

## تحلیل تجربی میدان جریان و انتقال حرارت در یک کانال مسطح تحت تأثیر مولد گردابه سوراخ‌دار

علی روستای آبکنار<sup>۱</sup>، نیما امانی فرد<sup>۱</sup>، حامد محدث دیلمی<sup>۲\*</sup>، فرید دولتی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده فنی، پردیس دانشگاه گیلان، رشت، ایران  
<sup>۲</sup>دانشکده فنی و مهندسی شرق گیلان، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۶ فروردین ۱۳۹۵  
بازنگری: ۱۹ خرداد ۱۳۹۵  
پذیرش: ۱۴ شهریور ۱۳۹۵  
ارائه آنلاین: ۲۳ شهریور ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

افزایش انتقال حرارت  
مولد گردابه  
کانال مسطح  
تحلیل تجربی

**چکیده:** انتقال حرارت و عملکرد هیدرودینامیکی برای جریان در داخل کانال مستطیلی در حضور مولد گردابه به صورت تجربی با استفاده از شکل‌های مختلف مولد گردابه مورد مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا تجهیزات آزمایشگاهی دقیق و مطمئن به منظور ایجاد شرایط مرزی شار حرارتی ثابت طراحی و ساخته شده است. به منظور بررسی تأثیر شکل مولد گردابه طولی، از سه نوع جفت مولد گردابه مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی در شرایط سوراخ‌دار و بدون سوراخ استفاده شده و تأثیر آنها بر مشخصات جریان سیال و انتقال حرارت در زوایای حمله مختلف ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه با ضخامت ناچیز مورد مطالعه قرار گرفته است. اثرات تعداد سوراخ با استفاده از پارامترهای بی‌بعد نسبت ضریب اصطکاک  $(f/f_0)$ ، نسبت عدد ناسلت  $(Nu/Nu_0)$  و عملکرد کلی  $(f/f_0)/(Nu/Nu_0)$  مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر طبق نتایج تجربی جفت بالچه مولد گردابه مستطیلی بدون سوراخ بیشترین نسبت ضریب اصطکاک را دارد و با افزایش زاویه حمله این نسبت افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که با ایجاد سوراخ در جفت بالچه‌های مولد گردابه مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی ضریب اصطکاک کاهش و انتقال حرارت و ضریب عملکرد کلی افزایش یافته است. اما در حالت بکارگیری مولد گردابه دوزنقه‌ای با دو سوراخ، انتقال حرارت کمی بیشتر نسبت به حالت مولد گردابه سه سوراخ افزایش یافته است.

### ۱- مقدمه

استفاده از مولدهای گردابه طولی<sup>۱</sup> روی سطوح انتقال حرارت، از جمله روش‌های افزایش انتقال حرارت است که کاربردهای وسیعی دارد. این روش در تجهیزات حرارتی مانند مبدل‌های حرارتی و تیغه‌های سرمایش داخلی توربین‌های گاز کاربرد دارد. به‌طور کلی، مکانیزم افزایش انتقال حرارت در مولدهای گردابه بر پایه جدایش جریان و برهم‌زدگی جریان است. سیال در مواجهه با مولد گردابه به‌دلیل جدایش جریان، یک تنش برشی قوی در پشت شیار یا بالچه ایجاد می‌کند که این امر باعث برهم زدن لایه مرزی حرارتی و در نتیجه بهبود انتقال حرارت می‌گردد [۱]. بررسی تأثیر مولد گردابه‌ها بر روی میزان انتقال حرارت برای نخستین بار در سال ۱۹۶۹ توسط جانسون و جویرت [۲] با به‌کارگیری باله‌های<sup>۲</sup> مثلثی به عنوان مولدهای گردابه در زاویه‌ای ثابت بر روی سطح یک سیلندر انجام پذیرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که عدد ناسلت موضعی در اطراف مولد گردابه تا ۲۰۰٪ افزایش یافته و علت آن افزایش اغتشاش در لایه‌مرزی حرارتی می‌باشد. متا و بردشا [۳ و ۴] به صورت تجربی جفت گردابه طولی را به گونه‌ای که در ناحیه بین خود ناحیه بالاشو<sup>۳</sup> را ایجاد می‌کردند، در لایه‌مرزی آشفته مورد بررسی قرار

دادند. در این آرایش گردابه‌ها با گذر به سوی پایین‌دست جریان، از سطح دیواره فاصله می‌گیرند. آن‌ها مشاهده کردند که در صورت استفاده از جفت مولد گردابه، ناپدید شدن چرخش جریان سیال نسبت به حالت مولد گردابه تکی، آهسته‌تر انجام شده و در نتیجه گردابه‌ها تمام منطقه مطالعاتی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. تیگلیک و همکاران [۵] به‌صورت تجربی با در نظر گرفتن دو ردیف مشابه از مولدهای گردابه به شکل بالچه مثلثی به بررسی میدان جریان و انتقال حرارت پرداختند. آن‌ها دریافتند که کاهش عدد ناسلت متوسط در راستای عرضی در پشت مولدهای ردیف دوم کمی بیشتر از ناحیه پشت مولدهای ردیف اول است و این امر نشان می‌دهد که گردابه‌های ایجاد شده توسط مولدهای گردابه ردیف دوم پایداری کمتری نسبت به گردابه‌های ایجاد شده توسط مولدهای گردابه ردیف اول دارند، این در حالی است که میزان افزایش انتقال حرارت موضعی پشت ردیف دوم بزرگ‌تر از ردیف اول است و در عدد رینولدز ۵۶۰۰، انتقال حرارت محلی تا ۲۰۰٪ و ضریب انتقال حرارت کلی حدود ۷۷٪ برای دو جفت مولد گردابه افزایش یافته است. همچنین آن‌ها نشان دادند که گردابه‌های طولی حاصل از ردیف اول می‌توانند بر تشکیل گردابه‌ها در ردیف یا ردیف‌های بعدی مؤثر باشند به‌طوری که مولدهای گردابه در ردیف یا ردیف‌های بعدی به صورت یک افزایش دهنده<sup>۴</sup> عمل می‌کنند. بیشینه این افزایش در فاصله طولی ۷ تا ۱۰ برابر ارتفاع کانال رخ می‌دهد. بررسی عدد ناسلت کلی در کانال نشان داد

- 1 Longitudinal vortex
- 2 Winglet
- 3 Up-wash flow

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hmohaddesd@guilan.ac.ir

است. نتایج همچنین نشان داد که برای مولدهای مستطیلی ساده و انحنادار که مساحت بیشتری دارند، بهترین انتقال حرارت و عملکرد حرارتی در هر دو جریان آرام و آشفته با سوراخ با قطر نسبتاً بزرگ ۸ میلی‌متر رخ می‌دهد، اما برای مولدهای با مساحت کمتر مانند مولد دوزنقه‌ای انحنادار و مولد مثلثی انحنادار، سوراخ‌های کوچک‌تر عملکرد بهتری را ارائه می‌دهند. به‌طور کلی با افزایش قطر سوراخ مقاومت جریان و در نتیجه افت فشار کاهش می‌یابد، اما افزایش انتقال حرارت و عملکرد حرارتی به مساحت مولد گردابه وابسته است. آن‌ها همچنین مشاهده نمودند که هر چقدر سوراخ ایجاد شده در راستای عمودی پائین‌تر و در راستای وتر به وسط مولد نزدیک‌تر باشد، عملکرد حرارتی افزایش می‌یابد، اما مکان هندسی تک سوراخ تاثیر چندانی بر روی میزان افت فشار ندارد.

سونگ و همکاران [۱۱] به‌صورت عددی اثر متقابل گردابه‌های طولی بر روی یکدیگر، را بر مبدل حرارتی صفحه تخت شبیه‌سازی نمودند. آن‌ها در این مطالعه از دو گردابه طولی ناهمسانگرد مثلثی استفاده نمودند. تاثیر فاصله عرضی بین دو ردیف مولد گردابه بر تقابل گردابه‌ها و اثر این تقابل بر روی افزایش انتقال حرارت مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها دریافتند که قدرت گردابه‌های طولی و کارایی انتقال حرارت به اثر متقابل بین گردابه‌های ناهمسانگرد بستگی دارد و اثر متقابل بین گرابه‌های ناهمسانگرد باعث کاهش قدرت گردابه‌ها می‌گردد، اما الزاماً باعث کاهش کارایی انتقال حرارت نمی‌شود. ناحیه جریان مشترک تشکیل شده در بین گردابه‌های ناهمسانگرد باعث بهبود افزایش انتقال حرارت می‌شود. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که یک آرایش بهینه برای فاصله عرضی مولدهای گردابه وجود دارد که منجر به دستیابی بهترین کارایی انتقال حرارت می‌شود.

در مطالعه حاضر تأثیر مولد گردابه طولی در جریان عبوری از یک کانال مستطیلی به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار است. به منظور بررسی تاثیر شکل مولد گردابه طولی، از سه نوع جفت مولد گردابه مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی در شرایط سوراخ‌دار و بدون سوراخ استفاده شده و تاثیر آنها بر مشخصات جریان سیال و انتقال حرارت در زوایای حمله مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین اثرات تعداد سوراخ بر نسبت ضریب اصطکاک، نسبت عدد ناسلت و عملکرد کلی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲- تنظیمات آزمایشگاهی

سیستم راه‌اندازی شده برای انجام آزمایش‌های مربوط به بررسی مشخصه‌های میدان جریان و انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری در جریان هوای داخل کانال در حضور مولد گردابه، در شکل ۱ و طرحواره این سیستم در شکل ۲ نشان داده شده است. در این سیستم دستگاه‌ها و ابزارهای زیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

۱. سکوی اصلی شامل تأسیسات کانال کشی
۲. فن مکنده جهت ایجاد جریان‌های متناسب با هدف آزمایش
۳. منطقه مطالعاتی

که آرایش قرارگیری با گام ۷ برابر ارتفاع کانال، بهترین عملکرد را در افزایش انتقال حرارت خواهد داشت و این افزایش در اعداد رینولدز بالاتر به مراتب محسوس‌تر خواهد بود. بیسواس و چاتوپوهیا [۶] به‌صورت عددی معادلات ناویراستوکس و انرژی را برای یک کانال مستطیلی دارای مولد گردابه مثلثی بررسی کردند و مشاهده نمودند که این نوع مولدهای گردابه به شدت بر روی عملکرد حرارتی اثر می‌گذارد و انتقال حرارت در زاویه حمله  $20^\circ$  و فاصله محوری بی‌بعد ۴ از ورودی، حدود ۴۵٪ افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که میزان این بهبود انتقال حرارت در زاویه حمله  $30^\circ$  حدود ۲۶٪ می‌باشد. سوهانکار [۷] با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ<sup>۱</sup> و شبیه‌سازی عددی مستقیم<sup>۲</sup>، جریان را در یک کانال با حضور دو چین زاویه‌دار به شکل مولد گردابه ۷ شکل در دو زاویه حمله مختلف  $10^\circ$  و  $30^\circ$  در محدوده اعداد رینولدز ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ شبیه‌سازی نمود. او دریافت که شدت گردابه‌ها با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد و بیشترین عدد ناسلت بر روی دیواره پایینی کانال در پایین دست جریان در پشت مولد گردابه رخ می‌دهد. همچنین گزارش نمود که به‌کارگیری مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با شبکه‌بندی نسبتاً ریز می‌تواند در مقایسه با روش شبیه‌سازی عددی مستقیم با شبکه بسیار ریز نتایج مشابهی را با هزینه زمان محاسباتی کمتر ارائه دهد. مین و همکاران [۸] اثر یک جفت مولد گردابه به شکل بالچه مستطیلی اصلاح شده با اضافه کردن سطح مستطیلی بر روی آن در محدوده اعداد رینولدز ۵۰۰ تا ۱۷۵۰۰ با زوایای حمله مختلف را بررسی نمودند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که مولد گردابه به شکل بالچه مستطیلی اصلاح شده آشفتگی بیشتری را نسبت به حالت به‌کارگیری بالچه مستطیلی ساده به دنبال دارد و همچنین اضافه کردن سطح اصلاح شده به صفحه خارجی مولد گردابه مستطیلی می‌تواند انتقال حرارت و افت فشار را به میزان بیشتری نسبت به حالت اضافه شدن به صفحه داخلی افزایش دهد. آن‌ها دلیل افزایش انتقال حرارت در حالت به‌کارگیری مولد گردابه اصلاح شده را ایجاد گردابه‌های دارای سطح مقطع بزرگ‌تر با هسته‌های نزدیک‌تر به دیواره پایینی بیان نمودند. عبداللهی و شمس [۹] اشکال و زوایای حمله مختلف را برای مولد گردابه در جریان آرام مورد بررسی قرار دادند و با استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک چند هدفه، زاویه حمله  $15^\circ$  و مولد گردابه دوزنقه‌ای شکل با زاویه شیب  $7^\circ$  را برای مولد گردابه به عنوان حالت بهینه گزارش نمودند. ژو و فنگ [۱۰] به طور تجربی تأثیر حضور سوراخ ایجاد شده بر روی عملکرد مولدهای گردابه مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای را در دو حالت ساده و انحنادار بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که مولد گردابه انحنادار در هر دو جریان آرام و آشفته انتقال حرارت بهتری ایجاد می‌کند، همچنین افت فشار کمتری نیز دارد. به‌طور کلی، مولد گردابه مثلثی انحنادار بهترین عملکرد حرارتی را نشان می‌دهد و پس از آن مولد گردابه دوزنقه‌ای انحنادار ( $\alpha=20^\circ$ ) است، در حالی که مولد گردابه مستطیلی ساده به دلیل افت فشار بالا دارای کمترین عملکرد حرارتی

- 1 Large eddy simulation (LES)
- 2 Direct numerical simulation (DNS)

۴. تجهیزات اندازه‌گیری دقیق سرعت جریان  
 ۵. تجهیزات اندازه‌گیری دقیق افت فشار  
 ۶. تجهیزات اندازه‌گیری دقیق دما  
 ۷. دستگاه مولد ولتاژ پایین و سایر تجهیزات لازم برای تولید شار حرارتی ثابت در منبع حرارتی



Fig. 1. Schematic sketch of the test section

شکل ۱: سکوی اصلی آزمایش

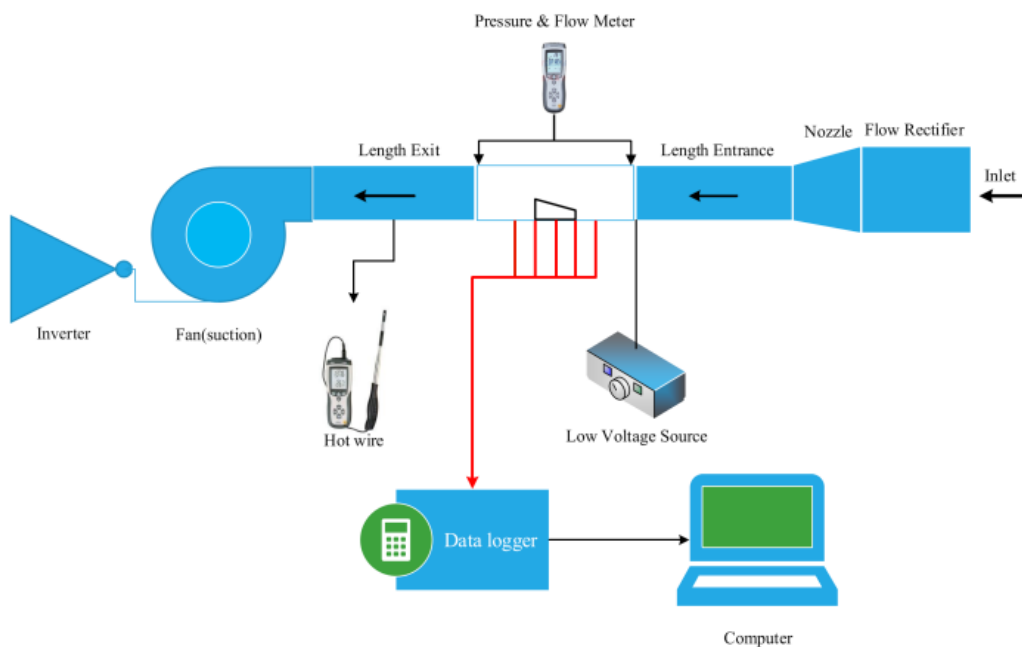


Fig. 2. Schematic platform for experimental experiments

شکل ۲: طرح‌واره سکوی مطالعاتی جهت انجام آزمایش‌های تجربی

جریان<sup>۲</sup> می‌باشد. نمایی شماتیک از بالچه‌های دوزنقه‌ای سوراخ‌دار در شکل ۵ مشاهده می‌شود. در شکل ۶ انواع حالت‌های مولد گردابه دوزنقه‌ای ساده و سوراخ‌دار نشان داده شده است. فاصله قسمت‌های جلویی بالچه‌ها در حالت قرارگیری پایین جریان ۰/۰۲ متر می‌باشد. در ورودی به میزان ۱۰ برابر ارتفاع کانال، به منطقه مطالعاتی اضافه شده است تا از توسعه یافتگی جریان و عدم اغتشاشات در ورودی جریان اطمینان حاصل شود و همچنین در ناحیه خروجی، به منظور این که خروجی جریان تحت تأثیر گردابه‌های ایجاد شده پشت مولد گردابه قرار نگیرد، ناحیه‌ای به طول ۲۰ برابر ارتفاع کانال به انتهای منطقه مطالعاتی اضافه شده است. نمایی از جاگذاری حس‌گرهای حرارتی و نحوه قرارگیری مولد گردابه به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

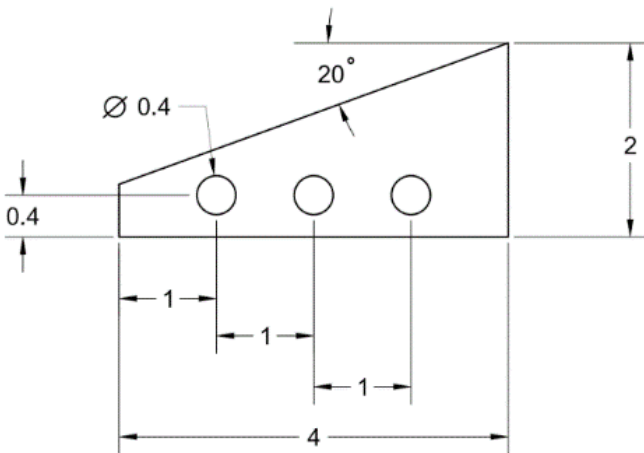


Fig. 5. A schematic view of the perforated vortex generator and the dimensions used in this study (longitudinal dimensions, cm)

شکل ۵: نمایی شماتیک از مولد گردابه سوراخ‌دار و ابعاد استفاده شده در مطالعه حاضر (ابعاد طولی بر حسب سانتی‌متر)

نحوه نصب حس‌گرها بدین ترتیب است که تعداد ۲۱ حس‌گر بر روی بدنه اصلی منطقه مطالعاتی با فاصله‌های یکسان و دو حس‌گر نیز در قسمت ورودی و خروجی جهت اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی سیال عامل نصب شده است. با توجه به لزوم اندازه‌گیری دقیق دما در چندین نقطه منطقه مطالعاتی، از حس‌گرهای دیجیتالی اندازه‌گیری دما به نام حس‌گرهای اسمارت اس ام تی<sup>۱</sup> ۳۰-۱۶۰ با دقت ۰/۷ درجه سانتیگراد استفاده شده که با تهیه یک صفحه الکترونیکی، دماهای اندازه‌گیری شده از طریق رابط به کامپیوتر منتقل می‌شود. صفحه الکترونیکی تهیه شده قابلیت اندازه‌گیری همزمان دما در دو نقطه ورودی و خروجی منطقه مطالعاتی را نیز دارد که همزمان با دماهای دیواره به کامپیوتر منتقل می‌کند. نمایی از حس‌گر اندازه‌گیری دما در شکل ۳ نشان داده شده است. منبع مولد ولتاژ پایین به منظور تولید شار حرارتی یکنواخت، شامل یک ترانس می‌باشد که توانایی تولید حداکثر ۴۰۰ آمپر جریان با ولتاژ ۱ ولت را دارد. به منظور ایجاد توان‌های مختلف، ترانس به یک دستگاه تغییر دهنده متصل است که قابلیت تغییر ولتاژ ورودی به ترانس را دارا بوده و در اثر این کار جریان تولید شده در ترانس تغییر می‌کند و در نتیجه قابلیت تنظیم برای ایجاد شارهای مختلف حرارتی را دارا می‌باشد. در شکل ۴ منبع مولد ولتاژ پایین نشان داده شده است.



Fig. 3. Temperature sensor

شکل ۳: حس‌گر اندازه‌گیری دما

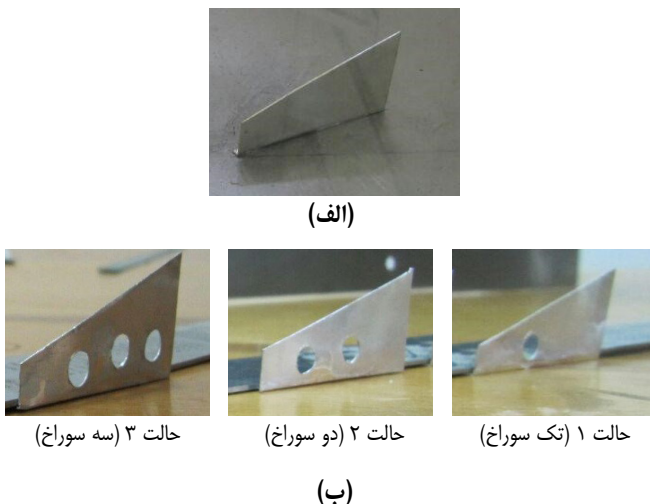


Fig. 6. Vortex generator types: a) simple trapezoidal; b) perforated trapezoidal  
شکل ۶: انواع مولد گردابه: الف) دوزنقه‌ای ساده ب) دوزنقه‌ای سوراخ‌دار



Fig. 4. Source of low voltage generator

شکل ۴: منبع مولد ولتاژ پایین

هندسه تحقیق حاضر متشکل از یک کانال مسطح به عنوان المانی از یک مبدل حرارتی و یک جفت مولد گردابه با آرایش قرارگیری پایین



همچنین عدد رینولدز به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad (2)$$

که در آن  $U$  و  $D_h$  به ترتیب سرعت متوسط ورودی و قطر هیدرولیکی کانال می‌باشند.

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$h_{c,m} = \frac{Q}{A_p \Delta T_m} \quad (3)$$

که  $Q$  نرخ انتقال حرارت در سمت هوا است که از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.  $A_p$  مساحت سطح انتقال حرارت و  $\Delta T_m$  میانگین اختلاف دمای بین سطح انتقال حرارت و هوا است.  $\Delta T_m$  به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta T_m = t_{w,m} - t_{a,m} \quad (4)$$

که در آن  $t_{w,m}$  متوسط دمای سطح انتقال حرارت است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$t_{w,m} = \frac{\sum_{i=1}^{i=21} t_{w,i} A_i}{A_p} \quad (5)$$

که زیروند  $i$  مشخص‌کننده المان انتقال حرارتی کانال هوا است.  $t_{a,m}$  متوسط دمای هوا در کانال است که توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$t_{a,m} = \frac{t_{a,out} + t_{a,in}}{2} \quad (6)$$

عدد ناسلت متوسط نیز از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$Nu_m = \frac{h_{c,m} D}{\lambda} \quad (7)$$

همچنین برای ضریب اصطکاک داریم:

$$f = \frac{2\Delta p D}{\rho U^2 L} \quad (8)$$

قبل از ارائه نتایج، ابتدا نتایج تحلیل تجربی حاضر در یک کانال مسطح با رابطه تجربی دیتوس-بولتر [۸] مقایسه شده است. رابطه تجربی دیتوس-بولتر در محدوده جریان آشفته در کانال مسطح برای عدد ناسلت متوسط به صورت زیر بیان می‌شود:



Fig. 7. Insert thermal sensors

شکل ۷: جاگذاری حس گرهای حرارتی

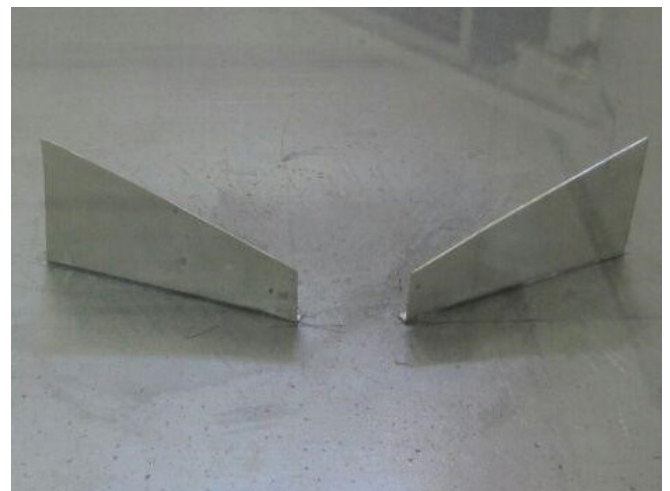


Fig. 8. The placement of a simple trapezoidal vortex generator pair

شکل ۸: نحوه قرارگیری جفت مولد گردابه دوزنقه‌ای ساده

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط از روش پیشنهادی چائو [۱۲] استفاده شده است. در این روش مقدار میانگین دمای توده‌ای ورودی و خروجی هوا برای محاسبه خواص هوا مانند چگالی و لزجت به کار رفته است. نرخ انتقال حرارت در سمت هوا برابر است با:

$$Q = C_p \rho U A_c (t_{a,out} - t_{a,in}) \quad (9)$$

$A_c$  مساحت سطح مقطع کانال هوا و  $t_{a,out}$  و  $t_{a,in}$  به ترتیب دمای متوسط مقطعی هوا در ورودی و خروجی کانال است. همچنین  $Q$  به عنوان نرخ انتقال حرارت، با توان الکتریکی مصرف‌شده جهت گرمایش صفحات کانال مقایسه شده که نتیجه نشان دهنده اختلاف زیر ۸٪ است که بیانگر این موضوع است که عایق به خوبی انجام شده و تشعشع نیز قابل صرف نظر است.

به گونه‌ای که با افزایش این زاویه، شدت گردابه‌های عرضی بیشتر و از شدت گردابه‌های طولی کاسته می‌شود. همچنین حضور مولد گردابه منجر به تشکیل گردابه نعل اسبی شده که در شکل ۱۰ با شماره‌های ۳ و ۴ مشخص شده است.

#### ۴- تأثیر هندسه و زاویه قرارگیری مولد گردابه

به منظور بررسی تأثیر هندسه مولد گردابه، از سه نوع مولد گردابه مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی استفاده شده است. نسبت ارتفاع به طول مولدها یکسان بوده و برابر ۰/۵ می‌باشد. همچنین زاویه حمله ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ برای مطالعه حاضر در نظر گرفته شده و تأثیر زاویه حمله و نوع مولد گردابه بر اساس نسبت ضریب اصطکاک، نسبت عدد ناسلت و ضریب عملکرد کلی کانال نسبت به کانال مسطح بیان خواهد شد. این نسبت‌ها به ترتیب بیان‌گر مقاومت جریان سیال، افزایش انتقال حرارت و عملکرد ترموهیدرودینامیکی جفت مولد گردابه می‌باشند.

همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود جفت مولد گردابه مستطیلی به دلیل ایجاد بیشینه مساحت در برابر جریان سیال دارای بیشترین نسبت ضریب اصطکاک می‌باشد و پس از آن به ترتیب جفت مولد گردابه دوزنقه‌ای و مثلثی است. همچنین قابل مشاهده است که با افزایش زاویه حمله، نسبت ضریب اصطکاک به دلیل ایجاد بیشینه مساحت در برابر جریان سیال افزایش یافته است. با توجه به نتایج حاضر، ضریب اصطکاک در حضور جفت مولد گردابه مستطیلی با زاویه حمله ۶۰ درجه، ۷۰ تا ۱۳۰ درصد و در زوایای حمله ۳۰، ۴۵ و ۱۵ درجه نیز در محدوده اعداد رینولدز به ترتیب ۵۰ تا ۱۲۰ درصد، ۴۰ تا ۸۰ درصد و ۱۰ تا ۵۰ درصد نسبت به صفحه تخت افزایش یافته است.

$$Nu_m = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (9)$$

همچنین به منظور اعتبارسنجی ضریب اصطکاک از رابطه بلازیوس بهره گرفته شده است:

$$f = 0.3164 Re^{-1/25} \quad (10)$$

بررسی انجام شده میزان انحراف بیشینه ۳٪ را برای ضریب اصطکاک و انحراف بیشینه ۴٪ برای عدد ناسلت متوسط را نشان می‌دهد. نتایج این بررسی در شکل ۹ نشان داده شده است.

#### ۳- بررسی نتایج

همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، حضور مولد گردابه باعث ایجاد جریان ثانویه شده و در نتیجه دو گردابه اصلی (شماره ۱) ناهمسانگرد در پشت بالچه‌ها ایجاد می‌شود که جهت چرخش گردابه سمت چپ به صورت ساعتگرد و گردابه سمت راست پادساعتگرد می‌باشد. این دو گردابه جریان پایین‌شو را در بین خود و جریان بالا شو را در قسمت خارجی ایجاد می‌کنند. جریان ثانویه با گذر به سمت انتهایی کانال به دلیل دور شدن از چشمه ایجاد گردابه و اتلاف ویسکوز به

تدریج ضعیف‌تر و فاصله بین هسته‌های دو گردابه ناهمسانگرد افزایش می‌یابد. در ناحیه پشت و در مجاورت بالچه، گردابه‌های عرضی نیز ایجاد می‌شود که در شکل ۱۰ (شماره ۲) نمایش داده شده است. میزان شدت ایجاد گردابه‌های عرضی و طولی، به زاویه حمله مولد گردابه بستگی دارد

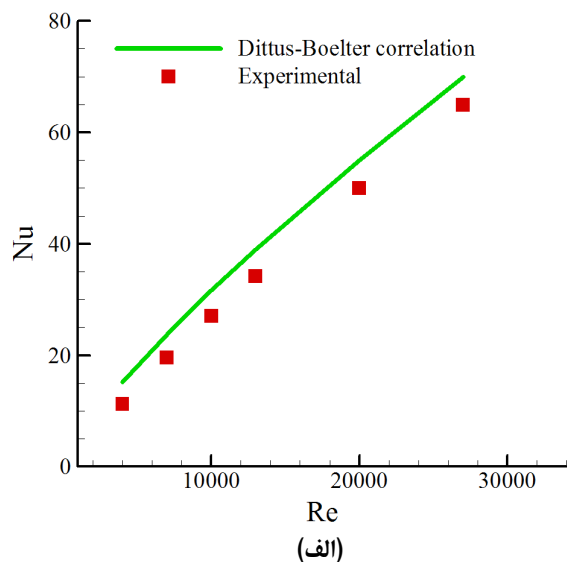
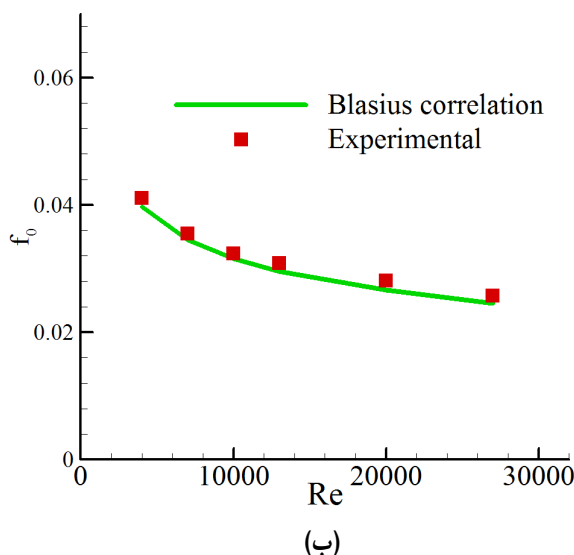


Fig. 9. The comparison of predicted results with empirical correlations: a) the average Nusselt number of smooth channel obtained from the present study with the Dittus-Boelter correlation; b) Comparison of smooth channel friction coefficient obtained from the experimental results with the Blasius correlation

شکل ۹: مقایسه نتایج حاضر با روابط تجربی الف) عدد ناسلت متوسط کانال مسطح حاصل از مطالعه حاضر با رابطه تجربی دیتوس-بولتر ب) مقایسه ضریب اصطکاک کانال مسطح حاصل از نتایج تجربی با رابطه بلازیوس

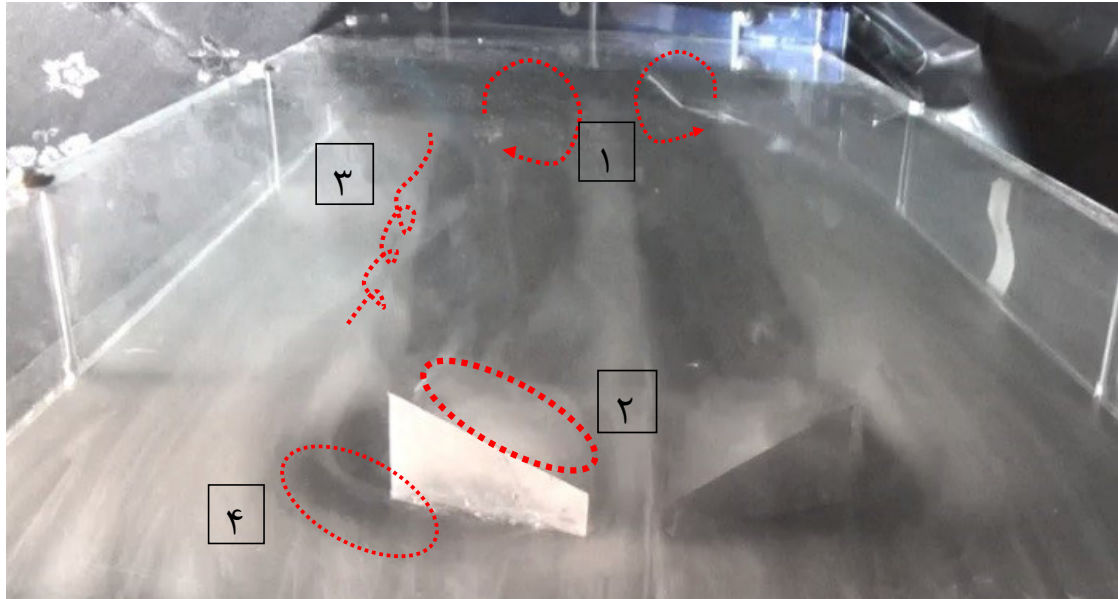


Fig. 10. Flow detection in the presence of vortex generator (formation region of the horseshoe core, transverse and main vortices in  $Re_D=10000$ )  
 شکل ۱۰: آشکارسازی جریان در حضور مولد گردابه (ناحیه شکل‌گیری هسته گردابه‌های نعل اسبی، عرضی و اصلی در  $Re_D=10000$ )

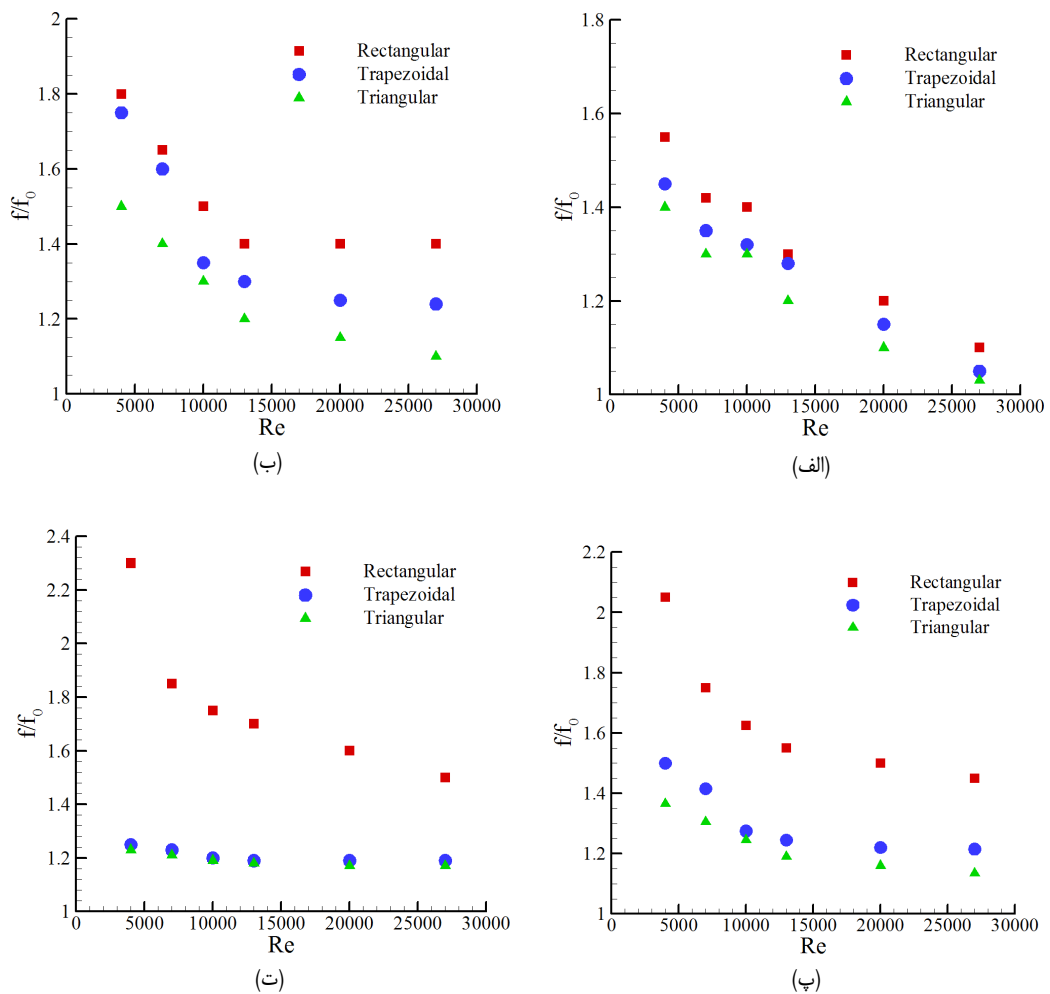
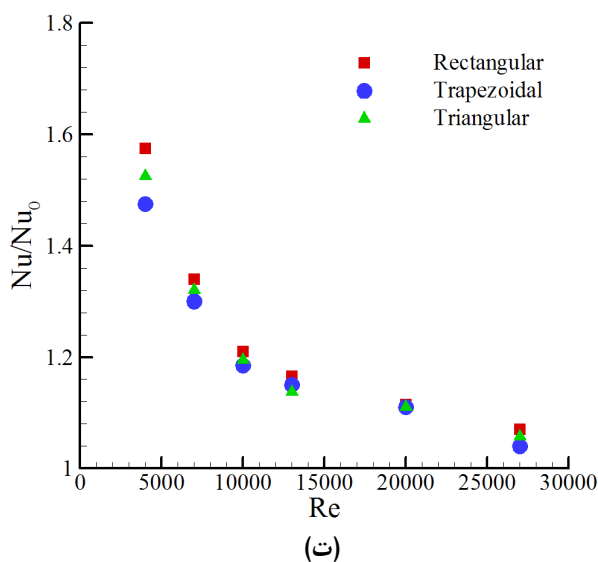
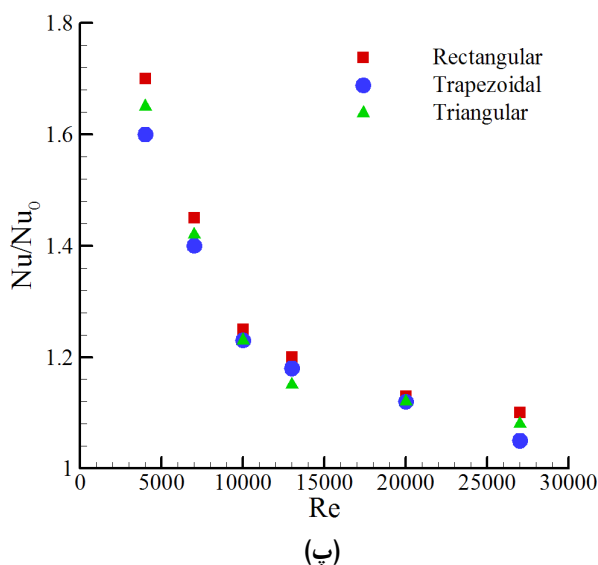


Fig. 11. The variation of the coefficient of friction in the presence of vortex generator at different attack angles: a)  $\alpha=15^\circ$ ; b)  $\alpha=30^\circ$ ; c)  $\alpha=45^\circ$ ; d)  $\alpha=60^\circ$   
 شکل ۱۱: تغییرات نسبت ضریب اصطکاک در حضور مولد گردابه در زوایای حمله مختلف الف)  $\alpha=15^\circ$  ب)  $\alpha=30^\circ$  پ)  $\alpha=45^\circ$  ت)  $\alpha=60^\circ$



در شکل ۱۲ تأثیر شکل مولد گردابه و زاویه حمله بر روی افزایش انتقال حرارت در اعداد رینولدز مختلف قابل مشاهده می‌باشد. همان‌گونه که مشخص است، در تمامی زوایای حمله، جفت مولد گردابه مستطیلی دارای بهترین عملکرد حرارتی می‌باشد و پس از آن نیز به ترتیب جفت مولدهای مثلثی و دوزنقه‌ای هستند. لازم به ذکر است که در زاویه ۴۵ درجه در تمامی مولد گردابه‌ها نسبت ضریب انتقال حرارت در مقایسه با زاویه ۶۰ درجه افزایش یافته است. با توجه به نتایج حاضر، عدد ناسلت در حضور جفت مولد گردابه مستطیلی با زاویه حمله ۶۰ درجه، ۵ تا ۵۵ درصد و در زوایای حمله ۴۵، ۳۰ و ۱۵ درجه نیز در محدوده اعداد رینولدز به ترتیب ۱۰ تا ۷۰ درصد، ۵ تا ۴۵ درصد و ۱۲ تا ۴۰ درصد افزایش یافته است.

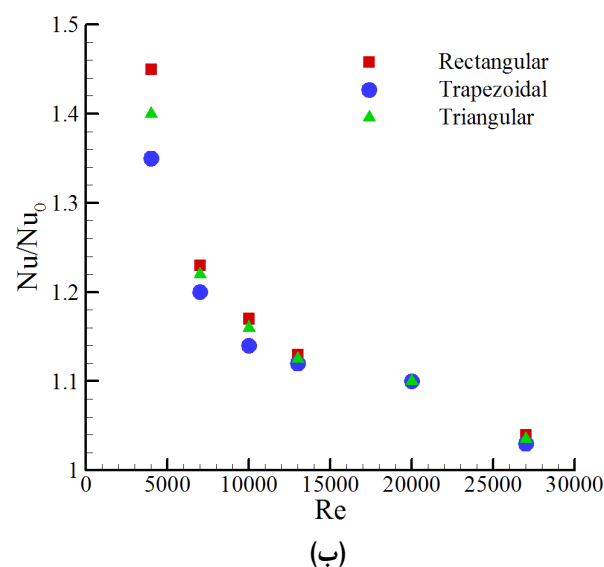
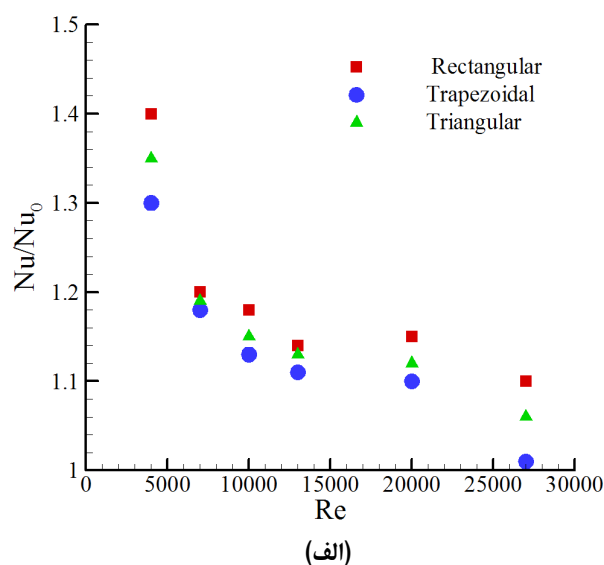


Fig. 12. The variation of the Nusselt number in the presence of vortex generator at different attack angles: a)  $\alpha=15$ ; b)  $\alpha=30$ ; c)  $\alpha=45$ ; d)  $\alpha=60$

شکل ۱۲: تغییرات نسبت عدد ناسلت در حضور مولد گردابه در زاویه حمله‌های مختلف  
الف)  $\alpha=15$  ب)  $\alpha=30$  پ)  $\alpha=45$  ت)  $\alpha=60$

در شکل ۱۳ عملکرد کلی برای جفت مولدهای گردابه در اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در تمامی اعداد رینولدز مورد نظر، جفت مولد مثلثی به غیر از زاویه ۴۵ درجه دارای بهترین عملکرد کلی می‌باشد. همچنین در بسیاری از اعداد رینولدز، جفت مولد دوزنقه‌ای نسبت به جفت مولد مستطیلی دارای عملکرد بهتری می‌باشد.



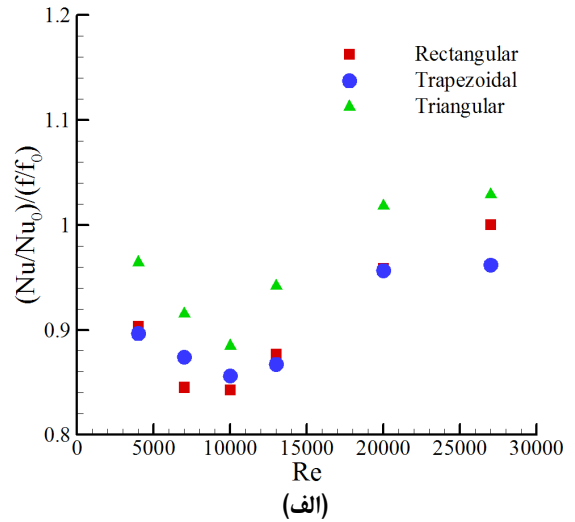
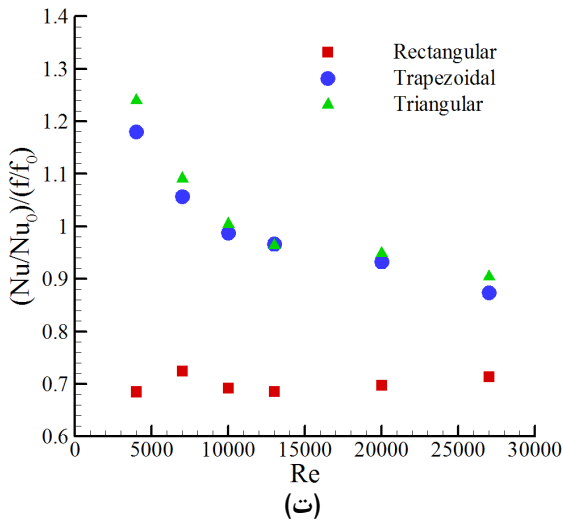
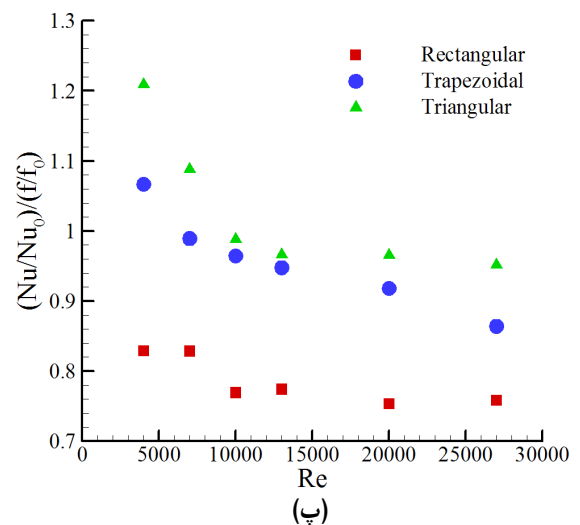
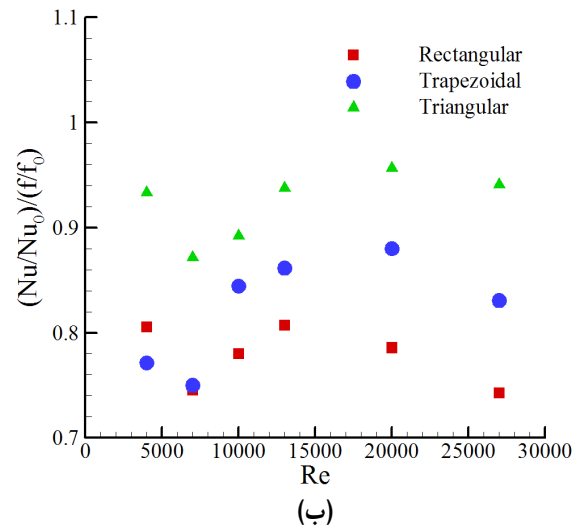


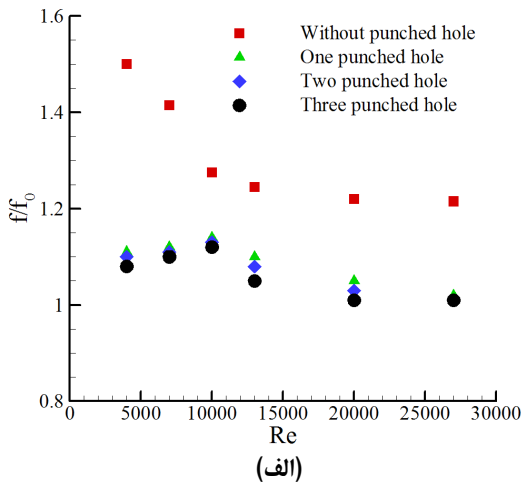
Fig. 13. The variation of the overall performance coefficient in the presence of vortex generator at different attack angles: a)  $\alpha=15$ ; b)  $\alpha=30$ ; c)  $\alpha=45$ ; d)  $\alpha=60$

شکل ۱۳: تغییرات ضریب عملکرد کلی در حضور مولد گردابه در زاویه حمله‌های مختلف  
 (الف)  $\alpha=15$  (ب)  $\alpha=30$  (پ)  $\alpha=45$  (ت)  $\alpha=60$

#### ۵- تأثیر مولد گردابه سوراخ‌دار

همان‌گونه که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود با ایجاد سوراخ در مولد گردابه از مقاومت هوا در برابر جریان سیال کاسته شده و گردابه‌های عرضی تقریباً محو شده و این عمل منجر به کاهش افت فشار می‌شود. همچنین با سوراخ کردن مولد گردابه اگرچه قدرت گردابه‌های نعلی و گردابه طولی کاهش یافته اما به دلیل تشکیل گردابه‌های ریزتر و برهم‌زدگی جریان در پشت مولد گردابه، انتقال حرارت به میزان اندکی افزایش می‌یابد.

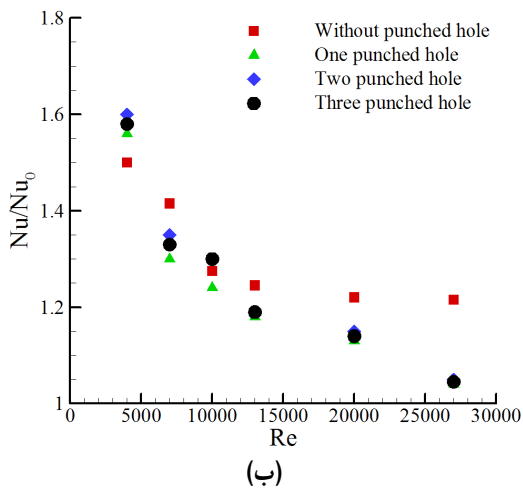




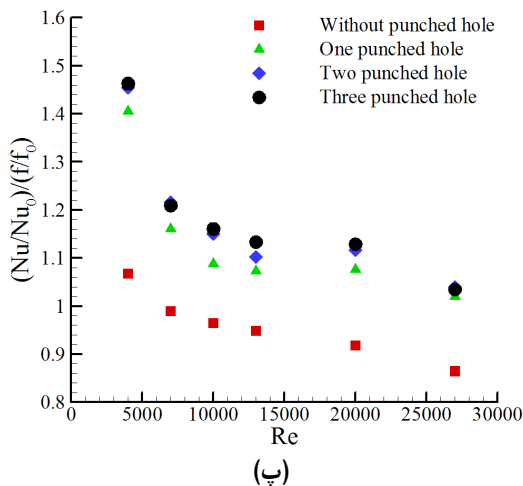
(ب)

Fig. 14. Fluid flow detection in presence of the vortex generator: a) simple trapezoidal; b) perforated trapezoidal

شکل ۱۴: آنسکار سازی جریان سیال در مولد گردابه الف) دوزنقه‌ای ساده (ب) دوزنقه‌ای سوراخ‌دار



(ب)



(پ)

Fig. 15. a) Comparison of the friction coefficient ratio for simple and perforated trapezoidal vortex generators,  $\alpha=45$ ; b) comparison of the average Nusselt number for simple and perforated trapezoidal vortex generators ; c) comparison of overall performance coefficient for simple and perforated trapezoidal vortex generators

شکل ۱۵: الف) مقایسه نسبت ضریب اصطکاک برای دو مولد گردابه دوزنقه‌ای ساده و سوراخ‌دار،  $\alpha=45$  (ب) مقایسه نسبت عدد ناسلت متوسط برای دو مولد گردابه دوزنقه‌ای ساده و سوراخ‌دار (پ) مقایسه ضریب عملکرد کلی برای دو مولد گردابه دوزنقه‌ای ساده و سوراخ‌دار

به منظور بررسی میزان افزایش انتقال حرارت و افت فشار حاصل از به کارگیری مولدهای گردابه ساده و سوراخ‌دار دوزنقه‌ای، نسبت عدد ناسلت، نسبت ضریب اصطکاک و ضریب عملکرد کلی این نوع مولدها در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود، استفاده از مولد گردابه‌ای ساده به سبب ایجاد گردابه‌هایی در پایین دست جریان موجب افزایش انتقال حرارت در ناحیه دارای شار حرارتی کانال می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که استفاده از مولدهای گردابه‌ای با تعداد سوراخ مختلف به سبب عبور هوا از داخل سوراخ و کاهش مقاومت در برابر هوا، در مقایسه با گردابه‌های مولد گردابه‌ای بدون سوراخ افت فشار بسیار کمتری دارند که با افزایش این سوراخ‌ها افت فشار به مراتب کمتر نیز می‌شود. این در حالی است که با افزایش تعداد سوراخ‌ها انتقال حرارت به مقدار ناچیزی افزایش می‌یابد. البته ذکر این نکته ضروری است که در حالتی که سه سوراخ در مولد گردابه ایجاد شده است انتقال حرارت به دلیل کاهش اثر مولد بر جریان نسبت به حالتی که مولد دارای دو سوراخ است، کمتر شده است. همچنین مشاهده می‌شود با سوراخ‌دار کردن مولد و افزایش تعداد آن ضریب عملکرد کلی افزایش یافته است و با افزایش عدد رینولدز به دلیل کاهش اثر مولد گردابه این ضریب کاهش می‌یابد. طبق نتایج به دست آمده وجود دو سوراخ در مولد گردابه دوزنقه‌ای نسبت ضریب اصطکاک را ۱۲ تا ۲۷ درصد کاهش می‌دهد و نسبت عدد ناسلت و ضریب عملکرد کلی را به ترتیب ۲ تا ۷ درصد و ۱۵ تا ۳۵ درصد افزایش می‌دهد.

برای مشاهده تأثیر سوراخ‌ها بر روی انتقال حرارت و افت فشار مولدهای گردابه مستطیلی نسبت عدد ناسلت، نسبت ضریب اصطکاک و ضریب عملکرد کلی این مولدها در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود مشابه مولد دوزنقه‌ای، با افزایش تعداد سوراخ‌ها ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. برای تحلیل این موضوع باید به عوامل ایجاد

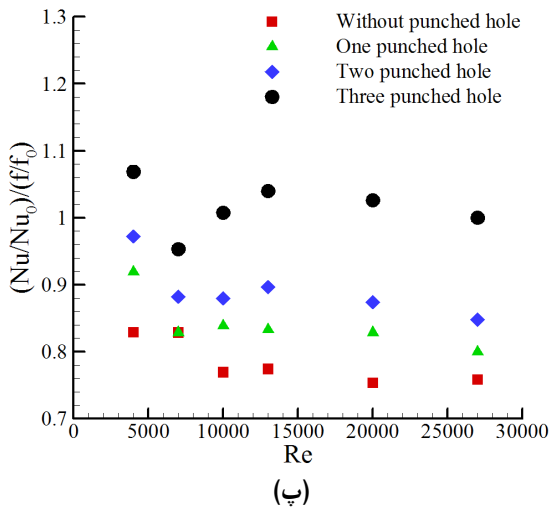
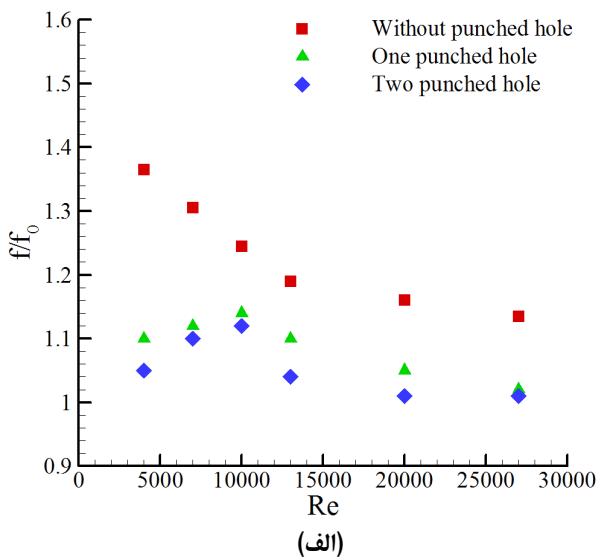


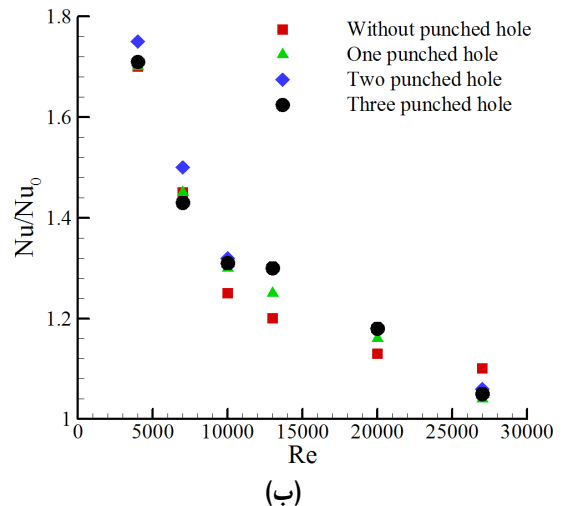
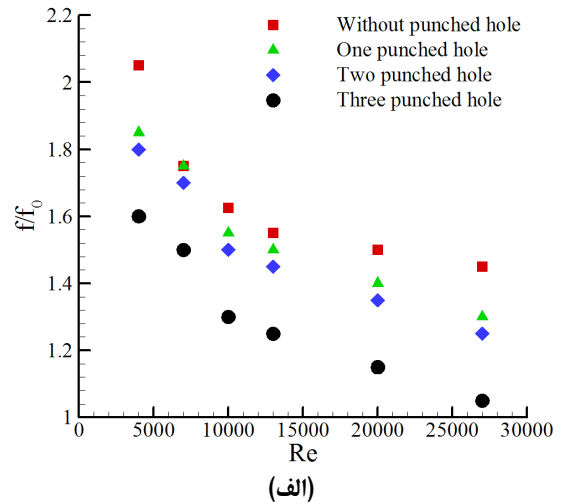
Fig. 16. a) Comparison of the friction coefficient ratio for simple and perforated rectangular vortex generators,  $\alpha=45$ ; b) comparison of the average Nusselt ratio for simple and perforated rectangular vortex generators; c) comparison of the overall performance coefficient for two simple and perforated rectangular vortex generators

شکل ۱۶: الف) مقایسه نسبت ضریب اصطکاک برای دو مولد گردابه مستطیلی ساده و سوراخ‌دار،  $\alpha=45$  (ب) مقایسه نسبت عدد ناسلت متوسط برای دو مولد گردابه مستطیلی ساده و سوراخ‌دار (پ) مقایسه ضریب عملکرد کلی برای دو مولد گردابه مستطیلی ساده و سوراخ‌دار

در شکل ۱۷ نسبت عدد ناسلت، نسبت ضریب اصطکاک و ضریب عملکرد کلی برای مولد گردابه مثلثی نشان داده شده است. مشابه با مولدهای گردابه مستطیلی و دوزنقه‌ای با افزایش تعداد سوراخ‌ها ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. مطابق نتایج به‌دست آمده در مولد گردابه مثلثی با ایجاد سوراخ، نسبت ضریب اصطکاک ۱۲ تا ۲۵ درصد کاهش می‌یابد و نسبت عدد ناسلت و ضریب عملکرد کلی به ترتیب ۳ تا ۹ درصد و ۱۶ تا ۲۰ درصد افزایش می‌یابد.



اصطکاک توجه نمود. همان‌گونه که می‌دانیم اصطکاک در این جریان ناشی از گردان سرعت روی سطوح مجاور جریان است و هر چه مساحت این سطوح بیشتر باشد میزان اصطکاک و در نتیجه ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. بنابراین با ایجاد سوراخ به دلیل کاهش مساحت سطح ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد و هر چه تعداد این سوراخ‌ها بیشتر باشد کاهش ضریب اصطکاک نیز بیشتر خواهد بود. با توجه به نتایج آزمایش نسبت ضریب اصطکاک مولد گردابه مستطیلی با سه سوراخ نسبت به مولد گردابه مستطیلی بدون سوراخ ۱۴ تا ۲۸ درصد کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که انتقال حرارت در مولد گردابه مستطیلی سوراخ‌دار نسبت به مولد گردابه مستطیلی ساده بیش‌تر است. با توجه به آنچه گفته شد در مولدهای گردابه مستطیلی با افزایش تعداد سوراخ‌ها انتقال حرارت افزایش و ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد، بنابراین با ایجاد سوراخ و افزایش تعداد سوراخ در مولدهای گردابه مستطیلی ضریب عملکرد کلی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد، به‌طوری که با ایجاد ۳ سوراخ در مولد گردابه مستطیلی ۱۴ تا ۳۵ درصد افزایش ضریب عملکرد کلی مشاهده می‌گردد.



را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- در تمامی اعداد رینولدز، حالت جفت مولد گردابه مستطیلی بدون سوراخ، دارای بیشترین نسبت ضریب اصطکاک می‌باشد که با افزایش زاویه حمله، نسبت ضریب اصطکاک به دلیل ایجاد بیشینه مساحت در برابر جریان سیال افزایش می‌یابد.
- در بازه اعداد رینولدز بررسی شده، در زاویه ۴۵ درجه در تمامی مولد گردابه‌ها نسبت عدد ناسلت، در مقایسه با زاویه ۶۰ درجه بیشتر است.
- در تمام بازه اعداد رینولدز مورد نظر، در حالت بدون سوراخ، جفت مولد مثلی دارای بهترین عملکرد کلی می‌باشد.
- همچنین جانمایی سوراخ و افزایش تعداد آن، در مولدهای گردابه‌ای مستطیلی، ذوزنقه‌ای و مثلی منجر به کاهش ضریب اصطکاک و افزایش انتقال حرارت و همچنین افزایش ضریب عملکرد کلی می‌شود. اما در حالت مولد گردابه‌ای ذوزنقه‌ای در حالت دو سوراخ انتقال حرارت در مقایسه با حالت سه سوراخ بیشتر افزایش یافته است.

### منابع

- [1] S.J.I.J.o.H. Caliskan, M. Transfer, Experimental investigation of heat transfer in a channel with new winglet-type vortex generators, 78 (2014) 604-614.
- [2] T. Johnson, P.J.J.o.H.T. Joubert, The influence of vortex generators on the drag and heat transfer from a circular cylinder normal to an airstream, 91(1) (1969) 91-99.
- [3] R. Mehta, P.J.J.o.F.M. Bradshaw, Longitudinal vortices imbedded in turbulent boundary layers Part 2. Vortex pair with 'common flow' upwards, 188 (1988) 529-546.
- [4] I. Shabaka, R. Mehta, P.J.J.o.F.M. Bradshaw, Longitudinal vortices imbedded in turbulent boundary layers. Part 1. Single vortex, 155 (1985) 37-57.
- [5] S. Tiggelbeck, N. Mitra, M.J.E.T. Fiebig, F. Science, Flow structure and heat transfer in a channel with multiple longitudinal vortex generators, 5(4) (1992) 425-436.
- [6] G. Biswas, H.J.I.J.o.H. Chattopadhyay, M. Transfer, Heat transfer in a channel with built-in wing-type vortex generators, 35(4) (1992) 803-814.
- [7] A.J.I.J.o.H. Sohankar, F. Flow, Heat transfer augmentation in a rectangular channel with a vee-shaped vortex generator, 28(2) (2007) 306-317.
- [8] C. Min, C. Qi, E. Wang, L. Tian, Y.J.I.J.o.H. Qin, M. Transfer, Numerical investigation of turbulent flow and heat transfer in a channel with novel longitudinal vortex generators, 55(23-24) (2012) 7268-7277.
- [9] A. Abdollahi, M.J.A.T.E. Shams, Optimization of shape and angle of attack of winglet vortex generator in a

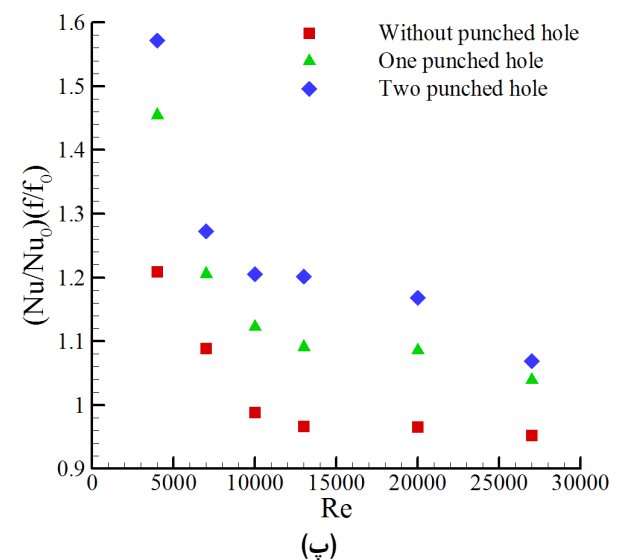
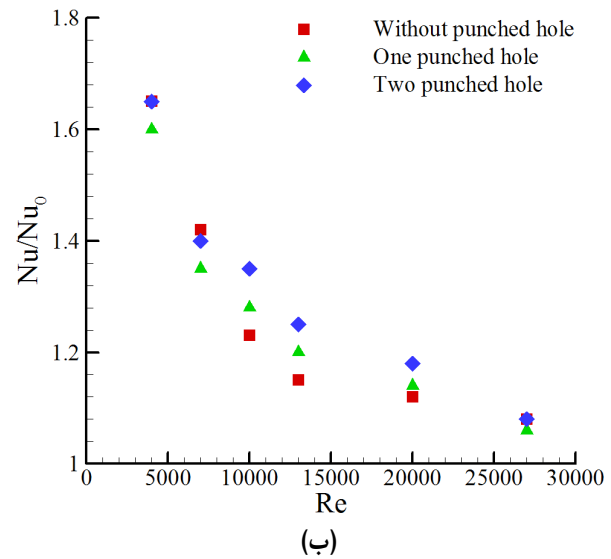


Fig. 17. a) Comparison of the friction coefficient ratio for simple and perforated triangular vortex generators,  $\alpha=45$ ; b) comparison of the average Nusselt ratio for simple and perforated triangular vortex generators; c) comparison of the overall performance coefficient for two simple and perforated triangular vortex generators

شکل ۱۷: الف) مقایسه نسبت ضریب اصطکاک برای دو مولد گردابه مثلی ساده و سوراخ‌دار،  $\alpha=45$  ب) مقایسه نسبت عدد ناسلت متوسط برای دو مولد گردابه مثلی ساده و سوراخ‌دار پ) مقایسه ضریب عملکرد کلی برای دو مولد گردابه مثلی ساده و سوراخ‌دار

### ۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در مطالعه حاضر، با توجه به اهمیت موضوع افزایش انتقال حرارت، روش استفاده از مولدهای گردابه به عنوان روشی غیر فعال برای رسیدن به این هدف مورد بررسی قرار گرفته است. ساختار جریان و انتقال حرارت در کانال مسطح به عنوان المانی از یک میدل حرارتی دارای مولد گردابه با اشکال مختلف، عملکرد مولد گردابه مختلف در زوایای حمله متفاوت در جریان آشفتنه مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌طور کلی نتایج به دست آمده

- [11] K. Song, S. Liu, L.J.I.J.o.H. Wang, M. Transfer, Interaction of counter rotating longitudinal vortices and the effect on fluid flow and heat transfer, 93 (2016) 349-360.
- [12] Y.Z. Cao, Experimental Heat Transfer, National Defense Industry Press, (1998).
- rectangular channel for heat transfer enhancement, 81 (2015) 376-387.
- [10] G. Zhou, Z.J.I.J.o.T.S. Feng, Experimental investigations of heat transfer enhancement by plane and curved winglet type vortex generators with punched holes, 78 (2014) 26-35.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Rosta Abkenar, N. Amanifard, H. Mohhades Deylami, F. Dolati, Experimental Investigation of Flow and Heat Transfer in a Smooth Channel Affected by Vortex Generator with a Punched Hole, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(2) (2018) 271-284.

DOI: 10.22060/mej.2016.770





