور مانع
	x	نقطه متغیر در طول صفحه
	$\infty$	خواص در شرایط محیط
	F	عدم قطعیت مربوط به یک متغیر
	u	متغیر مربوط به فاکتور پوششی
	b	عدم قطعیت مربوط به یک متغیر با تابع گوسی

### ۱۱- مراجع

- [1] R. L. Webb, Advances in modeling enhanced heat transfer surfaces, *Proceeding 10th International Heat Transfer Conference*, Vol. 1, Hemisphere, Washington DC, pp. 445-459, 1994.
- [2] A. E. Bergles, Heat transfer enhancement the encouragement and accommodation of high heat fluxes, *Transaction ASME, Journal Heat Transfer*, No. 119, pp. 8-19, 1995.
- [3] A. Mohammad, E. Danesh, K. Tafti, A novel split-dimple interrupted fin configuration for heat transfer augmentation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, No. 52, pp. 1561-1572, 2009.
- [4] E. Smith, P. Somsak, T. Chinaruk, P. Pongjet, Turbulent flow heat transfer and pressure loss in a double pipe heat exchanger with louvered strip inserts, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, No. 35, pp. 120-129, 2008.
- [5] P. Haghparast, *Optimization Structure of Enhancement of Boundary Layer by using Genetic Algorithm and Neural Network*, Master Science Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Faculty of Engineering, 2008.
- [6] S. Sarkar, Vortex dynamics of a cylinder wake in proximity to a wall, *J. Fluid and Structures*, Vol. 26, pp. 19-40, 2010.

خواص ریاضی بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد.

عدم قطعیت متغیر با توزیع خطای گوسی به صورت زیر خواهد بود:

$$u_b = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

که در این رابطه  $a$  بیانگر دقت متغیر می‌باشد. دقت هر وسیله اندازه‌گیری، نصف کوچک‌ترین واحد اندازه‌گیری آن می‌باشد. همچنین شایان ذکر است که بسته به دقت مورد نیاز برای گزارش، نتایج به صورت زیر گزارش می‌شوند.

$$F = F \pm K_{iu} u_F \quad (9)$$

که در آن  $u_F$  عدم قطعیت مربوط به  $F$  و  $K_{iu}$  مقدار ضریب اطمینان پوششی است که با توجه به سطح اطمینان گزارش، مطابق جدول ۳، متغیر می‌باشد.

جدول ۳ مقدار ضریب اطمینان پوششی  $K_{iu}$  با توجه به سطح اطمینان

سطح اطمینان	مقدار $K_{iu}$
±σ	۶۸/۲۸٪
±۲σ	۹۵٪
±۳σ	۷۴/۹۹٪

محاسبات عدم قطعیت بر مبنای روش دقیق کلین و مک کلین [۱۷] انجام شده است که حداکثر مقدار برای عدد رینولدز  $3/9\% \pm$  و برای ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی  $8/2\% \pm$  بوده است.

### ۹- نتیجه‌گیری

با بررسی دقیق نتایج می‌توان این‌گونه گفت که با ثابت نگه داشتن رینولدز و با افزایش فاصله عمودی مانع تا ۲ میلی‌متر، جهش ناگهانی در ضریب انتقال حرارت موضعی ناشی از جت سیال بیشتر شده، و گردابه‌های تشکیل شده پس از مانع نسبتاً قوی‌تر عمل می‌نمایند و باعث افزایش بیشتری در ضریب انتقال حرارت موضعی می‌شوند همچنین ضریب انتقال حرارت متوسط نیز در این فاصله به بیشترین مقدار خود می‌رسد. پس از آن با افزایش فاصله اثر مانع با شیب کمی رو به کاهش می‌گذارد. قابل ذکر است در فاصله صفر میلی‌متری، به دلیل اینکه مانع به سقف چسبیده است، اثر جت وجود نداشته و افزایش ضریب انتقال حرارت صرفاً به وسیله گردابه‌های تشکیل شده می‌باشد، ولی با فاصله گرفتن مانع اثر جت رو به افزایش می‌گذارد و در فاصله ۲ میلی‌متری این اثر به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. همچنین در این فاصله گردابه‌ها نیز قوی‌تر عمل نموده و ضریب انتقال حرارت بیشترین مقدار خود را خواهد یافت. از سویی دیگر با افزایش رینولدز جریان میزان تاثیر مانع بر ضریب انتقال حرارت موضعی و متوسط افزایش می‌یابد که این موضوع به دلیل قوی‌تر شدن جت سیال زیر مانع و گردابه‌های فون کارمن قابل پیش‌بینی بود. همچنین در ادامه با مقایسه نتایج مانع بهینه و مربعی در هر رینولدز و در هر فاصله عمودی از سقف مشاهده می‌شود که مانع بهینه عملکرد نسبتاً بهتری نسبت به مانع مربعی داشته است. از سویی دیگر با بررسی بیشتر نتایج به نظر می‌رسد تاثیر مانع بهینه بر افزایش انتقال حرارت در رینولدزهای بالاتر افزایش می‌یابد.

### ۱۰- فهرست علائم

D	قطر مانع (mm)
G	فاصله مانع از صفحه (mm)
h	ضریب انتقال حرارت متوسط ( $Wm^{-2} K^{-1}$ )
$h_f$	ضریب جابه‌جایی موضعی در حالت بدون مانع ( $Wm^{-2} K^{-1}$ )
$h_n$	ضریب جابه‌جایی موضعی در حالت با مانع ( $Wm^{-2} K^{-1}$ )

- [12] S. W. Ahn, The Effect of roughness type on friction factor and heat transfer in roughened rectangular duct, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 28, No. 7, pp. 933-942, 2001.
- [13] M. Y. Zhang, W. Z. Gu, J. C. Han, Heat transfer and friction in rectangular channel with ribbed or ribbed grooved wall, *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 116, pp. 58-65, 1994.
- [14] M. Kahrom, S. M. Javadi, Application of single objective genetic algorithm to optimize heat transfer enhancement from a flat plate, *International journal of Engineering, Trans S.C.*, Vol. 25, No. 1, pp. 67-78, 2012.
- [15] F. Incropera, D. P. Dewitt, *Introduction to Heat Transfer*, Second Edition, New York: John Wiley & Sons, p. 555, 2011.
- [16] P. Oosthuizen, D. Naylor, *An International Convection Heat Transfer Analysis*, New York: McGraw Hill, International Edition, pp. 280-285, 1999.
- [17] S. J. Kline, F. A. Mc Clintock, Describing uncertainties in single sample experimental, *Mech. Eng.*, Vol. 75, pp. 385-387, 1953.
- [7] G. Bosch, M. Kappler, W. Rodi, Experiments on the flow past a square cylinder placed near a wall, *J. Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 13, pp. 292-305, 1996.
- [8] S. Farievar, A. Haidarie, The effect of square splintered and unsplittered rods in flat heat transfer enhancement, *IJE Transactions*, Vol. 20, No. 1, 2007.
- [9] M. Kahrom, A. Farahbod, D. Khodadazade, Effect of obstacle ratio on struhall number and enhancement of heat coefficient near a flat plate, *Esteghlal Maganize*, Vol. 27, No. 1, pp. 103-114, 2008.
- [10] J. F. Lockett, J. J. Hwang, Holographic interferometer applied to rib-roughness heat transfer in turbulent flow, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, pp. 2439-2449, 1990.
- [11] T. M. Liou, J. J. Hwang, Effect of ridge shapes on turbulent heat transfer and friction in rectangular channel, *International Journal Heat and Mass Transfer*, Vol. 11, pp. 931-940, 1993.