

مطالعه تجربی به کارگیری طرح جدید روزنه لوبیایی شکل در خنک کاری لایه‌ای

یونس پولادرنگ^۱ و مهدی رضانی‌زاده^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۷)

چکیده

شکل روزنه جت به شدت روی اثربخشی خنک کاری لایه‌ای تیغه‌های توربین اثرگذار است. شکل روزنه باید به گونه‌ای طراحی شود که توزیع مناسبی از سیال خنک کننده روی سطح بوجود آید و نقاط داغ تشکیل نگردد. در تحقیق حاضر، عملکرد خنک کاری طرح جدید هندسه روزنه لوبیایی شکل به طور تجربی با استفاده از روش دمانگاری مادون قرمز بررسی شده است. آزمایش‌ها در عدد رینولدز جریان اصلی ۱۰۰۰۰ (بر اساس قطر معادل روزنه جت) روی صفحه آزمایش با زاویه تزریق ۳۰ درجه انجام شده است. اندازه‌گیری‌ها در سرعت جریان اصلی ۲۷ متر بر ثانیه و در چهار نسبت دممش ۰/۴، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۸ صورت گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که هندسه روزنه شکل یافته لوبیایی شکل در مقایسه با روزنه استوانه‌ای مرسوم، منجر به افزایش اثربخشی خنک کاری لایه‌ای می‌شود. لازم به ذکر است که در طرح جدید، بیشترین اثربخشی خنک کاری در نسبت دممش ۰/۵ و کمترین اثربخشی در نسبت دممش ۰/۴ حاصل می‌شود. به عبارت دیگر، با استفاده از روزنه لوبیایی-شکل، اثربخشی خنک کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده کل ناحیه در نسبت دممش‌های مختلف بین ۴۵/۴ الی ۲۰۷/۴ درصد افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: اثربخشی خنک کاری لایه‌ای، هندسه جدید روزنه جت، روزنه لوبیایی شکل، آزمایش تجربی، دمانگاری مادون قرمز، تونل باد.

Experimental Investigation of Applying a Novel Bean-Shaped Hole Geometry for the Film Cooling

Youness Poladrang and Mahdi Ramezanizadeh

Abstract

Shape of the jet hole highly affects the film cooling effectiveness of the gas turbine blades, which must be designed in such a way that creates proper distribution of the coolant over the surface to remove the hot spots. The present study investigates the cooling performance of the novel Bean-shaped hole geometry experimentally using an infrared thermography method. The tests were performed at the main flow Reynolds number of 10,000 (based on the hole equivalent diameter) over a test plate at injection angle of 30 degrees relative to the surface. The measurements were carried out at the mainstream speed of 27 m/s and four blowing ratios of, 0.4, 0.5, 0.7 and 0.8. The obtained results show that the Bean-shaped hole geometry increases the film cooling effectiveness in comparison to the cylindrical hole. In the new hole design, the highest cooling effectiveness was obtained at the blowing ratio of 0.5 and the lowest effectiveness was obtained over the surface at the blowing ratio of 0.4. In the case of Bean-shaped hole geometry, the full area averaged cooling effectiveness increases by 45.4% to 207.4% at different blowing ratios.

Keywords: Film cooling effectiveness, Novel jet hole geometry, Bean-shaped hole, Experimental test, Infrared thermography, Wind tunnel

مقدمه

توربین‌های گازی به‌عنوان نیروی محرکه هواپیماها و صنایع به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حال حاضر، دمای ورودی توربین از حداکثر دمای پایدار پره‌های توربین فراتر است. توسعه‌ی سامانه‌ی خنک‌کاری، نقش کلیدی در افزایش راندمان حرارتی و توان خروجی توربین‌های گازی ایفا می‌کند. در بین روش‌های مختلف خنک‌کاری که به‌کار می‌رود، خنک‌کاری لایه‌ای به‌عنوان بهترین و کاربردی‌ترین روش، جایگزین عالی برای افزایش حفاظت حرارتی پره‌های توربین است.

ایده خنک‌کاری لایه‌ای، ایجاد لایه خنک‌کننده نازک روی سطح اجزای داغ توربین‌های گازی برای جلوگیری از در معرض مستقیم قرارگرفتن گازهای داغ و در نتیجه افزایش ساعت کاری آن‌ها می‌باشد [۱]. اساساً، موفقیت هر طرح خنک‌کاری لایه‌ای به اثربخشی خنک‌کاری آن بستگی دارد [۲]. خنک‌کاری لایه‌ای از دهه ۱۹۷۰ موضوع تحقیقاتی فعالی بوده و نقش مهمی در توسعه توربین‌های گازی ایفا نموده است. به‌طور مشابه، پایگاه داده بزرگی از نتایج تجربی در زمینه خنک‌کاری لایه‌ای در ادبیات باز وجود دارد [۳]، [۴]. راندمان خنک‌کاری لایه‌ای تحت تاثیر عوامل زیادی قرار دارد که در میان آن‌ها، هندسه روزنه جت نقش مهمی را ایفا می‌کند [۵] - [۸]. در گذشته، روزنه‌های استوانه‌ای با زاویه تزریق ۳۰ الی ۳۵ درجه، به دلیل تولید آسان و دمای نسبتاً پایین گاز اعمال‌شده برای خنک‌کاری پره‌های توربین، به‌طور گسترده‌ای استفاده شده است [۹] - [۱۱]. این در حالی است که روزنه‌های استوانه‌ای به دلیل شکل ساده خود، بهترین کارایی خنک‌کاری را ندارند و در پوشش جانبی ناکارآمد هستند. بسیاری از مطالعات عددی و تجربی دقیق نشان می‌دهند که جفت گردابه ناشی از برهم‌کنش جریان جت خنک‌کننده با جریان عرضی روی تیغه‌ها، باعث افزایش جهش عمودی جت می‌شود که این امر کارایی جت خنک‌کننده را کاهش می‌دهد [۱۲] - [۱۶]. بنابراین، ارائه طرح‌های کارآمد و روش‌های بهبودیافته برای خنک‌کاری لایه‌ای، مستلزم تحقیقات بیش‌تر است.

مطالعات متعددی از طریق تجزیه و تحلیل ساختارها و ویژگی‌های پیچیده اندرکنش جت در جریان متقاطع، به بررسی عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای روزنه‌های خنک‌کاری شکل‌یافته پرداخته‌اند. محققان همچنین نشان داده‌اند که این نوع از

روزنه‌ها می‌توانند راندمان خنک‌کاری را در مقایسه با روزنه‌های استوانه‌ای سنتی به میزان قابل توجهی افزایش دهند [۱۷]. [۱۸]. گلدشتاین و همکارانش [۵] از پیشگامان این حوزه بودند. آن‌ها تاثیرات هندسه روزنه و چگالی را بر مسئله خنک‌کاری لایه‌ای سه‌بعدی مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که بسط خروجی کانال جت، به‌طور قابل‌توجهی راندمان خنک‌کاری لایه‌ای را بهبود می‌بخشد. بونکر [۱۹] نیز بررسی جامعی روی عملکرد روزنه‌های شکل‌یافته انجام داد و فیزیک جریان ناشی از چنین روزنه‌هایی را بررسی کرد.

تاکنون پژوهشگران طرح‌های مختلفی را برای بهبود راندمان خنک‌کاری لایه‌ای ارائه کرده‌اند که در بین آن‌ها، هندسه‌های شکل‌یافته بیش‌ترین تاثیر را در بهبود خنک‌کاری لایه‌ای داشته‌اند. لی و کیم [۲۰] روزنه شکل‌یافته بادبزی را با سه متغیر طراحی بهینه کردند و شکل بهینه‌شده آن‌ها در مقایسه با طرح روزنه مرجع بادبزی شکل، افزایش ۲۸ درصدی را در راندمان خنک‌کاری لایه‌ای نشان داد. لو و همکارانش [۲۱] عملکرد خنک‌کاری روزنه هلالی شکل را اندازه‌گیری کردند که اثربخشی خنک‌کاری بهبودیافته‌ای را در مقایسه با روزنه استوانه‌ای و شیاردار نشان می‌داد. رضانی‌زاده و پولادرنگ [۲۲] به‌طور تجربی عملکرد خنک‌کاری هندسه جدید جت‌های مرکب پیوسته را با استفاده از روش دمانگاری مادون‌قرمز در تونل باد مادون‌صوت بررسی کردند. عملکرد حرارتی هندسه جت نوآورانه آن‌ها با هندسه سنتی جت‌های استوانه‌ای تزریق‌شده روی صفحه تخت مقایسه گردید. نتایج آن‌ها نشان داد که طرح جدید جت‌های مرکب پیوسته (گوشواره‌ای)، با استفاده از سیال خنک‌کننده کم‌تر، می‌تواند در مقایسه با جت‌های استوانه‌ای سنتی، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای بالاتری را ارائه دهد. در این هندسه جدید، نسبت‌دمش بهینه برابر با ۰/۸ بدست آمد و در نسبت‌دمش برابر، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای بیشتری حاصل شد. یعنی با استفاده از همان مقدار دبی جرمی تزریقی، توزیع یکنواخت‌تری از لایه سیال خنک‌کننده روی سطح فراهم می‌شود. آن‌ها بیان کردند که در هندسه گوشواره‌ای، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای محوری و اثربخشی متوسط‌گیری - شده جانبی به‌طور میانگین بین ۱۰٪ الی ۱۹۵٪ افزایش می‌یابد.

لیو و همکارانش [۲] روزنه‌های دمبلی و لوبیایی شکل را ارائه کردند که در مقایسه با روزنه‌های هلالی شکل، طرح بادگیر،

لایه‌ای پیشنهاد کرد. از سوی دیگر، مشکلات در تولید و ماشین‌کاری، کاربرد بیش‌تر این هندسه‌ها را محدود می‌کند. بنابراین هندسه پیشنهادی باید با در نظر گرفتن امکان تولید صنعتی آن ارائه شود.

در این تحقیق، هندسه روزنه لوبیایی شکل جدید با استفاده از روش تجربی مادون‌قرمز مورد بررسی قرار گرفته است که شکل هندسی آن برای ماشین‌کاری، ساده طراحی شده است. لازم به ذکر است که لیو و همکارانش [۲] قبلاً هندسه روزنه لوبیایی شکل را به صورت عددی مورد مطالعه قرار داده‌اند. تفاوت هندسه مذکور با تحقیق حاضر در این است که در تحقیق لیو و همکارانش [۲]، کانال جت در ابتدا دایره‌ای است و سپس در نزدیکی سطح تزریق، خروجی آن به لوبیایی-شکل تغییر یافته است. ولی در مطالعه حاضر، مسئله به روش تجربی مطالعه شده و تمام کانال جت به صورت لوبیایی شکل در نظر گرفته شده که می‌تواند از به هم ریختگی جریان در منطقه حساس خروجی جت بکاهد.

دستگاه آزمایش و روش اندازه‌گیری

در این تحقیق روش تصویربرداری مادون‌قرمز به کار گرفته شده (شکل ۱) که در آن از دوربین FLIR C2 برای اندازه‌گیری دمای سطح استفاده شده است. این دوربین دارای محدوده کاری ۱۰- الی ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد با دقت ۲ درجه سانتی-گراد می‌باشد. برای تامین جریان اصلی، از تونل باد مادون‌صوت استفاده شده است. سرعت جریان اصلی ۲۷ متر بر ثانیه و عدد رینولدز بر اساس قطر روزنه جت حدود ۱۰۰۰۰ است. هوای مورد نیاز جهت تزریق، از طریق مخزنی به حجم ۰/۵ متر مکعب و در فشار ۸ اتمسفر با استفاده از کمپرسور رفت و برگشتی تامین می‌شود. هوا قبل از تزریق با استفاده از گرم‌کن الکتریکی استوانه‌ای که توان الکتریکی آن قابل تنظیم است، گرم می‌شود. سپس هوای گرم‌شده وارد یک پلنوم مکعبی شده و از طریق هفت کانال ایجادشده با زاویه تزریق ۳۰ درجه نسبت به سطح، به جریان عرضی (روی سطح صفحه آزمایش تخت) تزریق می‌شود. دمای هوای جت‌ها قبل از تزریق و در داخل پلنوم با استفاده از حس‌گر PT100 با دقت ۰/۲ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری می‌شود. سرعت جریان جت‌ها، توسط

استوانه‌ای و بادبزی شکل، در شرایط مرزی یکسان، بازده خنک-کاری لایه‌ای را بهبود می‌بخشیدند. لی و کیوم [۲۳] روزنه خنک‌کاری لایه‌ای برگی شکل را معرفی کردند که رفتاری شبیه روزنه بادبزی شکل در نسبت‌دمش ۰/۵ داشت و با افزایش نسبت‌دمش، اثربخشی آن به شدت زیاد می‌شد. اثربخشی خنک-کاری لایه‌ای روزنه جدید نخودی شکل نیز توسط پولادرنگ و رضائی‌زاده [۲۴] به طور تجربی در نسبت‌دمش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که هندسه نخودی شکل در مقایسه با هندسه استوانه‌ای ساده، راندمان خنک‌کاری لایه‌ای را ۶۲٪ الی ۲۵۰٪ افزایش می‌دهد. همچنین هندسه نخودی شکل به دلیل شکل خاص خود، کاهش میانگین ارتفاع جهش عمودی در مقایسه با هندسه استوانه‌ای ساده را ممکن می‌سازد. البته، در نسبت‌دمش‌های بالا، تفاوت بین عملکرد روزنه‌های استوانه‌ای ساده و روزنه نخودی شکل کاملاً مشهود است. آن‌ها نشان دادند که در هندسه روزنه جدید، نسبت‌دمش بهینه ۰/۷ می‌باشد و در نسبت‌دمش‌های یکسان، اثربخشی روزنه‌های مذکور در مقایسه با روزنه استوانه‌ای ساده بیشتر است.

لازم به ذکر است که دسته‌بندی‌های دیگری از هندسه روزنه، مانند ایجاد زائده‌ی خارجی در اطراف روزنه استوانه‌ای و روزنه‌های دارای خروجی چندگانه نیز توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است. این‌ها شامل جت دوگانه [۲۵]، جت-های مرکب سه‌گانه [۲۶]، رمپ بالادست [۲۷]، زائده‌های هلالی شکل (برخان) [۲۸] و زائده‌های طولی هم‌راستا با جریان [۲۹] می‌باشد. استفاده از هندسه‌های روزنه مذکور، اثربخشی خنک-کاری را در مقایسه با هندسه روزنه استوانه‌ای ساده بهبود می‌بخشد. یکی از معایب استفاده از زائده‌های خارجی این است که نقاط داغ موضعی ایجاد می‌کنند که این امر کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. به منظور دستیابی به حداکثر اثربخشی سیال خنک‌کننده توزیع‌شده، شکل روزنه خنک‌کاری باید به دقت با شرایط آیرودینامیکی و حرارتی محلی مطابقت داده شود [۲].

هندسه روزنه‌های متعددی به صورت تجربی و عددی در زمینه تحقیقات خنک‌کاری لایه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در بالا ذکر شد، ایجاد تغییرات در خروجی روزنه جت، یکی از موفق‌ترین راه‌ها برای بهبود اثربخشی خنک‌کاری است. با توجه به متغیرهای هندسی مختلف، هنوز هم می‌توان روزنه‌های خنک‌کاری زیادی را برای بهبود اثربخشی خنک‌کاری

های مربوط به حساسه PT100 مرجع و دوربین مادون قرمز کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که خوانش و تحلیل دمای مادون قرمز مربوط به آزمایش‌های این تحقیق، با استفاده از منحنی کالیبراسیون بدست آمده تصحیح شده است.

در این تحقیق، از تونل باد نوع مکشی مادون صوت با حداکثر سرعت ۵۰ متر بر ثانیه استفاده شده است. مقطع آزمون تونل دارای قطر ۵۰ سانتی‌متر و طول ۸۰ سانتی‌متر است. شدت آشفستگی و سرعت جریان اصلی با استفاده از جریان سنج سیم-داغ اندازه‌گیری شده است. طول صفحه آزمایش قبل از ردیف خروجی‌های جت طوری انتخاب شده که نسبت ضخامت لایه-مرزی به قطر جت (δ/d) ۰/۹۸ شود.

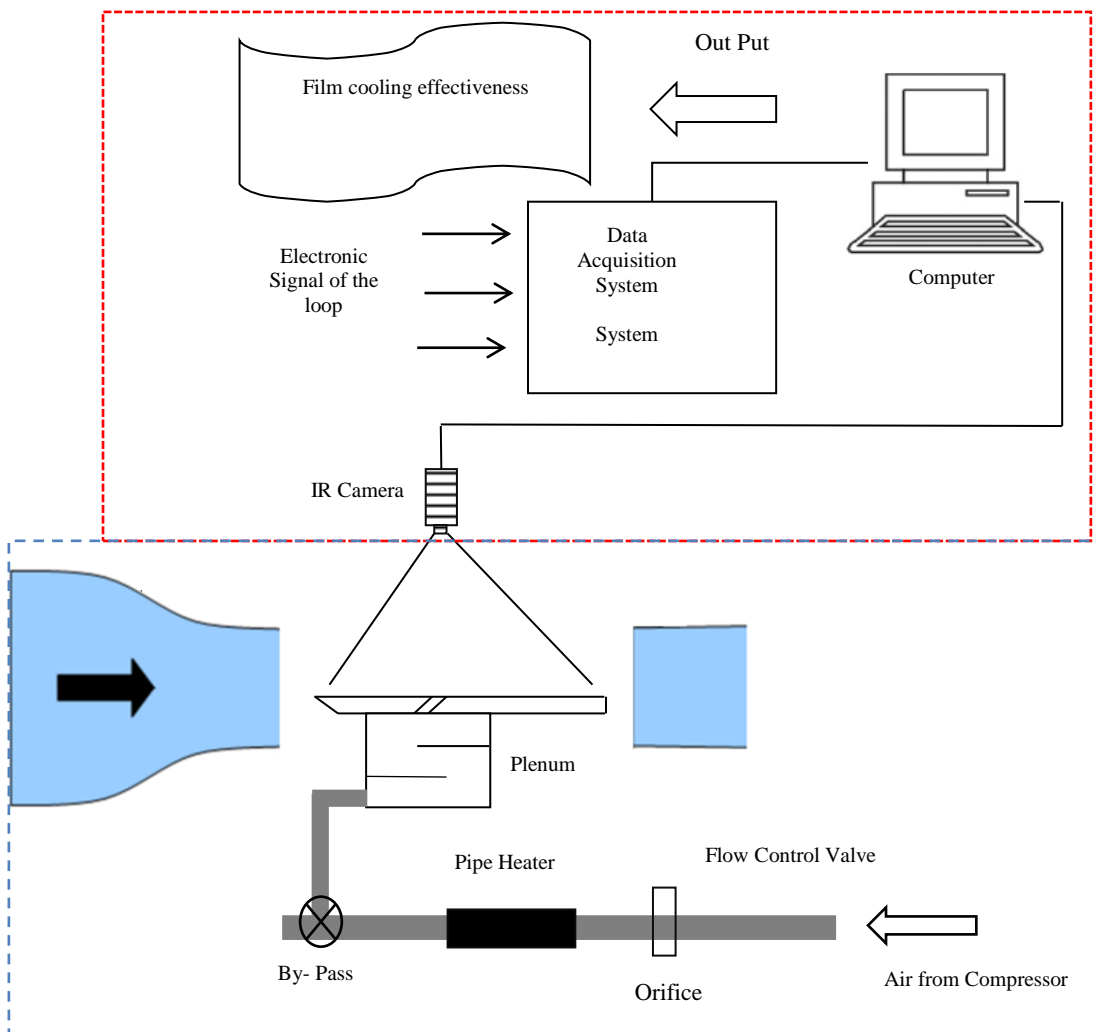
هوای خنک کاری مورد نیاز توسط کمپرسور هوا و مخزن متصل به آن با فشار ۸ اتمسفر تامین می‌شود. سرعت جریان هوای گرفته شده از مخزن نیز با استفاده از شیر کنترل جریان تنظیم می‌شود. هوای خنک که از شیر کنترل جریان عبور داده می‌شود، از اریفیس عبور می‌کند تا سرعت جریان اندازه‌گیری شود. هوای گرفته شده از مخزن، با استفاده از گرم‌کن استوانه‌ای ۲ کیلو واتی گرم می‌شود و توسط ترموستات دیجیتال و رله کنترل می‌شود که در مدار پنوماتیک بعد از اریفیس قرار گرفته اند. بنابراین، هوا قبل از ورود به پلنئوم، گرم شده و از شیر اطمینان عبور می‌کند تا از آسیب احتمالی به مدار پنوماتیک جلوگیری شود. پلنئوم از پلاستیک آکرلیک ساخته شده که مستقیماً به زیر صفحه آزمایش متصل شده است. برای اندازه-گیری دمای جت تزریقی (T_j) ، حساسه PT100 نوع آلفا در نزدیکی ورودی یکی از جت‌ها در زیر صفحه آزمایش نصب گردیده است. برای داشتن جریان هوای یکنواخت از پلنئوم، دو تیغه حایل در پلنئوم تعبیه شده که هوا از میان آن‌ها عبور می‌کند و در نهایت از طریق کانال‌ها، جت به جریان اصلی تزریق می‌شود. در تمامی آزمایش‌ها برای اندازه‌گیری دمای جریان اصلی (T_∞) ، یعنی جریان عرضی که توسط تونل باد تامین می‌شود، حساسه PT100 در بالادست صفحه آزمایش به کار گرفته شده است.

اریفیس مجهز به دو فشارسنج با دقت یک پاسکال، قبل و بعد از اریفیس اندازه‌گیری می‌شود. تنظیم دمای هوای جت‌ها نیز با استفاده از کنترل کننده دیجیتال دما که دارای ترانس $\pm 0.1^\circ C$ است، انجام می‌شود. دمای سطح آزمایش (T_{av}) توسط دوربین مادون قرمز ثبت می‌شود که پس از کالیبره شدن در محدوده دمایی کاربردی خود، خطایی کم‌تر از $0.5^\circ C$ دارد. با اندازه‌گیری دمای سطح، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای (η) را می‌توان با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد:

$$\eta = \frac{T_{av} - T_\infty}{T_j - T_\infty} \quad (1)$$

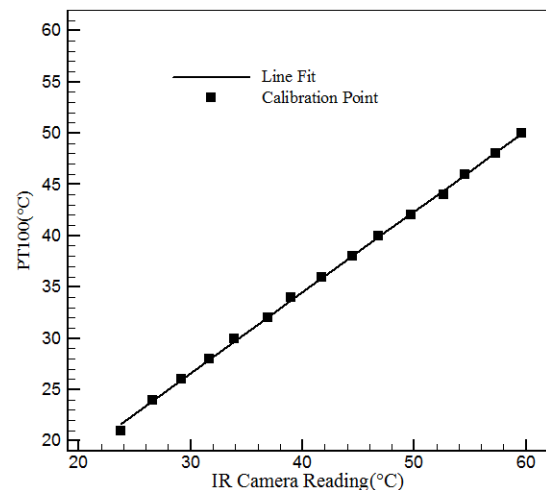
که در آن T_{av} ، T_∞ و T_j به ترتیب دمای دیواره آدیاباتیک، دمای جریان اصلی و دمای جریان جت را نشان می‌دهند.

قبل از ثبت داده، لازم است که سامانه نوری مادون قرمز کالیبره شود. این کار با حرارت دادن ورقه مسی مربعی به طول ۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر انجام می‌شود. بنابراین، روی سطح بالایی ورقه مسی، رنگ مشکی به صورت یکنواخت اسپری شده است. سپس یک گرم‌کن تخت زیر ورقه مسی قرار داده شده و جریان الکتریکی برای گرم شدن صفحه اعمال گردیده است. لازم به ذکر است که ورقه مسی به گونه‌ای تنظیم شده که فاصله و زاویه دوربین مادون قرمز از ورقه در طول آزمایش ثابت بماند. یک حساسه پی‌تی ۱۰۰ نوع آلفا برای اندازه‌گیری دمای ورقه مسی استفاده شده و دوربین مادون قرمز به‌طور همزمان دما را در هر پیکسل اندازه می‌گیرد. ثبت دما توسط حساسه و دوربین بین ۲۱ درجه سانتی‌گراد الی ۵۰ درجه سانتی‌گراد با اختلاف دمای ۲ درجه سانتی‌گراد انجام شد. برای بدست آوردن دمای ورقه مسی، یک ناحیه 10×10 پیکسلی از عکس‌های دوربین مادون قرمز به‌طور متوسط محاسبه شد و این دما با خوانش حس‌گر PT100 مقایسه گردید. باید توجه شود که ثبت دما باید در وضعیت پایا صورت پذیرد. شکل ۲ منحنی کالیبراسیون دوربین مادون قرمز را نشان می‌دهد که قبل از شروع اندازه‌گیری‌های تحقیق بدست آمده است. واضح است که با افزایش دمای کاری، انطباق بین داده-



شکل ۱: دستگاه‌ها و تجهیزات به کاررفته در آزمایشات تحقیق حاضر.

شکل ۳ نمای دقیقی از دو هندسه مختلف روزنه مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می‌دهد. هندسه روزنه اول، جت استوانه‌ای ساده به قطر $5/74$ میلی‌متر است که با زاویه 30° درجه نسبت به جریان عرضی تزریق می‌شود. نسبت طول به قطر کانال جت $5/22$ و نسبت گام جت (نسبت فاصله بین دو مرکز جت مجاور به قطر جت) 3 است. هندسه روزنه دوم، جت دارای سطح مقطع روزنه لوبیایی شکل است که سطح مقطع آن در تمام کانال جت یکنواخت است. جت‌های لوبیایی شکل نیز با زاویه 30° درجه به جریان عرضی تزریق می‌شوند و نسبت طول به قطر و گام جت آن‌ها با حالت جت‌های استوانه‌ای



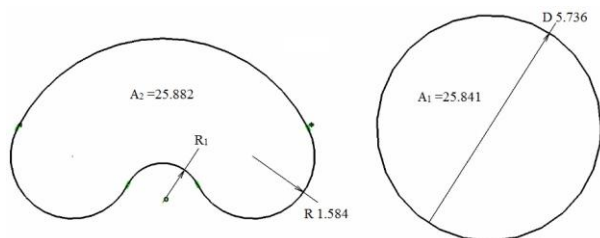
شکل ۲: منحنی کالیبراسیون مادون قرمز.

دمای سطح در اندازه‌گیری مادون قرمز $\pm 0.32 C$ می‌گردد. افت فشار در دو طرف اریفیس با استفاده از دو مبدل فشار اندازه‌گیری شده که عدم قطعیت کل آن $\pm 1.01 Pa$ می‌باشد. سرعت ورودی جریان اصلی، توسط جریان سنج سیم‌داغ اندازه‌گیری شده است. برای انجام اندازه‌گیری‌ها، از فشارسنج تک کاناله استفاده شده که دارای خطای بایاس $\pm 0.625 Pa$ است. پس از انجام آزمایشات خطای تکرارپذیری، عدم قطعیت کل آن $\pm 0.22 Pa$ به دست می‌آید.

عدم قطعیت کلی در حالتی که اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای برابر با 0.9 باشد، معادل با 2% است و زمانی که اثربخشی برابر با 0.7 باشد، معادل با 9.7% می‌گردد که با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه است.

$$\delta\eta = \sqrt{\left(\frac{\partial\eta}{\partial T_\infty}\delta T_\infty\right)^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial T_{surf}}\delta T_{surf}\right)^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial T_{cool}}\delta T_{cool}\right)^2} \quad (2)$$

که در آن، δT_∞ ، δT_{cool} و δT_{surf} به ترتیب عدم قطعیت دمای جریان اصلی، جت و سطح آدیاباتیک می‌باشد.



شکل ۳: نمایی از هندسه روزنه خنک‌کاری لایه‌ای استوانه‌ای ساده و لوبیایی شکل.

بحث و نتایج

آزمایش‌ها در چهار نسبت دم‌ش مختلف برای دو هندسه جت متفاوت در شدت آشفته‌گی جریان اصلی $1/5$ درصد انجام شده است. در این بخش، پس از اعتبارسنجی، عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای هندسه روزنه لوبیایی شکل جدید و هندسه روزنه استوانه‌ای ساده مورد مقایسه و بحث قرار گرفته است.

یکسان می‌باشد. هر دو نوع هندسه روزنه (استوانه‌ای و لوبیایی شکل) به گونه‌ای طراحی شده‌اند که دارای سطح مقطع یکسان $25/85$ میلی‌متر مربع باشند. توجه شود که جهت محاسبه قطر معادل برای جت لوبیایی، شعاع انحناها در سطح مقطع روزنه لوبیایی شکل طوری طراحی گردیده‌اند که سطح مقطع دو جت استوانه‌ای و لوبیایی شکل برابر شود. به عبارت دیگر، ابعاد هندسه لوبیایی به گونه‌ای در نظر گرفته شده که سطح مقطع آن دقیقاً برابر با سطح مقطع جت استوانه‌ای گردد. لذا قطر معادل روزنه لوبیایی برابر قطر روزنه استوانه‌ای خواهد بود و دبی خروجی هر دو روزنه یکسان می‌شود. صفحه تخت از جنس پلکسی گلاس به ضخامت 15 میلی‌متر ساخته شده که دارای رسانایی حرارتی اندک $k = 0.187$ می‌باشد. ردیف هفت‌گانه جت‌ها در فاصله 18 سانتی‌متری از لبه پایین دست صفحه ایجاد شده‌اند. برای کنترل لایه مرزی جریان عرضی، لبه صفحه آزمایش با زاویه 30 درجه تیز شده است.

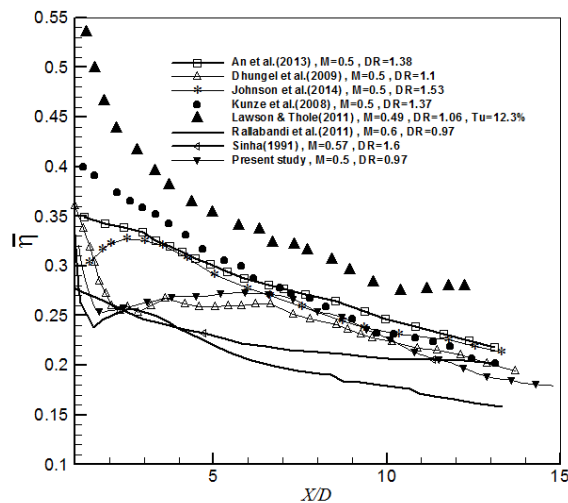
عدم قطعیت

عدم قطعیت داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده در این تحقیق، با استفاده از روش ارائه شده توسط موفات [30] محاسبه شده است. دمای جریان اصلی T_∞ و دمای جت T_j با استفاده از حس گر PT100 نوع آلفا اندازه‌گیری شده که دارای خطای بایاس $\pm 0.2 C$ است. لذا عدم قطعیت تکرارپذیری دمای جریان اصلی و جت خنک‌کننده به ترتیب $\pm 0.2 C$ و $\pm 0.03 C$ بدست می‌آید.

دمای صفحه‌ی آزمایش (صفحه‌ی در معرض خنک‌کاری لایه‌ای) با دوربین مادون قرمز ثبت شده است. دما با استفاده از دمای قرائت شده توسط حس گر PT100 که روی سطح نصب شده کالیبره شده است. خطای بایاس دوربین برابر با انحراف استاندارد خطای بایاس حس گر PT100 و اختلاف بین داده‌های مادون قرمز کالیبره شده و داده‌های حس گر می‌باشد. در مجموع، خطای بایاس برای اندازه‌گیری دمای سطح $\pm 0.23 C$ خواهد بود. از طرف دیگر، خطای تکرارپذیری برای اندازه‌گیری دمای سطح $\pm 0.23 C$ بدست آمده که محاسبه عدم قطعیت کلی

صحت‌سنجی

کم‌تر جت ($L/D = 1.75$) به کار برده شده در تحقیق مذکور باشد. همچنین با مقایسه نتایج حاضر با نتایج رالابندی و همکارانش [۳۶] اختلافاتی مشاهده شد که ممکن است به دلیل اعمال نسبت سرعت بالاتر و شدت آشفتگی کم‌تر باشد. البته، در تمام مقایسه‌های مذکور، اثر عدم قطعیت نتایج را نیز نباید نادیده گرفت.



شکل ۴: مقایسه اثربخشی خنک کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده جانبی با نتایج منتشر شده در مطالعات قبلی در نسبت دم‌ش ۰/۵.

عملکرد خنک کاری لایه‌ای هندسه روزنه شکل یافته

جدید لوبیایی

بر اساس تحقیقات انجام‌شده، هرگاه جت در جریان عرضی تزریق شود، در پایین دست جت گردابه‌هایی تشکیل می‌شود که دارای ساختارهای منسجم و پیچیده‌ای هستند. این ساختارها شامل گردابه‌های نعل‌اسبی^۱، گردابه‌های لایه برشی^۲، گردابه‌های خلاف جهت هم‌گرد^۳ (سی.آر.وی.پی) و گردابه‌های دنباله‌ای^۴ (گردابه‌های چرخشی) می‌باشند [۱۸]. گردابه‌های خلاف جهت هم‌گرد که به گردابه‌های کلیوی نیز معروفند، مهم‌ترین ساختارها در اختلاط جت و جریان اصلی هستند. تشکیل جفت گردابه خلاف هم‌گرد سبب مخلوط شدن جت و جریان عرضی شده و جریان اصلی را به نزدیکی دیواره می‌کشاند. همچنین، باعث خیزش جت و بلند شدن جت از سطح می‌شود که در هر دو مورد، خنک کاری لایه‌ای را تضعیف می‌کند. لذا، پژوهشگران به دنبال حصول کم‌ترین اختلاط بین

به منظور صحت‌سنجی نتایج، اثربخشی خنک کاری لایه‌ای بی‌دررو جت‌های استوانه‌ای ساده با داده‌های موجود مقایسه شده است. با توجه به اینکه شرایط آزمایش و زوایای تزریق در این تحقیق دقیقاً با تحقیقات انجام شده قبلی یکسان نیست، چندین مطالعه مشابه برای مقایسه انتخاب شده است. دقت شود که اختلافات کوچک بین نمودارهای مختلف به دلیل تفاوت نسبت چگالی، نسبت دم‌ش، زاویه تزریق و عدم قطعیت نتایج می‌باشد.

در شکل ۴، توزیع اثربخشی خنک کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده جانبی در نسبت دم‌ش ۰/۵ با داده‌های موجود مقایسه شده است. لازم به ذکر است که جهت محاسبه اثربخشی خنک کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده جانبی، از داده‌های خروجی دوربین که بصورت پیکسل به پیکسل می‌باشد، در نرم افزار اکسل در هر X در فاصله‌ی جانبی $-1/5 < Z/D < 1/5$ متوسط‌گیری جانبی شده است.

می‌توان مشاهده کرد که نتایج بدست آمده مطابقت خوبی با

نتایج هانگل و همکارانش [۳۱] مخصوصاً در $2 < \frac{X}{D} < 10$

دارد. تغییرات مشاهده‌شده بین نتایج ممکن است به دلیل تفاوت در نسبت چگالی یا شدت آشفتگی باشد. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری‌های لاوسون و تول [۳۲] نسبت به اندازه‌گیری‌های حاضر کارایی بالاتری را نشان می‌دهد که می‌تواند مربوط به شدت آشفتگی بیش‌تر جریان اصلی باشد. شرایط آزمایش کونز و همکارانش [۳۳]، جانسون و همکارانش [۳۴] و ان و همکارانش [۳۵] مشابه مطالعه حاضر است که بازده خنک کاری کم‌تری را در مقایسه لاوسون و تول نشان می‌دهد. با این حال، با توجه به اختلاف نسبت چگالی و شدت آشفتگی، راندمان خنک کاری بالاتری در مقایسه با مطالعه حاضر بدست آمده است.

با مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج مرجع [۱۱] (سینها و همکارانش ۱۹۹۱)، برخی تفاوت‌ها را می‌توان در نسبت دم‌ش ۰/۵ مشاهده کرد. این ممکن است به دلیل گام

¹ Horse Shoe Vortices (HSV)

² Shear Layer Vortices (SLV)

³ Counter Rotating Vortex Pair (CRVP)

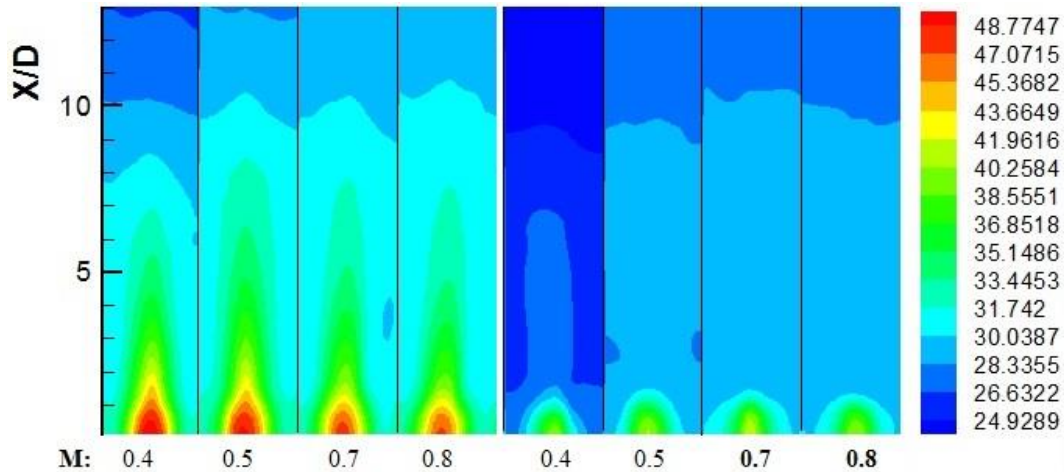
⁴ Wake Vortices

جت و جریان عرضی با کنترل صحیح این جفت گردابه‌ها هستند. با استفاده از هندسه‌های پیشرفته جهت روزه جت، انتظار می‌رود که جریان جت کنترل شده و میزان اختلاط کاهش یابد. به علاوه، با توزیع جانبی یکنواخت‌تر جریان جت، انتظار می‌رود که خنک‌کاری مؤثرتری حاصل گردد.

در تحقیق حاضر، هندسه روزه نوین لوبیایی شکل مورد مطالعه قرار گرفته است. انتظار می‌رود که انحنای خاص سطح مقطع روزه‌ی جدید باعث شود که در برخورد جریان جت با جریان اصلی، گردابه‌های کلیوی تضعیف شده و متوسط ارتفاع جهش عمودی جت لوبیایی شکل در مقایسه با جت استوانه‌ای کاهش یابد. لذا پیش‌بینی می‌شود که مشکل اختلاط جریان جت و جریان اصلی در هندسه لوبیایی شکل نسبت به هندسه استوانه‌ای، بهبود یابد و جریان جت در جهت جانبی و محوری روی سطح به مراتب بهتر توزیع گردد. بنابراین، روزه لوبیایی - شکل باید بتواند پوشش جریان مؤثرتری روی سطح ایجاد کند. هرچه نسبت اندازه حرکت جریان جت به جریان اصلی بزرگ‌تر باشد، نفوذ جت خنک‌کننده در جریان عرضی بیش‌تر شده و اندرکنش دو جریان متقاطع افزایش می‌یابد. هرچقدر قدرت گردابه‌های خلاف‌هم‌گرد و ناحیه چرخشی که ایجاد می‌کنند بزرگ‌تر باشد، جت از سطح صفحه بیش‌تر فاصله گرفته و اختلاط جریان جت با جریان هوای داغ عرضی افزایش می‌یابد. این افزایش اختلاط باعث کاهش اثربخشی خنک‌کاری می‌شود. هرگاه نسبت اندازه حرکت بین جت و جریان اصلی پایین باشد، ساختار گردابه‌های خلاف‌هم‌گرد تشکیل نمی‌شوند. در نسبت - دمش پایین، جت به سطح صفحه خیلی نزدیک خواهد بود. لذا، قدرت گردابه‌های تشکیل شده و میزان نفوذ در راستای عرضی نیز کاهش می‌یابد. پیش‌بینی می‌شود که با استفاده از هندسه جدید لوبیایی شکل، در مقایسه با هندسه استوانه‌ای ساده، در اثر افزایش نسبت دمش، اندازه حرکت عمودی جت کم‌تر و میزان افزایش اندازه حرکت افقی آن بیش‌تر شود. لذا انتظار می‌رود که این طرح، منجر به پخش وسیع‌تر جریان روی سطح شده و در نتیجه اثربخشی بهتری را در پایین دست جت‌ها ایجاد نماید.

شکل ۵، خطوط هم‌تراز دمای سطح برای هر دو هندسه روزه استوانه‌ای و لوبیایی شکل در نسبت دمش‌های مختلف را نشان

می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که در نزدیکی خروجی جت، جت به سطح متصل می‌شود و در حین دور شدن از خروجی جت در جهت جریان اصلی، جت استوانه‌ای تقریباً به‌طور کامل از سطح جدا می‌شود ولی برای روزه لوبیایی شکل، این جدایی به تدریج صورت می‌گیرد. این رفتارها برای هر دو هندسه، باعث کاهش اثربخشی خنک‌کاری می‌شود. با مقایسه خطوط هم‌تراز دما برای دو نوع روزه مذکور در هر نسبت دمش، مشاهده می‌شود که هندسه روزه لوبیایی شکل پوشش جریان جت بهتری را روی سطح ایجاد می‌کند که منجر به محافظت بهتری از سطح در برابر جریان عرضی می‌شود. با در نظر گرفتن نسبت دمش ۰/۸ برای هندسه روزه استوانه‌ای، اثر خنک‌کنندگی جریان جت روی سطح به‌طور ناگهانی پس از تزریق جت از بین می‌رود، در حالی که برای هندسه روزه لوبیایی - شکل، این اثر به تدریج محو می‌شود. بنابراین، به نظر می‌رسد وقتی جت از روزه‌های لوبیایی شکل وارد جریان متقاطع می‌شود، در مقایسه با روزه‌های استوانه‌ای، نفوذ عمودی کم‌تری داشته و از گسترش جانبی بیش‌تری برخوردار است. لازم به ذکر است که در بدو ورود جت به جریان اصلی، بیش‌ترین پرتاب عمودی جریان جت رخ می‌دهد. با توجه به تولید جفت گردابه کلیوی در جت استوانه‌ای، جریان جت دچار جهش عمودی می‌شود. اما در روزه شکل یافته با توجه به هندسه آن، گردابه‌های کلیوی تضعیف شده و میزان جهش عمودی کم‌تر خواهد بود. بنابراین جریان اصلی، جریان جت را روی سطح می‌چسباند و میزان کاهش اثر خنک‌کنندگی کم‌تر شده و کاهش ناگهانی اثر خنک‌کنندگی اتفاق نمی‌افتد. ساختار جریان حاصل از طرح مذکور، اختلاط بین جریان اصلی و جت‌های خنک‌کننده را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر، جت راحت‌تر در مجاورت سطح می‌ماند. یعنی انحنای سطح مقطع روزه لوبیایی شکل باعث کاهش معنی‌داری در اندازه حرکت جت می‌شود و متعاقباً با افزایش نسبت دمش، اثربخشی افزایش می‌یابد.



شکل ۵: توزیع دما روی سطح (دیوار آدیاباتیک) با استفاده از دمانگاری مادون قرمز برای روزنه‌های استوانه‌ای ساده (راست) و روزنه‌های لوبیایی- شکل (چپ) در نسبت‌دمش‌های مختلف.

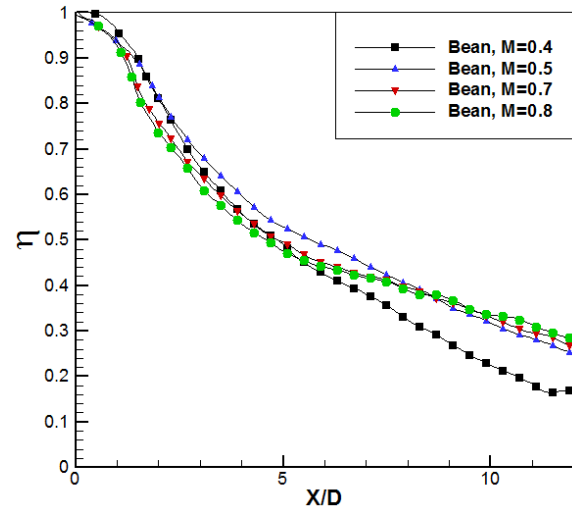
در شکل ۶، اثربخشی خنک کاری لایه‌ای جت‌های دارای هندسه روزنه لوبیایی شکل در نسبت‌دمش‌های مختلف ارائه شده است. در شکل ۶- الف اثربخشی خنک کاری لایه‌ای محوری در جهت جریان در فاصله $0 < \frac{X}{D} < 12$ روی سطح برای نسبت‌دمش‌های مختلف ترسیم شده است. می‌توان مشاهده کرد که اگرچه در نسبت‌دمش ۰/۴ اثربخشی خنک کاری بالاتری در نزدیکی خروجی جت بدست می‌آید، ولی با حرکت در راستای جریان، اثربخشی خنک کاری کاهش زیادی می‌یابد و حتی به کم‌تر از سه نسبت‌دمش دیگر می‌رسد. در مقایسه با سایر نسبت‌دمش‌ها، در نسبت‌دمش ۰/۵ بهترین اثربخشی خنک کاری در فاصله $0 < \frac{X}{D} < 8$ به دست می‌آید. اگرچه نسبت‌دمش‌های ۰/۷ و ۰/۸ اثربخشی خنک کاری اندکی بالاتر را در فاصله $8 < \frac{X}{D} < 12$ نشان می‌دهند، اما در فاصله $0 < \frac{X}{D} < 12$ ، نسبت‌دمش ۰/۵ رفتار کلی بهتری را نشان می‌دهد.

اثربخشی خنک کاری لایه‌ای حاصل شده است. به‌طور کلی، با مقایسه این نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که در فاصله $0 < \frac{X}{D} < 12$ ، نسبت‌دمش ۰/۵ بهترین اثربخشی خنک کاری متوسط‌گیری شده جانبی را نتیجه می‌دهد. توجه داشته باشید که دور از خروجی جت، نسبت‌دمش ۰/۸ بالاترین راندمان خنک کاری را به همراه دارد. در نسبت‌دمش‌های پایین، چون در مقطع خروجی جت جهش پایین‌تری داریم، در فواصل نزدیک افت کم‌تری حاصل می‌شود. اما چون میزان دبی جت کم است، در پایین دست دور از روزنه، جریان جت با جریان اصلی مخلوط شده و بیش‌تر دچار اضمحلال می‌گردد و فاصله اثرگذاری کم‌تری خواهد داشت. ولی در نسبت‌دمش‌های بالا، چون دبی جریان خروجی بالاتر است، جریان جت دیرتر دچار اضمحلال می‌شود و فاصله اثرگذاری بالاتری خواهد داشت.

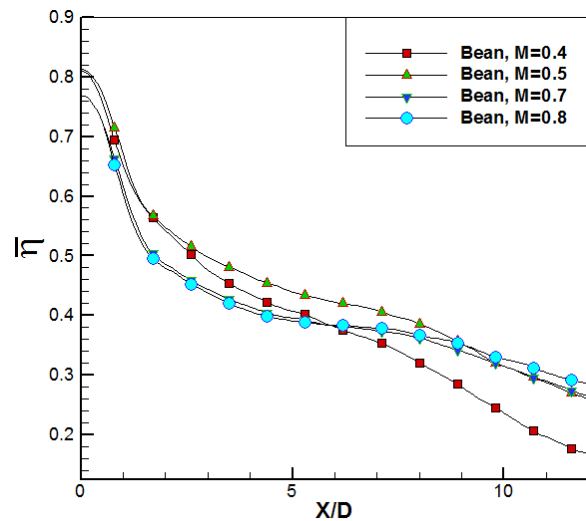
در شکل ۶- ب، اثربخشی خنک کاری لایه‌ای متوسط-گیری شده جانبی روی سطح در نسبت‌دمش‌های مختلف برای هندسه روزنه لوبیایی شکل نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که در نسبت‌دمش ۰/۴ و در فاصله $6 < \frac{X}{D} < 12$ ، کم‌ترین اثربخشی خنک کاری لایه‌ای به دست می‌آید. همچنین در نسبت‌دمش‌های ۰/۷ و ۰/۸ در $6 < \frac{X}{D} < 12$ ، کم‌ترین مقدار

لوبیایی شکل در مقایسه با هندسه استوانه‌ای ساده، در همه نسبت‌دمش‌های ذکر شده بالاتر است. با مقایسه نمودارهای ارائه شده در شکل ۷، پس از خروج جت در فاصله $0 < \frac{X}{D} < 12$ نسبت‌دمش ۰/۵ بهترین اثربخشی کلی را در مقایسه با سایر هندسه استوانه‌ای ساده (در زاویه تزریق و عدد رینولدز به کار رفته)، نسبت دممش بهینه برابر با ۰/۷ می‌باشد. یعنی با زیاد شدن نسبت‌دمش به ۰/۸، جهش عمودی جت زیاد شده و بعد از آن اثربخشی کاهش زیادی می‌یابد. البته در نسبت‌دمش ۰/۸، با وجود این که جهش عمودی جت زیاد شده اما از طرفی چون دبی جرمی جت نیز افزایش یافته، در فاصله پایین دست نزدیک به روزنه، بیش‌ترین اثربخشی حاصل می‌شود و سپس در فاصله $2 < X/D < 8$ ، اثربخشی آن در مقایسه با دو نسبت‌دمش ۰/۵ و ۰/۷ کم‌تر می‌گردد. برای موشکافی این مسئله که چرا بالاترین اثربخشی در پایین دست نزدیک جت استوانه‌ای در بالاترین نسبت تزریق رخ داده است، ضروری است که آشکار سازی وابسته به زمان در این محدوده از جریان صورت پذیرد و موضوع مورد مطالعه دقیق قرار گیرد.

در هندسه روزنه لوبیایی شکل، توزیع جریان خنک کاری در جهت محوری روی سطح بخصوص در بالاترین نسبت‌دمش، افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که بدو ورود جت به جریان اصلی، بیش‌ترین پرتاب عمودی جریان جت رخ می‌دهد. با توجه به تولید جفت گردابه کلیوی در جت استوانه‌ای، جت دچار جهش عمودی می‌شود. اما در روزنه شکل یافته لوبیایی، با توجه به هندسه آن، گردابه‌های کلیوی تضعیف شده و میزان جهش عمودی کاهش می‌یابد. بنابراین، جریان اصلی جریان جت را روی سطح می‌چسباند و میزان کاهش اثر خنک‌کنندگی کم‌تر می‌شود و کاهش ناگهانی اثر خنک‌کنندگی رخ نمی‌دهد. ساختار جریان حاصل از طرح مذکور، اختلاط بین جریان اصلی و جت‌های خنک‌کننده را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر، جت راحت‌تر در مجاورت سطح می‌ماند. یعنی انحنای سطح مقطع روزنه لوبیایی شکل باعث کاهش معنی‌داری



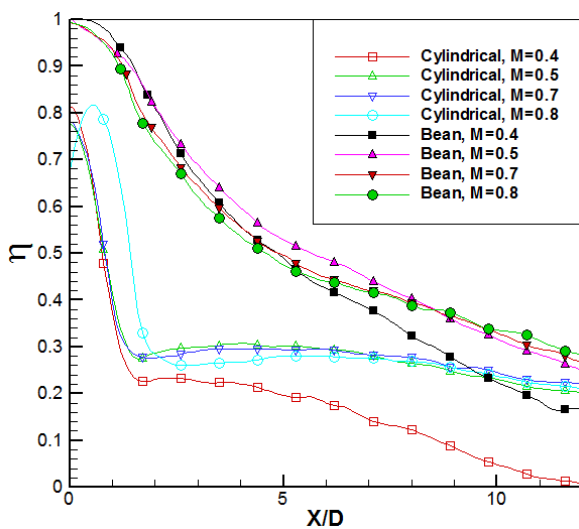
(الف)



(ب)

شکل ۶: توزیع اثربخشی خنک کاری لایه‌ای در نسبت‌دمش‌های مختلف الف) محوری ب) متوسط‌گیری شده جانبی

اثرات هندسه روزنه بر اثربخشی خنک کاری لایه‌ای برای هندسه روزنه استوانه‌ای ساده و هندسه روزنه لوبیایی شکل در چهار نسبت‌دمش ۰/۴، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۸ در شکل ۷ نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که هندسه روزنه لوبیایی شکل در کم‌ترین نسبت‌دمش ۰/۴ بالاترین راندمان را در نزدیکی خروجی جت $(X/D) < 1$ ارائه می‌دهد، اما به تدریج در پایین دست دچار اضمحلال سریع می‌شود. کاملاً مشهود است که اثربخشی خنک کاری لایه‌ای محوری برای هندسه روزنه



شکل ۷: مقایسه توزیع اثربخشی خنک کاری محوری هندسه روزنه لوبیایی شکل با هندسه روزنه استوانه‌ای در نسبت‌دمش‌های مختلف.

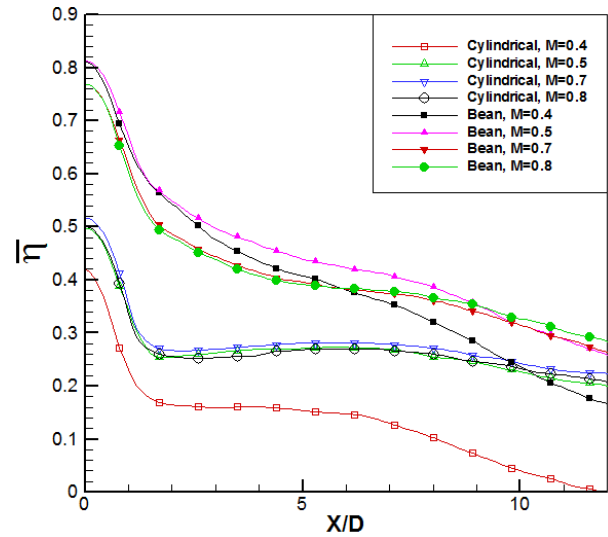
شکل ۸ اثربخشی خنک کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده جانبی را برای هندسه‌های روزنه استوانه‌ای و روزنه لوبیایی شکل در نسبت‌دمش‌های متفاوت نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که در هر چهار نسبت‌دمش اعمال شده، روزنه‌های لوبیایی شکل در مقایسه با روزنه‌های استوانه‌ای، کارایی بالاتری دارند. با توجه به اثربخشی خنک کاری روزنه‌های لوبیایی شکل در نسبت‌دمش ۰/۵، می‌توان مشاهده کرد که این نسبت‌دمش بهترین اثربخشی را دارد. لازم به ذکر است که با اعمال میانگین‌گیری جانبی برای هر دو هندسه، کاهش ناگهانی اثربخشی خنک کاری پس از خروج جت در هندسه روزنه استوانه‌ای رخ می‌دهد، اما این پدیده برای هندسه روزنه لوبیایی شکل رخ نمی‌دهد. علاوه بر این، در روزنه لوبیایی شکل، نسبت‌دمش بهینه کاهش می‌یابد که به معنی مصرف هوای خنک کاری کمتر و در عین حال حصول اثربخشی بالاتری می‌باشد.

در اندازه حرکت جت می‌شود و متعاقباً با افزایش نسبت‌دمش، اثربخشی افزایش می‌یابد. توجه داشته باشید که کاهش ناگهانی اثربخشی خنک کاری پس از خروج جت در هندسه روزنه استوانه‌ای رخ می‌دهد، اما این پدیده در هندسه روزنه لوبیایی-شکل رخ نمی‌دهد. علاوه بر این، برای روزنه‌های لوبیایی شکل، نسبت‌دمش بهینه کاهش می‌یابد. یعنی با مصرف هوای خنک-کننده کمتر، اثربخشی بالاتری حاصل می‌شود.

لازم به ذکر است که $X/D = 0$ لبه خروجی در پایین دست جت می‌باشد. در نقطه خروجی جت (لبه خروجی جت)، بسته به نسبت‌دمش، هندسه جت و زاویه تزریق، جهش عمودی جت و به طبع آن اثربخشی جت قطعاً تغییر خواهد کرد. برای جت استوانه‌ای ساده، جت دارای جهش عمودی به مراتب بیشتری نسبت به هندسه لوبیایی خواهد بود و جریان اصلی از اطراف به زیر آن نفوذ کرده و در نسبت سرعت‌های بالا، حباب جدایی جریان شکل می‌گیرد. از طرف دیگر، به نظر می‌رسد که اختلاط جریان عرضی با جریان جت در حالت جت استوانه‌ای بیشتر و سریع‌تر صورت می‌گیرد که باعث کاهش سریع اثربخشی خنک کاری از بدو ورود جت به جریان عرضی می‌گردد. لذا دو عامل اختلاط دو جریان و همچنین دور زدن جت توسط جریان عرضی باعث شده که اثربخشی محوری خنک کاری در نقطه خروجی جت در جت استوانه‌ای کمتر از یک باشد. همچنین، دقت شود که در فاصله بین دو جت مجاور، تزریقی صورت نمی‌گیرد و جریان عرضی در تماس مستقیم با سطح خواهد بود (البته، این موضوع در اثربخشی میانگین‌گیری شده در جهت جانبی و میانگین‌گیری شده کل دامنه مطرح است). از طرف دیگر، با توجه به نتایج حاصل، این گونه برآورد می‌شود که روزنه شکل‌یافته لوبیایی، با توجه هندسه و فیزیک جریان بوجود آمده در پایین دست جت، به جریان اصلی اجازه نفوذ در پشت جت را نمی‌دهد. یعنی در هندسه لوبیایی شکل، اختلاف دمایی بین جریان جت داخل پلنوم و جریان جت در نقطه خروجی جت ایجاد نمی‌شود.

شکل ۹ اثربخشی خنک کاری لایه‌ای متوسط گیری شده کل ناحیه را برای هندسه‌های روزنه استوانه‌ای ساده و روزنه لوبیایی شکل در نسبت‌دمش‌های مختلف نشان می‌دهد. برای بدست آوردن اثربخشی خنک کاری لایه‌ای متوسط گیری شده کل ناحیه، مقدار اثربخشی در هر دو جهت طولی و جانبی در ناحیه بین دو جت مجاور متوسط گیری شده است ($0 < X/D < 12, -1/5 < Z/D < 1/5$). می‌توان به وضوح مشاهده کرد که اثربخشی خنک کاری لایه‌ای متوسط-گیری کل ناحیه بدست آمده برای هندسه روزنه لوبیایی شکل بالاتر از روزنه استوانه‌ای ساده برای همه نسبت‌دمش‌ها است. بالاترین اثربخشی خنک کاری متوسط‌گیری کل ناحیه برای روزنه استوانه‌ای ساده در نسبت‌دمش ۰/۷ رخ می‌دهد. اما برای هندسه لوبیایی شکل، این موضوع در نسبت‌دمش ۰/۵ رخ می‌دهد. با مقایسه اثربخشی خنک کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده کل ناحیه برای هر دو نوع هندسه روزنه در هر نسبت‌دمش، می‌توان نتیجه گرفت که در نسبت‌دمش ۰/۴، اثربخشی خنک کاری ۲۰۷/۶ درصد و در نسبت‌دمش ۰/۷ حدود ۴۵/۴ درصد افزایش می‌یابد.

با در نظر گرفتن اثربخشی خنک کاری متوسط گیری شده کل ناحیه، طبق نتایج آزمایشات انجام شده، نسبت‌دمش بهینه برای هندسه استوانه‌ای ۰/۷ و برای هندسه لوبیایی شکل ۰/۵ می‌باشد. یعنی در روزنه لوبیایی به دلیل هندسه خاص آن و در نتیجه تغییر ساختار و رفتار جت، اختلاط دو جریان متقاطع مذکور کاهش یافته و اثربخشی خنک کاری جت در نسبت‌دمش پایین تری به بیشینه مقدار خود می‌رسد. اما در هندسه استوانه‌ای چون اختلاط جت و جریان اصلی بالاست، باید جریان خنک کننده بیش تری تزریق گردد تا اثربخشی به حداکثر مقدار خود برسد. بنابراین در هندسه شکل یافته با استفاده از مقدار سیال خنک کننده کم تر، اثربخشی بهتری حاصل شده است.

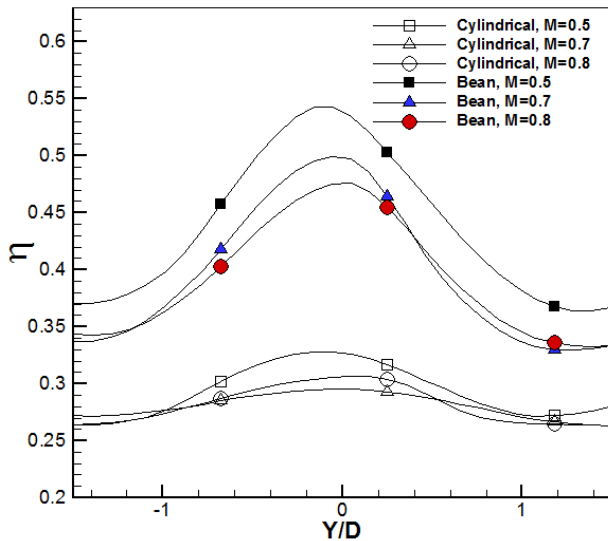


شکل ۸: مقایسه توزیع اثربخشی خنک کاری لایه‌ای میانگین گیری شده جانبی برای هندسه روزنه لوبیایی شکل با هندسه روزنه استوانه‌ای در نسبت‌دمش‌های مختلف.

جدول ۱ مقادیر اثربخشی خنک کاری لایه‌ای میانگین گیری شده جانبی مربوط به نسبت‌دمش بهینه ۰/۵ در چند X/D مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که اثربخشی خنک کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده جانبی در این مقاطع به طور میانگین ۶۰/۷ درصد بهبود یافته است. لازم به ذکر است که این محاسبه برای اثربخشی خنک کاری محوری نیز انجام شده که مقادیر اثربخشی خنک کاری لایه‌ای محوری نیز به طور میانگین، افزایش ۷۶ درصدی را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مقادیر راندمان اثربخشی خنک کاری لایه‌ای میانگین-گیری شده جانبی در X/D های مختلف.

فاصله بی بعد از مرکز روزنه	استوانه‌ای ساده	شکل یافته لوبیایی	درصد افزایش
۱	۰/۳۴	۰/۱۶۷	۹۷٪
۳	۰/۱۲۶	۰/۴۹۶	۹۰/۷٪
۵	۰/۱۲۷	۰/۴۳۷	۶۱/۸٪
۷	۰/۱۲۶۸	۰/۴	۴۹/۲٪
۱۰	۰/۱۲۲	۰/۳	۳۶/۳٪
۱۲	۰/۱۲	۰/۲۵۸	۲۹٪
میانگین			۶۰/۷٪



شکل ۱۰: مقایسه توزیع جانبی اثربخشی خنک کاری در $X/D = 5$.

نتیجه‌گیری

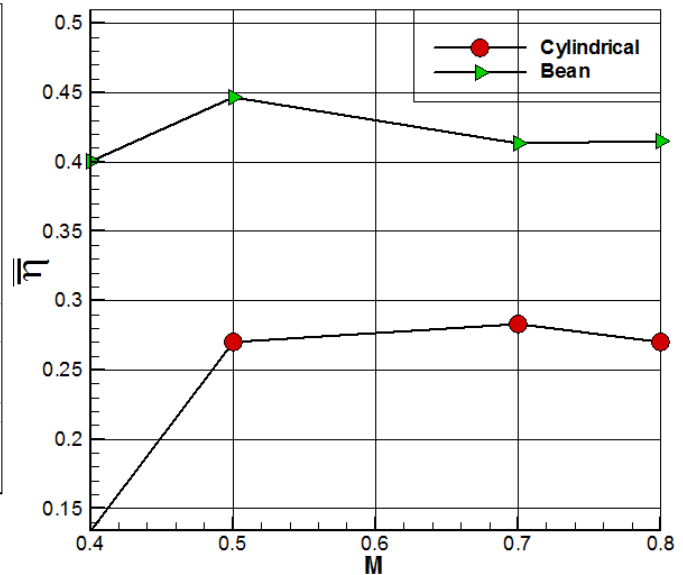
در این تحقیق از دمانگاری مادون قرمز برای بررسی اثربخشی خنک کاری لایه‌ای روزنه جدید لوبیایی شکل استفاده شده و نتایج بدست آمده با نتایج روزنه‌های استوانه‌ای ساده روی صفحه تخت مقایسه گردیده است. اهم نتایج بدست آمده عبارتند از:

(الف) طرح جدید روزنه لوبیایی شکل، با استفاده از مقدار سیال خنک‌کننده کم‌تر در مقایسه با روزنه‌های استوانه‌ای سنتی، اثربخشی خنک کاری لایه‌ای بالاتری را ایجاد می‌کند.

(ب) بهترین اثربخشی خنک کاری لایه‌ای برای هندسه روزنه لوبیایی شکل در نسبت دممش ۰/۵ بدست می‌آید. یعنی با استفاده از همان مقدار دبی جرمی تزریقی، توزیع یکنواخت‌تری از لایه سیال خنک‌کننده روی سطح فراهم می‌شود.

(ج) برای هندسه روزنه لوبیایی شکل، در نسبت دممش بهینه ۰/۵، اثربخشی خنک کاری لایه‌ای محوری و متوسط‌گیری شده جانبی در شش X/D مختلف پس از تزریق جت روی سطح، به ترتیب به‌طور میانگین ۶۰/۷ و ۷۶ درصد افزایش می‌یابد. یعنی افزایش قابل‌توجهی در اثربخشی خنک کاری لایه‌ای محوری و متوسط‌گیری شده جانبی وجود دارد.

(د) با مقایسه اثربخشی خنک کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده کل ناحیه برای هر دو نوع هندسه روزنه در هر نسبت دممش، می‌توان نتیجه گرفت که در نسبت دممش ۰/۴، اثربخشی خنک کاری ۲۰۷/۶ درصد و در نسبت دممش ۰/۷ حدود ۴۵/۴ درصد افزایش می‌یابد.



شکل ۹: اثربخشی خنک کاری متوسط‌گیری شده کل ناحیه برای هندسه‌های استوانه‌ای ساده و لوبیایی شکل در نسبت دممش‌های مختلف.

شکل ۱۰ توزیع جانبی اثربخشی خنک کاری بعد از خروجی جت در $X/D = 5$ در نسبت دممش‌های ۰/۷ و ۰/۸ برای هر دو هندسه روزنه را نشان می‌دهد. در این حالت نیز نتایج مشابهی مشاهده می‌شود. یعنی با مقایسه اثربخشی خنک کاری دو هندسه روزنه در هر نسبت دممش، مشاهده می‌شود که روزنه لوبیایی شکل در مقایسه با روزنه استوانه‌ای، منجر به اثربخشی بالاتری می‌گردد. به عبارت دیگر، با به‌کار بردن هندسه لوبیایی شکل، هوای خنک‌کننده بهتر در جهت جانبی گسترش می‌یابد که منجر به اثربخشی خنک کاری بالاتر می‌شود. هم‌چنین، هندسه روزنه لوبیایی شکل بالاترین توزیع جانبی اثربخشی خنک کاری لایه‌ای را در نسبت دممش ۰/۵ ارائه می‌دهد.

- “Hydrodynamic measurements of Jets in crossflow for gas turbine film cooling applications,” Vol. 111, No. April 1989, pp. 139–145, 1989.
- [10] C. M. Pietrzyk J. R., Bogard D. G., “Effects of density ratio on the hydrodynamics of film cooling,” Vol. 112, No. July 1990, pp. 437–443, 1990.
- [11] A. K. Sinha, D. G. Bogard and M. E. Crawford, “Film-cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio,” *J. Turbomach.*, Vol. 113, No. 3, pp. 442–449, 1991.
- [12] J. H. Leylek and R. D. Zerkle, “Discrete-jet film cooling : a comparison of computational results with experiments,” Vol. 116, No. July 1994, 1994.
- [13] M. Gritsch, W. Colban, H. Scha□r, K. Do□bbeling, H. Schär and K. Döbbeling, “Effect of hole geometry on the thermal performance of fan-shaped film cooling holes,” *J. Turbomach.*, Vol. 127, No. 4, p. 718, 2005.
- [14] C. Saumweber and A. Schulz, “Effect of geometry variations on the cooling performance of fan-shaped cooling holes,” *ASME Turbo Expo*, Vol. 134, pp. 1–16, 2008.
- [15] S. Gritsch, M., Schulz, A., and Wittig, “Adiabatic wall effectiveness measurements of film-cooling holes with expanded exits,” *ASME J. Turbomach.*, Vol. 3, No. 98, pp. 931–938, 2006.
- [16] X. Zhu, L. Liu and F. Yuan, “Effect of rotation on flow field and film cooling effectiveness in film-cooled turbine rotors,” Vol. 31, No. 4, pp. 361–370, 2014.
- [17] S. Khajehhasani and B. Jubran, “Film cooling from novel sister shaped single-holes,” *ASME Turbo Expo 2014 Turbine Tech. Conf. Expo. GT2014*, pp. 1–13, 2014.
- [18] M. R. Salimi M. Ramezanizadeh, and M. Taeibi-Rahni and R. Farhadi-Azar, “Film cooling effectiveness enhancement applying another jet in the upstream neighbor of the main jet-using les approach,” *J. Appl. Fluid Mech.*, Vol. 9, No. 1, pp. 33–42, 2016.
- [19] R. S. Bunker, “A review of shaped hole turbine film-cooling technology,” *J. Heat Transfer*, Vol. 127, pp. 441–453, 2005.
- [20] K. Lee and K. Kim, “Shape optimization of a fan-shaped hole to enhance film-cooling
- (ه هندسه روزنه لوبیایی شکل، در تمام نسبت‌دمش‌های اعمال‌شده به‌طور قابل‌توجهی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای را افزایش می‌دهد که می‌تواند به‌شدت بر خنک‌کاری لایه‌ای پره-های توربین تاثیر گذار باشد.
- (و کاهش ناگهانی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای که پس از خروج جت در هندسه روزنه استوانه‌ای رخ می‌دهد، در اثربخشی خنک‌کاری هندسه روزنه لوبیایی شکل رخ نمی‌دهد.
- منابع و مراجع**
- [1] Z. Wenwu and Hu. Hui, “A novel sand-dune-inspired design for improved film cooling performance,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 110, No. 7, pp. 908–920, 2017.
- [2] J. S. Liu, M. F. Malak, L. A. Tapia and D. C. Crites, “Enhanced film cooling effectiveness with new shaped holes,” *ASME Conference*, pp. 1517–1527, 2010.
- [3] J. B. Anderson, D. G. Bogard, R. D. Moser and G. Laskowski, “Implicit LES for Shaped-hole film cooling flow,” 2017.
- [4] J. H. Liu, Y. B. Liu and L. Liu, “Film cooling modeling of a turbine vane with multiple configurations of holes,” *Case Stud. Therm. Eng.*, Vol. 11, pp. 71–80, 2018.
- [5] R. B. R. J. Goldstein and E. G. Eckert, “Effects of hole geometry and density on three- dimensional film cooling,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 17, no. 5, pp. 595–607, 1974.
- [6] Ramezanizadeh M., Taeibi-Rahni M. and Saidi MH., “Investigation of density ratio effects on normally injected cold jets into a hot cross flow,” *Arch. Appl. Mech.*, Vol. 77, No. 11, pp. 835–847, 2007.
- [7] Taeibi-Rahni M., Ramezanizadeh M., Ganji DD., Darvan A., Ghasemi E., Soleimani S. and Bararni H., “Large-eddy simulations of three dimensional turbulent Jet in a cross flow using a dynamic subgrid-scale eddy viscosity model with a global model coefficient,” *World Appl. Sci. J.*, vol. 9, no. 10, pp. 1191–1200, 2010.
- [8] M. Ramezanizadeh, M. Taeibi-Rahni. M.H. Saidi “Large eddy simulation of multiple jets into a cross flow,” *Scientia Iranica*, Vol. 14, No. 3, pp. 240–250, 2007.
- [9] D. G. Bogard and M. E. Crawford,

- holes,” *J. Turbomach.*, Vol. 131, No. 2, pp. 021007, 2009.
- [32] S. A. Lawson and K. A. Thole, “Effects of simulated particle deposition on film cooling,” *ASME*, Vol. 133, No. 2, pp. 021009, 2011.
- [33] M. Kunze, S. Preibisch and K. Landis, “A new test rig for film cooling experiments on turbine endwalls,” *Proc. ASME Turbo Expo conf*, pp. 989–998, 2008.
- [34] B. Johnson, W. Tian, K. Zhang, and H. Hu, “An experimental study of density ratio effects on the film cooling injection from discrete holes by using PIV and PSP Techniques,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 76, pp. 337–349, 2014.
- [35] B.-T. An, J.-J. Liu, C. Zhang and S.-J. Zhou, “Film cooling of cylindrical hole with a downstream short crescent-shaped block,” *J. Heat Transfer*, Vol. 135, No. 3, p. 031702, 2013.
- [36] A. P. Rallabandi, J. Grizzle and J. Han, “Effect of upstream step on flat plate film-cooling effectiveness using PSP,” *J. ASME Turbomach.*, Vol. 133, No. 4, pp. 041024–1/8, 2011.
- Effectiveness,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 53, No. 15, pp. 2996–3005, 2010.
- [21] Y. P. Lu, “Effect of hole configurations on film cooling from cylindrical inclined holes for the application to gas turbine blades,” Louisiana State University, 2007.
- [22] M. Ramezanizadeh and Y. Pouladrang, “Experimental investigation of film cooling effectiveness applying a novel integrated compound jets design for the jet holes,” *Modares Mech. Eng.*, Vol. 18, No. 03, pp. 302–310, 2018.
- [23] Lee. K. D and K. Kim, “Performance evaluation of a novel film-cooling hole,” *J. Heat Transfer*, Vol. 134, No. 10, p. 101702, 2012.
- [24] Y. Pouladrang and M. Ramezanizadeh, “Experimental investigation of the effect of novel pea jet hole on the thermal behavior of jets injected into a crossflow,” *J. Mechanics & Aerodynamics*, Vol. 7, No.2, p.p 33-34, 2018.
- [25] L. M. Wright and E. L. Martin, “Double-Jet ejection of cooling air for improved film cooling,” *ASME Conf. Proc.*, p. 44541, 2011.
- [26] R. Farhadi-Azar, M. Ramezanizadeh, M. Taeibi-Rahni and M. Salimi, “Compound triple jets film cooling improvements via velocity and density ratios: large eddy simulation,” *J. Fluids Eng.*, Vol. 133, pp. 031202, 2011.
- [27] F. N. A. M. M, Abdala and D. H. Elwekeel, “Film cooling effectiveness and flow structures for novel upstream steps,” *Appl. Therm. Eng*, Vol. 105, No. 10, pp. 397–410, 2016.
- [28] W. Zhou and H. Hu, “Improvements of film cooling effectiveness by using barchan dune shaped ramps,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 103, pp. 443–456, 2016.
- [29] M. Ramezanizadeh and Y. Pouladrang, “Experimental investigation of longitudinal tabs effects on film-cooling effectiveness of pea shaped holes in gas turbine blades,” *Amirkabir J. Mech. Eng.*, Vol.52, No. 4, pp. 813-832, 2020.
- [30] R. J. Moffat, “Describing the uncertainties in experimental results,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 1, No. 1, pp. 3–17, 1988.
- [31] A. Dhungel, Y. Lu, W. Phillips, E. Srinath V. and H. James, “Film cooling from a row of holes supplemented with antivortex