



تحلیل تجربی انتقال حرارت جت دایروی برخوردی به سطح مقعر نامتقارن

امیرحسین هادی پور، مهران رجبی زرگرآبادی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۸ بهمن ۱۳۹۵
بازنگری: ۵ خرداد ۱۳۹۶
پذیرش: ۲۵ تیر ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲ مرداد ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

سطح مقعر نامتقارن
جت برخوردی
عدد ناسلت
انتقال حرارت

چکیده: هدف از این تحقیق بررسی تجربی جریان و انتقال حرارت جت برخوردی دایروی به سطح مقعر نامتقارن است. به این منظور از یک سطح نامتقارن استوانه‌ای با دو شعاع انحنای ۸ و ۱۲ سانتی‌متر استفاده شده است. روی سطح مقعر، با استفاده از گرمکن سیلیکونی انعطاف پذیر شار حرارتی ثابت با توان ۲۰۰۰ وات بر متر مربع اعمال شده است. مقادیر دما روی سطح مقعر با استفاده از دوربین مادون قرمز اندازه گیری و ثبت شده است. توزیع عدد ناسلت سطح نامتقارن با مقادیر ناسلت سطوح متقارن با شعاع‌های انحنای ۸ و ۱۲ سانتی‌متر مقایسه شده است. بررسی‌های تجربی انتقال حرارت جت برخوردی به سطح مقعر نامتقارن در سه عدد رینولدز ۲۳۰۰۰، ۳۵۰۰۰ و ۵۰۰۰۰ و سه فاصله نسبی جت از سطح برخورد ۲، ۴ و ۶ انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در سطح مقعر نامقارن، سطح با شعاع انحنای ۸ سانتی‌متر عدد ناسلت بیشتری در مقایسه با سطح با شعاع انحنای ۱۲ سانتی‌متر دارد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در سطح نامتقارن، توزیع عدد ناسلت در راستای انحنای سطح، نامتقارن و در راستای محوری متقارن است. همچنین، با کاهش فاصله جت از سطح برخورد عدد ناسلت در سراسر سطح نامتقارن افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

امروزه بهینه سازی مصرف انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از موثرترین روش‌های ایجاد انتقال حرارت از سطح استفاده از جت‌های برخوردی می‌باشد. از کاربردهای جت برخوردی می‌توان به خنک‌کاری قطعات الکترونیکی، خنک‌کاری پره توربین و دیواره‌ی محفظه‌ی احتراق، فرایند برش و شکل‌دهی فلزات و خشک کردن کاغذ اشاره کرد. اصلی‌ترین کاربرد جت برخوردی به سطوح مقعر، مربوط به خنک‌کاری سطح داخلی لبه حمله پره توربین گاز است. در توربین‌های گاز، با افزایش دمای ورودی توربین راندمان حرارتی سیکل افزایش می‌یابد. این بدان معنی است که نرخ حرارت منتقل شده به پره‌های توربین گاز نیز افزایش خواهد یافت. در این شرایط استفاده از خنک‌کاری برخوردی به منظور حفاظت سطح پره از گازه‌های داغ ضروری به نظر می‌رسد. در این روش جریان جت خروجی یک لایه نازک هیدرودینامیکی و حرارتی بر روی سطح برخورد تشکیل می‌دهد. ایجاد جریان آشفته در مجاورت سطح برخورد، منجر به انتقال حرارت قابل توجه از سطح خواهد شد. بررسی‌های متعدد قبلی نشان می‌دهد که خنک‌کاری جت برخوردی در حالت پایا به عوامل مختلفی چون عرض جت، عدد رینولدز جت، فاصله جت تا سطح برخورد، انحنای سطح، سطح مقطع جت برخوردی، زاویه جت‌برخوردی، تعداد جت و فاصله جت‌ها از هم بستگی دارد.

ایرن و همکاران [۱] به بررسی تجربی جت شیاری برخوردی به سطح

مقعر در اعداد رینولدز مختلف پرداختند. آنها ضمن اثبات تغییرات غیر خطی عدد ناسلت روی سطح مقعر، رابطه تجربی برای متوسط عدد ناسلت ارائه کردند.

چوپ و همکاران [۲] با مطالعه یک ردیف جت برخوردی به سطح مقعر نشان دادند که عدد رینولدز جت موثرترین عامل برای افزایش نرخ انتقال حرارت از سطح مقعر است.

لی و همکاران [۳] توزیع انتقال حرارت یک تک جت برخوردی به صفحه مقعر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که در اعداد رینولدز ۱۱۰۰۰ و ۲۳۰۰۰، مقدار ناسلت در نقطه برخورد هنگامی دارای مقدار بیشینه می‌باشد که فاصله نسبی جت از سطح برخورد (H/d) برابر ۶ باشد. سد و همکاران [۴] پارامترهای آشفته‌گی، جریان متوسط و انتقال حرارت یک ردیف جت دو بعدی و تک جت را با هم مقایسه کردند. آنها در این تحقیق اثر افت نرخ انتقال حرارت را در طول سطح با استفاده از یک ردیف جت تا حدی جبران کردند.

فنون و همکاران [۵] مطالعه تجربی را بر روی یک ردیف جت برخوردی به صفحه تخت و مقعر متقارن انجام دادند. در آزمایش انجام شده تأثیر عدد رینولدز، فاصله جت تا صفحه برخورد، فاصله مرکز جت‌ها و همچنین تأثیر دمای هوای ورودی به جت‌ها بر عدد ناسلت مورد بررسی قرار گرفت. آنها پس از بررسی نمودارهای توزیع ناسلت در دماهای مختلف هوای ورودی به جت، مستقل بودن ناسلت از اختلاف دمای جت و محیط را گزارش کردند.

احمدی و همکاران [۶] به بررسی جریان و انتقال حرارت جت شیاری

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rajabi@semnan.ac.ir

ناسلت جت خنک کننده برخوردی به سطح نامتقارن با نتایج سطوح متقارن مورد مقایسه قرار گرفته است. در پایان تاثیر عدد رینولدز جت و فاصله جت از سطح برخورد بر توزیع ناسلت سطح مقعر مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

شکل ۱ تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد. قسمت های اصلی دستگاه شامل جعبه کنترل، فن فشار بالا، سنسور

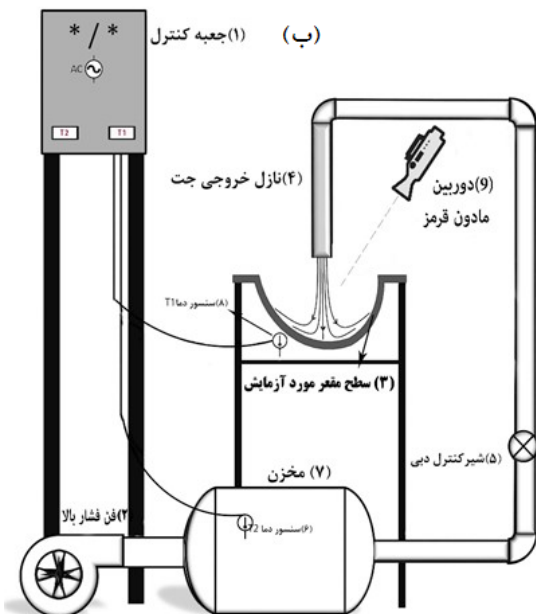


Fig. 1. Experimentally equipment of Impingement cooling (a) main equipment (b) Introducing device components

شکل ۱: تجهیزات آزمایشگاهی خنک کاری برخوردی (الف) تجهیزات واقعی (ب) معرفی اجزای دستگاه

برخوردی به سطح مقعر متقارن در فواصل مختلف جت از سطح برخورد پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان می دهد که انرژی جنبشی آشفته گی در مجارت سطح مقعر تاثیر قابل توجهی بر توزیع عدد ناسلت دارد.

زوکین و همکاران [۷] به بررسی جریان و انتقال حرارت یک ردیف جت برخوردی به سطح مقعر لبه حمله بال هواپیما پرداختند. آنها در تحقیق خود تاثیر عواملی از قبیل تعداد ردیف جت، زاویه برخورد جت و عدد رینولدز جت را بر توزیع عدد ناسلت مورد بررسی قرار دادند.

البیری و تزلیم [۸] مطالعه تجربی و عددی را روی یک ردیف جت در برخورد با صفحه مقعر سهموی شکل انجام دادند. آنها تاثیر وجود جریان های عرضی بر ضریب انتقال حرارت صفحه مقعر را بررسی کردند. نتایج آنها نشان می دهد که وجود جریان عرضی از نوع دایره ای سبب افزایش مقدار ناسلت متوسط بر روی صفحه مقعر می شود.

اگزای و همکاران [۹] تاثیر عمق نسبی (نسبت عمق به قطر صفحه مقعر) بر عدد ناسلت در نقطه برخورد را برای تک جت برخوردی به صفحه مقعر متقارن مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان می دهد که در یک انحنای نسبی ثابت، کاهش عمق نسبی از ۰/۳ به ۰/۱ سبب افزایش عدد ناسلت در نقطه برخورد و کاهش ناسلت متوسط سطح برخورد می شود. در مطالعه تجربی دیگری که توسط لی و همکاران [۱۰] بر تک جت دایره ای در برخورد با صفحه مقعر متقارن استوانه ای انجام شد، نتایج نشان داد که با کاهش فاصله برخورد و افزایش زاویه ای که صفحه مقعر با افق می سازد بیشینه مقدار ناسلت به سمت جریان بالا دستی انتقال یافته، به طوری که در $H/D=2$ با افزایش زاویه صفحه مقعر نسبت به افق از صفر درجه به ۴۰ درجه، حداکثر مقدار ناسلت از نقطه $S/D=0$ به $S/D=0.7$ انتقال یافته است.

مارتین و همکاران [۱۱ و ۱۲] مطالعه تجربی و عددی روی یک ردیف جت برخوردی به صفحه مقعر انجام دادند. نتایج آنها نشان می دهد که با افزایش عدد رینولدز و کاهش فاصله سطح تا مرکز جت، عدد ناسلت نقطه برخورد افزایش می یابد. همچنین افزایش انحنای نسبی از ۰/۱۸ به ۰/۲۷ تغییر محسوسی در عدد ناسلت نقطه برخورد ایجاد نمی کند. اوزتکین و همکاران [۱۳] به بررسی تجربی و عددی جت شیاری برخوردی به سطح مقعر متقارن پرداختند. آنها توزیع عدد ناسلت در شعاع های انحنای متفاوت سطح مقعر را مورد بررسی قرار داده، حالت بیشینه ناسلت متوسط سطح را گزارش کردند.

تحقیقات تجربی و عددی انجام شده در زمینه تک جت برخوردی دایروی به سطح مقعر، محدود به سطوح مقعر استوانه ای متقارن است. در بسیاری از کاربردها از جمله خنک کاری سطح داخلی پره توربین، یخ زدایی از بال هواپیما و خنک کاری صفحات داغ فلزی، جت خنک کننده به سطح مقعر نامتقارن برخورد می کند. در این تحقیق تلاش جدیدی برای بررسی تجربی جریان و انتقال حرارت جت دایروی برخوردی به سطح مقعر نامتقارن انجام شده است. در این راستا در یک سطح مقعر با انحنای نسبی متفاوت شار حرارتی ثابت ایجاد شده است. با انجام آزمایشات مختلف، توزیع تجربی عدد

بر یکدیگر منطبق می‌شود. در این حالت دماسنج دقیقا دمای مکان انطباق را نشان می‌دهد. با تنظیم مکان انطباق دو نور لیزر، دمای نقاط مورد نظر روی سطح ثبت شده و در حافظه دستگاه ذخیره می‌شود.

۳- طرح مساله

در این آزمایش خنک‌کاری جت برخوردی دایروی روی صفحه‌های مقعر متقارن و نامتقارن بصورت سه‌بعدی بررسی شده است. به این منظور یک صفحه نامتقارن با دو شعاع ۸ و ۱۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. به منظور تحلیل نتایج، توزیع عدد ناسلت صفحه نامتقارن با دو شعاع متقارن با شعاع‌های انحنای ۸ سانتی‌متر و ۱۲ سانتی‌متر مقایسه شده است. در تمام آزمایش‌ها از جت برخوردی با قطر ثابت ۲۴ میلی‌متر استفاده شده است. مقایسه نتایج سطوح مقعر متقارن و نامتقارن، بر حسب انحنای نسبی گزارش شده است. دو سطح متقارن با انحنای نسبی ۰/۱ و ۰/۱۵ و یک سطح نامتقارن با شعاع انحنای ۰/۱۵-۰/۱ در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

تمامی سطوح در شرایط یکسان شار حرارتی برابر با ۲۰۰۰ وات بر متر مربع آزمایش شده است. با مشخص بودن شار حرارتی و توزیع دما روی سطح، توزیع عدد ناسلت از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$Nu = \frac{q'' D_{jet}}{T_s - T_{jet} k} \quad (1)$$

بررسی جریان و انتقال حرارت در سطوح متقارن و نامتقارن در سه عدد رینولدز ۲۳۰۰۰، ۳۵۰۰۰ و ۵۰۰۰۰ انجام شده است، همچنین آزمایش‌ها در سه فاصله نسبی جت از سطح برخورد برابر ۲، ۴ و ۶ انجام شده است. همچنین با اندازه‌گیری سرعت متوسط خروجی از نازل و قطر نازل عدد رینولدز از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

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

سرعت جریان جت در این تحقیق از دو روش به دست آمده است. در روش اول از لوله پیتوت برای محاسبه سرعت استفاده شده است. فشار کل و فشار استاتیک توسط فشار سنج تفاضلی در چند مقطع ثبت شده و از فشار دینامیکی سرعت جت محاسبه می‌شود. در روش دوم سرعت جریان خروجی از لوله با استفاده از سرعت سنج سیم داغ اندازه‌گیری شده است.

۴- روش انجام آزمایش

در این آزمایش هدف تعیین نرخ انتقال حرارت و ناسلت برای سطح مقعر نامتقارن و مقایسه آن با سطوح متقارن است. به این منظور سطوح مورد نظر با مشخصاتی که در بخش قبل به آن اشاره شد، در نظر گرفته شده است. در هر آزمایش ابتدا گرمکن در شارحرارتی تنظیم می‌شود. پس از حدود ۱۰ دقیقه با روشن کردن فن، جریان جت برخوردی روی سطح گرم ایجاد می‌شود. مدت زمان حدود ۳۰ الی ۴۰ دقیقه کافی است تا توزیع دما

دما، شیر تنظیم دبی، سطح مقعر شار ثابت و دماسنج مادون قرمز می‌باشد. جریان هوای جت از طریق یک فن فشار بالا وارد مخزن می‌شود. جریان خروجی از مخزن توسط شیر کنترل دبی در رینولدز مورد نظر تنظیم می‌گردد. لوله جریان جت برخوردی به اندازه‌ای در نظر گرفته شده که جریان خروجی از آن توسعه یافته باشد.

در شکل ۲ بخش‌های مختلف سطح برخورد نامتقارن نشان داده شده است. سطح برخورد جت، ورق فولادی با ضخامت ۱ میلی‌متر است که نمونه نامتقارن آن با دو شعاع انحنای ۸ و ۱۲ سانتی‌متر در شکل ۲ نشان داده شده است.

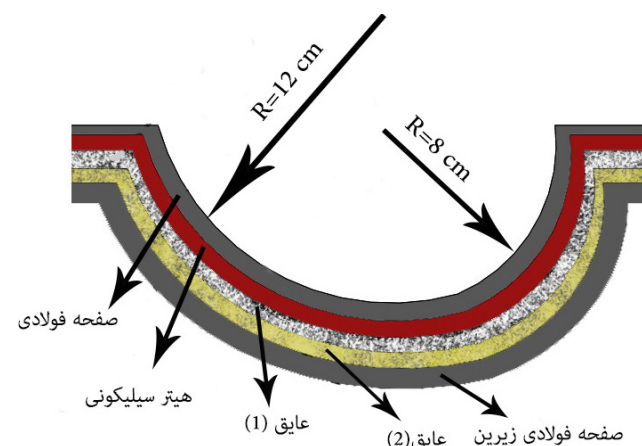


Fig. 2. Concave surface examined (a) Impinging surface components (b) asymmetric concave under experiment

شکل ۲: سطح مقعر مورد بررسی (الف) اجزای سطح برخورد (ب) سطح مقعر نامتقارن مورد آزمایش

مطابق شکل، برای ایجاد شار حرارتی ثابت در سطح مقعر از گرمکن سیلیکونی انعطاف پذیر استفاده شده است. این گرمکن به صفحه برخورد فولادی منطبق شده و صفحه برخورد جت را به طور یکنواخت گرم می‌کند. در این تحقیق توان ثابت ۲۰۰۰ وات بر متر مربع برای گرمکن در نظر گرفته شده است.

مطابق شکل ۲، به منظور جلوگیری از اتلاف حرارت، سطح زیر گرمکن توسط یک لایه عایق از جنس پشم سنگ و یک لایه عایق از جنس پشم شیشه پوشیده شده است. گرمکن و لایه‌های عایق بین دو سطح فولادی نگه داشته شده اند. مطابق با شکل ۱ الف، صفحه مقعر داخل یک محفظه عایق بندی شده قرار گرفته است. تغییرات دمای محفظه عایق در طول انجام آزمایش توسط ترموکوپل ۱ اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. تغییرات دمای محفظه عایق در طول آزمایش نشان می‌دهد که اتلاف حرارتی از سطح پایین کمتر از ۵ درصد خواهد بود. اتلاف حرارتی از سطح پایین در تحلیل عدم قطعیت در نظر گرفته شده است.

برای اندازه‌گیری دما از دوربین مادون قرمز با دو نشانگر لیزری استفاده شده است که دما را در نقاط مختلف سطح با دقت یک درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری می‌کند. در فاصله ۱۲۰ سانتی‌متری از سطح، دو نشانگر لیزری

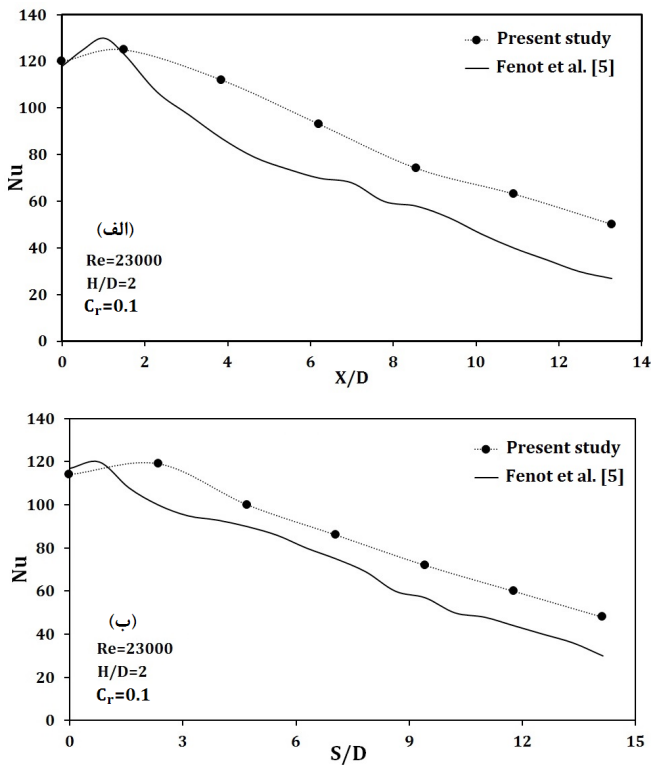


Fig. 3. Comparing the Nusselt distribution of concave surface with experimental result of Fenot et al[5] along (a) axis (b) curve

شکل ۳: مقایسه توزیع ناسلت سطح متقارن با مقادیر تجربی فنوت و همکاران [۵]، در راستای (الف) محوری (ب) انحنا

سطح کاهش می‌یابد [۱۵]. با کاهش سرعت، میزان انتقال مومنوم و انرژی در مجاور سطح و در نتیجه ضریب انتقال حرارت در سطح برخورد کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۴، عدد ناسلت در سطح متقارن با شعاع انحنا کمتر (انحنای نسبی بیشتر، $Cr=0/15$) بیشتر از سطح متقارن با انحنا نسبی کمتر ($Cr=0/1$) است. همچنین، ناسلت سطح نامتقارن ($Cr=0/1-0/15$) بین ناسلت سطوح متقارن قرار دارد. علت عدم تقارن توزیع ناسلت در سطح نامتقارن عدم توزیع سرعت یکسان در دو سمت سطح نامتقارن می‌باشد (شکل ۶ را ببینید).

شکل ۵ تاثیر انحنا نسبی سطح و فاصله جت از سطح برخورد بر توزیع عدد ناسلت در راستای محور مرکزی را نشان می‌دهد. مطابق شکل، با کاهش فاصله جت از سطح برخورد عدد ناسلت در سطح متقارن و سطح نامتقارن افزایش می‌یابد. همچنین، توزیع محوری عدد ناسلت در سطح نامتقارن ($Cr=0/1-0/15$) تقریباً متقارن بوده و مقداری بین سطح با انحنا نسبی ($Cr=0/1$) و انحنا نسبی ($Cr=0/15$) دارد. در میانه صفحه ($X/D=12$) یک کمینه نسبی در توزیع عدد ناسلت مشاهده می‌شود که به دلیل تشکیل ناحیه سیال مرده در ناحیه برخورد جت با سطح می‌باشد [۵] و [۱۶].

توزیع سرعت محوری در فاصله ۲ میلی‌متری از سطح نامتقارن در شکل ۶ نشان داده شده است. مقادیر سرعت با استفاده از لوله پیتوت با قطر یک میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. مطابق شکل، مقدار سرعت نقاط متناظر روی

روی سطح مقعر به شرایط پایا برسد. در شرایط پایا دمای نقاط مورد نظر روی سطح مقعر توسط دوربین مادون قرمز اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. لازم به ذکر است برای اطمینان از توزیع دمای به دست آمده هر آزمایش دو تا سه بار تکرار شده است. در تحقیق حاضر عدم قطعیت اندازه‌گیری عدد ناسلت با استفاده از روش تجمیع خطاها [۱۴] محاسبه شده است. با توجه به مشخصات فنی دستگاه‌های اندازه‌گیری مورد استفاده، منابع خطای محاسبه ناسلت شامل عدم صحت اندازه‌گیری سرعت (۵٪)، دما (۲٪)، وات مصرفی گرمکن (۳٪)، عدم یکنواختی شار حرارتی (۳٪) و تلافات حرارتی از سطح (۵٪) می‌باشد. بنابراین عدم قطعیت عدد ناسلت اندازه‌گیری شده حدود ۸/۵٪ خواهد بود.

۵- نتایج

در این تحقیق با تغییر سه پارامتر انحنای سطح، عدد رینولدز جت و فاصله نسبی جت از سطح برخورد، توزیع ناسلت سطح مقعر نامتقارن با سطوح متقارن مقایسه شده است.

۵-۱- اعتبار سنجی نتایج تجربی

به منظور اعتبار سنجی نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر، توزیع عدد ناسلت روی سطح مقعر متقارن با نتایج تجربی فنوت و همکاران [۵] مقایسه شده است. محاسبه توزیع ناسلت مطابق با شرایط آزمایشگاهی فنوت و همکاران، در عدد رینولدز جت ۲۳۰۰۰، انحنا نسبی ۰/۱ و فاصله جت از سطح برخورد $2D$ انجام شده است.

اختلاف توزیع ناسلت به دست آمده در تحقیق حاضر و نتایج مرجع [۵] می‌تواند به دلیل تفاوت در شار حرارتی اعمال شده روی سطح باشد. در تحقیق حاضر با استفاده از گرمکن سیلیکونی شار حرارتی ثابت در سطح اعمال شده اما در تحقیق فنوت و همکاران شار حرارتی با شیب کم به صورت خطی در سطح تغییر می‌کند.

۵-۲- تاثیر انحنا نسبی بر انتقال حرارت

در این تحقیق در رینولدز ثابت و در سه فاصله جت برخوردی تاثیر انحنا نسبی سطح بر توزیع عدد ناسلت مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۴ تاثیر فاصله جت از سطح برخورد در سه H/D برابر ۲، ۴ و ۶ بر توزیع عدد ناسلت در راستای انحنا مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به تقارن هندسی در دو سطح مقعر متقارن فقط نیمی از توزیع عدد ناسلت نشان داده شده است. مطابق شکل، با افزایش فاصله جت از سطح برخورد مقدار عدد ناسلت در سطوح متقارن و سطح نامتقارن کاهش می‌یابد. عدد ناسلت نقطه برخورد در سطح متقارن در فاصله‌های نسبی ۲، ۴ و ۶ به ترتیب برابر ۱۸۵، ۱۶۵ و ۱۶۰ می‌باشد.

علت کاهش ناسلت این است که با افزایش فاصله جت تا سطح برخورد، هسته پتانسیل کوتاه‌تر شده و در نتیجه سرعت محوری جت در مجاورت

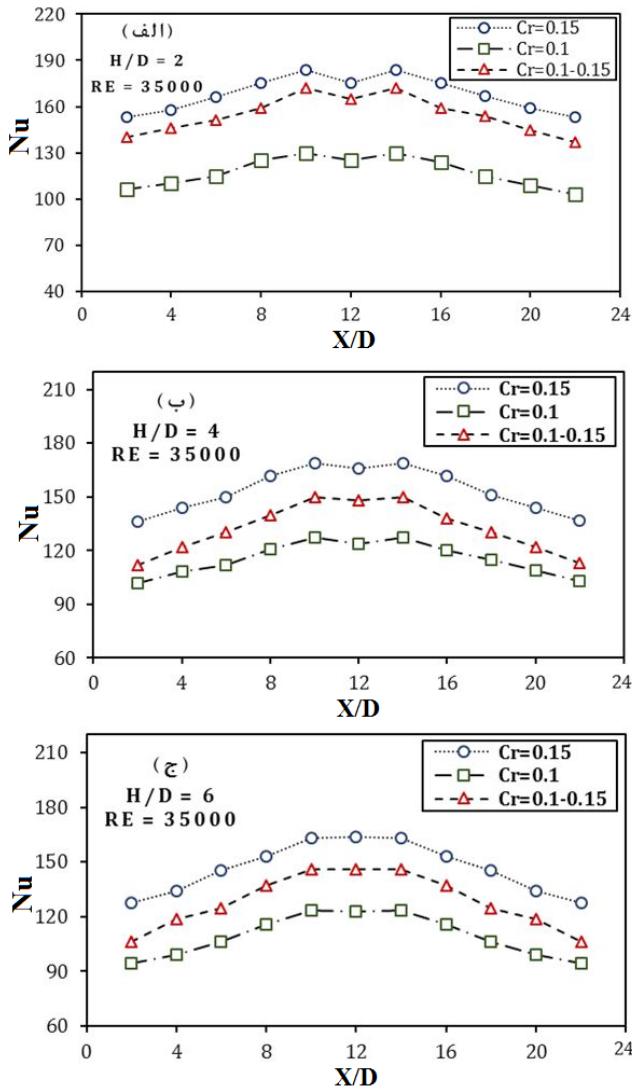


Fig. 5. Effect of relative curvature and nozzle-to-surface distance on Nusselt distribution along the axis

شکل ۵: تاثیر انحنا نسبی سطح و فاصله جت از سطح برخورد بر توزیع ناسلت در راستای محوری

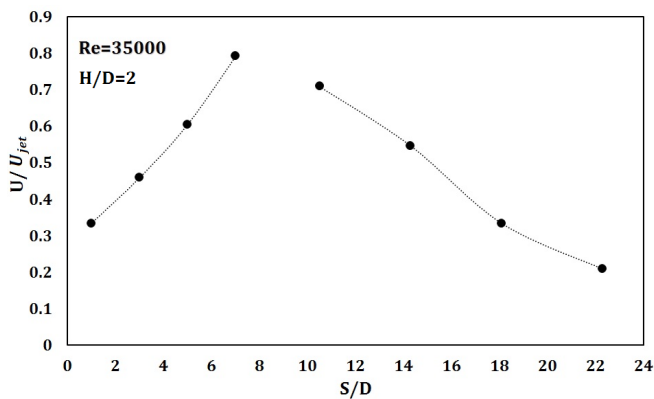


Fig. 6. Velocity distribution on the asymmetric concave surface along the curvature

شکل ۶: توزیع سرعت روی سطح مقعر نامتقارن در راستای انحنا

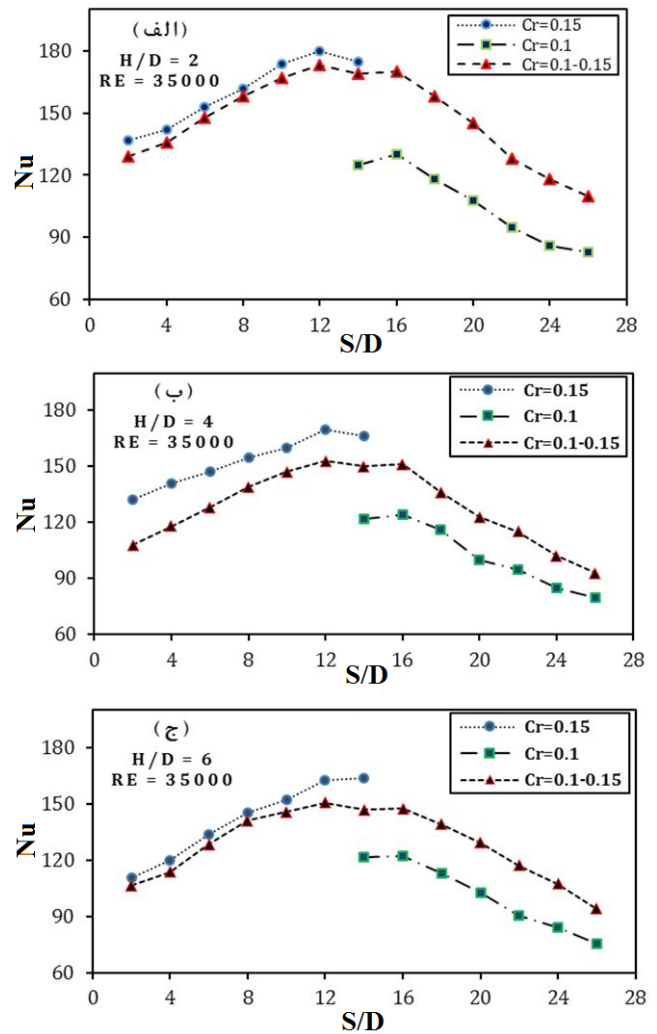


Fig. 4. Effect of curvature and nozzle-to-surface distance on Nu number along the curvature

شکل ۴: تاثیر انحنا و فاصله جت از سطح برخورد بر ناسلت در راستای انحنا

سطح با شعاع انحنا ۸ سانتی متر ($Cr=0.15$) بزرگتر از سرعت در سطح روی شعاع انحنا ۱۲ سانتی متر ($Cr=0.15$) است. عدم تقارن توزیع سرعت روی سطح منجر به عدم تقارن توزیع عدد ناسلت روی سطح نامتقارن می‌شود. (شکل ۴ را ببینید)

۵-۳- بررسی تاثیر عدد رینولدز بر نرخ انتقال حرارت

عدد رینولدز جت یکی از عوامل مهم در انتقال حرارت جت برخوردی به سطح می‌باشد [۵، ۱۵ و ۱۶]. در این تحقیق توزیع ناسلت سطح نامتقارن سطوح در سه عدد رینولدز ۲۳۰۰۰، ۳۵۰۰۰ و ۵۰۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج توزیع عدد ناسلت سطح نامتقارن در شکل‌های ۷ و ۸ با سطوح متقارن مقایسه شده است. تاثیر عدد رینولدز بر توزیع عدد ناسلت در راستای انحنا (S/D) در شکل ۷ نشان داده شده است.

همانطور که در نمودارها نمایش داده شده است افزایش عدد رینولدز از ۲۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ منجر افزایش نرخ انتقال حرارت در نقطه برخورد و راستای انحنا (S) شده است.

تأثیر عدد رینولدز بر ناسلت در راستای محوری (X/D) در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق نتایج گرفت و همکاران [۱۷] یکی از مهمترین پارامترها برای افزایش نرخ انتقال حرارت عدد رینولدز است. مطابق شکل، در سطح نامتقارن نیز توزیع عدد ناسلت در راستای محوری متقارن است. همچنین، میزان تأثیر عدد رینولدز بر عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز از ۳۵۰۰۰ به ۵۰۰۰۰ کاهش می‌یابد. همچنین مطابق شکل ۸، مقدار عدد ناسلت سطح نامتقارن $(Cr=0/15-0/15)$ تقریباً بین مقادیر ناسلت سطح متقارن با انحنای نسبی بیشتر $(Cr=0/15)$ ، و سطح متقارن با انحنای کمتر $(Cr=0/1)$ قرار دارد.

برای صفحه تخت وابستگی ناسلت با عدد رینولدز یک رابطه توانی $(Nu \propto Re^n)$ می‌باشد. عوامل زیادی در تعیین مقدار n نقش دارند. گلدشتاین و همکاران [۱۶] با مطالعه بر روی یک ردیف جت برخوردی به صفحه تخت مقدار n را روی خط برخورد برابر $0/67$ و برای جریان پایین دستی برابر $0/7$ گزارش کردند.

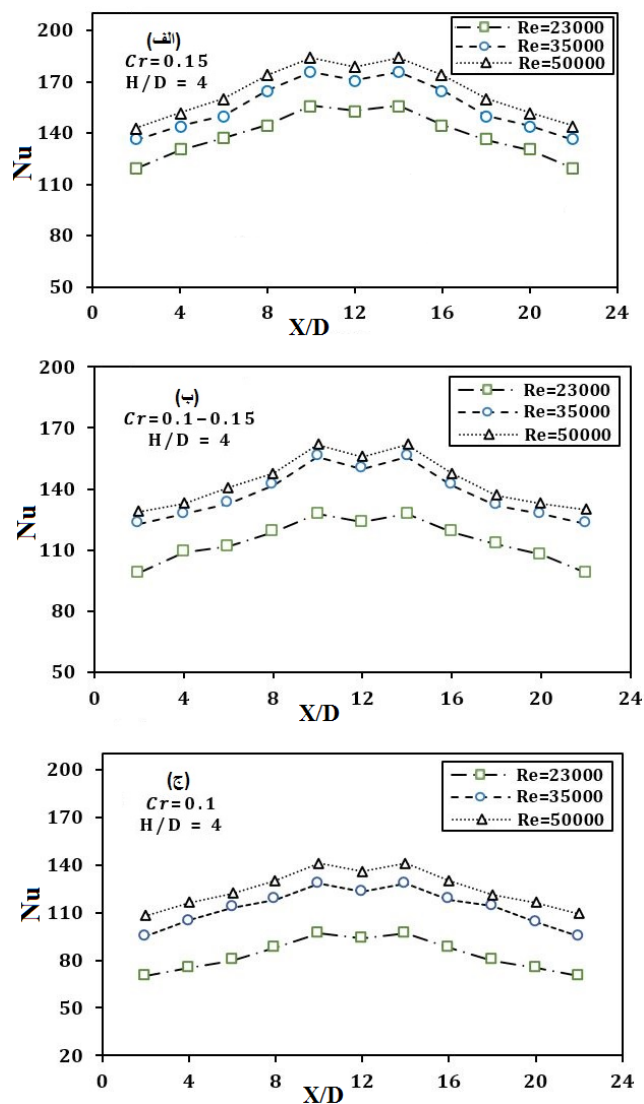


Fig. 8. Effect of Reynolds number on Nu number distribution along the axis

شکل ۸: تأثیر عدد رینولدز بر ناسلت در راستای محوری

با افزایش عدد رینولدز سرعت محوری جت در مجاورت سطح افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت، میزان انتقال مومنتوم و انرژی در مجاور سطح و در نتیجه ضریب انتقال حرارت در سطح برخورد نیز می‌یابد.

مطابق شکل ۷، افزایش عدد رینولدز از ۲۳۰۰۰ به ۳۵۰۰۰ به صورت محسوسی منجر به افزایش عدد ناسلت در سطح می‌شود. با افزایش عدد رینولدز از ۳۵۰۰۰ به ۵۰۰۰۰ تأثیر عدد رینولدز بر عدد ناسلت کاهش می‌یابد. همچنین مقایسه نتایج توزیع عدد ناسلت دو سطح متقارن نشان می‌دهد که افزایش عدد رینولدز بر توزیع عدد ناسلت در سطح با انحنای نسبی کمتر $(Cr=0/1)$ تأثیر بیشتری دارد. برای سطح با انحنای نسبی کمتر $(Cr=0/1)$ افزایش عدد رینولدز از ۲۳۰۰۰ به ۵۰۰۰۰ منجر به افزایش ۳۰ درصدی عدد ناسلت در نقطه برخورد (سکون) می‌شود. در حالی برای $(Cr=0/15)$ میزان افزایش ناسلت نقطه سکون حدود ۱۲ درصد می‌باشد.

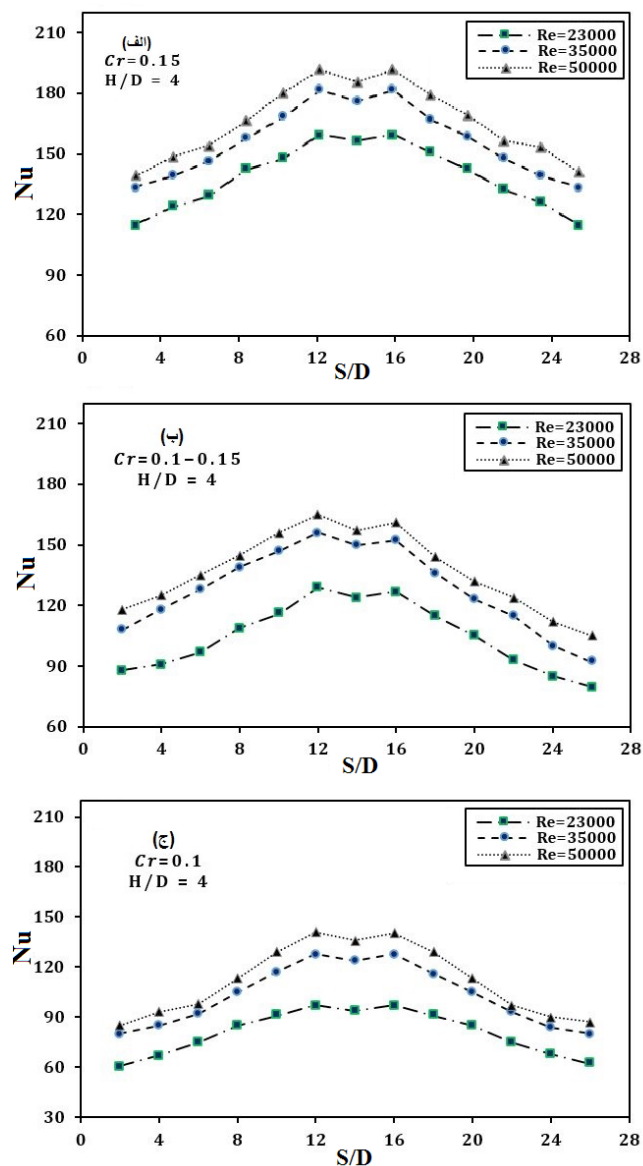


Fig. 7. Effect of Reynolds number on Nu number distribution along the curvature

شکل ۷: تأثیر عدد رینولدز بر توزیع عدد ناسلت در راستای انحنای

- از: در توزیع ناسلت شکل‌های ۵ تا ۸ یک نقطه کمینه در ناحیه برخورد مشاهده می‌شود. نقطه کمینه ناسلت در نقطه برخورد در آزمایش شریف و موته [۱۸] روی یک جت شیاری برخوردی به سطح مقعر نیز مشاهده شده است. آنها دلیل وجود نقطه کمینه عدد ناسلت در ناحیه برخورد را ایجاد ناحیه سیال مرده گزارش کردند. ناحیه سیال مرده توسط گیلارد و بریزی [۱۹] در مطالعه تجربی آنها روی یک جت شیاری در برخورد با صفحه مقعر مشاهده شده است. آنها سرعت متوسط سیال در این ناحیه را بسیار ناچیز گزارش کردند.
۱. بررسی توزیع عدد ناسلت در سطح نامتقارن نشان می‌دهد که سطح با انحنای نسبی بیشتر ($Cr=0/15$) ناسلت بالاتری نسبت به سمت با انحنای نسبی کمتر ($Cr=0/1$) دارد.
۲. کاهش فاصله جت با سطح برخورد سبب افزایش عدد ناسلت و در نتیجه افزایش ضریب انتقال حرارت سطح می‌شود. با کاهش فاصله جت از سطح برخورد عدد ناسلت در دو سمت سطح برخورد نامتقارن افزایش می‌یابد.
۳. بررسی نتایج نشان می‌دهد که توزیع محوری عدد ناسلت در سطح نامتقارن ($Cr=0/1-0/15$) تقریباً متقارن بوده و مقداری بین سطح با انحنای نسبی کمتر ($Cr=0/1$) و انحنای نسبی بیشتر ($Cr=0/15$) دارد.
۴. افزایش عدد رینولدز از ۲۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ سبب افزایش نرخ انتقال حرارت در راستای انحنا و جهت محوری می‌شود. اما با افزایش عدد رینولدز این تاثیر روند کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر یعنی شیب رشد عدد ناسلت با افزایش رینولدز کند می‌شود.
۵. مقایسه میانگین ناسلت روی سطوح متقارن و نامتقارن نشان می‌دهد که متوسط عدد ناسلت سطح نامتقارن با انحنای نسبی ۰/۱ و ۰/۱۵ بین مقادیر عدد ناسلت سطوح متقارن با شعاع‌های انحنای نسبی ۰/۱ و ۰/۱۵ قرار دارد.

جدول ۱: مقایسه میانگین ناسلت روی سطوح متقارن و نامتقارن مورد بررسی

Table 1. Comparing of average Nusselt number on concave and asymmetric concave

Re	H/D	$Cr=0/1$	$Cr=0/1-0/15$	$Cr=0/15$
۲۳۰۰۰	۲	۹۵/۱۲	۱۱۲/۳۳	۱۵۰/۶۲
۲۳۰۰۰	۴	۸۰/۹۱	۱۰۵/۹۵	۱۴۱/۷۸
۳۵۰۰۰	۲	۱۱۵/۲۵	۱۵۰/۷۵	۱۷۷/۸۷
۳۵۰۰۰	۴	۱۱۲/۰۴	۱۳۳/۱۲	۱۶۰/۸۳
۵۰۰۰۰	۲	۱۲۵/۲۱	۱۵۴/۹۵	۱۹۴/۳۳
۵۰۰۰۰	۴	۱۲۰/۳۱	۱۳۹/۵۰	۱۷۰/۳۹

۶- نتیجه گیری

در این مقاله تحلیل تجربی جریان و انتقال حرارت جت برخوردی به سطح مقعر استوانه‌ای نامتقارن انجام شده است. نتایج توزیع ناسلت سطح نامتقارن با سطوح متقارن مورد مقایسه قرار گرفته است. در این تحقیق با تغییر سه پارامتر انحنای سطح، عدد رینولدز جت و فاصله نسبی جت از سطح برخورد، توزیع ناسلت سطح مقعر نامتقارن با سطوح متقارن مقایسه شده است. مهم ترین نتایج این تحقیق عبارت است

فهرست علائم

C_r	انحنای نسبی (D/d)
D	قطر دهانه خروجی جت
d	قطر انحنای سطح
H	فاصله جت از سطح برخورد
k	ضریب هدایت گرمایی هوا
Nu	عدد ناسلت
q''	شار حرارتی سطح
Re	عدد رینولدز جت
T_{jet}	دمای هوای خروجی از جت
T_s	دمای روی سطوح مقعر
U	سرعت هوای خروجی از نازل
μ	ویسکوزیته دینامیکی
ρ	چگالی

منابع

- [1] H. Eren, N. Celik, B. Yesilata, Nonlinear flow and heat transfer dynamics of a slot jet impinging on a slightly

- heat transfer enhancement on a cylindrical, leading edge model with varying jet temperatures, in: ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition, *American Society of Mechanical Engineers*, 2012, pp. 323-334.
- [12] E.L. Martin, L.M. Wright, D.C. Crites, Computational investigation of jet impingement on turbine blade leading edge cooling with engine-like temperatures, in: ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition, *American Society of Mechanical Engineers*, 2012, pp. 311-322.
- [13] E. Öztekin, O. Aydın, M. Avcı, Heat transfer in a turbulent slot jet flow impinging on concave surfaces, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 44 (2013) 77-82.
- [14] J. Taylor, *An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements*. Univ, Science, Sausalito, CA, 45 (1997) 92.
- [15] Y.-T. Yang, T.-C. Wei, Y.-H. Wang, Numerical study of turbulent slot jet impingement cooling on a semi-circular concave surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(1-3) (2011) 482-489.
- [16] R. Goldstein, W. Seol, Heat transfer to a row of impinging circular air jets including the effect of entrainment, *International journal of heat and mass transfer*, 34(8) (1991) 2133-2147.
- [17] T. Craft, L. Graham, B.E. Launder, Impinging jet studies for turbulence model assessment—II. An examination of the performance of four turbulence models, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36(10) (1993) 2685-2697.
- [18] M. Sharif, K. Mothe, Evaluation of turbulence models in the prediction of heat transfer due to slot jet impingement on plane and concave surfaces, *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 55(4) (2009) 273-294.
- [19] V. Gilard, L.-E. Brizzi, Slot jet impinging on a concave curved wall, *Journal of fluids engineering*, 127(3) (2005) 595-603.
- [20] J.L. Lee, Sang-Joon, Stagnation region heat transfer of a turbulent axisymmetric jet impingement, *Experimental Heat Transfer*, 12(2) (1999) 137-156.
- curved concave surface, *International communications in heat and mass transfer*, 33(3) (2006) 364-371.
- [2] R.E. Chupp, H.E. Helms, P.W. McFadden, Evaluation of internal heat-transfer coefficients for impingement-cooled turbine airfoils, *Journal of Aircraft*, 6(3) (1969) 203-208.
- [3] D. Lee, Y. Chung, S. Won, The effect of concave surface curvature on heat transfer from a fully developed round impinging jet, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 13(42) (1999) 2489-2497.
- [4] N. Saad, S. Polat, W. Douglas, Confined multiple impinging slot jets without crossflow effects, *International journal of heat and fluid flow*, 13(1) (1992) 2-14.
- [5] M. Fenot, E. Dorignac, J.-J. Vullierme, An experimental study on hot round jets impinging a concave surface, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29(4) (2008) 945-956.
- [6] H. Ahmadi, M. Rajabi-Zargarabadi, A.S. Mujumdar, J. Mohammadpour, NUMERICAL MODELING OF A TURBULENT SEMI-CONFINED SLOT JET IMPINGING ON A CONCAVE SURFACE, *Thermal Science*, 19(1) (2015).
- [7] X. Bu, L. Peng, G. Lin, L. Bai, D. Wen, Experimental study of jet impingement heat transfer on a variable-curvature concave surface in a wing leading edge, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 90 (2015) 92-101.
- [8] K. Elebiary, M. Taslim, Experimental/numerical crossover jet impingement in an airfoil leading-edge cooling channel, *Journal of Turbomachinery*, 135(1) (2013) 011037.
- [9] Y. Xie, P. Li, J. Lan, D. Zhang, Flow and heat transfer characteristics of single jet impinging on dimpled surface, *Journal of Heat Transfer*, 135(5) (2013) 052201.
- [10] C. Lee, K. Lim, S. Lee, Y. Yoon, N. Sung, A study of the heat transfer characteristics of turbulent round jet impinging on an inclined concave surface using liquid crystal transient method, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31(6) (2007) 559-565.
- [11] E.L. Martin, L.M. Wright, D.C. Crites, Impingement

Please cite this article using:

A. Hadipour, M. Rajabi Zargarabadi, Experimental Analysis of Heat Transfer from Round Jet Impinging to Asymmetric Concave Surface, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(6) (2018) 1229-1236.
DOI: 10.22060/mej.2017.12548.5361

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

