

مطالعه تجربی و عددی اثر تداخل لایه‌های مرزی در کاهش ضریب اصطکاک

سعید وحیدی فر دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
محسن کهرم استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

در این نوشتار کاهش نیروی پسای وارد بر یک صفحه تخت از طریق قرار دادن یک مانع در مجاورت صفحه، مورد مطالعه عددی و تجربی قرار گرفته است. بررسی عددی نشان می‌دهد که با قرارگیری مانع در کنار صفحه فرایند گذار جریان در لایه مرزی تغییر کرده و تحت تأثیر گردابه‌های صادر شده از مانع به کاهش ضریب اصطکاک می‌انجامد. در این پژوهش نیروی پسای متوسط وارد بر صفحه تخت در سه حالت بدون مانع، با مانع مربعی و با گونیا اندازه‌گیری و با نتایج عددی مقایسه شده‌اند. از یک تونل باد و صفحه تخت به عنوان بستر اصلی آزمون و یک سلول بار^۱ با دقت ۱ dyne برای اندازه‌گیری نیرو استفاده گردیده است. نتایج نشان می‌دهد با تغییر فاصله مانع از صفحه، تا فاصله خاصی که مانع از صفحه قرار داده می‌شود، ضریب پسای متوسط کاهش و از آن نقطه به بعد رو به افزایش می‌گذارد تا اینکه اثر مانع از بین می‌رود. برای مانع مربعی حداقل ضریب پسای در ۲٫۵ میلیمتری صفحه مشاهده شده و نتایج عددی به طور کامل با نتایج آزمایشگاهی تونل باد مقایسه و گزارش شده‌اند.

کلمات کلیدی: تحریک لایه مرزی، ضریب پسای، مانع مربعی، بهینه‌سازی انرژی

Experimental and Numerical Evaluation of the Effect of Boundary Layers Interaction on Drag Reduction

S. Vahidifar Ph.D. Student, Mechanical Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad
M. Kahrom Professor, Mechanical Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

Abstract:

Numerical and experimental evaluation of total drag of a quad cylinder in the vicinity of a flat plate is investigated. A quad of rectangular shape and later a quad with optimal drag are placed near and the inside of a turbulent boundary layer of a flat plate. The drag on the flat plate and the quad are measured separately and compared to the case when they are in similar flow field lonely. The experiment is performed by employing a low speed wind tunnel. The measuring device was a one Dyne accurate load cell. Conclusion is revealed that when the obstacle closes to the flat plate, the total drag is reduced to a minimum and then increases again at very close to the plate. For the case of square cylinder the minimum distance is about 2.5 millimeter. The same conclusion is arrived to by reforming a numerical evaluation of the same flow fields and results are reported.

Keywords: Enhancement of boundary layer, Drag coefficient, Obstacle Rod, Optimization of energy

¹. Load cell

۱- مقدمه

بررسی رفتار سیال و مطالعه عوامل تأثیرگذار بر رفتار لایه-های مرزی از جایگاه ویژه‌ای در دانش مهندسی برخوردار است. در بسیاری از کاربردهای صنعتی، یافتن شیوه‌های کاهش ضریب اصطکاک و افزایش ضریب انتقال گرما، مانند کاهش نیروی پسای وارد بر بالهای هواپیما، کاهش نیروی پسای وارد بر یک سطح از طرف جریان، کاهش نیروی پسای وارد بر هواپیما در هنگام فرود، افزایش انتقال گرما در مبادله‌کن‌های گرمایی، تسریع جریان خنک‌کاری قطعات الکترونیکی از موضوعات مهم تحقیقاتی است. در این تحقیق تأثیر رفتار لایه مرزی در کاهش ضریب اصطکاک مورد بررسی قرار گرفته است. در گذشته مطالعات عددی در این زمینه نتایج مفیدی در کاهش ضریب پسا را پیش بینی نموده است.

حق پرست [۱] در پژوهشی عددی با استفاده از تکنیکهای الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی نشان داد که سطح مقطع نوعی مانع چهار گوش حداقل ضریب اصطکاک روی صفحه تخت را بدست می‌دهد. نتایج حق پرست [۱] نشان داد که یک مقطع خاص از چهار گوش ضمن اعمال بیشترین ضریب انتقال گرما از یک صفحه تخت، ضریب پسا روی صفحه تخت را نیز کاهش می‌دهد، به همین دلیل این مانع گونیا نامیده شد. با توجه به مشکلات تحقیقات آزمایشگاهی، آزمون مانع بهینه‌ی حاصل از مطالعه حق پرست دو قسمت گردید. یک قسمت اندازه‌گیری ضریب پسای صفحه‌ی تخت در حضور گونیا و دیگری اندازه‌گیری ضریب انتقال گرمایی جابجایی صفحه‌ی تخت در حضور گونیا می‌باشد. سرکار [۲] دینامیک گردابه‌های ناشی از تعامل یک استوانه‌ی با مقطع دایروی در مجاورت دیواره را با استفاده از یک مدل LES سه بعدی مورد بحث و بررسی 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 را تحلیل کرد. بوش و همکارانش [۳] آزمایشاتی در مورد جریان حول یک ستون با مقطع مربعی در کنار دیواره انجام دادند. آزمایشات آنها در عدد رینولدز ۲۲۰۰۰ (بر مبنای قطر چهار گوش D) انجام شد. آنها دریافتند که در نسبت فاصله‌ی $G/D=0.35-0.5$ در کسری از دوره تناوب صدور گردابه‌ها تغییر وضعیت می‌دهد. در نسبت فاصله‌ی کمتر از این مقدار صدور گردابه‌ها کاملاً سرکوب شده و فقط گردابه موجود در پشت جسم به طور متناوب تغییر اندازه می‌دهد و در نسبت فاصله‌ی با مقدار بیشتر، صدور گردابه‌ها بصورت منظمی و از دو سمت چهار گوش انجام می‌گیرد. فریور [۴]، در پژوهشی لایه مرزی آشفته روی صفحه‌ی تخت که توسط یک مقطع

مستطیلی تحریک شده را بررسی نمود و نشان داد تحریک لایه مرزی توسط مانع مربعی که پشت آن توسط یک جداکننده به دو قسمت فوقانی و تحتانی تقسیم شده باشد، بسته به شرایط، تأثیر زیادی بر افزایش و یا کاهش ضریب انتقال گرما خواهد داشت. کهرم و همکارانش [۵]، یک مانع با مقطع چهارگوش را در مسیر جریان آزاد قرار دادند و تأثیر 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 صفحه‌ی 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 جابه جا می‌شوند ولی بعد از مدت زمانی که جریان به حالت پایدار می‌رسد گردابه‌ها روی لبه پایینی مانع دیگر تشکیل نمی‌شوند و فقط از لبه بالایی مانع ساطع می‌شوند. در پایین دست مانع گردابه‌ای ساکن و با ضربان تشکیل می‌شود. در این آزمون نشان داده می‌شود که گردابه در لبه بالایی مانع بر روی سطح آن جابجایی 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 m/s (عدد رینولدز مقطع مورد مطالعه 8.4×10^5) و دمای 20°C به موازات صفحه تخت که در دمای ثابت 58°C قرار دارد، را مورد بررسی قرار دادند و یک مانع چهارگوش به ضخامت $t=8 \text{ mm}$ و طولهای ۱۶، ۳۲، ۴۰ و 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. یک مانع مستطیلی در مسیر جریان آزاد قرار داده و تأثیر نسبت ابعادی مانع چهارگوش و همچنین فاصله آن از سطح صفحه تخت در شکل‌گیری و تعداد گردابه‌های رها شده از انتهای مانع را مورد بحث و بررسی 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 مؤثر تحریک لایه مرزی مغشوش بر روی یک دیواره، استفاده از یک جسم خارجی در داخل لایه مرزی است. کهرم و همکارانش [۵] 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 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

۲- تجهیزات آزمایش

در این پژوهش، اندازه‌گیری نیروی پسای متوسط وارد بر صفحه ی تخت و تعیین ضریب پسای متوسط صفحه‌ی تخت انجام شده و اثر تحریک لایه مرزی ناشی از قرارگرفتن مانع مربعی و بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک در نزدیک صفحه انجام گردیده است. همچنین اثر موانع روی ساختار جریان در نزدیک صفحه و اثرات برهمکنش گردابه‌های ناشی از مانع و لایه مرزی بررسی گردیده است.

یک صفحه‌ی تخت در تونل باد روی ساچمه‌های با اصطکاک بسیار کم قرارداد شده تا دارای آزادی حرکت در امتداد جریان باشد. با کشیده شدن صفحه‌ی تخت توسط جریان هوا، اهرم U شکل تعبیه شده در ابتدای صفحه که از زیر آن متصل به یک سلول بار خمشی می‌باشد حرکت کرده و کل نیروی وارد بر صفحه را با دقت ۱ Dyne اندازه‌گیری می‌کند. برای تبدیل پالس‌های فرستاده شده از سلول بار به مقادیر قابل خواندن از یک نمایشگر دیجیتالی استفاده شده است. هرمانع در سه مکان مختلف و در فواصل عمودی نسبت به صفحه قرار گرفته و در هر حالت نیروی پسای صفحه اندازه‌گیری گردید. همچنین در یکی از اعداد رینولدز، مقادیر نیروی پسای مربوط به مانع، به طور مستقل، در فواصل مختلف مانع نسبت به صفحه اندازه‌گیری شدند.

بدنه تونل از MDF با ضخامت ۱۶mm ساخته شده است. مقطع تونل، مستطیلی با ابعاد ۳۳٫۵ cm × ۲۹٫۵ cm و طول تونل ۲m می‌باشد. همچنین برای این که بتوان به فضای داخل تونل تسلط داشت، یک دریچه سراسری در دیواره‌های کناری تونل ایجاد شده و سطح بالای تونل از جنس شیشه ساخته شد تا فرایندهای داخل قابل رویت باشند. این شیشه‌ها بصورت کشویی قابلیت باز و بسته شدن را دارند. لذا با توجه به سه تکه بودن سطح بالایی تونل امکان دسترسی به کلیه مقاطع تونل مهیا گردید. برای اینکه دیواره باز نشود قسمت بالای تونل را در سه قسمت کلاف گردید تا کاملاً محکم شود.

برای اندازه‌گیری نیروی وارد بر صفحه از سلول بار خمشی 1kg-L6J1 با دقت ۱ Dyne اندازه‌گیری نیرو استفاده گردید. برای تأمین جریان هوا از یک دستگاه فن مکشی با دبی $7950 \text{ m}^3/\text{hr}$ استفاده شد. همچنین برای اتصال فن به تونل از یک شیپوره از ورق گالوانیزه استفاده شد. برای آب بندی اتصال فن به شیپوره از درزگیر در لابلای اتصال استفاده شده است. برای خواندن و تبدیل ولتاژهای فرستاده شده از سلول بار به یک نمایش گر یا یک دیجیتایزر نیاز بود، که با توجه به اهمیت مسئله، از یک نمایش‌گر دیجیتالی Omega DWI 400 استفاده گردیده است.

تأثیر قرار می‌دهد. سرعت این جت تا دو برابر سرعت جریان برخوردی به مانع می‌رسد و در شستشوی لایه مرزی بسیار مؤثر 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 ادامه‌ی راه خود در پشت مانع تشکیل یک گردابه می‌دهد. این گردابه به نوبه‌ی خود در تحریک لایه مرزی پس از جسم مؤثر می‌باشد. به طور خلاصه در چنین فرایندی در بالادست 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 مؤثر 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. میلز و همکارانش [۶] جریان روی یک مانع با مقطع مربعی موازی با دیواره را مورد بررسی قرار دادند. همچنین بررسی جریان سیال عبوری از روی مانع مربعی و برخورد جت و دنباله در پشت موانع و اندازه ضخامت لایه مرزی در بالا دست و پایین دست جریان توسط سوهانکار و همکارانش [۷] مطالعه شده است. مودی [۸] پدیده جدایش جریان و برخورد جت و دنباله را در پشت موانع و ضخامت لایه مرزی را در بالادست و پایین دست جریان بررسی نمود. در مورد دنباله و جریان گردابه‌های پشت مانع مربعی در اثر جریان عبوری از آن به صورت آزمایشگاهی و عددی توسط داویس و همکارش [۹] مورد بررسی قرار گرفته است.

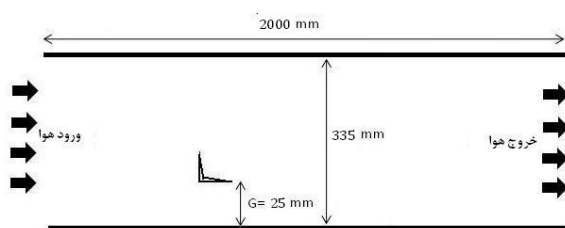
کهرم و همکار [۱۰] نشان دادند با تغییر اضلاع چهار گوش و گونیا توسط الگوریتم ژنتیک و در نتیجه کنترل موقعیت نقطه سکون و جت تشکیل شده روی سطح فوقانی مانع می‌توان ضریب انتقال گرما را تا ۵۱٪ افزایش داد.

در این مقاله کاهش نیروی پسای وارد بر صفحه از طریق قرار دادن یک مانع در مجاورت یک صفحه مورد مطالعه تجربی و عددی قرار گرفته است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد با تغییر فاصله مانع از صفحه، تا فاصله خاصی ضریب پسای متوسط کاهش و از آن نقطه به بعد رو به افزایش می‌گذارد تا اینکه اثر مانع از بین می‌رود. برای مانع مربعی حداقل ضریب پسا در ۲٫۵ میلیمتری صفحه مشاهده شده و برای یک مانع بهینه که بیشترین اثر را در کاهش پسا دارد، نتایج آزمایشگاهی با روش عددی مقایسه گردیده است.

برای قوام و کنترل اثر ارتعاشات بر قسمت روان (صفحه تخت) از لرزه‌گیر و جدا کردن فن از قسمت تونل باد توسط اتصالهای پارچه‌ای استفاده شده است.

۳- شرح مساله

هوا با دمای ۲۷ درجه سانتیگراد و در فشار ۶۶۹ میلی متر جیوه با سرعت ۱۴٫۷ متر بر ثانیه وارد یک تونل باد به طول ۲۰۰۰ میلی متر گردیده و گونیا در فواصل مختلف از صفحه تخت قرار گرفته و سپس ضریب اصطکاک اندازه‌گیری شده است. مشخصات هندسی مطابق شکل ۲ است.



شکل ۲- مشخصات هندسی تونل باد و موقعیت مانع در جریان

۴- روش انجام آزمایش

یک تونل باد به ابعاد $29.5\text{cm} \times 33.5\text{cm} \times 200\text{cm}$ تامین جریان با مشخصات معین را به عهده دارد.

یک صفحه شیشه‌ای با ابعاد $29.5\text{cm} \times 200\text{cm}$ در کف تونل قرار داده شد. روی این صفحه‌ی شیشه‌ای ۶ عدد ساچمه با قطر ۶mm قرار داده شده و سپس یک صفحه‌ی شیشه‌ای دیگر با ابعاد $29.2\text{cm} \times 19.8\text{cm}$ روی ساچمه‌ها قرار داده شد. ساچمه‌ها به طور کاملاً متقارن روی سطح شیشه‌ی پایینی توزیع شده‌اند و تونل باد طوری تراز می‌شود که پس از قرارگرفتن شیشه‌ی بالایی روی ساچمه‌ها، شیشه‌ی بالایی کاملاً در حالت تعادل بوده و به هیچ طرفی حرکت نکند. کوچکتر بودن طول صفحه‌ی بالایی به خاطر آزادی حرکت این صفحه داخل تونل در نظر گرفته شد تا بتوان نیروی وارد بر صفحه را مستقل از اثر تماس دیواره‌ها اندازه‌گیری کرد.

بعد از قراردادن صفحه‌ی بالایی روی ساچمه‌ها، برای انتقال نیروی پسا وارد بر صفحه به سلول بار از یک اهرم U شکل استفاده شد. این اهرم با استفاده از چسب حرارتی به زیر صفحه‌ی بالایی متصل شد، به گونه‌ای که در حالت آزاد هیچ نیرویی به سلول بار وارد نمی‌شود. به عبارتی آزادی حرکت صفحه‌ی بالایی باعث می‌شود که در صورت تراز بودن دستگاه تعیین، و در حالت خاموش بودن دستگاه هیچ نیرویی به سلول بار وارد نشود. همین موضوع یکی از موارد تست عملکرد صحیح دستگاه و ترازبودن دستگاه در هر مرحله پس از آزمایش بوده است.

در این پژوهش برای آماده سازی تجهیزات آزمایش دو صفحه شیشه‌ای با ابعاد $29.2\text{cm} \times 19.8\text{cm}$ و ابعاد $29.5\text{cm} \times 200\text{cm}$ با ضخامت ۶mm سفارش داده شد. تنها عامل مهم در انتخاب شیشه به عنوان جنس صفحه، رفتار صلب در فواصل کوتاه و عدم انحنای گرفتن آن در اثر قرارگرفتن روی ساچمه‌ها می‌باشد.

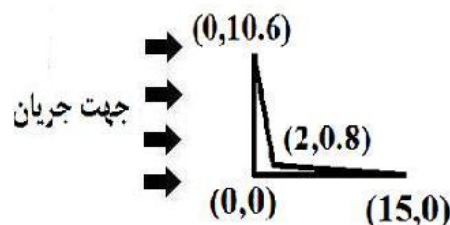
صفحه شیشه‌ای اول کف تونل قرار می‌گیرد و در روی آن تعدادی ساچمه و سپس سطح شیشه‌ای دوم که درگ آن اندازه‌گیری خواهد شد روی ساچمه‌ها به صورت افقی قرار داده می‌شود. ساچمه‌ها با روغن API ۱۰ دائماً چرب می‌شوند تا کمترین مقاومت در برابر حرکت را داشته باشند نیروی لازم برای آغاز جابجایی کمتر از ۱ Dyne است.

برای آزادی حرکت شیشه بالایی از ۶ عدد ساچمه‌ی با قطر ۶mm استفاده شد.

دبی جریان به کمک یک سرعت سنج اندازه‌گیری می‌شود. همچنین برای اطمینان از یکنواخت بودن سرعت در مقطع ورودی و هم مرکز بودن فن و تونل باد، 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 آن تراز شده‌اند.

برای اندازه‌گیری دمای هوای آزمایشگاه، از یک دماسنج - ۶۱۲-ST 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 $8\text{mm} \times 8\text{mm} \times 292\text{mm}$ از جنس چوب و برای مانع چهارگوش بهینه از جنس فولاد و با ابعاد ذکر شده در شکل ۱ که با عملیات تراشکاری دقیق تهیه گردیده استفاده می‌شود.



شکل ۱- ابعاد گونیا بر حسب میلی متر

برای انتقال نیروی پسا وارد بر صفحه‌ی شیشه‌ای به لودسل از یک اهرم U شکل استفاده شده است.

تونل باد توسط یک پایه فلزی تنظیم و تراز بودن آن با چهار مهره که در زیر پایه تونل نصب شده‌اند انجام می‌پذیرد.

خواهد بود. از این منحنی درجه ۱ برای تبدیل مقادیر نیروی خوانده شده به مقادیر واقعی استفاده شده است.

جدول ۱- مقادیر منحنی کالیبراسیون سلول بار و نمایش گر

نیروی واقعی (gr)	نیروی نمایش داده شده (gr)	خطا %
24.2	24.08	0.5
25.3	25.1	0.79
50.3	50.15	0.3
103	102.88	0.12
156.9	156.62	0.18
200	199.65	0.17
282.15	281.54	0.22
356.9	355.8	0.3
482.15	481.1	0.22
متوسط خطا 0.31%		

بنابراین:

$$f_D)_{Actual} = \frac{f_D)_{Displayed} + 0.055}{0.998} = f_D)_{Displayed} + 0.055(gr) \quad (1)$$

اثر این خطا به همراه خطای نمایش گر در محاسبه‌ی عدم قطعیت ضریب پسا لحاظ شده است.

۶- شرایط آزمایش

مشخصات محل آزمایش، لزجت و سرعت هوا در جدول ۲ آورده شده است. برای تعیین چگالی هوا از رابطه گاز کامل استفاده گردیده است.

جدول ۲- مشخصات ترموفیزیکی هوا

دما	فشار	سرعت جریان	لزجت دینامیکی
27 °C	669 mm Hg	14.5m.s	1.85×10 ⁻⁵ m ² .s

۷- عدم قطعیت آزمایش

۷-۱ روابط عدم قطعیت

عدم قطعیت متغیر با توزیع خطای گاوسی بصورت زیر خواهد بود:

$$u_b = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

که در این رابطه a بیانگر دقت متغیر می باشد. دقت هر وسیله ی اندازه گیری، نصف کوچکترین واحد اندازه گیری آن می باشد. همچنین لازم به ذکر است که بسته به دقت مورد نیاز برای گزارش، نتایج بصورت زیر گزارش می شوند

$$F = F \pm K_u u_F \quad (3)$$

دلیل استفاده از فن بصورت مکشی این بود که اغتشاشات ناشی از فن در خارج از تونل باد و داخل شیپوره اتفاق می افتند و لذا اثرات ناشی از اغتشاشات فن اثری بر نیروی پسی وارد بر صفحه ندارند. همچنین برای اینکه جریان در ورودی تونل یکنواخت باشد از یک شیپورهی همگرا استفاده شده است. این شیپوره باعث می شود که نوسانات ناشی از جریان ورودی تا ورود جریان هوا به تونل باد از بین بروند. با توجه به فاصله ی بین دو صفحه ی شیشه ای امکان ورود هوا از زیر شیپورهی ورودی به این فاصله وجود داشت که باعث زیاد شدن نیروی پسا وارد بر صفحه می شد. به همین دلیل فضای ورود هوا از زیر شیپورهی ورودی کاملاً با لایه های نازک سلفون آب بندی شد.

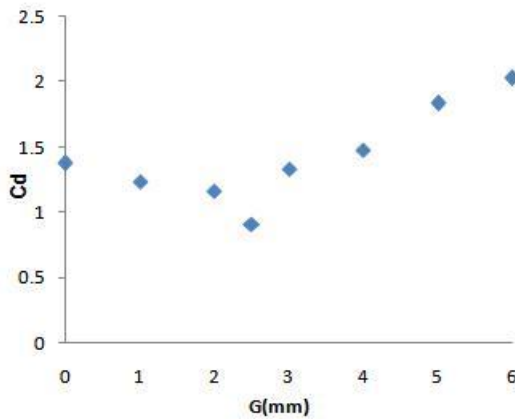
از طرفی با توجه به کوچکتر بودن صفحه ی بالایی نسبت به تونل در ورودی و خروجی تونل، امکان زیاد شدن نیروی وارد بر صفحه به دلیل برخورد هوا با لبه ی جلویی شیشه و همچنین و یک پشت شیشه در انتها وجود داشت. برای از بین بردن این احتمال روی شیپورهی ورودی، در ورودی تونل یک نوار از سلفون نازک چسبانده شد تا هوا به صورت موازی از روی صفحه ی شیشه ای عبور کرده و به لبه ی جلویی شیشه برخورد نکند. در انتهای صفحه ی شیشه ای نیز یک نوار مشابه چسبانده شد تا از بوجود آمدن ویک در پشت شیشه جلوگیری شود. قابل ذکر است که فاصله ی اهرم تا سلول بار در حالت آزاد، به گونه ای تنظیم شده بود که در صورت روشن شدن دستگاه و کشیده شدن صفحه، نیروی صفحه فقط به سلول بار وارد شده و صفحه به جای دیگری متصل نباشد. برای بررسی اصطکاک ناشی از تماس صفحه ی شیشه ای با ساچمه ها، با آویزان کردن وزنه های مختلف از طرف دیگر صفحه، میزان نیروی نشان داده شده توسط سلول بار بررسی گردید. خطای ناشی از اصطکاک ساچمه و صفحه کمتر از ۱۰٪ وزنه ی آویزان شده بود.

۵- کالیبراسیون سلول بار و نمایشگر

برای کالیبره کردن این دو دستگاه با یکدیگر، ابتدا سلول بار به پایه پیچ شده و سپس به نمایش گر متصل گردید. وزنه های مختلفی روی سلول بار قرار داده شده و مقادیر نیرو قرائت شدند. در جدول ۱ مقادیر وزنه های قرار داده شده و مقادیر نشان داده شده توسط سیستم آورده شده اند.

طبق دستورالعمل استاندارد ASTM برای کالیبراسیون دستگاه های اندازه گیری نیرو، یک منحنی درجه ۲ به داده ها منطبق گردید. با انطباق نمودار بر نیروی نمایش داده شده و نیروی واقعی در محدوده ی نیرویی زیر ۱۰۰ گرم، جمله ی مرتبه ۲ بسیار کوچک می باشد و منحنی کالیبراسیون درجه ۱

صفحه اندازه‌گیری و یادداشت گردید. همچنین در عدد رینولدز 8.94×10^5 ، نیروی وارد بر مانع‌ها به ازای فواصل عمودی مختلف مانع از صفحه نیز اندازه‌گیری گردید.



شکل ۳- ضریب پسای متوسط مانع مربعی بازای فواصل مختلف مانع از صفحه در عدد رینولدز 8.94×10^5

در شرایط آزمایش، دمای هوای آزمایشگاه ۲۷ درجه سانتی‌گراد، فشار هوا ۶۶۹ میلی‌متر جیوه و سرعت جریان هوا در تونل باد ۱۴٫۵ متر بر ثانیه ثبت شده است.

ضریب پسای متوسط مربوط به مانع مربعی بازای فواصل مختلف مانع از صفحه، در عدد رینولدز 8.94×10^5 اندازه‌گیری گردید.

در شکل ۳، چگونگی تغییرات ضریب پسای متوسط مانع مربعی با تغییر فاصله‌ی آن از صفحه‌ی تخت آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در فاصله‌ی بین ۲٫۵ میلی‌متری مانع از صفحه مقدار ضریب پسای مانع، به کمترین مقدار خود، ۰٫۹۹۶ می‌رسد. در این حالت، با توجه به اینکه حالت بحرانی سرکوب‌صورت گردابه‌ها از مانع رخ می‌دهد، نسبت فاصله‌ی مانع از صفحه به قطر معادل مانع، G/D ، ۰٫۳۲ می‌باشد.

جدول ۵- ضریب پسای متوسط مانع مربعی در عدد رینولدز 8.94×10^5

فاصله مانع از صفحه (mm)	نیروی معادل پسای متوسط (gf)	ضریب پسای متوسط	مقدار σ	مقدار u	عدم قطعیت
0	40.52	1.376	3.96	0.085	± 0.336
1	36.46	1.238	2.48	0.084	± 0.208
2	34.2	1.161	2.81	0.095	± 0.267
2.5	26.85	0.912	1.79	0.061	± 0.109
3	39.29	1.334	2.63	0.089	± 0.234
4	43.43	1.475	4.54	0.154	± 0.699
5	54.11	1.837	3.41	0.116	± 0.395
6	59.76	2.029	3.122	0.106	± 0.331

که در آن u_F عدم قطعیت مربوط به F و K_u مقدار ضریب اطمینان پوششی است که با توجه به سطح اطمینان گزارش، مطابق جدول ۳، متغیر می‌باشد

جدول ۳- مقدار ضریب اطمینان پوششی K_u با توجه به سطح اطمینان

سطح اطمینان	مقدار K_u
68.28%	$\pm \sigma$
95%	$\pm 2\sigma$
99.74%	$\pm 3\sigma$

۲-۷ محاسبه‌ی عدم قطعیت مربوط به ضریب پسای متوسط

برای محاسبه عدم قطعیت آزمایش خواهیم داشت.

جدول ۴- مساحت در مقابل جریان برای حالت‌های مختلف

محاسبه‌ی ضریب پسا

صفحه‌ی تخت	گونیا	مانع مربعی	صفحه‌ی تخت
5.78×10^{-1}	3.09×10^{-3}	2.34×10^{-3}	$A (m^2)$

با توجه به مقادیر جدول ۴، روابط محاسبه‌ی عدم قطعیت به صورت زیر بدست می‌آیند:

الف: عدم قطعیت ضریب پسای مانع مربعی

$$u_{C_D} = \sqrt{1.48e - 5u_{f_d}^2 + 1.87e - 11f_d^2} \quad (4)$$

ب: عدم قطعیت ضریب پسای مانع بهینه:

$$u_{C_D} = \sqrt{8.49e - 4u_{f_d}^2 + 1.07e - 11f_d^2} \quad (5)$$

ج: عدم قطعیت ضریب پسای صفحه‌ی تخت

$$u_{C_D} = \sqrt{2.42e - 10u_{f_d}^2 + 3.06e - 16f_d^2} \quad (6)$$

در نهایت نتایج ضریب پسا با رابطه‌ی زیر گزارش می‌شوند:

$$C_D = C_D + K_u u_{C_D} \quad (7)$$

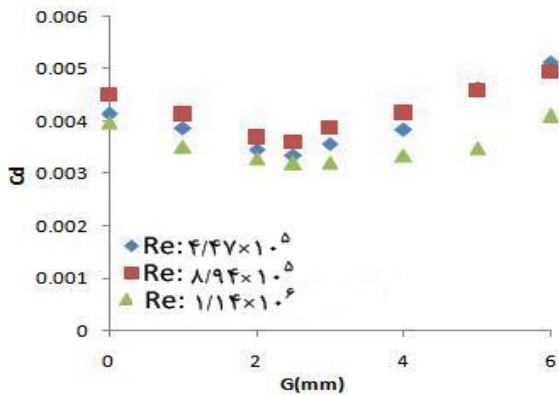
که مقدار K_u از جدول ۳ بسته به میزان اطمینان مورد نیاز تعیین می‌شود.

۸- بررسی و تحلیل نتایج

مانع‌ها در سه عدد رینولدز 4.47×10^5 ، 8.94×10^5 ، 1.14×10^6 قرار داده شدند. در هر موقعیت، فاصله‌ی عمودی مانع‌ها از صفحه، از ۰ میلی‌متر شروع شده و گام‌های ۱ میلی‌متری در هر مرحله این فاصله تا مقداری افزایش داده شد که اثر وجود مانع روی نیروی پسای صفحه کاملاً از بین برود. در هر بار تغییر فاصله‌ی عمودی مانع از صفحه، نیروی پسای وارد بر

در شکل ۵ سه ضریب پسای صفحه‌ی تخت به ازای فواصل عمودی مختلف مانع مربعی نسبت به صفحه و در رینولدزهای مختلف آورده شده است. از شکل ۵ چند نکته قابل برداشت می‌باشد:

۱- با افزایش فاصله‌ی مانع از صفحه، ضریب پسای متوسط صفحه به یک مقدار حداقل رسیده و سپس دوباره افزایش می‌یابد. فاصله‌ای که در آن حداقل ضریب پسای متوسط صفحه اتفاق می‌افتد، دقیقاً منطبق بر فاصله‌ای است که در آن ضریب پسای متوسط مانع، حداقل می‌شود. به عبارتی در نسبت فاصله‌ی بحرانی که بهترین حالت تعامل سرکوب صدور گردابه‌ها از مانع و جت سیال زیر مانع در حالت بحرانی باشد، دلیل اینکه مقدار ضریب پسای متوسط مانع بهینه در فاصله‌ی ۰ میلی متری کمتر از بقیه است، این است که در این حالت جریان هوا از زیر مانع رد نمی‌شود و در نتیجه به سطح پایینی مانع نیرو وارد نمی‌شود.



شکل ۵- ضریب پسای متوسط صفحه‌ی تخت بر حسب فاصله-ی عمودی مانع مربعی از صفحه در رینولدزهای مختلف

۲- با افزایش عدد رینولدز بر مبنای فاصله از لبه حمله صفحه تخت، یا به عبارتی افزایش ضخامت لایه مرزی، همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقدار مینیمم ضریب پسای متوسط صفحه رخ نمی‌دهد. این موضوع را بورستی و لانسوتی [۱۱] نیز بیان کرده بودند که ارتباطی بین ضریب پسا و ضخامت لایه مرزی وجود ندارد و تنها عامل مهم داخل یا خارج لایه مرزی بودن مانع می‌باشد. بیشترین درصد کاهش ضریب پسای متوسط صفحه نسبت به حالت بدون مانع در هر عدد رینولدز در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷- درصد کاهش ضریب پسای متوسط صفحه در حضور مانع مربعی نسبت به حالت بدون مانع

Re	درصد کاهش ضریب پسای متوسط صفحه
4.47×10^5	30%
8.94×10^5	36%
1.14×10^6	38%

در حالتی که مانع به اندازه‌ی کافی از صفحه دور می‌شود، مقدار ضریب پسای متوسط مربوط به مانع مربعی برابر 0.33 ± 0.02 تعیین گردید.

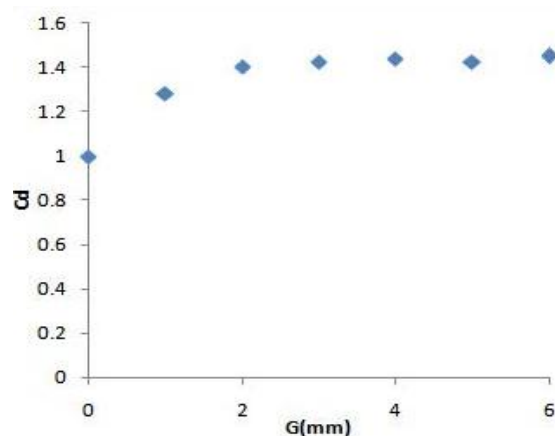
نتایج مربوط به ضریب پسای متوسط گونیا عدد رینولدز 8.94×10^5 در جدول ۶ آورده شده و در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. با توجه به نتایج حاصل از داده‌گیری، ضریب پسای متوسط گونیا در فاصله‌ای بین ۱ تا ۲ میلی متر به حداقل خود می‌رسد. با توجه به اینکه حداقل ضریب پسای متوسط مانع در جایی رخ می‌دهد که تعامل بین سرکوب صدور گردابه‌ها از مانع و جت سیال زیر مانع در حالت بحرانی باشد، دلیل اینکه مقدار ضریب پسای متوسط مانع بهینه در فاصله‌ی ۰ میلی متری کمتر از بقیه است، این است که در این حالت جریان هوا از زیر مانع رد نمی‌شود و در نتیجه به سطح پایینی مانع نیرو وارد نمی‌شود.

نیروی پسای متوسط صفحه به ازای قرارگیری مانع مربعی در سه عدد رینولدز مختلف، و در فواصل عمودی مختلف اندازه‌گیری و ضریب پسای متوسط صفحه در هر مرحله محاسبه گردیده است.

جدول ۶- ضریب پسای متوسط گونیا در عدد رینولدز

8.94×10^5

فاصله مانع از صفحه (mm)	نیروی پسای متوسط (g)	ضریب پسای متوسط	مقدار σ	مقدار u	عدم قطعیت
0	35.61	0.99708	2.285	0.058	± 0.132
1	45.82	1.28296	1.771	0.045	± 0.079
2	50.05	1.4014	2.111	0.054	± 0.114
3	50.96	1.42688	1.785	0.046	± 0.082
4	51.41	1.43948	1.823	0.047	± 0.086
5	50.96	1.42688	2.485	0.064	± 0.159
6	51.78	1.44984	3.786	0.059	± 0.223

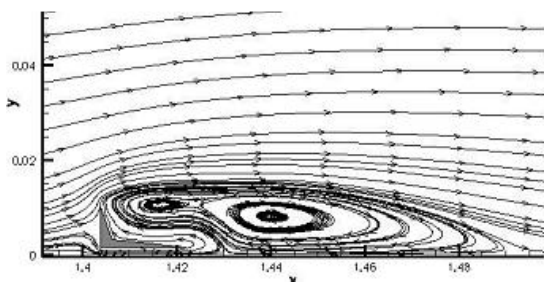


شکل ۴- ضریب پسای متوسط گونیا به ازای فواصل مختلف مانع از صفحه در عدد رینولدز 8.94×10^5

یابد. فاصله‌ای که در آن حداقل ضریب پسای متوسط صفحه اتفاق می‌افتد، دقیقاً منطبق بر فاصله‌ای است که در آن ضریب پسای متوسط مانع، حداقل می‌شود. به عبارتی در نسبت فاصله‌ای که تعامل بین صدور گردابه‌ها از مانع و جت زیر مانع در بهترین حالت ممکن به نفع کاهش پسای صفحه قرار می‌گیرد. به بیان دیگر تعامل جت زیر مانع که باعث افزایش ضریب پسا شده و گردابه‌ی ثانویه‌ی تشکیل شده در پایین دست مانع که در راستای کاهش ضریب پسا عمل می‌کند، در این نسبت فاصله‌ی بحرانی، مقدار ضریب پسای صفحه را به مقدار حداقل خود می‌رساند.

۲- با افزایش عدد رینولدز با توجه به افزایش ضخامت لایه مرزی، میزان نفوذ اثر وجود مانع افزایش یافته و شیب تغییرات ضریب پسا با افزایش فاصله‌ی مانع کمتر می‌شود. به طوری که در عدد رینولدز $4,47 \times 10^5$ ، در فاصله‌ی ۶ میلی متری مانع از صفحه، اثر مانع از بین می‌رود، این در حالی است که در عدد رینولدز برابر $1,14 \times 10^6$ ، در فاصله‌ی ۶ میلی متری مانع از صفحه اثرات وجود مانع روی ضریب پسای متوسط صفحه در شکل ۶ مشهود می‌باشند.

۳- مقدار درصد کاهش ضریب پسا با قرارگیری مانع بهینه در لایه مرزی نسبت به حالت قرارگیری مانع مربعی در لایه مرزی، حدود ۱۵٪ بیشتر می‌باشد. این مقدار کاهش بیشتر ضریب پسای صفحه را می‌توان به تغییرات ایجاد شده در ویژگی‌های صدور گردابه‌ها از مانع ارتباط داد. در شکل ۷ خطوط جریان حول گونیا آورده شده‌اند [۱]. با توجه به شکل ۷ در مورد مانع بهینه، گردابه‌ی ثانویه، با توجه به جهت چرخش آن، و همچنین برگشت جریان روی مانع، نقش بسیار مهمی در کاهش ضریب پسای صفحه ایفا می‌کند.



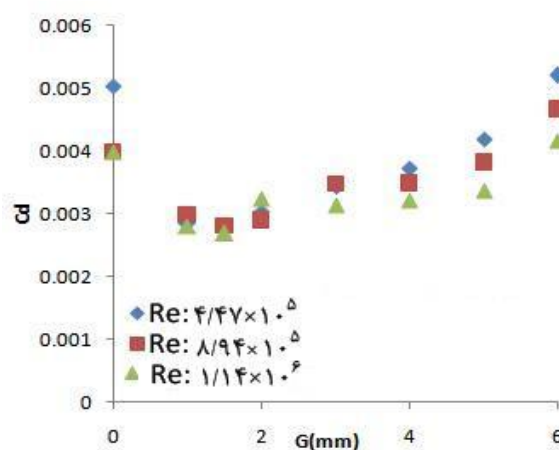
شکل ۷- خطوط جریان حول گونیا (برگرفته از مرجع [۱])

۴- با افزایش عدد رینولدز بر مبنای فاصله از ورودی، همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقدار حداقل ضریب پسای متوسط صفحه رخ نمی‌دهد. بیشترین درصد کاهش ضریب پسای متوسط نسبت به حالت بدون مانع در هر عدد رینولدز در جدول ۸ آورده شده است.

۳- با افزایش عدد رینولدز با توجه به افزایش ضخامت لایه مرزی، میزان نفوذ اثر وجود مانع افزایش یافته و شیب تغییرات ضریب پسا با افزایش فاصله‌ی مانع کمتر می‌شود. به طوری که در عدد رینولدز $4,47 \times 10^5$ ، در فاصله‌ی ۶ میلی متری مانع از صفحه، اثر مانع از بین می‌رود. این در حالی است که در عدد رینولدز برابر $1,14 \times 10^6$ ، در فاصله‌ی ۶ میلی متری مانع از صفحه اثرات وجود مانع روی ضریب پسای متوسط در شکل ۵ مشهود می‌باشند.

۴- در فاصله‌ی ۲٫۵ میلی متری مانع مربعی از صفحه، ضریب پسای متوسط صفحه دارای حداقل مقدار خود می‌باشد. این فاصله دقیقاً منطبق بر فاصله‌ای است که در آن ضریب پسای متوسط مانع مربعی به حداقل مقدار خود می‌رسد. این گونه می‌توان استنباط کرد که با توجه به رخ دادن حالت مطلوب تعامل صدور گردابه‌ها از مانع و جت زیر مانع، گردابه‌های ثانویه تقویت شده و از آنجا که این گردابه‌ها در جهت کم کردن ضریب پسای صفحه عمل می‌کنند، هم ضریب پسای متوسط مانع در این نسبت فاصله حداقل می‌شود و هم ضریب پسای متوسط صفحه به حداقل مقدار خود می‌رسد.

نیروی پسای متوسط صفحه بازای قرارگیری گونیا در سه عدد رینولدز مختلف، و در فواصل عمودی مختلف اندازه‌گیری و ضریب پسای صفحه در هر مرحله محاسبه گردید. در شکل ۶ ضریب پسای صفحه‌ی تخت به ازای فواصل عمودی مختلف گونیا نسبت به صفحه و در رینولدزهای مختلف آورده شده است.



شکل ۶- ضریب پسای متوسط صفحه‌ی تخت بر حسب فاصله-ی گونیا از صفحه در رینولدزهای مختلف

از شکل ۶ چند نکته قابل برداشت می‌باشد:

۱- با افزایش فاصله‌ی مانع از صفحه، ضریب پسای متوسط صفحه به یک مقدار حداقل رسیده و سپس دوباره افزایش می‌-

جدول ۸- درصد کاهش ضریب پسای متوسط صفحه در حضور

مانع بهینه نسبت به حالت بدون مانع	
Re	درصد کاهش ضریب پسای صفحه
4.47×10^5	46.4%
8.94×10^5	47.5%
1.14×10^6	47.7%

قطر مانع	D
عدد رینولدز	Re
نسبت فاصله	G/D
دما	T
عدم قطعیت	u
فاکتور پوششی	Ku
انحراف معیار	σ
طول صفحه	L
ضخامت مانع	t
عدم قطعیت نتایج اندازه گیری شده	
عدم قطعیت متغیر	
میانگین داده های	fd
عدم قطعیت نتایج اندازه گیری شده با	
احتساب خطای تکرار و کالیبراسیون	

۵- حداکثر درصد کاهش ضریب پسای صفحه در عدد رینولدز 1.06×10^6 برای کار عددی حق پرست [۱]، ۴۰٪ بدست آمده بود، که در این تحقیق، در عدد رینولدز 1.06×10^6 ، درصد کاهش پسا برابر ۴۷٫۷٪ بدست آمده است.

۶- در نتایج عددی حق پرست [۱]، در فاصله ی ۱٫۵ میلی متری مانع از صفحه، ضریب پسای صفحه بهینه سازی شده بود، که در این تحقیق، با قرارگیری مانع بهینه در فاصله ی ۱٫۵ میلی متری صفحه، ضریب پسا دارای حداقل مقدار خود می-باشد.

۹ - نتیجه گیری

در این مقاله هدف بررسی و مقایسه نتایج حاصل از مطالعه حق پرست [۱] بوده است. مانع گونیا حاصل الگوریتم ژنتیک حق پرست [۱] با مانع مربعی به صورت عددی و آزمایشگاهی مقایسه و نتایج گزارش شده اند. پیچیدگی جریان اطراف و پشت موانع و وجود عوامل زیادی که بر شدت تحریک لایه مرزی مؤثر می باشند، دینامیک بسیار پیچیده ای را به وجود می آورد. با بررسی دینامیک برهم کنش گردابه های پشت مانع و لایه مرزی، نتایج حاصل از داده گیری تفسیر شدند.

نتایج بدست آمده برای یک مانع با مقطع چهارضلعی، نشان می دهد که با کاهش فاصله ی مانع از صفحه، صدور گردابه ها از نیمه ی پایینی استوانه سرکوب می شود. این اتفاق در راستای کاهش $\overline{C_D}$ می باشد. از طرفی جت سیال تشکیل شده زیر مانع، لایه مرزی را شسته و با سرعت دادن به سیال باعث افزایش $\overline{C_D}$ می شود. در نتیجه، در نسبت فاصله ای بحرانی، برآیند اثر این دو رخداد، باعث حداقل شدن ضریب پسای متوسط صفحه می شود.

نتایج حاصل از مانع بهینه ی بدست آمده از الگوریتم ژنتیک [۱]، کاهش ۴۰٪ در مقدار $\overline{C_D}$ را نشان داده بود، که در این تحقیق، کاهش ضریب پسای متوسط برابر ۴۷٪ بدست آمد. مانع بهینه در مقایسه با مانع مربعی، که ۳۸٪ مقدار $\overline{C_D}$ را کاهش داده بود، ۹٪ بیشتر مقدار $\overline{C_D}$ را کاهش می دهد.

نمادها

C_d	ضریب پسا
Fd	نیروی پسا
G	فاصله مانع از صفحه

مراجع

[1] Haghparast, P. "Optimization of heat transfer enhancement by the use of genetic algorithm and neural network" Master science thesis, Ferdowsi university of Mashhad, 2008.

[2] Sarkar, S. "Vortex dynamics of a cylinder wake in proximity to a wall", J. Fluid and structures, vol.26, pp.19-40, 2010.

[3] Bosch, G., Kappler, M.; Rodi, W. "Experiments on the Flow Past a Square Cylinder Placed near a Wall", J. Experimental Thermal and Fluid Science, vol.13, pp.292-305, 1996.

[4] Farievar, S. "The effect of square splattered and unsplattered rods in flat plate heat transfer enhancement", international journal of engineering, vol.20, no.1, pp. 83-94, 2007.

[5] Kahrom, M.; farahbod, A.; khodadazade, D. "Effect of obstacle aspect ratio on strouhall number and enhancement of heat transfer coefficient near a flat plate" esteghlal maganize, No.1, vol 27, PP.103-114, 2008.

[6] Mills, R.; Sheridan, J.; Hourigan, K.; Welsh, M.C., "The Mechanism controlling vortex shedding from flat plate with square leading edge and trailing edge", J. Fluid Mechanics, vol.15, pp.1025-1036, 1995.

[7] Sohankar, A.; Norberg, C.; Davidson, L., "Simulation of three-dimensional flow around a square cylinder at moderate reynolds numbers", J. Fluid Mechanics, vol.11, pp.288-306, 1999.

[8] Modi, V.J., Munshi, S.R., Yokomizo T. "Effect of momentum injection on the drag reduction and flow Induced instabilities of a square prisms", International Journal of Offshore and Polar Engineering, Volume 6, Number 3 September, 1996.

- [9] Davis and Moore, "A numerical study of vortex shedding from rectangles", journal of fluid mechanics, vol.116, pp.475-506, 1982
- [10] Kahrom, M.; javadi, S.M. "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 March 2012.
- [11] Buresti, G.; Lanciotti, A., "Vortex shedding from smooth and roughened cylinders in cross-flow near a plane surface", Aeronautical Quarterly, vol.30, pp.305-321, 1979.