



بررسی آزمایشگاهی عدم تشابه انتقال حرارت و انتقال ممنتوم در لایه مرزی تحریک شده به کمک روش طراحی آزمایش

قدرت قصابی¹، محسن کهرم^{2*}

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

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

*مشهد، صندوق پستی 9177948944، mkahrom@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 11 مهر 1393
پذیرش: 18 آبان 1393
ارائه در سایت: 23 آذر 1393

کلید واژگان:

ضریب اصطکاک

ضریب انتقال حرارت

عدم تشابه

تاگوچی

چکیده

در تحقیقات پیش از این، مطالعه جامع آزمایشگاهی که، اثر تمام متغیرهای مؤثر و تقابل آن‌ها را بر میزان عدم تشابه ممنتوم و انتقال حرارت صفحه تخت در حضور مانع بررسی نماید، صورت نگرفته است. اگرچه الگوی استفاده از مانع در نزدیکی صفحه تخت جهت افزایش انتقال حرارت در مبدل‌ها و تمایل محققین جهت دریافت اطلاعات کامل در زمینه عوامل ایجاد عدم تشابه، باعث تحقیقات فراوانی در این زمینه شده بود. از طرفی، با حضور مانع مستطیلی در نزدیکی صفحه تخت، ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک، تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرد که بررسی تمام تقابل‌های بین متغیرها، با توجه به بازه تغییرات آن‌ها، بصورت آزمایشگاهی امکان پذیر نمی‌باشد. در این مقاله، ماکزیمم و مینیمم مقدار ضرایب اصطکاک و انتقال حرارت به ازای تمام ترکیب‌های ممکن برای متغیرهای مستقل تعیین شدند تا حداقل و حداکثر میزان عدم تشابه ممنتوم و انتقال حرارت مشخص شوند و وجود عدم تشابه، در میان ترکیب‌های متغیرهای مستقل، بررسی گردد. بدین منظور با توجه به تعدد متغیرها و بازه تغییرات آنها، ابتدا با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها، تعداد آزمایش‌ها کاهش یافته است بدون اینکه اطلاعات اساسی حذف شود. سپس آزمایش‌ها در یک تونل باد آزمایشگاهی که دارای حداکثر سرعت 13 متر بر ثانیه می‌باشد انجام گرفت و در آخرین مرحله، با استفاده از روش تاگوچی، حداکثر و حداقل مقادیر ضرایب اصطکاک و انتقال حرارت تعیین گردیدند. نتایج نشان می‌دهد عدم تشابه ممنتوم و انتقال حرارت به ازای تمام ترکیب‌های ممکن برای متغیرهای مستقل وجود دارد.

Experimental Investigation of dissimilarity between heat transfer and momentum transfer in a disturbed boundary layer using design of experiments method

Ghodrat Ghassabi, Mohsen Kahrom*

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

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 03 October 2014
Accepted 09 November 2014
Available Online 14 December 2014

Keywords:

Skin friction coefficient
Heat transfer coefficient
Dissimilarity
Taguchi

ABSTRACT

In previous studies, there has been no comprehensive experimental study to evaluate dissimilarity between heat transfer and momentum transfer for all the interactions between effective variables. On the other hand, when a rectangular cylinder is located near a flat plate, skin friction coefficient and heat transfer coefficient affect some variables that change in an extensive range. So, testing all possible combinations of effective variables is not reasonable. In this paper, maximum and minimum of skin friction coefficients and heat transfer coefficients were determined using robust Taguchi design. Design of experiments method was applied for decreasing the number of experiments without losing the required information in the first step. Then, experiments were performed in a wind tunnel, the maximum speed of which was 13 m/s. Finally, skin friction coefficient and heat transfer coefficient were optimized using Taguchi method and Minitab software. Results showed that dissimilarity between heat transfer and momentum transfer occurred for all the possible combinations of the effective variables. Additionally, the gap height between the rectangular cylinder and flat plate was the most effective variable on generating the dissimilarity.

1- مقدمه

توجه محققین بوده است. تحقیقات زیادی در زمینه انتقال حرارت و انتقال ممنتوم از صفحه تخت در حضور مانع صورت گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد هنگامی که مانعی در نزدیکی صفحه تخت قرار می‌گیرد با برخورد جریان به مانع یک نقطه سکون تشکیل می‌شود و با عبور جریان از زیر مانع سرعت

بررسی جریان در نزدیکی صفحه تخت و با حضور مانع به دلیل تقابل گردابه‌های آزاد شده توسط مانع و لایه مرزی صفحه تخت و ایجاد جریان غیر متقارن حول مانع و مشخصه‌های کاربردی آن در چندین سال اخیر مورد

Please cite this article using:

Gh. Ghassabi, M. Kahrom, Experimental Investigation of dissimilarity between heat transfer and momentum transfer in a disturbed boundary layer using design of experiments method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 323-331, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

منظور، ابتدا ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت میانگین صفحه تخت به طور آزمایشگاهی بر حسب متغیرهای مؤثر محاسبه شده اند. همچنین، روش طراحی آزمایش جهت کاهش تعداد آزمایش های لازم استفاده گردید به گونه ای که اطلاعات لازم اساسی حذف نگردد. سپس، با استفاده از روش تاگوچی، ماکزیمم و مینیمم مقادیر ضرایب اصطکاک و انتقال حرارت تعیین شدند تا حداقل و حداکثر میزان عدم تشابه ممنوم و انتقال حرارت مشخص شوند. نتایج نشان می دهد عدم تشابه ممنوم و انتقال حرارت به ازای تمام ترکیب های ممکن برای متغیرهای مستقل وجود دارد.

2- بیان مسئله

هنگامیکه یک مانع مستطیلی در نزدیکی یک صفحه تخت قرار می گیرد مطابق آنچه در شکل 1 نشان داده شده است. با توجه به ابعاد مانع (C, t) ، فاصله مانع از صفحه تخت (d) ، فاصله آن از لبه ابتدایی صفحه تخت (L) و سرعت جریان آزاد (U_{∞}) ساختار جریان متفاوت خواهد بود. بنابراین تنش اصطکاکی وارد بر صفحه تخت و حرارت منتقل شده به صفحه تخت، به ازای مقادیر مختلف از متغیرهای ذکر شده دارای مقدار متفاوتی خواهد بود [2]. در نتیجه می توان تنش اصطکاکی صفحه تخت و ضریب انتقال حرارت متوسط صفحه تخت را تابعی از پارامترهای روابط (1) و (2) دانست:

$$\tau_w = f_1(L, d, C, t, U_{\infty}, \rho, \mu) \quad (1)$$

$$\bar{h} = f_2(L, d, C, t, U_{\infty}, \rho, \mu, K, C_p) \quad (2)$$

با استفاده از آنالیز ابعادی، شکل بی بعد معادله (1) و (2) بصورت رابطه (3) و (4) می باشد:

$$\bar{C}_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2} = f_1\left(\frac{L}{t}, \frac{d}{t}, \frac{C}{t}, Re_t = \frac{\rho U_{\infty} t}{\mu}\right) \quad (3)$$

$$\bar{Nu} = \frac{ht}{k} = f_2\left(\frac{L}{t}, \frac{d}{t}, \frac{C}{t}, Re_t = \frac{\rho U_{\infty} t}{\mu}, Pr = \frac{\mu C_p}{K}\right) \quad (4)$$

باید توجه داشت که بازه تغییرات این متغیرها بسیار گسترده است همچنین تعداد آزمایش ها جهت بررسی تمام تقابل های بین متغیرها بسیار زیاد است. بنابراین، برای کاهش تعداد آزمایش ها، بگونه ای که اطلاعات اساسی مسئله حذف نگردد روش طراحی آزمایش ها در مطالعه حاضر مورد استفاده قرار گرفته است بعلاوه خواص سیال نیز ثابت فرض شده است.

3- بستر آزمایشگاهی

آزمایش ها در یک تونل باد مکشی صورت گرفته است که ناحیه تحت آزمایش آن دارای طول 2000 میلی متر با مقطع مربعی 300×300 میلی متر می باشد. ماکزیمم سرعت 13 متر بر ثانیه و شدت آشفتگی جریان آزاد کمتر از 1% می باشد بگونه ای که می توان جریان در ابتدای صفحه تخت را آرام فرض کرد اما با توجه به طول صفحه تخت و مقدار رینولدز بحرانی (5×10^5) جریان در پایین دست کاملاً متلاطم می شود. مانع مستطیلی دارای طول C ، عرض 300 میلی متر و ضخامت 8 میلی متر می باشد که با فاصله d از کف تونل و فاصله L از لبه ابتدایی صفحه تخت مطابق شکل 1 قرار گرفته است. انتخاب عرض 300 میلی متر برای مانع مستطیلی، جهت یکسان بودن عرض مانع با عرض تونل باد می باشد تا شرایط جریان را بتوان دو بعدی فرض کرد و انتخاب ضخامت مانع بر این اساس صورت گرفته است که ضخامت مانع از مرتبه مقادیر ضخامت لایه مرزی در حالت بدون مانع باشد.

3-1- نحوه اندازه گیری ضریب اصطکاک

برای محاسبه ضریب اصطکاک میانگین صفحه تخت روش تعادل قاب شناور

جریان افزایش ناگهانی می یابد و سبب ایجاد گردابه در ناحیه پشت مانع می گردد که تأثیر قابل توجهی بر کاهش ضریب اصطکاک میانگین صفحه تخت و افزایش ضریب انتقال حرارت میانگین صفحه تخت دارد [1-4]. به عبارتی وجود مانع سبب عدم تشابه انتقال ممنوم و انتقال حرارت از صفحه تخت می گردد. در این زمینه مارمو و همکارانش [5] نتایج ضریب اصطکاک صفحه تخت و ضریب انتقال حرارت با حضور استوانه و بدون آن را در مسیر جریان مقایسه کردند. نتایج آن ها نشان می دهد ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد و ضریب اصطکاک صفحه تخت با حضور استوانه کاهش می یابد. سوزوکی و همکارانش [6] عدم تشابه بین انتقال حرارت و انتقال ممنوم در لایه مرزی متلاطم تحریک شده بوسیله استوانه را بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان می دهد عدم تشابه فقط بعد از استوانه رخ می دهد و مخالف بودن علامت تنش های رینولدز و شار حرارتی ناشی از آشفتگی جریان، در این ناحیه سبب عدم تشابه بین انتقال حرارت و ممنوم شده است. سوزوکی و سوزوکی [7] با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی، اثر قطر استوانه و فاصله استوانه از صفحه تخت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان می دهد فاصله استوانه از صفحه تخت عامل مهمتری در افزایش ضریب انتقال حرارت و کاهش ضریب اصطکاک می باشد. ایناواکا و همکارانش [8] عدم تشابه انتقال حرارت و ممنوم را در تحریک لایه مرزی جریان متلاطم صفحه تخت بوسیله یک مکعب مستطیل بصورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها با استفاده از علامت تنش های رینولدز و شار حرارتی ناشی از آشفتگی جریان، عامل ایجاد عدم تشابه را وجود گردابه ساعتگرد ناپایدار پایین دست مانع برآورد می کند که سبب جابجایی جریان سرد و گرم و در نتیجه افزایش انتقال حرارت می گردد. اما با کاهش سرعت جریان نزدیک دیواره، سبب کاهش ضریب اصطکاک می گردد. آن ها همچنین در بررسی دیگر [9] این نتیجه را برای جریان آرام بدست آوردند. ایناواکا و همکارانش [10] اثر وجود صفحه جداکننده متصل به لبه پشتی مانع را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان می دهد افزایش طول جداکننده سبب کاهش عدم تشابه ممنوم و انتقال حرارت شده است. دی سوزا و همکارانش [11] لایه مرزی متلاطم تحت تأثیر ویک یک استوانه را بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند نتایج آن ها افزایش ضریب انتقال حرارت و کاهش ضریب اصطکاک را نشان می دهد و عامل عدم تشابه را گردابه ساعتگرد می داند که سبب ایجاد جریان برگشتی و کاهش ضریب اصطکاک می گردد. کهرم و همکارانش [12] اثر پارامترهای هندسی مانع را بر روی ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت صفحه تخت مورد بررسی قرار دادند. آن ها ابعاد مانع چهارگوش و فاصله آن از صفحه تخت را به گونه ای بهینه سازی کردند که دارای بیشترین ضریب انتقال حرارت و کمترین ضریب اصطکاک باشد. مطالعه های صورت گرفته عدم تشابه ممنوم و انتقال حرارت را نشان می دهد و اثر متغیرهای مختلف را بر میزان عدم تشابه بررسی کرده است. با این وجود، مطالعه جامع آزمایشگاهی که اثر تمام متغیرهای مؤثر و تقابل آن ها را بر میزان عدم تشابه ممنوم و انتقال حرارت صفحه تخت در حضور مانع بررسی نماید صورت نگرفته است. از طرفی دیگر، انجام تمام آزمایش هایی که شامل تمام تقابل های متغیرهای مؤثر باشد به لحاظ زمانی و اقتصادی منطقی نمی باشد.

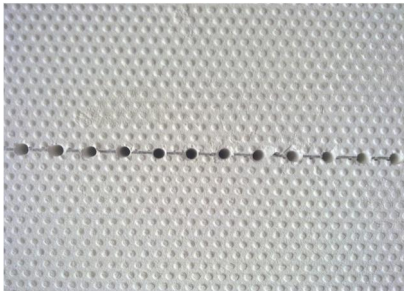
هدف مطالعه حاضر این است که وجود عدم تشابه ممنوم و انتقال حرارت را در میان ترکیب های متغیرهای مستقل مسئله حاضر، بررسی نماید و حداکثر میزان عدم تشابه ممنوم و انتقال حرارت را تعیین نماید. برای این



شکل 2 نحوه قرار گیری لودسل



شکل 3 سطح شار ثابت با عایق پشم سنگ



شکل 4 سیلیکون جامد دارای سوراخ های در مرکز واقع در طول ورق فلزی و در خط مرکزی آن

می توان ضریب انتقال حرارت را تعیین کرد:

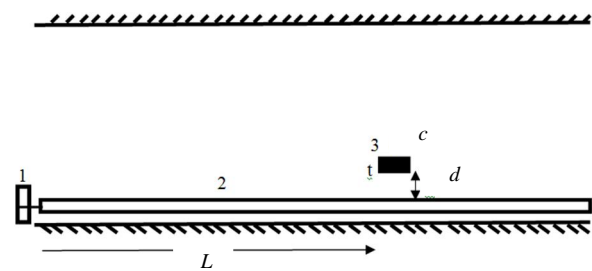
$$q = VI \quad (5)$$

(6)

$$h = \frac{q}{A(T_s - T_\infty)}$$

4- طراحی آزمایش ها

در روش طراحی آزمایش ها، هدف، تعیین اطلاعات مورد نیاز با استفاده از حداقل تعداد آزمایش و بر پایه روش های آماری است [14]. در سال های اخیر، روش های متعددی جهت طراحی آزمایش ها توسعه یافته است که از آن جمله می توان به روش تاگوچی اشاره کرد که بسیار مورد استقبال محققین قرار گرفته است. این روش یک ترکیب بهینه ای از تقابل متعامد بین متغیرهای مستقل ایجاد می کند که با حداقل تعداد آزمایش ها، متغیر وابسته بیشترین میزان حساسیت را به تغییرات متغیرهای مستقل دارا باشد. روش تاگوچی از آرایه های متعامد برای سازماندهی متغیرهای مستقل و سطوح تغییرات آن ها استفاده می کند. این روش به جای انجام تمام آزمایش های ممکن به مانند روش طراحی آزمایش فاکتوریل، ترکیبات دوتایی از متغیرهای مستقل را در نظر می گیرد که سبب می شود با حداقل تعداد آزمایش ها، اطلاعات ضروری جمع آوری گردد و مشخص می کند کدام متغیر مستقل بیشترین اثر را بر



شکل 1 هندسه و ابعاد مسئله

(1- لودسل 2- صفحه تخت 3- مکعب مستطیل)

استفاده شده است [13]. در این روش، برای محاسبه نیروی اصطکاکی، یک لودسل خمشی با دقت 0/01 گرم به لبه ابتدایی ناحیه تحت آزمایش تونل باد متصل شده است و یک صفحه شیشه ای با ابعاد 2000×296 میلی متر در کف تونل قرار داده شد. روی این صفحه شیشه ای 6 عدد ساچمه با قطر 6 میلی متر قرار داده شده و سپس یک صفحه شیشه ای به عنوان صفحه تخت با ابعاد 2000×296 میلی متر روی ساچمه ها قرار داده شد. ساچمه ها به طور کاملاً متقارن روی سطح شیشه ای پایینی قرار داده شدند تا با قرار گرفتن شیشه ای بالایی روی آن ها، شیشه ای بالایی کاملاً در حالت تعادل بوده و به هیچ طرفی حرکت نکرده، با دیواره های تونل تماس پیدا نکند. بعد از قراردادن صفحه ای بالایی روی ساچمه ها، برای انتقال نیروی اصطکاکی وارد بر صفحه به لودسل از یک اهرم L شکل استفاده شد. این اهرم با استفاده از چسب حرارتی به زیر صفحه ای بالایی متصل شد، به گونه ای که در حالت آزاد هیچ نیرویی به لودسل وارد نکند. به عبارتی آزادی حرکت صفحه ای بالایی باعث می شود که در صورت تراز بودن دستگاه، در حالت خاموش بودن فن، هیچ نیرویی به لودسل وارد نشود. همین موضوع یکی از موارد تست عملکرد صحیح دستگاه و تراز بودن دستگاه در هر مرحله پس از آزمایش بوده است. نمایی از نحوه قرار گیری لودسل در شکل 1 و 2 نشان داده شده است.

3-2- نحوه اندازه گیری ضریب انتقال حرارت

جهت محاسبه ضریب انتقال حرارت طرح سطح شار ثابت انتخاب شده است بدین صورت که برای سطح بالایی ناحیه تحت آزمایش تونل باد از یک ورق فلزی استفاده شده است سطح ورق فلزی توسط المنت های تخت موازی با هم پوشیده شده است اتصال المنت ها به لحاظ الکتریکی سری بوده و با عبور جریان الکتریکی از آن ها دمای سطح ورق افزایش پیدا می کند و سطح شار ثابتی را ایجاد می نماید. به منظور اینکه تمام حرارت تولید شده صرف گرم کردن جریان هوای داخل تونل گردد پشت ورق فلزی همانطور که در شکل 3 مشاهده می شود توسط پشم سنگ کاملاً عایق شده است. تنها چون برای اندازه گیری دما از ترموکوپل استفاده می شود در ناحیه ای که باید دما اندازه گیری شود همانطور که در شکل 4 نشان داده شده است به جای پشم سنگ، لایه ای از عایق سیلیکونی جامد استفاده شده است و در مرکز آن سوراخ هایی ایجاد شده است. قطر سوراخ ها بگونه ای است که ترموکوپل با تفرانس کمی داخل آن قرار می گرفت و می توان از انتقال حرارت جابجایی بین ترموکوپل و هوای آزاد نیز صرف نظر کرد.

با اندازه گیری دما در طول سطح ورق فلزی، دمای هوا در ورودی تونل باد، مشخص بودن ولتاژ و تعیین جریان الکتریکی طبق رابطه (5) و (6)

جدول 1 سطوح متغیرهای مستقل

متغیر	سطح اول	سطح دوم	سطح سوم	سطح چهارم
Re _t	5384/8	5920/02	6455/23	7525/67
C/t	2	4	8	18
d/t	0/125	0/25	0/5	1
L/t	175	37/5	-	-

می توانند انتخاب شوند. برای افزایش دقت در تحلیل نتایج، آرایه متعامد L₃₂ بکار گرفته شد. ساختار آرایه در بخش پیوست و در جدول 6 قابل مشاهده است.

5- تعیین سطوح بهینه با استفاده از روش تاگوچی

یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای بهینه سازی یک تابع در مطالعات آزمایشگاهی، روش تاگوچی می باشد [20]. برای تحلیل داده‌ها روش تاگوچی از یک معیار آماری عملکرد، به نام نسبت سیگنال به نویز استفاده می کند که از تئوری کنترل در مهندسی برق گرفته شده است. نسبت سیگنال به نویز معیار عملکردی است که سطوح پارامترهای کنترل را طوری انتخاب کنند که به بهترین شکل با پارامترهای اختلال مقابله کنند. معادله سیگنال به نویز به معیار مشخصه کیفیت که باید بهینه شود بستگی دارد. با اینکه تعداد زیادی نسبت سیگنال به نویز ممکن وجود دارد، سه معیار متداول تر به عنوان استاندارد در نظر گرفته شده است که در موارد زیر کاربرد دارد: (1) مشخصه کیفیت بزرگتر بهتر است. به عبارتی، هدف تعیین ماکزیمم مقدار مشخصه کیفیت کوچکتر بهتر است. به عبارتی، هدف تعیین مینیمم مقدار است. (3) مشخصه کیفیت اسمی بهتر است. [20]. از آنجائیکه در مطالعه حاضر، هدف تعیین ماکزیمم و مینیمم مقادیر ضرایب اصطکاک و انتقال حرارت می باشد دو معیار بزرگتر بهتر و کوچکتر بهتر باید جهت تعیین سطوح بهینه استفاده شود. برای این دو معیار، روابط مورد نیاز برای محاسبه نسبت سیگنال به نویز آزمایش‌ها با N مرتبه تکرار، بفرم رابطه (8) و (9) نشان داده شده است [20]:

$$\eta_{L,B} = -10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N y_m^2 \right) \quad (8)$$

$$\eta_{H,B} = -10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \frac{1}{y_m^2} \right) \quad (9)$$

در رابطه (8) و (9)، مقدار خروجی آزمایش و واحد نسبت سیگنال به نویز دسیبل می باشد. با توجه به روابط، ذکر این نکته ضروری است که مشخصه کیفیت از هر نوعی باشد نسبت سیگنال به نویز طوری تعریف شده است که همیشه مقدار بزرگتر آن بهتر باشد. در نتیجه سطوح بهینه، در سطوح با مقادیر ماکزیمم نسبت سیگنال به نویز برای هر متغیر رخ خواهد داد. نسبت سیگنال به نویز برای سطوح بهینه از رابطه (10) تعیین می شود:

$$\eta = \eta_m + \sum_{i=1}^p (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad (10)$$

در رابطه (10)، P نشان دهنده تعداد متغیرهای مستقل می باشد. در نهایت، مقادیر خروجی بهینه پیش بینی شده توسط رابطه (11) بدست می آید:

$$X = \sqrt{10^{\frac{-\eta}{10}}} \quad (11)$$

متغیر وابسته دارد بنابراین سبب کاهش زمان لازم و کاهش مصرف تجهیزات آزمایشگاهی می گردد [15]. اولین گام در روش تاگوچی، انتخاب سطوح متغیرهای مستقل است. منظور از سطح یک متغیر، یک مقدار مشخص و معین برای آن متغیر می باشد. جهت تعیین سطوح متغیر (d/t)، از نتایج مرجع [16] استفاده شده است. نتایج آن‌ها نشان می دهد با تغییر (d/t)، 4 رژیم جریان متفاوت ایجاد می شود: (1) 0/125 < (d/t)، در این حالت، آزاد سازی گردابه متوقف می شود. (2) 0/125 < (d/t) < 0/5، در این حالت ساختار جریان مشابه حالت 1 می باشد با این تفاوت که برهم کنش بین لایه برشی جدا شده از لایه پایینی مانع مستطیلی و لایه مرزی دیواره افزایش می یابد. (3) 0/5 ≤ (d/t) < 0/75، در این حالت آزادسازی گردابه متناوب می شود. (4) (d/t) > 0/75، در این حالت جدایش لایه مرزی دیواره رخ نمی دهد. بنابراین برای متغیر (d/t)، 4 سطح در نظر گرفته شده است این 4 سطح در جدول 1 نشان داده شده است.

برای انتخاب سطوح (C/t)، نتایج مرجع [17] استفاده شده است. آن‌ها بر اساس مقادیر (C/t)، نوع رژیم آزادسازی گردابه پیشنهاد کردند. استوکس و ولش [18] این 4 نوع را بدین صورت خلاصه کردند: (1) 3/2 < (C/t)، در این حالت، لایه برشی لایه حمله مانع مستطیلی، مستقیماً بدون چسبیدن به سطح مانع، لایه پشتی را برای تشکیل گردابه کارمن تحت تأثیر قرار می دهد. (2) 7/6 < (C/t) < 3/2: لایه برشی لایه حمله مانع مستطیلی، به صورت نوسانی از سطح مانع جدا می شود و متصل می گردد و یک ناحیه گردابه جدید را ایجاد می کند. (3) 16 < (C/t) < 7/6: در این حالت، لایه برشی لایه حمله مانع مستطیلی، همواره بالادست لایه پشتی به سطح مانع متصل می گردد که سبب تولید گردابه هایی به صورت پراکنده و تصادفی می گردد بنابراین گردابه های منظمی در این حالت مشاهده نمی شود. (4) (C/t) > 16: گردابه های آزاد شده در ناحیه بالادست لایه پشتی نفوذ می کنند و سبب جدایش لایه مرزی سطح مانع مستطیلی شده و لایه پشتی را جهت تولید گردابه کارمن تحت تأثیر قرار می دهند. با توجه به توضیحات فوق، 4 سطح نیز برای (C/t) در نظر گرفته شده است و در جدول 1 نشان داده شده است.

به منظور بررسی هر دو رژیم جریان آرام و متلاطم لایه مرزی صفحه تخت، دو سطح برای (L/t) در نظر گرفته شده است و در جدول 1 نشان داده شده است. لازم بذکر است سطوح متغیرها لزوماً یکسان نیست و بر اساس شرایط مسأله تعیین می گردد. انتخاب سطوح عدد Re_t بر اساس محدودیت های آزمایشگاهی تعیین شده است مقادیر آن، در جدول 1 قابل مشاهده است. در گام دوم روش تاگوچی، چگونگی تقابل سطوح متغیرهای مستقل جهت انجام آزمایش‌ها با استفاده از آرایه های متعامد تعیین می شود. در این آرایه ها، ستون‌ها به صورت دوطرفه بر هم عمودند. به این معنی که برای هر جفت از ستون‌ها همه ترکیب‌های سطوح متغیرها وجود دارد. آرایه های متعامد موجود شامل L₄, L₈, L₉, L₁₂, L₁₆, L₁₈, L₃₂ می باشند. قبل از انتخاب آرایه متعامد، حداقل تعداد آزمایش‌ها با استفاده از رابطه (7) باید تعیین گردد [19]:

$$N_{Taguchi} = 1 + \sum_{i=1}^p (LV_i - 1) \quad (7)$$

در رابطه (7)، P نشان دهنده تعداد متغیرهای مستقل می باشد. در مطالعه حاضر، با توجه به جدول 1، یک متغیر دارای 2 سطح و 3 متغیر دیگر دارای 4 سطح می باشند. بنابراین، حداقل تعداد آزمایش‌ها مورد نیاز بر اساس رابطه (7) 11 مورد می باشد. بنابراین آرایه های متعامد L₃₂, L₁₈, L₁₆, L₁₂

6- تحلیل نتایج

برای بررسی صحت و دقت نتایج مربوط به ضریب اصطکاک، مقایسه ضرایب اصطکاک میانگین صفحه تخت در حالت بدون وجود مانع مستطیلی بین معادله تجربی [21] که در رابطه (12) ذکر شده است و داده‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر برای 4 عدد رینولدز مختلف در شکل 5 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نتایج آزمایشگاهی تطابق قابل قبولی با داده‌های حاصل از معادله تجربی دارد. لازم بذکر است که عدد رینولدز در این شکل بر مبنای طول صفحه تخت می‌باشد.

$$\bar{C}_f = 0.074 \text{Re}_H^{-\frac{1}{5}} - \frac{1742}{\text{Re}_H} \quad (12)$$

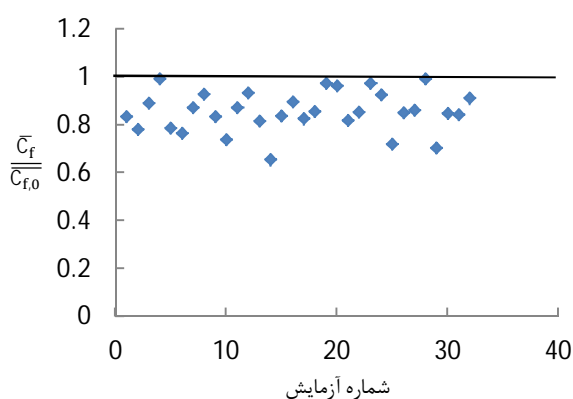
همچنین برای بررسی صحت و دقت نتایج مربوط به عدد ناسلت، مقایسه عدد ناسلت میانگین صفحه تخت در حالت بدون وجود مانع مستطیلی بین معادله تجربی [21] که در رابطه (13) ذکر شده است و داده‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر برای 4 عدد رینولدز مختلف در شکل 6 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نتایج آزمایشگاهی تطابق قابل قبولی با داده‌های حاصل از معادله تجربی دارد. لازم بذکر است که عدد رینولدز و عدد ناسلت در این شکل بر مبنای طول صفحه تخت می‌باشند.

$$\bar{Nu} = (0.037 \text{Re}_H^{\frac{4}{5}} - 871) \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

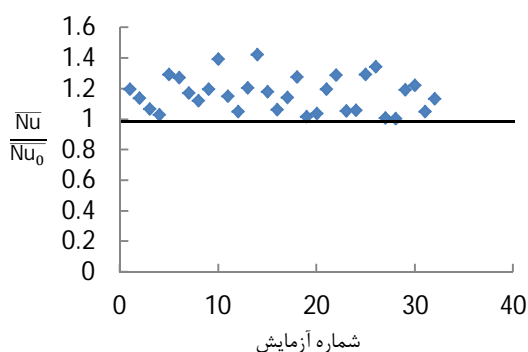
نسبت ضرایب اصطکاک میانگین صفحه تخت و نسبت اعداد ناسلت میانگین صفحه تخت در حالت با وجود مانع به بدون مانع، به ترتیب، در شکل های 7 و 8 نشان داده شده است. مقادیر نسبت ضرایب اصطکاک و نسبت اعداد ناسلت در مورد آزمایش هایی که این مقادیر، خیلی نزدیک به 1 بود در جدول 2 نشان داده شده است تا تحلیل بهتری از نتایج حاصل شود. مشاهده می‌شود نسبت ضرایب اصطکاک برای همه آزمایش‌ها کمتر از یک می‌باشد بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که وجود مانع در تمام آزمایش‌ها سبب کاهش

ضریب اصطکاک صفحه تخت شده است. در مورد نسبت اعداد ناسلت نیز مشاهده می‌شود نسبت اعداد ناسلت برای تمام آزمایش‌ها بیشتر از 1 می‌باشد در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که وجود مانع در تمام آزمایش‌ها سبب افزایش ضریب انتقال حرارت صفحه تخت گردیده است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت در تمام آزمایش‌ها عدم تشابه ممتوم و انتقال حرارت وجود دارد.

برای اثبات عدم تشابه ممتوم و انتقال حرارت برای تمام ترکیب‌های ممکن متغیرهای مستقل، کافی است در بین تمام ترکیب‌های متغیرهای مستقل، ماکزیمم مقدار نسبت ضرایب اصطکاک کمتر از 1 و مینیمم مقدار نسبت اعداد ناسلت بیشتر از 1 باشد. برای این منظور، معیار بزرگتر بهتر روش تاگوچی جهت تعیین ماکزیمم مقدار نسبت ضرایب اصطکاک و معیار کوچکتر بهتر روش تاگوچی جهت تعیین مینیمم مقدار نسبت اعداد ناسلت توسط نرم افزار مینی تب مورد استفاده قرار گرفتند. مقادیر بیشینه نسبت ضرایب



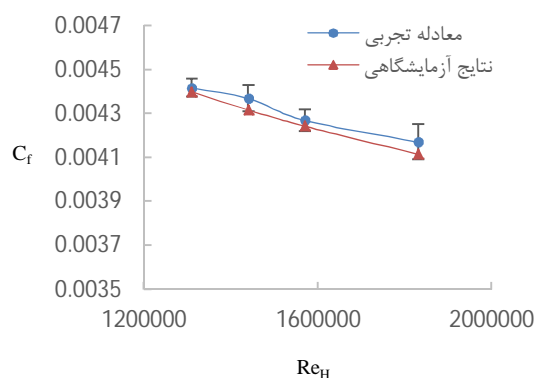
شکل 7 نسبت ضرایب اصطکاک بر حسب شماره آزمایش



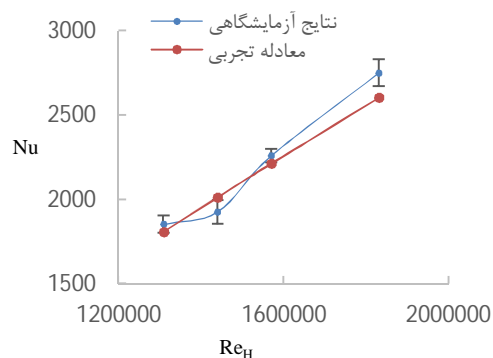
شکل 8 نسبت اعداد ناسلت بر حسب شماره آزمایش

جدول 2 نسبت ضرایب اصطکاک و عدد ناسلت

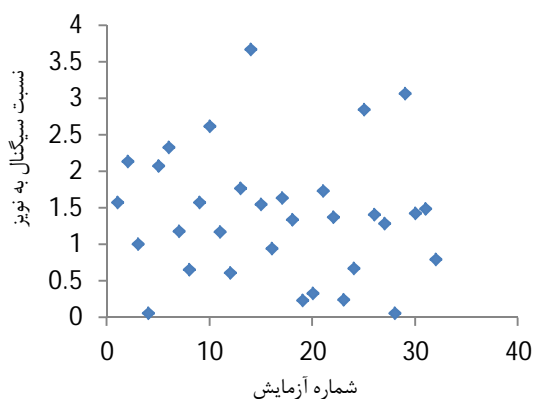
شماره آزمایش	$\frac{Nu}{Nu_0}$	$\frac{C_f}{C_{f0}}$
4	1/027778	0/994143
19	1/018450	0/974063
20	1/035857	0/962954
23	1/055351	0/973019
27	1/007968	0/862319
28	1/003690	0/993904



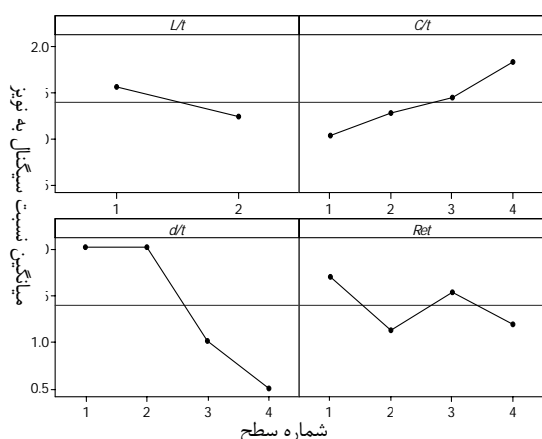
شکل 5 مقایسه Cf نتایج آزمایشگاهی و معادله تجربی برای حالت بدون مانع



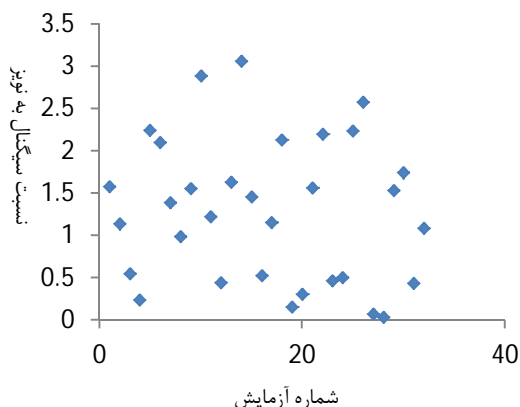
شکل 6 مقایسه Nu نتایج آزمایشگاهی و معادله تجربی برای حالت بدون مانع



شکل 9 نسبت سیگنال به نویز بر حسب شماره آزمایش برای نسبت ضریب اصطکاک و بر اساس معیار کوچکتر بهتر



شکل 10 نمودار میانگین نسبت سیگنال به نویز برای نسبت ضرایب اصطکاک و بر اساس معیار کوچکتر بهتر



شکل 11 نسبت سیگنال به نویز بر حسب شماره آزمایش برای نسبت اعداد ناسلت و بر اساس معیار بزرگتر بهتر

و مشابه ضریب اصطکاک، نمودار شکل 12 برای نسبت اعداد ناسلت نشان داده شده است. بر اساس شکل 12، مشابه ضریب اصطکاک، سطوح بهینه را سطح اول (L/t)، سطح چهارم (C/t)، سطح دوم (d/t) و سطح اول (Re_i) تشکیل می دهند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که ماکزیمم ضریب انتقال حرارت در سطوحی رخ می دهد که مینیمم ضریب اصطکاک را دارا می باشد. در نتیجه بیشترین میزان عدم تشابه انتقال حرارت و ممتوم نیز در این

اصطکاک و مینیمم نسبت اعداد ناسلت پیش بینی شده توسط نرم افزار مینی تب، در جدول 3 نشان داده است و با مقادیر بدست آمده توسط آزمایش مقایسه شده است. همچنین درصد تفاوت نتایج در جدول 3 نشان داده شده است. مشاهده می شود مقادیر پیش بینی شده تطابق قابل قبولی با مقادیر آزمایشگاهی دارد. همچنین مشاهده می شود مقادیر پیش بینی شده و آزمایشگاهی ماکزیمم نسبت ضرایب اصطکاک کمتر از 1 می باشد بنابراین می توان نتیجه گرفت مانع مستطیلی به ازای تمام ترکیب های ممکن متغیرهای مستقل، سبب کاهش ضریب اصطکاک صفحه تخت می شود. برای نسبت اعداد ناسلت نیز مشاهده می شود مقادیر پیش بینی شده و آزمایشگاهی مینیمم نسبت اعداد ناسلت بیشتر از 1 می باشد بنابراین می توان نتیجه گرفت مانع مستطیلی به ازای تمام ترکیب های ممکن متغیرهای مستقل، سبب افزایش ضریب انتقال حرارت صفحه تخت می شود. علاوه بر این، می توان نتیجه گرفت که عدم تشابه انتقال حرارت و ممتوم صفحه تخت در حضور مانع مستطیلی، به ازای تمام ترکیب های ممکن برای متغیرهای مستقل وجود دارد. در شکل 9، مقادیر نسبت سیگنال به نویز بر اساس معیار کوچکتر بهتر برای نسبت ضرایب اصطکاک، جهت تعیین سطوحی که دارای کمترین مقدار نسبت ضرایب اصطکاک می باشند نشان داده شده اند. از مقایسه شکل 7 و شکل 9، مشاهده می شود همانطور که در تعریف معیار کوچکتر بهتر بیان شد آزمایشی که دارای بیشترین مقدار نسبت سیگنال به نویز می باشد دارای کمترین نسبت ضرایب اصطکاک در میان تمام آزمایش ها نیز می باشد. از شکل 9، با تعیین میانگین نسبت سیگنال به نویز برای هر متغیر مستقل در یک سطح خاص، نموداری که در شکل 10 نشان داده شده است بدست می آید. برای مثال، میانگین نسبت سیگنال به نویز برای سطح اول (L/t)، بوسیله تعیین میانگین نسبت سیگنال به نویز برای آزمایش های 1 تا 16 شکل 9 که (L/t) در سطح 1 خود می باشد و برای معیار کوچکتر بهتر بدست آمده است. بر اساس شکل 10، سطوح بهینه را سطح اول (L/t)، سطح چهارم (C/t)، سطح دوم (d/t) و سطح اول (Re_i) تشکیل می دهند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که مینیمم ضریب اصطکاک در جریان متلاطم رخ می دهد که می تواند به دلیل این باشد که گرادیان سرعت در نزدیکی صفحه تخت برای جریان متلاطم خیلی بیشتر از جریان آرام می باشد [21]. همچنین مشاهده می شود سطح بهینه برای (d/t)، 0/25 می باشد که با نتایج مرجع [12] مطابقت دارد. علاوه بر آن، مشاهده می شود با افزایش (C/t)، نسبت سیگنال به نویز افزایش می یابد بنابراین می توان نتیجه گرفت که با افزایش (C/t)، ضریب اصطکاک کاهش می یابد. همچنین در شکل 11، مقادیر نسبت سیگنال به نویز بر اساس معیار بزرگتر بهتر برای نسبت اعداد ناسلت جهت تعیین سطوحی که دارای بیشترین مقدار نسبت اعداد ناسلت می باشند نشان داده شده اند. از مقایسه شکل 8 و شکل 11، همانطور که در تعریف معیار بزرگتر بهتر بیان شد آزمایشی که دارای بیشترین مقدار نسبت سیگنال به نویز می باشد دارای بیشترین نسبت اعداد ناسلت در میان تمام آزمایش ها نیز می باشد.

جدول 3 مقایسه مقادیر پیش بینی شده و آزمایشگاهی نسبت ضرایب اصطکاک و

پارامتر	معیار کیفیت	آزمایشگاهی	پیش بینی شده	درصد تفاوت نتایج
$\frac{C_f}{C_{f0}}$	بزرگتر بهتر	0/997643	0/998473	0/08
$\frac{Nu}{Nu_0}$	کوچکتر بهتر	1/001115	1/001123	0/001

جدول 5 آنالیز واریانس نسبت سیگنال به نویز

متغیر وابسته	متغیر مستقل	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
ضریب اصطکاک	L/t	1	0/7807	0/7807	3/55
	C/t	3	2/7063	0/9021	4/10
	d/t	3	13/9711	4/6570	21/17
ضریب انتقال حرارت	Ret	3	1/8021	0/6007	2/73
	خطا	21	4/6205	0/2200	
	مجموع	31			
ضریب انتقال حرارت	L/t	1	0/7196	0/7196	4/11
	C/t	3	1/5610	0/5203	2/97
	d/t	3	15/7347	5/2449	29/92
	خطا	21	3/6807	0/1753	1/45
	مجموع	31			

که در رابطه (14)، $AdjSS_i$ مجموع مربعات تنظیم یافته می باشد و D.F.i درجه آزادی برای پارامتر i می باشد. D.F.i برای هر پارامتر، برابر با تعداد سطوح آن پارامتر منهای 1 می باشد. درجه آزادی کلی، برابر با تعداد آزمایش‌ها منهای 1 می باشد و درجه آزادی برای خطا، برابر با تفاوت درجه آزادی کل و مجموع درجه آزادی تمام پارامترها می باشد. مقادیر F نیز برای متغیرهای مستقل در این جدول قابل مشاهده است. مقدار F برای پارامتر i بصورت رابطه (15) تعریف می شود [15]:

$$F = \frac{AdjMS_i}{AdjMS_E} \quad (15)$$

در رابطه (15)، $AdjMS_E$ میانگین مربعات تنظیم یافته برای خطا می باشد. مقدار بزرگتر F نشان می دهد که تغییر متغیر مستقل اثر بیشتری بر روی ویژگی های عملکردی متغیر وابسته دارد [22]. جریات آماری بیشتر در مرجع [20] توصیف شده است. بر اساس مقادیر F در جدول 5 مشاهده می شود که (d/t) ، بیشترین تأثیر را بر عدم تشابه ممنوم و انتقال حرارت دارد زیرا برای هر دو متغیر ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت دارای بیشترین مقادیر F می باشد و Ret کمترین تأثیر را دارد زیرا کمترین مقادیر F را دارا می باشد. همچنین مشاهده می شود از آنجائیکه، (d/t) برای ضریب انتقال حرارت دارای مقدار F بیشتر از ضریب اصطکاک می باشد، میزان تأثیر (d/t) بر ضریب انتقال حرارت بیشتر از ضریب اصطکاک است که دلیل این نتیجه را نیز می توان اینگونه بیان کرد همانطور که قبلاً نیز ذکر گردید تغییر (d/t) تأثیر زیادی در شرایط پایداری گردابه پشت مانع دارد و ضریب انتقال حرارت نیز به شرایط پایداری گردابه پشت مانع وابسته است در حالیکه ضریب اصطکاک مستقل از آن است.

7- نتیجه گیری

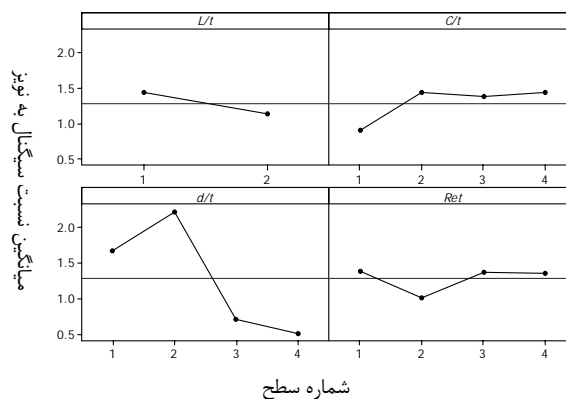
در این مقاله، انتقال حرارت و انتقال ممنوم از یک صفحه تخت در حضور مانع مستطیلی بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفتند و اثر تمام متغیرهای مؤثر بر ضریب اصطکاک میانگین صفحه تخت و ضریب انتقال حرارت میانگین صفحه تخت مطالعه گردیدند تا وجود عدم تشابه، که تنها برای حالت‌های خاص، در تحقیقات گذشته مشاهده شده بود برای مطالعه

سطوح خواهد بود. از مقایسه شکل 10 و 12 می توان نتیجه گرفت اگرچه برای هر دو متغیر ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت، (d/t) در سطح دوم بیشترین تأثیر را دارد اما، در مورد ضریب اصطکاک، میزان تأثیر گذاری (d/t) ، در سطح اول و دوم خیلی نزدیک بهم می باشد در حالیکه در مورد ضریب انتقال حرارت، میزان تأثیر گذاری (d/t) در سطح دوم بصورت قابل توجهی بیشتر از سطح اول می باشد این نتیجه به این دلیل است که با افزایش (d/t) از سطح اول به سطح دوم، گردابه تشکیل شده در پشت مانع که عامل افزایش انتقال حرارت می باشد ناپایدار می گردد و ناپایداری گردابه بدلیل جایگزین کردن سیال دور از دیواره با سیال نزدیک دیواره، تأثیر بسیار زیادی در افزایش انتقال حرارت دارد. در حالیکه در مورد ضریب اصطکاک، گردابه پشت مانع سبب کاهش ضریب اصطکاک می گردد و به شرایط پایداری گردابه وابسته نیست [10].

مقادیر مینیمم نسبت ضرایب اصطکاک و ماکزیمم نسبت اعداد ناسلت پیش بینی شده توسط نرم افزار مینی تب، در جدول 4 نشان داده است و با مقادیر بدست آمده توسط آزمایش مقایسه شده است. مشاهده می شود مقادیر پیش بینی شده تطابق قابل قبولی با مقادیر آزمایشگاهی دارد. همچنین مشاهده می شود حداکثر کاهش ضریب اصطکاک 40% می باشد و حداکثر افزایش انتقال حرارت 45% می باشد.

در جدول 5، آنالیز واریانس برای نسبت سیگنال به نویز مرتبط با نسبت ضرایب اصطکاک بر مبنای معیار کوچکتر بهتر و نسبت اعداد ناسلت بر مبنای معیار بزرگتر بهتر نشان داده شده است. در این جدول، $AdjMS_i$ میانگین مربعات تنظیم یافته برای پارامتر i می باشد و بصورت رابطه (14) تعریف می شود [15]:

$$AdjMS_i = \frac{AdjSS_i}{D.F.i} \quad (14)$$



شکل 12 نمودار میانگین نسبت سیگنال به نویز برای نسبت اعداد ناسلت و بر اساس معیار بزرگتر بهتر

جدول 4 مقایسه مقادیر پیش بینی شده و آزمایشگاهی نسبت ضرایب اصطکاک و اعداد ناسلت برای سطوح بهینه

پارامتر	معیار کیفیت	آزمایشگاهی	پیش بینی شده	درصد خطا
$\frac{C_f}{C_{f,0}}$	کوچکتر بهتر	0/60564	0/61321	1/25
	بزرگتر بهتر	1/449912	1/456312	0/44
$\frac{Nu}{Nu_0}$	بزرگتر بهتر			

η_m میانگین نسبت سیگنال به نویز (dB)
 μ لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
 ρ چگالی (kgm^{-3})
 τ_w تنش برشی صفحه تخت (Pa)

حاضر، در میان ترکیب های متغیرهای مستقل، بررسی گردد. همچنین، روش طراحی آزمایش برای کاهش تعداد آزمایش ها بدون از دست رفتن اطلاعات مورد نیاز مورد استفاده قرار گرفت. سپس با استفاده از روش تاگوچی، ماکزیمم و مینیمم ضرایب انتقال حرارت و اصطکاک جهت تعیین حداقل و حداکثر میزان عدم تشابه بدست آمدند. نتایج حاصل از این مطالعه شامل موارد زیر می باشند:

9- پیوست

طراحی آزمایش های انجام شده در جدول 6 آمده است.

جدول 6 آزمایش های طراحی شده

شماره آزمایش	C/t	d/t	Re _t	L/t
1	2	0/125	5384/80	175
2	2	0/25	5920/02	175
3	2	0/5	6455/23	175
4	2	1	7525/67	175
5	4	0/125	5384/80	175
6	4	0/25	5920/02	175
7	4	0/5	6455/23	175
8	4	1	7525/67	175
9	8	0/125	5920/02	175
10	8	0/25	5384/80	175
11	8	0/5	7525/67	175
12	8	1	6455/23	175
13	18	0/125	5920/02	175
14	18	0/25	5384/80	175
15	18	0/5	7525/67	175
16	18	1	6455/23	175
17	2	0/125	7525/67	37/5
18	2	0/25	6455/23	37/5
19	2	0/5	5920/02	37/5
20	2	1	5384/80	37/5
21	4	0/125	7525/67	37/5
22	4	0/25	6455/23	37/5
23	4	0/5	5920/02	37/5
24	4	1	5384/80	37/5
25	8	0/125	6455/23	37/5
26	8	0/25	7525/67	37/5
27	8	0/5	5384/80	37/5
28	8	1	5920/02	37/5
29	18	0/125	6455/23	37/5
30	18	0/25	7525/67	37/5
31	18	0/5	5384/80	37/5
32	18	1	5920/02	37/5

- 1- عدم تشابه انتقال حرارت و انتقال ممتوم صفحه تخت در حضور مانع مستطیلی، به ازای تمام ترکیب های ممکن برای متغیرهای مستقل وجود دارد.
- 2- بیشترین میزان عدم تشابه انتقال حرارت و ممتوم در جریان متلاطم و برای (d/t) ، 0/25 می باشد.
- 3- (d/t) بیشترین تأثیر را بر عدم تشابه ممتوم و انتقال حرارت دارد و Re_t کمترین تأثیر را دارد.
- 4- میزان تأثیر گذاری (d/t) بر ضریب انتقال حرارت بیشتر از ضریب اصطکاک می باشد.
- 5- حداکثر کاهش ضریب اصطکاک 40% می باشد و حداکثر افزایش انتقال حرارت 45% می باشد.

8- فهرست علائم

A	مساحت صفحه تخت (m^2)
C	طول مانع (m)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)
d	فاصله بین مانع و صفحه تخت (m)
H	طول صفحه تخت (m)
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی ($\text{J/m}^2.\text{K}$)
I	جریان الکتریکی (A)
K	ضریب هدایت حرارتی (J/m.K)
L	فاصله مانع از لبه ابتدایی صفحه (m)
LV	سطوح متغیرهای مستقل
$M_{Taguchi}$	حداقل تعداد آزمایش ها بر مبنای روش تاگوچی
Q	حرارت تولید شده توسط المنت ها (J)
Re_t	عدد رینولدز بر مبنای ضخامت صفحه تخت
Re_H	عدد رینولدز بر مبنای طول صفحه تخت
t	ضخامت مانع (m)
T_s	دمای صفحه تخت (K)
T_∞	دمای جریان آزاد (K)
U_∞	سرعت جریان آزاد (m/s)
V	ولتاژ الکتریکی (V)
X	مقادیر خروجی بهینه پیش بینی شده

10- مراجع

- [1] G. Ghassabi, M. Kahrom, Optimization of Heat Transfer Enhancement of a Domestic Gas Burner Based on Pareto Genetic Algorithm: Experimental and Numerical Approach, *International Journal of Engineering* Vol. 26, No. 1, pp. 469- 481, 2013 .

علائم یونانی

η نسبت سیگنال به نویز (dB)
 η_i میانگین نسبت سیگنال به نویز در سطوح بهینه (dB)

- [12] M. Kahrom, P. Haghighparast, S. M. Javadi, Optimization of Heat Transfer Enhancement of a Flat Plate Based on Pareto Genetic Algorithm *International Journal of Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp. 177-189, 2010 .
- [13] J. W. Naughton, M. Sheplak, Modern Developments in Shear Stress Measurement, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 38, No. 6, 7-pp. 515-570, 2002 .
- [14] A. h. Lotfi, S. Nourouzi, The microstructure and mechanical properties of friction stir welded 7075-T6 aluminum alloy by the use of design of experiment, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 17-26, 2014 . (In Persian)
- [15] M. H. Gollo, H. M. Naeini, G. H. Liaghat, S. Jelvani, Theoretical and Experimental Study of the Effects of Process Parameters on Bending Angle in Laser Bending process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 67-86, 2010 . (In Persian)
- [16] S. J. Price, D. Sumner, J. G. Smith, K. Leong, M. P. Paigdoussis, Flow Visualization around a Circular Cylinder Near to a Plane Wall *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 16, No. 2, pp. 175-191, 2002 .
- [17] R. Parker, M.C. Welsht, Effects of Sound on Flow Separation from Blunt Flat Plates, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 4, No. 2, pp. 113-127, 1983 .
- [18] A. N. Stokes, M. C. Welsh, Flow-Resonant Sound Interaction in a Duct Containing a Plate, II: Square Leading Edge, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 104 No. 1, pp. 55-73, 1986 .
- [19] T. Sivasakthivel, K. Murugesan, H. R. Thomas, Optimization of operating parameters of ground source heat pump system for space heating and cooling by Taguchi method and utility concept, *Applied Energy*, Vol. 116 , pp. 76-85, 2014 .
- [20] W. P. Gardiner, G. Gettinby, *Experimental Design Techniques in Statistical Practic*, Glasgow: Woodhead, 1998 .
- [21] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, D. P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7 ed., United States of America: John Wiley & Sons, 2011 .
- [22] A. Akbarzadeh, S. Kouravand, B. M. Imani, Robust Design of a Bimetallic Micro Thermal Sensor Using Taguchi Method, *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 157, No. 1, pp. 188-198, 2013 .
- [2] 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)
- [3] S. Sarkar, S. Sarkar, Vortex Dynamics of a Cylinder Wake in Proximity to a Wall, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 26, pp. 19-40, 2010 .
- [4] J. H. Choi, J. W. Cho, S. J. Lee, A Turbulent Boundary Layer Disturbed by an Elliptic Cylinder, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 25, No. 11, pp. 1476-1482, 2001 .
- [5] E. Marumo, K. Suzukit, T. Satot, Turbulent Heat Transfer in a Flat Plate Boundary Layer Disturbed by a Cylinder, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 6, No. 4, pp. 241-248, 1985 .
- [6] H. Suzuki, K. Suzuki, T. Sato, Dissimilarity Between Heat and Momentum Transfer in a Turbulent Boundary Disturbed by a Cylinder Layer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 31, No. 2, pp. 259-265, 1988 .
- [7] H. Suzuki, K. Suzuki, Heat Transfer and Skin Friction of a Flat Plate Turbulent Boundary Layer Disturbed by a Cylinder, *Heat Transfer - Japanese Research*, Vol. 20, No. 2, pp. 97-112, 1991 .
- [8] K. Inaoka, J. Yamamoto, K. Suzuki, Dissimilarity Between Heat Transfer and Momentum Transfer in a Disturbed Turbulent Boundary Layer with Insertion of a Rod- Modeling and Numerical Simulation, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, No. 3, pp. 290-301, 1999 .
- [9] K. Inaoka, J. Yamamoto, K. Suzuki, Heat Transfer Characteristics of a Flat Plate Laminar Boundary Layer Disturbed by a Square Rod, in *International conference on advanced computational methods in heat transfer Kraków, Poland, 1998*, pp. 297-306 .
- [10] K. Inaoka, M. Mesaru, K. Suzuki, Flow and Heat Transfer Characteristics of a Turbulent Boundary Layer with an Insertion of a Square Rod (Control of Vortex Shedding by a Splitter Plate), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers* Vol. 97, No. 4, pp. 212-218, 1998 .
- [11] F. de Souza, J. Delville, J. Lewalle, J.P. Bonnet, Large Scale Coherent Structures in a Turbulent Boundary Layer Interacting with a Cylinder Wake, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 19, pp. 204-213, 1999 .