

## مطالعه تجربی اثرات شدت آشفتگی جریان آزاد بر اثربخشی خنک کاری لایه‌های با استفاده از روزنه‌های استوانه‌ای ساده و لوبیایی شکل

دانشیار، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران،  
 ramezanizadeh@ssau.ac.ir  
 کارشناسی ارشد، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران،  
 poladrang@gmail.com  
**مهدی رضانی‌زاده\***  
**یونس پولادرنگ**

### چکیده

در این تحقیق، اثرات افزایش شدت آشفتگی جریان آزاد بر اثربخشی خنک کاری لایه‌های روزنه‌های جت تزریق شده روی صفحه‌ای تخت به صورت تجربی با استفاده از روش دمانگاری مادون قرمز مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی‌ها در سه نسبت دممش ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۸ و سه شدت آشفتگی جریان اصلی (۰/۵، ۱/۵ و ۳/۰) با استفاده از دو نوع روزنه استوانه‌ای ساده و لوبیایی شکل یافته انجام شده است. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری‌ها برای ردیفی از روزنه‌ها با زاویه تزریق ۳۰ درجه نسبت به سطح در سرعت جریان اصلی ۲۷ متر بر ثانیه تحلیل شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش شدت آشفتگی، اثربخشی خنک کاری لایه‌های متوسط‌گیری شده جانبی در نسبت‌دمش پایین کاهش ولی در نسبت‌دمش بالا افزایش می‌یابد، به طوری که منجر به پخش جت روی ناحیه بزرگ‌تری می‌شود. حساسیت اثربخشی خنک کاری لایه‌های نسبت به میزان شدت آشفتگی، برای روزنه‌های شکل یافته لوبیایی در مقایسه با روزنه استوانه‌ای کم‌تر است. در نسبت‌دمش ۰/۵ که بیش‌ترین حساسیت را نسبت به تغییرات شدت آشفتگی دارد، برای دو هندسه استوانه‌ای ساده و لوبیایی شکل، به ترتیب درصد کاهش اثربخشی خنک کاری لایه‌های متوسط‌گیری شده جانبی ۴۳/۵٪ و ۱۳٪ می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** اثربخشی خنک کاری لایه‌ای، شدت آشفتگی جریان اصلی، آزمایش تجربی، دمانگاری مادون قرمز، تونل باد، پره توربین‌های گازی.

## Experimental Investigation of the Effects of Free Stream Turbulence Intensity on the Film Cooling Effectiveness in Gas Turbines from Simple Cylindrical and Shaped Bean Holes

**M. Ramezanizadeh**  
**Y. Pouladrang**

Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran  
 Graduate Center, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran

### Abstract

The present study investigated several test samples with three blowing ratios of 0.5, 0.7 and 0.8 and three main stream turbulence intensities (0.5%, 1.5% and 3%) using two types of simple cylindrical and shaped beans holes. Measurements are provided for a row of holes with an axial angle of 30 degrees relative to the surface, and mainstream velocity 27 m/s. The results show that with increasing turbulence intensity, the laterally film cooling effectiveness decreases at low blowing ratio but increases at high blowing ratio such that the jet spreads on a larger area. The sensitivity of the film cooling effectiveness to turbulence intensity for bean shaped holes is significantly reduced compared to cylindrical holes. At the blowing ratio of 0.5, which has the most sensitive to turbulence intensity changes, for the two cylindrical and bean geometries, respectively, the reduction percent of the laterally averaged film cooling efficiency are 43.5% and 13%, respectively.

**Keywords:** film cooling effectiveness, main stream turbulence intensity, Experimental test, infrared thermography, wind Tunnel, Gas turbine blades.

تحمل حرارتی پره‌ها این امر را دشوار می‌سازد [۲]. برای غلبه بر این چالش، از طرح‌های خنک کاری پیشرفته‌ای نظیر خنک کاری داخلی و لایه‌ای [۳] استفاده می‌شود که مؤثرترین روش برای محافظت از پره‌ها در برابر شکست حرارتی، خنک کاری لایه‌ای است [۴-۶]. این روش دمای مجاز فلز تیغه را حفظ کرده و ماندگاری توربین را افزایش می‌دهد [۷]. با وجود مطالعات گسترده (عددی و تجربی)، به دلیل پیچیدگی عملیاتی موتور، مهندسان همچنان به دانش بیشتری در این زمینه نیازمندند [۳].

بهینه‌سازی خنک کاری لایه‌ای پره‌های توربین، بر اساس مطالعات پژوهشی، بر عواملی چون هندسه روزنه، دبی سیال خنک‌کننده، نسبت

### ۱- مقدمه

فرسایش پره‌های کمپرسور و تیغه‌های توربین، که ناشی از سایش، خوردگی حرارتی یا خستگی مواد است، چالشی حیاتی در موتورهای جت محسوب می‌شود. این فرسایش منجر به افزایش آشفتگی جریان شده و به طور مستقیم بر کارایی خنک کاری و بازده کلی توربین تأثیر منفی می‌گذارد؛ درک این فرآیندها برای بهبود طراحی ضروری است. کمپرسور، با فشرده‌سازی هوا، بازده توربین گازی را از طریق افزایش نسبت فشار بهبود می‌بخشد [۸]. افزایش راندمان حرارتی توربین گازی مستلزم افزایش دمای گاز ورودی به توربین است، اما محدودیت

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: ramezanizadeh@ssau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۳/۰۵/۲۶

تاریخ پذیرش: ۰۴/۰۹/۰۴

دمش، و زاویه تزریق جت متمرکز است.

هندسه روزنه به عنوان عامل کلیدی مؤثر بر پوشش لایه‌ای جت خنک‌کننده در نظر گرفته می‌شود. جهت افزایش استحکام و راندمان، طراحی روزنه‌ها از شیرهای اولیه به سمت طرح‌های استوانه‌ای و سپس شکل‌یافته پیشرفت کرده است [۸]. روزنه‌های شکل‌یافته معمولاً دارای خروجی گسترش‌یافته جانبی یا طولی هستند تا اتصال و ماندگاری بهتری از جت خنک‌کننده روی سطح فراهم شود. سلیمی و همکارانش [۹] با شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، نشان دادند که افزودن یک جت کوچک‌تر (حتی هم‌دما با جریان عرضی) به بالادست جت اصلی، می‌تواند اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای را به طور قابل توجهی افزایش دهد.

پولادرنگ و رضانی‌زاده [۱۰] روزنه‌های نخودی شکل را به طور تجربی بررسی کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که هندسه پیشنهادی آنها دارای نسبت‌دمش بهینه ۰/۷ است و در مقدار دبی جریان جرمی یکسان، روزنه‌های شکل‌یافته در مقایسه با روزنه‌های استوانه‌ای، دارای توزیع یکنواخت‌تری از لایه سیال خنک‌کننده هستند. رضانی‌زاده و پولادرنگ [۱۱]، عملکرد روزنه‌های شکل‌داده شده گوشواره‌ای در مقایسه با روزنه‌های استوانه‌ای ساده را با استفاده از روش تجربی دمانگاری مادون‌قرمز بررسی کردند. ساختار جریان حاصل از طرح مذکور، اختلاط بین جریان اصلی و جت‌های خنک‌کننده را به‌طور قابل توجهی کاهش داد و توزیع جریان یکنواخت‌تری از سیال خنک‌کننده را روی سطح ایجاد نمود.

علاوه بر هندسه روزنه‌ها، پارامترهای آیرودینامیکی مانند دبی و نسبت دمش جت خنک‌کننده نقش مهمی در خنک‌کاری لایه‌ای دارند. نسبت دمش بالا می‌تواند باعث هدررفت سیال شود، در حالی که نسبت پایین پوشش مؤثر سطح را کاهش می‌دهد؛ بنابراین انتخاب نسبت دمش بهینه برای عملکرد مطلوب ضروری است [۱۲]. دیتمار و همکارانش [۱۳] نشان دادند که در نسبت دمش پایین، اثربخشی خنک‌کاری بین روزنه‌های استوانه‌ای دو ردیفه و بادبزی شکل تک‌ردیفه مشابه است، اما در نسبت دمش بالا، روزنه‌های بادبزی شکل خنک‌کاری مؤثرتری فراهم می‌کنند.

عامل دیگری که بر کیفیت پوشش‌دهی جت خنک‌کننده مؤثر است، شدت آشفتگی<sup>۱</sup> جریان اصلی می‌باشد. در خروجی محفظه احتراق، شدت آشفتگی می‌تواند تا ۲۰٪ زیاد شود و در ورودی روتور، شدت آشفتگی می‌تواند در محدوده ۸ الی ۱۲ درصد باشد [۱۴]. شدت بالای آشفتگی جریان، با تقویت اندرکنش میان جت خنک‌کننده و جریان اصلی، تأثیری چشمگیر بر کارایی خنک‌کاری لایه‌ای برجای می‌گذارد.

اریکسن و گلدشتاین [۱۵] و لبدو و همکارانش [۱۶] تأثیر شدت آشفتگی جریان اصلی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که در نسبت اندازه‌حرکت نسبتاً کم، افزایش شدت آشفتگی می‌تواند اختلاط جریان ثانویه و جریان اصلی را تسریع نماید. در نتیجه، منجر به تخریب جریان ثانویه می‌شود. بنابراین، بازده خنک‌کاری لایه‌ای کاهش می‌یابد. با این حال، در نسبت اندازه‌حرکت بالا، شدت

آشفتگی زیاد باعث اتصال مجدد جت جدا شده به دیواره می‌شود. بنابراین، اثربخشی خنک‌کاری بهبود می‌یابد. سامویر و همکارانش [۱۴] با استفاده از سامانه مادون قرمز، سه هندسه روزنه خنک‌کاری لایه‌ای در شدت آشفتگی‌های در محدوده ۲/۳۶٪ الی ۱۱٪ را مورد آزمایش قرار دادند. اثربخشی برای روزنه‌های شکل‌یافته برای همه نسبت‌دمش‌ها، به دلیل افزایش شدت آشفتگی، کاهش یافت. هرچند در روزنه‌های استوانه‌ای، در نسبت‌دمش و شدت آشفتگی جریان آزاد زیاد، افزایش در اثربخشی مشاهده شده است. رایب و همکارانش [۱۷]، مطالعه‌ای تجربی در مورد تأثیر شدت آشفتگی جریان اصلی بر ساختار جت و اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای برای روزنه‌های استوانه‌ای زاویه‌دار انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش شدت آشفتگی جریان آزاد از ۱/۲٪ به ۱۲/۵٪، جت خنک‌کاری روی ناحیه بسیار وسیع‌تری پخش می‌شود (در تمام نسبت‌دمش‌های مورد بررسی در تحقیقشان). زونگی و همکارانش [۱۸] نیز برای مطالعه اثرات شدت آشفتگی جریان اصلی روی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای، آزمایشاتی را انجام دادند. در آزمایشات مذکور، شدت آشفتگی‌های جریان اصلی ۲٪، ۹٪ و ۱۵٪ اعمال شد. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که برای روزنه استوانه‌ای پره، شدت آشفتگی جریان اصلی باعث کاهش اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در نسبت دبی جریان جرمی ۵/۵٪ می‌شود. اما این اثر در نسبت دبی جریان جرمی ۱۲/۵٪، معکوس است. ولی در روزنه شکل‌یافته پره، افزایش آشفتگی جریان اصلی، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در تمام نسبت‌های دبی جریان جرمی را کاهش می‌دهد. در تحقیق تاکیشی و همکارانش [۱۹] از روش‌های اندازه‌گیری بصری پی‌آی‌وی<sup>۲</sup> و ال‌آی‌اف<sup>۳</sup> برای تعیین چگونگی تأثیر شدت آشفتگی جریان اصلی بر خنک‌کاری لایه‌ای برای دو مدل روزنه دایره‌ای و شکل-یافته بادبزی استفاده شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش شدت آشفتگی جریان اصلی، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده برای هر دو روزنه خنک‌کاری لایه‌ای استوانه‌ای و شکل‌یافته بادبزی را حدود ۱۰٪ کاهش می‌دهد.

با وجود تحقیقات گسترده بر هندسه و آیرودینامیک روزنه‌ها، تأثیر شدت آشفتگی بر خنک‌کاری لایه‌ای کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. این تحقیق، اولین بررسی تجربی برای سنجش این اثر بر هندسه‌های استوانه‌ای و لوبیایی در شدت‌های آشفتگی و نسبت دمش متفاوت و مقایسه عملکرد آن‌هاست. لازم به ذکر است که بررسی تجربی روزنه لوبیایی قبلاً توسط نویسندگان همین مقاله [۲۰] انجام گرفته که حاکی از افزایش ۴/۴ الی ۴/۲۰ درصدی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در مقایسه با هندسه استوانه‌ای ساده است. عملکرد خنک‌کاری، با استفاده از روش دمانگاری مادون‌قرمز و آزمایشات در عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ مطالعه شده است. در تمام آزمایش‌ها، سه شدت آشفتگی ۰/۵٪، ۱/۵٪ و ۳٪ و سه نسبت‌دمش ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۸ مورد بررسی قرار گرفته است.

<sup>۲</sup> Particle Image Velocimetry

<sup>۳</sup> Laser Induced Fluorescence

<sup>۱</sup> Turbulence Intensity



شکل ۱- مدار آزمایشگاهی و تجهیزات به کار رفته در تحقیق حاضر.

## ۲- روش اندازه‌گیری و دستگاه آزمایش

در این تحقیق، از تونل باد سرعت پایین نوع مکشی با حداکثر سرعت ۵۰ متر بر ثانیه مستقر در دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری (شکل ۱) استفاده شده است. تونل باد توانایی فراهم کردن جریان اصلی یکنواخت در سرعت کنترل شده تا ۵۰ متر بر ثانیه را دارد. سطح مقطع آزمون تونل، استوانه‌ای به قطر ۵۰ سانتی‌متر و طول ۸۰ سانتی‌متر است و نازل آن از جنس پلگسی گلاس به ضخامت ۱ سانتی‌متر ساخته شده است. هوای موردنیاز برای جریان ثانویه و جریان اصلی در این روش خنک‌کاری، توسط دو سامانه هوادهی کمپرسور هوا و تونل باد تامین می‌شود. در تمام آزمایشات تحقیق حاضر، جریان هوای اصلی که از روی صفحه تخت عبور می‌کند، توسط تونل باد مادون‌صوت مدار بسته در سرعت جریان ۲۷ متر بر ثانیه تامین می‌شود. ضمناً، هوای جریان ثانویه جت های تزریقی نیز از کمپرسور باد با قدرت هوادهی ۹۰۰ لیتر بر دقیقه تامین می‌شود. میزان دبی هوای گرفته‌شده از کمپرسور باد توسط شیر کنترل جریان و اریفیس تنظیم و اندازه‌گیری می‌شود. لذا، می‌توان با تنظیم شیر کنترل جریان، به دبی موردنظر هوای عبوری رسید. جهت گرم کردن هوای گرفته شده از کمپرسور، گرم‌کن استوانه‌ای ۲ کیلوواتی به همراه کنترلر دیجیتال دما در مدار پنوماتیکی بعد از اریفیس، قرار داده شده است. لذا، با عبور هوا از گرم‌کن، هوا گرم خواهد شد. قبل از ورود هوا به محفظه جت‌ها که زیر صفحه خنک‌کاری متصل است، هوای گرم از شیر اطمینان عبور می‌کند تا به مدار پنوماتیکی آسیبی نرسد. برای اندازه‌گیری دمای جت، حسگر هوای پی‌تی<sup>۱</sup> ۱۰۰، در داخل محفظه جت‌ها و در نزدیکی کانال روزه، تثبیت شده است. زمانی که جریان به حالت پایدار می‌رسد، دمای آن توسط حسگر مذکور اندازه‌گیری می‌شود. ترموستات با دریافت سیگنال از حسگر دما، مقدار واقعی دما  $(PV)^2$  را به کنترل‌کننده تناسبی<sup>۳</sup> (PID) ارسال می‌کند تا با مقدار مطلوب (SP)<sup>۴</sup> مقایسه شود. سپس، بر اساس اختلاف PV و SP و ضرایب PID، سیگنال کنترلی لازم از طریق رله الکترونیکی به سامانه گرم‌کن اعمال می‌شود و دما با دقت بالا به مقدار مطلوب می‌رسد و حلقه کنترل بسته می‌شود.

هوای گرم از طریق شلنگ نسوز به محفظه جت‌ها (مکعبی به ابعاد ۱۵ سانتی‌متر حاوی دو تیغه حائل به فاصله ۵ سانتی‌متر) می‌رسد تا جریانی یکنواخت از طریق کانال روزه بر سطح دمیده شود. دمای جریان ورودی اصلی توسط حساسه هوای PT100 اندازه‌گیری شده و پارامترهای فشار، دما و سرعت جریان عرضی در هر دو مسیر به طور مستقل تنظیم شده‌اند.

در شکل (۲)، نمای دقیقی از هندسه‌های دو روزه جت بررسی شده نشان داده شده است. این هندسه‌ها شامل روزه استوانه‌ای ساده و روزه لوبیایی می‌باشد که با زاویه ۳۰ درجه نسبت به سطح تزریق می‌شوند. هندسه استوانه‌ای دارای قطر ۵/۷۴ میلی‌متر می‌باشد. هندسه جدید لوبیایی نیز که دارای سطح مقطع برابر با هندسه استوانه‌ای می‌باشد، به گونه‌ای طراحی شده است که دارای لبه‌های تیز نباشد و ساخت آن با دستگاه سی‌ان‌سی ۵ امکان‌پذیر باشد. فاصله جت‌ها در جهت عرضی (گام روزه) و طول کانال روزه برای هندسه لوبیایی، به ترتیب ۱۷/۲ و ۳۰ میلی‌متر انتخاب شده است. همان‌گونه که ذکر شد، مساحت مقطع دو روزه استوانه‌ای ساده و لوبیایی تقریباً یکسان و برابر ۲۵/۸۵ میلی‌متر مربع می‌باشد. صفحه تخت نیز از مواد پلکسی گلاس با هدایت حرارتی بسیار پایین ( $k=0.187\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) ساخته شده است. صفحه پلکسی گلاس مذکور که روی آن خنک‌کاری لایه‌ای صورت می‌پذیرد، دارای طول ۴۰ سانتی‌متر، عرض ۱۵ سانتی‌متر و ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر می‌باشد. ردیف روزه‌های خنک‌کاری لایه‌ای در فاصله ۱۸ سانتی‌متری از لبه‌ی حمله صفحه آزمون واقع شده‌اند.

به منظور اندازه‌گیری سرعت و شدت آشفتگی جریان اصلی در مقطع آزمون، از دستگاه جریان‌سنج سیم داغ استفاده شده است. دستگاه مذکور از نوع یک بعدی بوده و حساسه آن از جنس تنگستن ۵ میکرونی و دارای فرکانس قطع ۱۶ کیلوهرتز می‌باشد. داده‌های اندازه‌گیری شده توسط جریان‌سنج سیم‌داغ از طریق کارت داده آنالوگ به دیجیتال به رایانه ارسال و توسط نرم‌افزار مربوطه تجزیه و تحلیل می‌شود. برای جابجایی کاوشگر از سامانه جابجاکننده کاوشگر استفاده شده است. سامانه مذکور دارای چهار درجه آزادی است که می‌تواند در سه جهت x، y و z جابه‌جایی یافته و با زاویه چرخش (γ) نیز دوران نماید که دارای دقت جابه‌جایی ۰/۱ میلی‌متر است. حرکت این مکانیزم انتقال‌دهنده توسط رایانه و نرم‌افزار کنترل می‌شود. جریان آزاد تونل باد مورد استفاده دارای شدت آشفتگی پایین ۰/۵ درصد می‌باشد که جهت بالا بردن این شدت آشفتگی، دو شبکه‌ی چوبی مطابق شکل (۳) طراحی و ساخته شده است. برای رسیدن به شدت‌های آشفتگی‌های بالاتر، شبکه‌های آشفته‌ساز به گونه‌ای طراحی شده که به راحتی جمع شود و پس از قرار گرفتن در داخل کانال تونل باد (قبل از مقطع

<sup>۱</sup> Platinum 100

<sup>۲</sup> Process Variable(PV)

<sup>۳</sup> Proportional-Integral-Derivative(PIV)

<sup>۴</sup> Set Point(SP)

<sup>۵</sup> Computer Numerical Control(CNC)

می‌توان توسط معادله (۱) محاسبه کرد:

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_m}{T_c - T_m} \quad (1)$$

که در آن،  $\eta$  اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای،  $T_m$  دمای جریان اصلی،  $T_{aw}$  دمای دیواره آدیاباتیک و  $T_c$  دمای جت خنک‌کننده است. دما و در نتیجه اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در هر پیکسل، از توزیع دقیق دمای سطح به‌دست آمده توسط نرم‌افزار دوربین مادون قرمز محاسبه می‌شود. در تمام آزمایش‌ها، اختلاف دمای جریان اصلی و ثانویه  $20/3$  درجه سلسیوس اعمال شده است.

## ۲-۲- عدم قطعیت نتایج

محاسبات مربوط به عدم قطعیت داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده در این تحقیق، با استفاده از روش ارائه شده توسط موفاقی [۲۲] انجام شده است. دمای جریان اصلی  $T_\infty$  و درجه حرارت جت  $T_j$  با استفاده از حسگر هوای پی.تی ۱۰۰ نوع آلفا اندازه‌گیری شده است که خطای بایاس مربوط به آن  $\pm 0/2^\circ\text{C}$  می‌باشد. عدم قطعیت تکرارپذیری دمای جریان اصلی و جت خنک‌کننده به ترتیب  $\pm 0/2^\circ\text{C}$  و  $\pm 0/3^\circ\text{C}$  به‌دست آمد.

دمای سطح مورد آزمایش (خنک‌کاری لایه‌ای)، با دوربین مادون قرمز ثبت گردیده است. دمای مذکور با استفاده از دمای خواننده شده توسط حسگر پی.تی ۱۰۰ که روی سطح اندازه‌گیری نصب شده، کالیبره شده است. خطای بایاس دوربین برابر با انحراف معیار خطای بایاس حسگر پی.تی ۱۰۰ و اختلاف داده‌های کالیبره شده مادون قرمز و داده‌های مربوط به حسگر می‌باشد. در مجموع، خطای بایاس برای اندازه‌گیری‌های دمای سطح  $\pm 0/23^\circ\text{C}$  خواهد بود. از طرفی خطای تکرارپذیری برای اندازه‌گیری مادون قرمز دمای سطح  $\pm 0/23^\circ\text{C}$  به‌دست آمده است که عدم قطعیت کلی برای اندازه‌گیری مادون قرمز دمای سطح  $\pm 0/32^\circ\text{C}$  به‌دست می‌آید. افت فشار در داخل لوله اریفیس با استفاده از دو مبدل فشار اندازه‌گیری شد که عدم قطعیت کل آن  $\pm 1/01 \text{ Pa}$  است. سرعت ورودی جریان اصلی، توسط جریان‌سنج سیم‌داغ اندازه‌گیری شد. برای انجام اندازه‌گیری‌ها، از فشارسنج تک کاناله استفاده شده است. فشارسنج دارای خطای بایاس  $\pm 0/625 \text{ Pa}$  است. پس از انجام آزمایشات خطای تکرارپذیری، عدم قطعیت کل آن  $\pm 0/22 \text{ Pa}$  به‌دست آمد.

عدم قطعیت کلی در حالتی که اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای برابر با  $0/9$  باشد، معادل با  $2\%$  و در حالتی که اثربخشی برابر با  $0/2$  باشد، معادل  $9/7\%$  خواهد بود که با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه است.

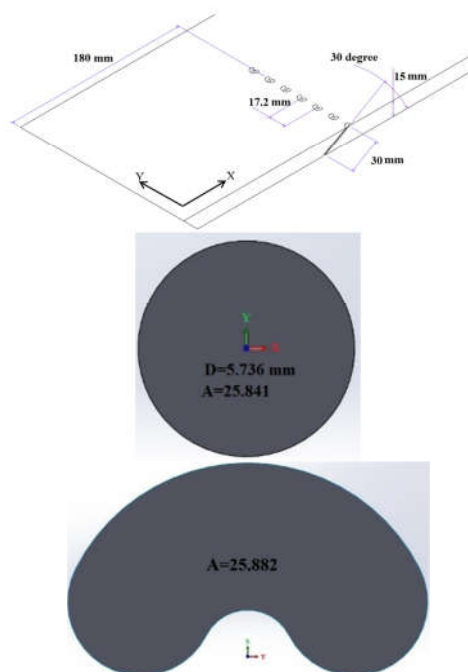
یعنی با کم شدن مقدار اثربخشی، عدم قطعیت افزایش می‌یابد.

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

که در آن  $\delta T_{\text{cool}}$ ،  $\delta T_{\text{surf}}$  و  $\delta T_\infty$  به ترتیب عدم قطعیت مربوط به جریان اصلی، جت و سطح آدیاباتیک هستند.

آزمون، به راحتی قابل باز شدن و نصب باشد. شبکه‌های آشفته‌ساز در طول آزمایش در فاصله یکسانی از مقطع آزمایش نصب می‌شوند. شبکه چوبی (الف)، متشکل از سیزده میله قائم و سیزده میله افقی مربعی است. سطح مقطع هر میله مربعی  $2\text{cm} \times 2\text{cm}$  ( $d=2\text{cm}$ ) و گام شبکه (اندازه چشمه)  $M$  برابر با  $7/7$  سانتی‌متر است. شبکه چوبی (ب)، دارای هفت میله قائم و هفت میله افقی است. سطح مقطع میله‌های چوبی، مربعی به ابعاد  $4$  سانتی‌متر است.

با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ، شدت آشفتگی جریان تونل، بدون استفاده از شبکه چوبی تقریباً برابر با  $0/5\%$  می‌باشد. با قرار دادن جداگانه شبکه‌های چوبی (الف) و (ب) در پایین‌دست جریان، شدت آشفتگی تونل به ترتیب به  $1/5\%$  و  $3\%$  می‌رسد. لذا در این تحقیق، اثرات افزایش شدت آشفتگی بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای، در سه حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.



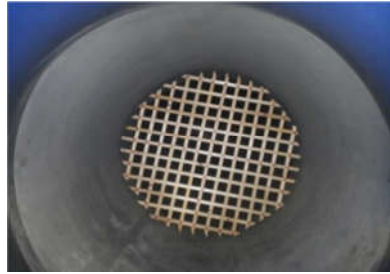
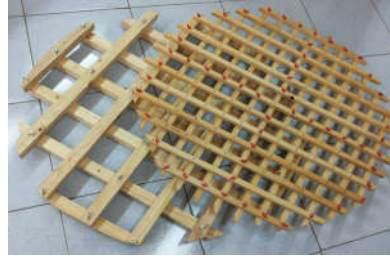
شکل ۲- نمایی از هندسه روزنه خنک‌کاری لایه‌ای استوانه‌ای ساده

و لوبیایی شکل به‌همراه مدل آزمایشگاهی صفحه تخت.

## ۱-۲- روش اندازه‌گیری مادون قرمز

برای اندازه‌گیری دمای سطح و اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای، سامانه مادون قرمز به‌کار گرفته شده است. سطح آزمون با تزریق هوای داغ از میان کانال روزنه‌های خنک‌کاری لایه‌ای، گرم می‌شود. هوای خنک گرفته‌شده از کمپرسور توسط گرم‌کن استوانه‌ای داغ می‌شود. درحالی‌که جریان اصلی تونل باد حرارت نمی‌بیند، به‌طوری‌که اختلاط جریان اصلی و جت باعث تغییرات دمایی روی صفحه آزمون می‌شود. دمای سطح آزمون که صفحه‌ای تخت از جنس پلکسی‌گلاس است، توسط دوربین مادون قرمز FLIR C2، اندازه‌گیری می‌شود. از مخلوط جت و جریان اصلی، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای روی سطح صفحه را

اندازه‌گیری‌های تحقیق حاضر، تطابق خوبی با نتایج هانگل و همکارانش [12] مخصوصاً در فاصله  $2 < X/D < 10$  نشان می‌دهد. اختلاف کوچک ممکن است در اثر اختلاف نسبت چگالی و شدت آشفته‌گی باشد. باید توجه شود که نتایج اندازه‌گیری‌های لاوسون و تول [23] دارای اثربخشی بالاتری نسبت به تحقیق حاضر است که در شدت آشفته‌گی زیاد جریان اصلی  $12/3$  درصد، نسبت چگالی کمی بالاتر و نسبت سرعت کمی پایین‌تر انجام شده است. شرایط آزمایش گنز و همکارانش [24]، جانسون و همکارانش [25] و ان و همکارانش [26] مشابه تحقیق حاضر است که مقدار اثربخشی خنک‌کاری پایین‌تری در مقایسه با لاوسون و تول نشان می‌دهد. اما به دلیل نسبت چگالی و شدت آشفته‌گی متفاوت، دارای اثربخشی خنک‌کاری بالاتری نسبت به تحقیق حاضر هستند. مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج سینها و همکارانش [27]، اختلافات آشکاری را نشان می‌دهد که ناشی از بالاتر بودن نسبت دممش  $(0/57)$ ، نسبت چگالی بالاتر  $(1/6)$ ، شدت آشفته‌گی بسیار کم‌تر و همچنین نسبت طول به قطر کانال جت کمتر  $(L/D = 1.75)$  می‌باشد. همچنین، مقایسه با نتایج رالابندی و همکارانش [28]، اختلافاتی را نشان می‌دهد که ناشی از نسبت سرعت بیش‌تر و شدت آشفته‌گی کم‌تر می‌باشد.



شکل ۳- نمایی از شبکه‌های چوبی (الف) و (ب) تعبیه‌شده در تونل- باد مادون صوت جهت افزایش شدت آشفته‌گی جریان آزاد.

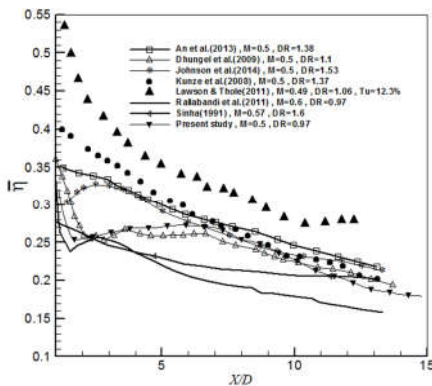
### ۳- نتایج و بحث

همه آزمایش‌ها در تونل باد در عدد رینولدز  $10000$  بر اساس قطر روزنه استوانه‌ای انجام شده‌اند. نسبت‌دمش‌های  $0/5$ ،  $0/7$  و  $0/8$  روی دو هندسه متفاوت استوانه‌ای ساده و لوبیایی در سه شدت آشفته‌گی متفاوت آزمایش شده‌اند که در مجموع ۱۸ آزمایش انجام شده است. نسبت‌دمش برای هر مورد بر اساس سرعت جت خنک‌کننده در ورودی روزنه (سطح مقطع استوانه‌ای) مشخص شده است. در این بخش، ابتدا خلاصه‌ای از صحت‌سنجی نتایج تحقیق آمده است. سپس، نتایج اثربخشی برای دو هندسه مورد بررسی در شدت آشفته‌گی و نسبت‌دمش‌های مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است.

#### ۳-۱- صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی نتایج تحقیق، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای بی‌دررو اندازه‌گیری شده برای جت‌های استوانه‌ای با نتایج تحقیقات قبلی مقایسه شده است. با توجه به این‌که شرایط آزمایش و زاویه تزریق جت‌ها دقیقاً یکسان نبوده است، چند تحقیق مشابه برای مقایسه انتخاب شده است. اختلافات مشاهده شده بین نمودارهای مختلف، ناشی از تفاوت در نسبت چگالی، نسبت دممش  $(BR = \rho_{jet} V_{jet} / \rho_{\infty} V_{\infty})$ ، شدت آشفته‌گی و یا زاویه تزریق جت‌ها می‌باشد [21].

در شکل ۴، توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده جانبی در نسبت‌دمش  $0/5$  با تحقیقات مشابه مقایسه شده است. داده‌ها در  $X/D$  های مختلف و به صورت متوسط‌گیری شده در جهت جانبی ارائه شده است.  $X$  در واقع فاصله هر نقطه تا مبدا مختصات (مرکز روزنه) در جهت جریان (محور طولی) و  $D$  قطر روزنه می‌باشد. از آنجایی که در عناوین محور عمودی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای پارامتری بی‌بعد می‌باشد، لذا  $X/D$  فاصله بی‌بعد شده از مرکز روزنه نسبت به قطر جت می‌باشد. در ضمن، قابل ذکر است که در شکل‌های مربوطه، متوسط مقادیر در جهت جانبی (متوسط‌گیری در جهت  $Z$ ) آورده شده است. به عبارت دیگر، متوسط‌گیری در جهت عرضی انجام شده است.



شکل ۴- نتایج اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده جانبی تحقیق حاضر و نتایج منتشر شده از تحقیقات قبلی در نسبت‌دمش  $0/5$ .

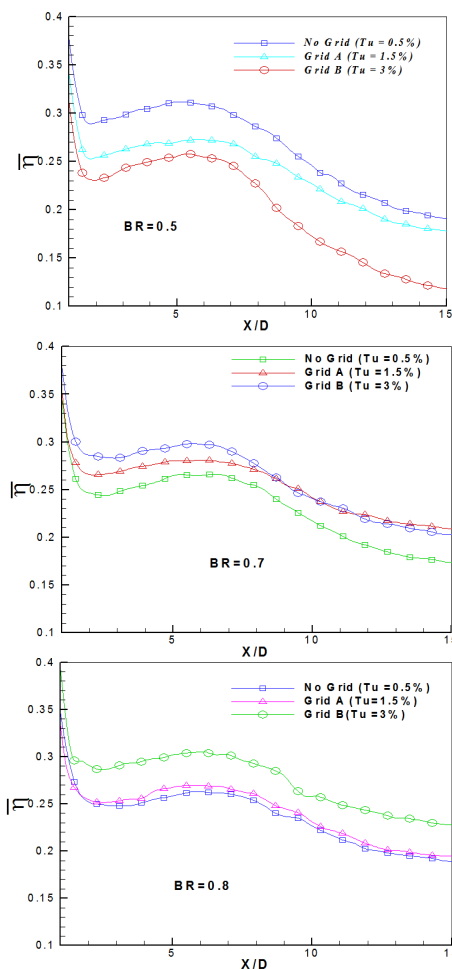
#### ۳-۲- عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای در آشفته‌گی‌های مختلف

شکل ۵، توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده جانبی را در سه نسبت‌دمش  $0/5$ ،  $0/7$  و  $0/8$  و سه سطح آشفته‌گی جریان اصلی  $0/5$ ،  $1/5$  و  $3/5$  را برای روزنه استوانه‌ای ساده مقایسه می‌کند. همان‌طور که دیده می‌شود، نسبت‌دمش  $0/5$  در فاصله  $1 < X/D < 15$  بالاترین اثربخشی را در شدت آشفته‌گی  $0/5$  دارد. این شکل نشان می‌دهد که برای نسبت‌دمش پایین  $BR=0.5$ ، میزان هوای خنک‌کاری به اندازه کافی نیست و در شدت آشفته‌گی بالاتر، با جریان اصلی مخلوط شده و از سطح دور می‌گردد. در نسبت‌دمش  $0/5$  و در مقطع  $X/D=15$  با افزایش شدت آشفته‌گی جریان اصلی، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای تقریباً  $62\%$  کاهش داشته است. یعنی هرگاه نسبت‌دمش پایین باشد، با فاصله گرفتن از مرکز روزنه، اثربخشی به میزان قابل توجهی کاهش داشته است. در نسبت‌دمش  $0/5$  و شدت آشفته‌گی  $3/5$ ، خنک‌کاری لایه‌ای به بدترین صورت انجام می‌گیرد. زیرا

که اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای ناگهانی افت پیدا خواهد کرد، طوری که منحنی آن به پایین‌تر از سایر منحنی‌ها رسیده است. در این صورت، اگر قسمتی از تیغه دچار خوردگی شده باشد، این حالت مزید بر علت خواهد بود.

به‌طور کلی، در نسبت‌دمش ۰/۷، با افزایش شدت آشفتگی، اثربخشی افزایش داشته است. اما منحنی‌های شبکه‌های چوبی A و B نشان می‌دهد که تقریباً در فاصله  $X/D > 9$  با به کار گرفتن شبکه چوبی B، اثربخشی نسبت به شبکه چوبی A کاهش می‌یابد. در نسبت‌دمش یادشده، با افزایش شدت آشفتگی، اثربخشی ۱۶/۵٪ افزایش یافته است. در نسبت‌دمش بالا (BR=0.8)، با به کار گرفتن شبکه چوبی B در طول باد، نسبت به حالت بدون شبکه آشفته‌ساز چوبی، اثربخشی خنک‌کاری متوسط‌گیری‌شده تقریباً به اندازه ۱۸/۴٪ بهبود یافته است. یعنی در این حالت، آشفتگی بالا مفید واقع شده است.

در نسبت‌دمش ۰/۵، با افزایش شدت آشفتگی، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری‌شده کاهش می‌یابد. اما در دو نسبت‌دمش ۰/۷ و ۰/۸، با افزایش شدت آشفتگی، اثربخشی بهبود می‌یابد. یعنی در نسبت‌دمش ۰/۵، افزایش شدت آشفتگی مضر است.

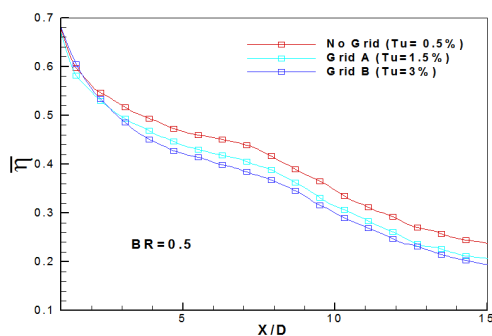


شکل ۵- اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری‌شده جانبی در سه نسبت‌دمش و شدت آشفتگی مختلف برای هندسه استوانه‌ای ساده.

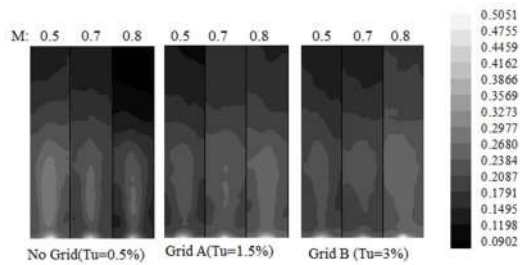
شکل ۶، اثرات شدت آشفتگی بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در سه نسبت‌دمش متفاوت (۰/۵، ۰/۷ و ۰/۸) را برای روزنه لوبیایی شکل مقایسه می‌کند. در نسبت‌دمش ۰/۵، هرگاه فاصله از مرکز روزنه افزایش یابد، با افزایش شدت آشفتگی، جت خنک‌کننده نسبتاً در مقایسه با دو نسبت‌دمش دیگر بیش‌تر مضمحل می‌شود. یعنی با فاصله گرفتن از جت تزریقی، اثر ضعیف‌تر جت روی سطح بیش‌تر مشهود است. در نسبت‌دمش مذکور، برای شدت آشفتگی پایین، هوای خنک‌کاری مقداری انرژی به اندازه آشفتگی بالا دارد، اما چون آشفتگی پایین جریان اصلی نمی‌تواند جت خنک‌ساز را مضمحل کند، آن انرژی در ناحیه بزرگ‌تری پخش می‌شود و توزیع بهتری در مقایسه با شدت آشفتگی بالا دارد.

در نسبت‌دمش ۰/۷، در فاصله  $9 < X/D < 15$ ، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری‌شده جانبی برای هر سه شدت آشفتگی، مقادیر قابل مقایسه‌ای داشته و اختلاف ناچیزی باهم دارند. به‌علاوه، اثربخشی برای دو شبکه آشفتگی ۰/۵٪ و ۱/۵٪، مقادیر قابل مقایسه‌ای دارند. برای نسبت‌دمش ۰/۷، با افزایش شدت آشفتگی، به‌طور متوسط اثربخشی به اندازه ۸/۷٪ کاهش یافته است. در نسبت‌دمش ۰/۸، با افزایش شدت آشفتگی، اثربخشی به‌طور متوسط تقریباً ۶٪ افزایش می‌یابد.

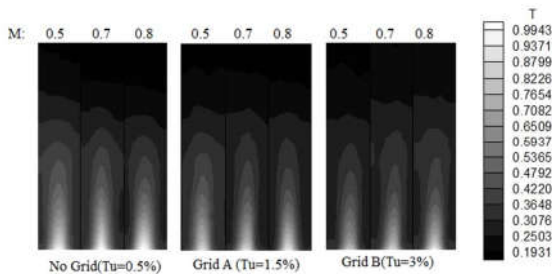
در نسبت‌دمش ۰/۵، در مقایسه با دو نسبت‌دمش دیگر، اختلاف بیش‌تری بین نمودارها وجود دارد. در نسبت‌دمش‌های پایین و متوسط (BR=0.5, 0.7)، هرگاه شدت آشفتگی جریان اصلی بالا باشد، هیچ‌گونه بسط توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در ناحیه پایین‌دست با تزریق از روزنه شکل‌یافته لوبیایی بوضوح مشاهده نمی‌شود. در نسبت‌دمش‌های پایین، با افزایش شدت آشفتگی، آشفتگی زیاد جریان جت را با جریان اصلی مخلوط کرده و آن را دور از سطح نگه می‌دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نسبت‌دمش‌های ۰/۵ و ۰/۷، با افزایش شدت آشفتگی، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری‌شده جانبی کاهش یافته است. یعنی در نسبت‌دمش ۰/۵ و ۰/۷، افزایش شدت آشفتگی، سبب خوردگی و ذوب شدن تیغه خواهد شد. بنابراین، رفتار و عملکرد روزنه استوانه‌ای ساده در نسبت‌دمش ۰/۷ با افزایش شدت آشفتگی در مقایسه روزنه شکل‌یافته لوبیایی متفاوت است. اما در نسبت‌دمش ۰/۸، با افزایش شدت آشفتگی، اثربخشی خنک‌کاری افزایش یافته است.



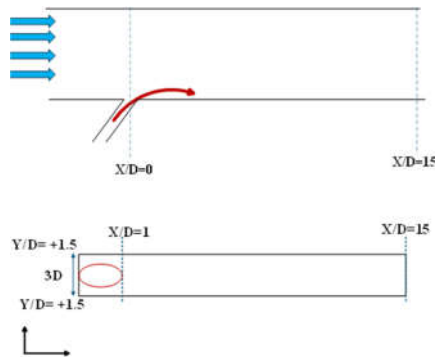
نسبت دممش پایین، هر دو روزنه شکل یافته و استوانه‌ای ساده هیچ نشانه‌ای برای جدا شدن جت را نشان نمی‌دهند. بنابراین، شدت آشفته‌گی بالا، تنها می‌تواند منجر به اضمحلال بیشتر جت خنک‌کننده به دلیل اختلاط شدید با گاز داغ شود. به‌طور کلی، در نسبت دممش‌های پایین، هرگاه شدت آشفته‌گی از ۰/۵ الی ۳ درصد افزایش یابد، اثربخشی متوسط‌گیری شده جانبی کاهش می‌یابد. همچنین از مقایسه دو کانتر دمای مربوط به شکل ۷، کاملاً مشخص است که برای هندسه استوانه‌ای ساده، جت در بدو ورود به جریان اصلی، نسبت به هندسه لوبیایی، اثر ضعیف‌تری روی سطح گذاشته و نسبتاً از صفحه آزمون فاصله گرفته است.



شکل ۷-الف: توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای روی دیواره بی‌دررو با استفاده از روش مادون‌قرمز برای هندسه استوانه‌ای ساده در شدت آشفته‌گی‌های مختلف و نسبت دممش‌های متفاوت.

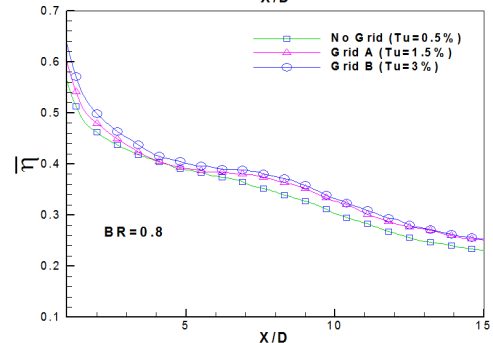
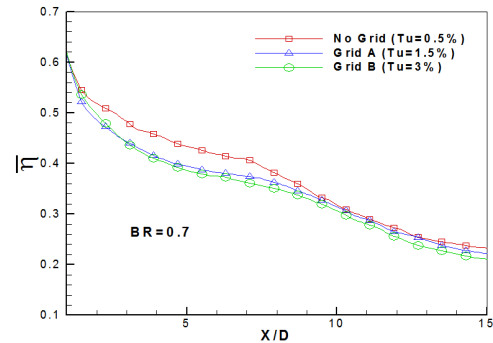


شکل ۷-ب: توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای روی دیواره بی‌دررو با استفاده از روش مادون‌قرمز برای هندسه شکل یافته لوبیایی در شدت آشفته‌گی‌های مختلف و نسبت دممش‌های متفاوت.



شکل ۷-ج: شمایی از مکان روزنه خنک‌کاری لایه‌ای استوانه‌ای ساده و محدوده اندازه‌گیری دمایی مربوط به هر روزنه

یکی از اصلی‌ترین نگرانی‌ها در استفاده از خنک‌کاری لایه‌ای،



شکل ۶- اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده جانبی در سه نسبت دممش و شدت آشفته‌گی مختلف برای روزنه شکل یافته لوبیایی.

شکل ۷ خطوط هم تراز اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای موضعی در سه نسبت دممش مختلف و سه حالت آشفته‌گی جریان اصلی را برای دو هندسه مختلف نشان می‌دهد ( $-1.5 < Y/D < 1.5$ ). در این شکل اثرات نسبت دممش بر توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در سه شدت آشفته‌گی ۰/۵٪، ۱/۵٪، و ۳٪ بررسی شده است. همان‌طور که در تمامی حالات مشاهده می‌گردد، جت در پایین دست نزدیک به روزنه بیش‌ترین اثربخشی را دارد یعنی جت چسبیده به سطح است. اما با فاصله گرفتن جت در پایین دست دور از روزنه، اثرات خنک‌کاری روی سطح کاهش می‌یابد و جت تقریباً به‌طور کامل از صفحه آزمون جدا شده است. (موقعیت روزنه در شکل ۷-ج نشان داده شده است) در شکل‌های ۷-الف و ۷-ب برای شدت آشفته‌گی پایین ۰/۵٪، با افزایش نسبت دممش اثربخشی کاهش می‌یابد. یعنی با استفاده از دبی جرمی کم‌تری از سیال خنک‌کننده، اثربخشی بیش‌تری حاصل می‌شود. در این حالت، نسبت دممش بهینه  $BR=0.5$  بدست می‌آید و استفاده از دبی جرمی بیش‌تر سیال خنک‌کننده، سبب هدر رفت آن خواهد شد. در شدت آشفته‌گی پایین، با افزایش نسبت دممش، اندازه حرکت جت در راستای عمودی افزایش یافته و آشفته‌گی جریان اصلی قادر به برگرداندن جت روی سطح نیست. لذا جت از سطح فاصله خواهد گرفت و یکنواختی جت روی سطح نیز کاهش می‌یابد. خطوط هم‌تراز دما نشان می‌دهد که چگونه آشفته‌گی بالای جریان اصلی، اثربخشی لایه بی‌دررو در نسبت دممش‌های بالا را بهبود می‌بخشد. آشفته‌گی بالای جریان اصلی، هوای خنک‌کاری را به اطراف پخش می‌کند و ناحیه بیش‌تری را پوشش می‌دهد. بنابراین، ناحیه کم‌تری در دمای حداکثر قرار خواهد گرفت. ناحیه پوشش یافته بوسیله هوای خنک‌کاری، به‌طور آشکار بزرگ‌تر از موارد مربوط به آشفته‌گی پایین است. در سطوح آشفته‌گی و

پوشش یا توزیع جانبی جت خنک‌کننده در ناحیه‌ی بین روزنه‌ای پایین‌دست جریان جت‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است که جت‌ها در  $Z/D$  بین  $0/5$  - الی  $0/5$  تریق می‌شوند. در واقع، ناحیه‌ی بین روزنه‌ای، مکانی است که بین دو جت واقع شده و مستقیماً تریق جریان در بالادست آن انجام نمی‌شود. اندازه‌گیری‌ها برای اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای بین روزنه‌ای، در فاصله  $1D$  الی  $2D$  از مرکز روزنه در جهت جانبی انجام می‌گیرد.

شکل ۸ اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای بین روزنه‌ای برای هندسه استوانه‌ای ساده را در شدت آشفته‌گی‌های متفاوت جریان آزاد مقایسه می‌کند. آزمایش مادون‌قرمز حالت پایدار برای هر نسبت‌دمش، با ثابت نگهداشتن دمای جت در دمای تقریباً  $43/3$  درجه سلسیوس، به مدت  $30$  دقیقه انجام می‌شود. اثربخشی در نسبت‌دمش پایین  $0/5$  با افزایش شدت آشفته‌گی، کاهش می‌یابد. اما در نسبت‌دمش‌های بالاتر  $0/7$  و  $0/8$ ، با افزایش شدت آشفته‌گی، اثربخشی افزایش می‌یابد. در هندسه استوانه‌ای ساده، با افزایش نسبت‌دمش، حساسیت اثربخشی بین روزنه‌ای نسبت به شدت آشفته‌گی افزایش می‌یابد. برای نسبت‌دمش  $0/5$  در مقطع  $X/D=15$ ، با افزایش شدت آشفته‌گی جریان اصلی، میزان اثربخشی  $0/61/9$  کاهش داشته است که در مقایسه با هندسه لوبیایی شکل، اثربخشی به شدت تحت تاثیر قرار گرفته است. همچنین به‌طور کلی، اثربخشی بین‌روزنه‌ای  $0/48/2$  کاهش یافته است. در نسبت‌دمش  $0/7$ ، با افزایش شدت آشفته‌گی از  $0/5$  به  $1/5$ ، اثربخشی خنک‌کاری بین روزنه‌ای نیز افزایش می‌یابد. درحالی‌که با افزایش شدت آشفته‌گی از  $1/5$  به  $3$ ، اثربخشی بین‌روزنه‌ای در فاصله  $1 < X/D < 11$  افزایش یافته ولی در فاصله  $11 < X/D < 15$ ، شاهد کاهش اندک اثربخشی هستیم. یعنی در فاصله پایین‌دست دور از روزنه استوانه‌ای، افزایش شدت آشفته‌گی تاثیر منفی بر اثربخشی بین‌روزنه‌ای دارد. اما در کل در نسبت‌دمش  $0/7$ ، افزایش آشفته‌گی تاثیر مثبتی روی اثربخشی دارد که اثربخشی به میزان  $19/3$ ٪ بهبود یافته است. در نسبت‌دمش  $0/8$ ، نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش شدت آشفته‌گی از  $0/5$  به  $3$ ، اثربخشی بین‌روزنه‌ای  $22/5$ ٪ افزایش داشته است.

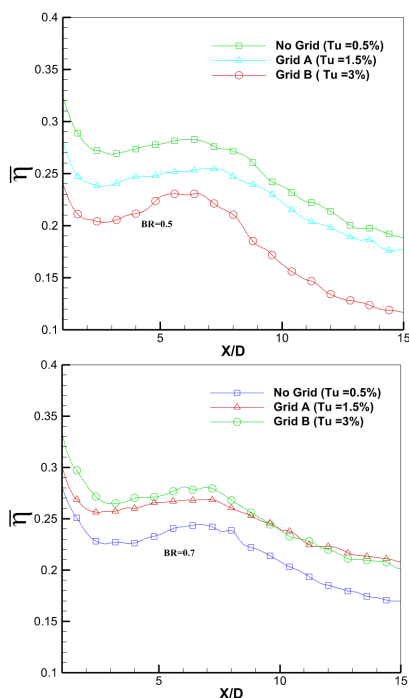
شکل ۹، خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده بین روزنه‌ای در نسبت‌دمش‌ها و شدت آشفته‌گی‌های مختلف برای هندسه لوبیایی شکل را نشان می‌دهد. در نسبت‌دمش‌های پایین و متوسط ( $0/5$  و  $0/7$ )، با افزایش شدت آشفته‌گی جریان، اثربخشی کاهش یافته است. اما در نسبت‌دمش بالاتر ( $0/8$ )، افزایش اثربخشی خنک‌کاری بین روزنه‌ای مشاهده می‌شود. در هر سه نسبت‌دمش و هر سه شدت آشفته‌گی، تقریباً در فاصله  $1.5 < X/D < 7$ ، اثربخشی یکنواختی برقرار است. اما پس از آن، منحنی اثربخشی خنک‌کاری بین روزنه‌ای دارای روند نزولی است.

در نسبت‌دمش  $0/5$ ، با افزایش شدت آشفته‌گی از  $0/5$  الی  $3$ ، اثربخشی خنک‌کاری بین‌روزنه‌ای برای روزنه‌های شکل‌یافته  $15/7$ ٪ کاهش یافته است. همچنین برای نسبت‌دمش  $0/7$ ، به میزان  $13/6$ ٪ کاهش اثربخشی مشاهده می‌شود. یعنی در نسبت‌های پایین و متوسط ( $0/5$  و  $0/7$ )، افزایش آشفته‌گی برای تیغه توربین مضر خواهد بود. در نسبت‌دمش  $0/8$ ، با افزایش شدت آشفته‌گی، اثربخشی بین روزنه‌ای به میزان  $7/3$ ٪ بهبود می‌یابد.

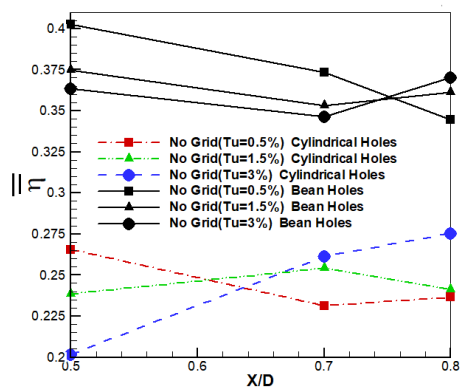
در این حالت نیز همانند آنچه که در شکل ۶ مشاهده شد، به کار گرفتن شبکه‌های آشفته‌گی چوبی سبب روند مشابهی در تغییرات

اثربخشی لایه‌ای می‌شود. با این حال، میزان تغییرات اثربخشی متوسط‌گیری شده‌ی جانبی بین روزنه‌ای بیش‌تر از میزان تغییرات مقدار متوسط‌گیری شده‌ی جانبی (در محدوده  $Y/D$  بین  $1/5$  - الی  $1/5$ ) است. همچنین، فاصله بین روزنه‌ها که در معرض جریان مستقیم جت نمی‌باشد، از خنک‌کاری بهتری برخوردار نیست.

همان‌طور که در شکل‌های ۸ و ۹ قابل مشاهده است، برای هر کدام از دو هندسه لوبیایی و استوانه‌ای ساده، رفتار نمودارها در شدت آشفته‌گی‌های  $1/5$ ٪ و  $3$ ٪ در مقایسه با حالت بدون شبکه تقریباً روند مشابهی دارند. همچنین، حساسیت اثربخشی خنک‌کاری بین روزنه‌ای در هندسه استوانه‌ای در مقایسه با هندسه لوبیایی، نسبت به شدت آشفته‌گی جریان بیش‌تر است. برای اندازه‌گیری اثربخشی خنک‌کاری متوسط‌گیری شده کل ناحیه، ابتدا اثربخشی متوسط‌گیری جانبی را بدست آورده، همان‌طور که مثلاً در شکل‌های ۵ و ۶ آمده است. در واقع همان‌طور که در شکل ۷-ج نشان داده شده است، یک مستطیل خاص روی صفحه آزمون در نظر گرفته، در هر مقطع عرضی، پیکسل به پیکسل در محدوده  $15 < X/D < 1$ ، دما را در جهت عرضی متوسط‌گیری نموده و متناسب با آن اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده جانبی حاصل می‌شود. حال، در نهایت از این داده‌ها در راستای طولی متوسط‌گیری نموده و یک داده حاصل شده که اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده جانبی کل ناحیه می‌باشد.



بررسی را نشان می‌دهد. برای هندسه استوانه‌ای، با افزایش شدت آشفته‌گی جریان، نسبت‌دمش بهینه بیشتر می‌شود. برای شبکه چوبی با کم‌ترین آشفته‌گی، بیشترین اثر بخشی در نسبت‌دمش ۰/۵ حاصل شده است. حالت با آشفته‌گی ۱/۵ عملکرد میانی دارد و اختلاف بیشینه اثر بخشی بین حالت بدون شبکه و شبکه آشفته‌گی ۳/۳ (Grid B)، حدود ۳/۷٪ است. برای هندسه لوبیایی، در شدت آشفته‌گی‌های مختلف، نسبت‌دمش بهینه متفاوت است. نسبت‌دمش بهینه برای هر دو شدت آشفته‌گی ۰/۵٪ و ۱/۵٪، برابر با  $BR=0.5$  می‌باشد. اما نسبت‌دمش بهینه برای شدت آشفته‌گی ۳/۳٪، برابر با  $BR=0.8$  است. همان‌طور که در شکل کاملاً مشهود است، در حالت بدون شبکه آشفته‌گی چوبی (۰/۵٪)، در نسبت‌دمش ۰/۸ و ۰/۷ در مقایسه با دو حالت آشفته‌گی دیگر، بیش‌ترین اثر بخشی کل ناحیه حاصل شده و در نسبت‌دمش ۰/۸، کم‌ترین اثر بخشی کل ناحیه به دست آمده است. یعنی به زبان ساده‌تر، به کار بردن شبکه چوبی برای توربین مضر است و بهتر است از شبکه چوبی استفاده نشود.



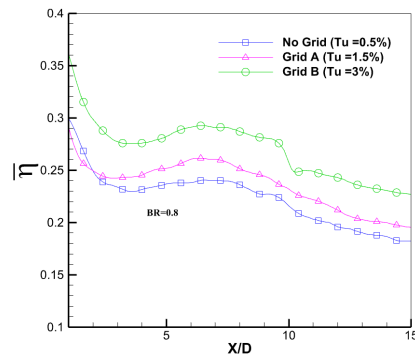
شکل ۴- اثر بخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده کل ناحیه در نسبت‌دمش‌های مختلف برای هندسه استوانه‌ای ساده و هندسه لوبیایی شکل.

#### ۴- نتیجه‌گیری

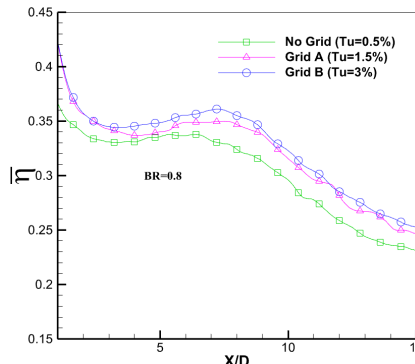
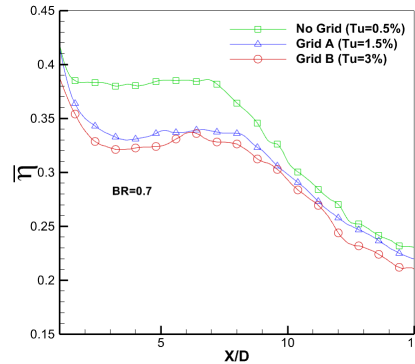
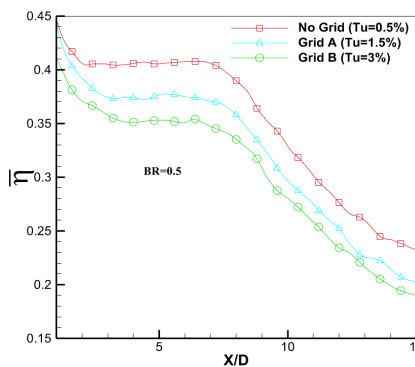
در این تحقیق، اثرات شدت آشفته‌گی جریان اصلی روی خنک‌کاری لایه‌ای صفحه تخت، به صورت تجربی برای دو نوع روزنه خنک‌کاری شامل استوانه‌ای ساده و لوبیایی شکل به صورت تجربی با استفاده از روش دمانگاری ماون قرمز مطالعه شده است. یافته‌های اصلی این مطالعه که در سه نسبت‌دمش ( $BR = \rho_{jet} V_{jet} / \rho_{\infty} V_{\infty}$ ) و سه شدت آشفته‌گی جریان انجام شده عبارتند از:

الف) در روزنه استوانه‌ای ساده، در نسبت‌دمش کم، آشفته‌گی زیاد جریان آزاد، منجر به کاهش پوشش‌دهی هوای خنک‌کننده در اثر اختلاط آن با جریان اصلی، می‌گردد. با این حال، در نسبت‌دمش بالا، آشفته‌گی زیاد جریان آزاد، باعث بهبود خنک‌کاری لایه‌ای می‌شود.

ب) در روزنه لوبیایی شکل، در نسبت‌دمش‌های پایین، با افزایش شدت آشفته‌گی، آشفته‌گی زیاد جریان جت را با جریان اصلی مخلوط کرده و آنرا دور از سطح نگه می‌دارد. لازم به ذکر است که در روزنه‌های لوبیایی شکل، افزایش شدت آشفته‌گی تنها در نسبت‌دمش بالا ۰/۸ اثر مثبتی روی اثر بخشی خواهد شد.



شکل ۸- اثر بخشی خنک‌کاری متوسط‌گیری شده جانبی بین روزنه‌ای برای هندسه استوانه‌ای ساده در سطوح آشفته‌گی مختلف.



شکل ۹- اثر بخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده بین روزنه‌ای برای هندسه لوبیایی شکل در شدت آشفته‌گی متفاوت.

شکل ۱۰- الف اثر بخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده کل را در ناحیه بالادست جت‌ها در نسبت‌دمش‌های مختلف برای هندسه مورد

- a Scaled Guide Vane Pressure Side Model. *Int J Rot Mach.* 2004; 10(5): 345-354. doi: 10.1080/10236210490474458.
- [14] Saumweber C, Schulz A, Wittig S. Free-Stream Turbulence Effects on Film Cooling With Shaped Holes. *ASME J Turbomach.* 2003; 125(1): 65-73. doi: 10.1115/1.1515336.
- [15] Eriksen V L, Goldstein R J. Heat Transfer and Film Cooling Following Injection Through inclined Circular Tubes. 1974; 96(2): 239-245.
- [16] Lebedev V P, Lemanov V V, Misyura S Y A, Terekhov V I. Effects of flow turbulence on film cooling efficiency. *Int. J. Heat Mass Transf.* 1995; 38(11): 2117-2125.
- [17] Wright L M, McClain S T, Clemenson M D. Effect of Freestream Turbulence Intensity on Film Cooling Jet Structure and Surface Effectiveness Using PIV and PSP. *J. Turbomach.* 2011; 133(4):041023-1/12. doi: 10.1115/1.4003051.
- [18] Zhongyi F U, Hui ren Z H U, Lijian C, Ru J. Experimental Investigation on the Effect of Mainstream Turbulence on Full Coverage Film Cooling Effectiveness for a Turbine Guide Vane. *J. Therm. Sci.* 2019; 28(1): 145-157.
- [19] Takeishi K, Oda Y, Mori S, Krewinkel R. Effect of main stream turbulence on the film cooling effectiveness of a circular and a fan-shaped film cooling hole. *Mech. Eng. J.* 2020; 7(4):1-10. doi: 10.1299/mej.20-00176.
- [۲۰] پولادرنگ ی، رمضانی زاده م، مطالعه تجربی به کارگیری طرح جدید روزنه لوبیایی شکل در خنک کاری لایه ای. نشریه علمی - پژوهشی مهندسی هوانوردی. ۱۴۰۱، د. ۲۵، ش. ۱، ص ۴۰-۵۴.
- [21] Pouladrang Y. Experimental Study of the Effects of Jet hole Geometry on the Film Cooling Effectiveness in Gas Turbines," Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, 2017.
- [22] Moffat R J. Describing the Uncertainties in Experimental Results. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 1988; 1(1): 3-17.
- [23] Lawson S A, Thole KA. Effects of Simulated Particle Deposition on Film Cooling. *ASME.* 2011; 133(2): 021009 (9 pages). doi: 10.1115/1.4000571.
- [24] Kunze M, Preibisch S, Landis K. A New test rig for film cooling experiments on turbine endwalls. *Proc. ASME Turbo Expo conf.* 2008; 989-998.
- [25] Johnson B, Tian W, Zhang K, Hu H. 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.* 2014; 76:337-349. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.04.028.
- [26] An B, Liu J J, Chao Zh, Zhou S. Film Cooling of Cylindrical Hole With a Downstream Short Crescent-Shaped Block. *J. Heat Transfer.* 2013; 135(3): p. 031702. doi: 10.1115/1.4007879.
- [27] Sinha AK, Bogard DG, Crawford ME. Film-Cooling Effectiveness Downstream of a Single Row of Holes With Variable Density Ratio. *J Turbomach.* 1991; 113(3): 442-449.
- [28] Rallabandi AP, Grizzle J, Han J. Effect of Upstream Step on Flat Plate Film-Cooling Effectiveness Using PSP. *J. ASME Turbomach.* 2011; 133(4): 041024-1/8. doi: 10.1115/1.4002422.
- ج) نتایج نشان می دهد که روزنه های استوانه ای و لوبیایی شکل اثرپذیری بسیار متفاوتی به سطوح آشفته گی جریان آزاد دارد. برای روزنه های لوبیایی، اثربخشی خنک کاری با افزایش سطح آشفته گی در نسبت دممش کم و متوسط کاهش می یابد، در حالی که افزایش کمی در اثربخشی برای نسبت دممش بالا می تواند دیده شود.
- د) برای روزنه های لوبیایی، افزایش شدت آشفته گی جریان آزاد موجب کاهش اثربخشی خنک کاری لایه ای بی دررو در نسبت دممش ۰/۵ و ۰/۷ می شود. هنگامی که شدت آشفته گی از ۰/۵ تا ۳ درصد افزایش می یابد، به طور میانگین میزان کاهش تا ۱۳ درصد برای اثربخشی متوسط گیری شده جانبی اتفاق می افتد. در نسبت دممش ۰/۸، افزایش بهره وری مشاهده شده است که ناشی از گسترش جانبی بهبودیافته خنک کاری، کاهش تمایل به جدا شدن از سطح و افزایش میزان دبی جرمی جت می باشد.
- ### ۵- مراجع
- [۱] مرتضوی س، ا، رهی ع، جعفری س م، بررسی رفتار ارتعاشی و شکست خستگی پره توربین گاز تحت اثر آسیب ناشی از برخورد جسم خارجی. نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۳، د. ۵۴، ش. ۳، ص ۲۱-۲۷.
- [۲] پویانی پ؛ کیهانی م؛ ح؛ نوروزی م، مطالعه ای عددی جهت بهبود عملکرد حرارتی برای خنک کاری داخلی توربین گاز در کانال های چهار گذره. نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۱، د. ۵۲، ش. ۲، ص ۱۸۳-۱۹۳.
- [3] Cheng L, Zhu H, Jiang R, Fu Z, Xu W. The Effect of Turbulence Intensity on Full Coverage Film Cooling for a Turbine Guide Vane. In *2018 Joint Propulsion Conference*, 2018. doi: 10.2514/6.2018-4523.
- [۴] عباسی ث، بررسی اثرات خنک کاری لایه ای بر مشخصه های عملکردی یک توربین محوری. نشریه علمی دانش و فناوری هوافضا. ۱۳۹۸، د. ۸، ش. ۲، ص ۲۰۹-۲۲۱.
- [5] Abbasi S, Gholamalipour A. Performance optimization of an axial turbine with a casing injection based on response surface methodology. *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.* 2021; 43(9): 1-15. doi: 10.1007/s40430-021-03155-6.
- [6] Abbasi S, Gholamalipour A. Parametric study of injection from the casing in an axial turbine. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy.* 2020; 234(5): 582-593. doi: 10.1177/0957650919877276.
- [7] Bunker R S. Evolution of Turbine Cooling. *ASME Pap. No. GT2017-63205*, 2017.
- [8] Goldstein R J, Eckert E R G, Burggraf F. Effects of hole geometry and density on three-dimensional film cooling. *Int. J. Heat Mass Transf.* 1974; 17(5): 595-607.
- [9] Salimi M R, Ramezanizadeh M, Taebi-Rahni M, Farhadi-Azar R. Film Cooling Effectiveness Enhancement Applying another Jet in the Upstream Neighbor of the Main Jet-Using LES Approach. *J. Appl. Fluid Mech.* 2016; 9(1):33-42.
- [10] Pouladrang Y, Ramezanizadeh M. Experimental Investigation of the Effect of a Novel Pea Jet Hole on Thermal Behavior of Jets Injected into a Crossflow. *FLUID Mech. Aerodyn. J.* 2018; 7(2): 33-45.
- [11] Ramezanizadeh M, Pouladrang Y. Experimental Investigation of Film Cooling Effectiveness Applying a Novel Integrated Compound Jets Design for the Jet Holes. *Modares Mech. Eng.* 2018; 18(3):302-310.
- [12] Dhungel A, Lu Y, Phillips W, E. Srinath E V, James H. Film Cooling From a Row of Holes Supplemented With Antivortex Holes. *J. Turbomach.* 2009; 131(2).
- [13] Dittmar J, Schulz A, Wittig S. Adiabatic Effectiveness and Heat Transfer Coefficient of Shaped Film Cooling Holes on