نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۴، سال ۱۳۹۹، صفحات ۸۱۳ تا ۸۳۲
DOI: 10.22060/mej.2019.14851.5957

بررسی تجربی اثرات زائده‌های طولی بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای ناشی از روزنه‌های نخودی در پره‌های توربین‌های گازی

مهدی رمضانی‌زاده*، یونس پولادرنگ

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

خلاصه: در تحقیق حاضر، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای ناشی از روزنه‌های نخودی شکل با افزودن زائده‌های طولی در ناحیه‌ی پس از خروجی جت‌ها، به‌صورت تجربی با استفاده از روش دمانگاری مادون قرمز بررسی شده است. اندازه‌گیری‌ها در عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ (بر اساس مشخصات جریان اصلی و قطر معادل روزنه‌ی جت) و زاویه‌ی تزریق ۳۰ درجه روی صفحه‌ی آزمون با استفاده از جت‌های دارای روزنه‌ی شکل‌یافته‌ی نخودی انجام شده است. بررسی‌ها برای چند حالت مختلف شامل سه ارتفاع زائده $(0/345D, 0/522D, 0/696D)$ ، سه فاصله‌ی بین دو زائده‌ی مجاور $(0/8D, 1D, 1/2D)$ و سه طول زائده‌ها $(8D, 16D, 24D)$ انجام شده که در آن‌ها، D قطر روزنه‌ی خنک‌کاری معادل برای روزنه‌ی نخودی می‌باشد. اثرات نسبت دمش در چهار حالت شامل ۰/۴، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۸ بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که زائده‌های مورد نظر، با مهار کردن جریان جت تزریق شده، می‌توانند تا حد زیادی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای را افزایش دهند. در بهترین نسبت دمش مربوط به هر هندسه، درصد افزایش اثربخشی متوسط‌گیری شده در کل ناحیه‌ی پایین‌دست جت در حالت دارای زائده‌های طولی، در مقایسه با حالت بدون زائده، ۴۱/۴ درصد می‌باشد. در حقیقت، این زائده‌ها با کنترل گردابه‌های خلاف هم‌گرد و محدود کردن پخش جت‌های خنک‌کننده، از اختلاط گازهای داغ با جت‌های خنک‌کاری لایه‌ای جلوگیری می‌کنند.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۲۷
بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۰۲
پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۱۱/۲۴

کلمات کلیدی:
خنک‌کاری لایه‌ای
روزنه‌ی شکل‌یافته‌ی نخودی
زائده‌های مهارکننده‌ی جریان
روش مادون قرمز
آزمایش تونل باد

۱- مقدمه

توربین‌های گازی پیشرفته، برای کار در دمای بالا در ورودی توربین‌ها که از حد مجاز فلزات رایج بیش‌تر است، به گونه‌ای طراحی شده‌اند که دارای راندمان حرارتی و توان خروجی ارتقاء یافته‌ای باشند [۱]. این ارتقاء، با پیشرفت در مواد و آلیاژهای فوق‌العاده، توسعه‌ی پوشش‌های حرارتی و پیشرفت در فن‌آوری‌های خنک‌کاری مانند خنک‌کاری‌های داخلی، لایه‌ای، اصابتی و سایر روش‌ها امکان‌پذیر است [۲-۴]. با خنک‌کاری، دمای ورودی می‌تواند به مراتب بیشتر از درجه حرارت مجاز مواد باشد. اگرچه خنک‌کاری روشی مؤثر برای افزایش دمای ورودی به توربین است، ولی ملاحظات کارایی نیازمند این است که خنک‌کاری مؤثر با حداقل جریان خنک‌کاری انجام شود. زیرا تزریق هوای خنک به سامانه‌ی توربین که تحت فشار بالا عمل می‌کند، مستلزم صرف انرژی زیادی می‌باشد. در روش خنک‌کاری لایه‌ای، روزنه‌ها طوری طراحی می‌شوند که با تزریق هوا از بین آن‌ها، لایه‌ی عایق نسبتاً خنکی در نزدیکی سطح تیغه تشکیل شود [۵]. اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای، پارامتری است که موفقیت لایه‌ی هوای خنک در محافظت از تیغه در برابر جریان هوای داغ را می‌سنجد. این پارامتر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = (T_{aw} - T_m) / (T_c - T_m) \quad (۱)$$

که در آن، T_{aw} دمای لایه‌ای محلی است. اگر سطح آدیاباتیک باشد، T_{ad} را می‌توان جایگزین T_{aw} کرد که T_{ad} دمای دیواره‌ی محلی بی‌دررو است. بدین ترتیب، η_{ad} اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای آدیاباتیک نامیده می‌شود.

تاکنون مطالعات زیادی در مورد اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای برای روزنه‌های استوانه‌ای تک و یا چند ردیفه روی صفحه‌ی تخت، صفحه‌ی انحنادار و تیغه‌های پشت سرهم، با هر دو روش عددی و تجربی انجام شده است. تأثیر پارامترهای هندسی و آیرودینامیکی از جمله زاویه‌ی روزنه، نسبت طول به قطر روزنه، نسبت دمش، نسبت چگالی و شدت آشفتگی جریان اصلی، بر اثربخشی خنک‌کاری مورد بررسی زیادی قرار گرفته است.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ramezanizadeh@ssau.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

به علاوه، در این مطالعات به آیرودینامیک و مکانیزم‌های انتقال‌حرارت خنک‌کاری لایه‌ای، مانند تشکیل جفت گردابه‌ی کلیوی، اندرکنش با جریان عرضی و نیز به جریان داخلی در روزنه‌ی خنک‌کاری پرداخته شده است. بررسی دقیقی در مورد خنک‌کاری لایه‌ای توربین گازی در مرجع [۶] ارائه شده است. در حال حاضر، مکانیزم خنک‌کاری لایه‌ای از طریق روزنه‌های استوانه‌ای شناخته شده است. نتیجتاً این که استفاده از روزنه‌های استوانه‌ای در خنک‌کاری لایه‌ای، به علت جهش عمودی جت روی سطح، به خصوص در نسبت‌های شار اندازه‌حرکت بالا (بالاتر از ۱)، معایبی در کاربردهای توربین‌گازی دارد که منجر به تضعیف عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای می‌گردد. روزنه‌ی استوانه‌ای به‌عنوان یکی از شکل‌های ابتدایی برای خنک‌کاری لایه‌ای، به‌وضوح در اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای و پوششده‌ی لایه‌ای جانبی مؤثر است. بنابراین، روش‌های بسیاری برای بهبود اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای روزنه‌ی استوانه‌ای پیشنهاد شده و تحقیق در جهت پیشرفت‌های جدید در سال‌های اخیر شدت یافته است [۷].

روش‌های بهبود خنک‌کاری لایه‌ای را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد. در دسته‌ی اول، با استفاده از بسط جانبی، بسط رو به جلو، انتشار رو به جلو و جانبی [۸] و بسط با زاویه‌ی مرکب [۹]، مساحت در خروجی روزنه‌ی جت استوانه‌ای بزرگ می‌شود [۱۰]. در مقایسه با روزنه‌ی استوانه‌ای، ناحیه‌ی بزرگ‌شده در خروجی روزنه باعث کاهش اندازه‌حرکت جت تزریقی و پوشش بیش‌تر سیال خنک‌کننده می‌شود. بونکر [۱۱] اظهار داشت که طی ۳۰ سال گذشته پیشرفت اصلی در فن‌آوری خنک‌کاری لایه‌ای، در زمینه‌ی تلفیق شکل‌دهی خروجی با روزنه خنک‌کاری بوده است. تاکنون تحقیقات زیادی روی موضوع شکل‌دهی روزنه خنک‌کاری لایه‌ای منتشر شده است. طبق بررسی‌های گلدشتاین و همکاران [۱۲]، نادعلی نجف‌آبادی و همکاران [۱۳]، لاویو و ابهری [۱۴] و رمضانی‌زاده و پولادرنگ [۱۵]، روزنه‌ی شکل‌داده‌شده بیش‌ترین اثربخشی آدیاباتیک را در بین شکل‌های مختلف روزنه خنک‌کاری لایه‌ای داشته است. کیم و کیم [۱۶] با استفاده از شبیه‌سازی عددی با رهیافت میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر– استوکس، عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای شکل‌های روزنه‌های ورودی همگرا را بررسی کردند. در تحقیق ایشان، نتایج عددی نشان داد که شکل همگرای مقطع ورودی جت، باعث افزایش ۵/۴۶ درصدی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای جانبی در مقایسه با روزنه‌ی خنک‌کاری لایه‌ای استوانه‌ای می‌شود.

در دسته‌ی دوم روش‌های بهبود خنک‌کاری لایه‌ای، ترکیبی از روزنه‌های استوانه‌ای چندگانه استفاده شده است. نمونه‌ای از این دسته، روزنه خنک‌کاری جت دوگانه است [۱۷]. از طریق ترکیب دو روزنه با زاویه‌های ترکیبی مخالف، روزنه‌ی جت دوگانه ساختار گردابه‌ای مناسبی را در پی خواهد داشت و اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای را ارتقاء می‌دهد. روزنه‌ی پیوسته [۱۸] و روزنه‌ی ضد گردابه [۱۹]، نمونه‌هایی از ترکیب سه روزنه هستند. در این نمونه‌ها، دو روزنه‌ی جت کوچک‌تر ثانویه به منظور تضعیف اندرکنش بین جریان اصلی و جریان جت روزنه اولیه (اصلی) مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین، قدرت گردابه‌های خلاف جهت هم‌گرد که برای اتصال مجدد سیال خنک مضر است، تضعیف می‌شود. فرهادی‌آذر و همکاران [۲۰] ساختار جت‌های مرکب سه‌گانه[1] را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که نسبت چگالی اثرات قابل توجهی بر مسئله هیدرودینامیک جت در جریان عرضی دارد. به علاوه، هرگاه نسبت سرعت جت‌های کوچک‌تر افزایش یابد، قدرت جفت گردابه‌های خلاف هم‌گرد[2] آن‌ها افزایش می‌یابد که باعث می‌شود جریان جت خنک‌کننده در نزدیکی سطح نگه داشته شود. سلیمی و همکاران [۲۱] افزایش اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای ناشی از استفاده از جتی کوچک‌تر در بالادست جت اصلی را با استفاده از رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج به دست آمده توسط آن‌ها نشان داد که حتی با استفاده از جت بالادستی که هم دما با جریان عرضی باشد نیز اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای افزایش می‌یابد.

در دسته‌ی سوم روش‌های بهبود خنک‌کاری لایه‌ای، شکل اطراف سطح مقطع خروجی روزنه‌ی جت اصلاح می‌شود. در رابطه با تفاوت روش دسته‌ی اول با روش دسته‌ی سوم لازم به ذکر است که در دسته‌ی اول، در حقیقت سطح مقطع روزنه و بسط آن در خروجی روزنه، جهت کاهش اندازه حرکت و جهش عمودی صورت می‌پذیرد. اما در دسته‌ی سوم، سطح مقطع روزنه و کانال جت تغییر نمی‌کند و اطراف مقطع خروجی روزنه‌ی جت تغییر و اصلاح می‌گردد. تولید روزنه‌های شکل‌داده‌شده پرخرج است. به‌جای استفاده از روزنه‌های با خروجی‌های شکل‌داده‌شده، نا و شیه [۲۲] ایده‌ای را معرفی کردند که در آن، رمپ بالادست با پله پس‌رو مستقیماً در جلو خروجی روزنه قرار می‌گیرد. زو و هو [۲۳] طرح جدید تپه‌های هلالی شکل (برخان) را بررسی کردند که باعث افزایش ۳۰ الی ۵۰۰ درصدی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای نسبت به هندسه‌ی پایه شد. رالابندی و همکاران [۲۴] روی مسئله‌ی تعیین میزان کاهش بار حرارتی به دلیل روزنه‌های خنک‌کاری با پله بالادست متمرکز شدند. ابدالا و همکاران [۷] اثرات بیست و یک مورد با پله‌های بالادست مختلف بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای و ساختارهای جریان

1 Compound Triple Jets (CTJ)
2 Counter Rotating Vortex Pairs (CRVPs)

را بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که پله‌های دارای انحناء، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای بالاتری نسبت دیگر پله‌ها دارند. اما پله‌های مطالعه‌شده نیاز به تعیین دقیق ضرایب انتقال‌حرارت و بهینه‌سازی ابعاد پله‌ها دارند. باریگزی و همکاران [۲۵]، اثرات روزنه‌ی شیاردار روی تیغه نازل را مطالعه نمودند.

مطالعات اندکی روی زائده‌های طولی در پایین‌دست روزنه‌های دایره‌ای ساده انجام شده است. شیح و همکاران [۴] به طور عددی اثرات زائده‌های ردیف‌کننده‌ی جریان را در پایین‌دست روزنه‌های استوانه‌ای ساده بررسی کردند. چِن [۲۶] اثر زائده‌های طولی، رمپ بالادست و شیارهای عرضی را بر روزنه‌های ساده‌ی استوانه‌ای بررسی نمود. نتایج آزمایش‌های او، اثرات قابل توجه در عملکرد روزنه‌های دایره‌ای ساده و نفوذ کم‌تر هوای داغ جریان اصلی را نشان داد. ایجاد شیارها، نسبت به روزنه‌های شکل‌داده‌شده برای تولید ارزان‌تر هستند. چن [۲۶] اثرات زائده‌های طولی مستطیلی شکل در پایین‌دست هندسه‌ی ساده‌ی دایره‌ای، رمپ بالادست و روزنه‌های شیاردار را به طور تجربی بررسی کردند.

در تحقیق حاضر، به منظور بهبود بیشتر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای ناشی از روزنه‌ی شکل‌یافته‌ی نخودی، ترکیب جدیدی از هندسه‌ی تزریق ارائه و مطالعه شده که در واقع، به دسته‌های اول و سوم مربوط می‌شود. در حقیقت، این مطالعه نشان‌دهنده‌ی اولین تحقیق تجربی جهت بررسی ایده قرار دادن زائده‌های هدایت‌کننده‌ی جریان در پایین‌دست روزنه‌های شکل‌یافته‌ی نخودی برای کنترل میزان اختلاط جریان اصلی و جریان جت‌ها می‌باشد. لازم به ذکر که بررسی تجربی روزنه‌ی نخودی، قبلاً توسط نویسندگان همین مقاله [۲۷] انجام گرفته که حاکی از افزایش ۶۲ الی ۲۵۰ درصدی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در مقایسه با هندسه‌ی ساده‌ی استوانه‌ای است. در تحقیق حاضر، اثرات پارامترهای هندسی نصب زائده‌ها بر عملکرد روزنه، مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. به عبارت دیگر، در تحقیق حاضر استفاده از زائده‌های ردیف‌کننده‌ی جریان[1] برای به حداقل رساندن میزان پخش هوای خروجی از جت‌ها به منظور ارتقاء اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای پیشنهاد شده است.

۲- دستگاه آزمایش و مدل‌های تجربی

در این قسمت، ابتدا سامانه‌ی تونل‌باد، وسایل و تجهیزات به‌کار رفته در تحقیق حاضر معرفی شده و سپس، روش دمانگاری مادون قرمز مورد استفاده تشریح شده است. در ادامه نیز ترکیب‌های هندسی روزنه‌ی تزریق به‌کار رفته در آزمایش‌های تجربی و همچنین، محاسبات مربوط به عدم قطعیت نتایج آزمایش به‌طور خلاصه ارائه گردیده است.

۲- ۱- سامانه تونل‌باد مادون‌صوت و دستگاه آزمایش

برای اندازه‌گیری اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای حاصل از روزنه‌های نخودی شکل با زائده‌های طولی پایین‌دست، از تونل باد مداربسته دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری استفاده شده است. این تونل باد دارای مقطع آزمون استوانه‌ای شکل به قطر ۵۰ سانتی‌متر و طول ۸۰ سانتی‌متر می‌باشد. در شکل ۱، شمایی از تجهیزات آزمایشگاهی به کار رفته در تحقیق نشان داده شده است. برای انجام کلیه آزمایش‌ها، جریان اصلی با سرعت ۲۷ متر بر ثانیه به کار رفته و هوای جت خنک‌کننده نیز از طریق کمپرسور باد دارای قدرت هوادهی ۹۰۰ لیتر بر دقیقه با حداکثر فشار کاری ۱۹۶۰ کیلوپاسکال (۱۹/۶ بار) تأمین شده است. میزان دبی هوای گرفته‌شده از کمپرسور باد توسط شیر کنترل جریان تنظیم می‌شود. هوای خنک با عبور از شیر کنترل جریان، به اریفیس می‌رسد و میزان دبی هوا توسط اریفیس اندازه‌گیری می‌شود. لذا، می‌توان با تنظیم شیر کنترل جریان، دبی مورد نیاز سیال جت ثانویه را جهت حصول نسبت دمش مورد نظر اعمال نمود. جهت گرم کردن هوای گرفته شده از کمپرسور، گرم‌کن لوله‌ای ۲ کیلوواتی که توان خروجی آن با استفاده از کنترل دیجیتال دما قابل تنظیم می‌باشد، در مدار پنوماتیکی بعد از اریفیس قرار داده شده است. لذا، با عبور هوا از گرم‌کن، نسبت دمای جت به جریان اصلی اعمال می‌گردد. قبل از ورود هوای گرم به محفظه‌ی جت‌ها، شیر اطمینانی در مسیر قرار داده شده تا ایمنی مورد نیاز جهت جلوگیری از آسیب دیدگی مدار پنوماتیکی تأمین شود. محفظه‌ی جت‌ها در زیر صفحه‌ی آزمون قرار گرفته که وظیفه‌ی آن، تأمین جریان یکنواخت مورد نیاز برای تزریق از جت‌ها می‌باشد.

به منظور افزایش دقت نتایج، تزریق روی سطح از طریق ۷ عدد جت که در یک ردیف قرار گرفته‌اند انجام شده و به منظور ایجاد قابلیت تکرارپذیری در جهت عرضی، اندازه‌گیری‌های مربوط به جت چهارم که در وسط واقع شده، برای محاسبات به کار رفته است. برای اندازه‌گیری دمای جت‌ها (T_c)، از سنسور هوای پی.تی ۱۰۰ نوع آلفا[2] استفاده شده که در داخل محفظه‌ی جت‌ها و در نزدیکی ورودی یکی از روزنه‌ها نصب شده است. هوای گرم پس از عبور از شیر اطمینان، توسط شیلنگی نسوز به محفظه جت‌ها می‌رسد.

1 Flow Aligned Tabs (FAT)

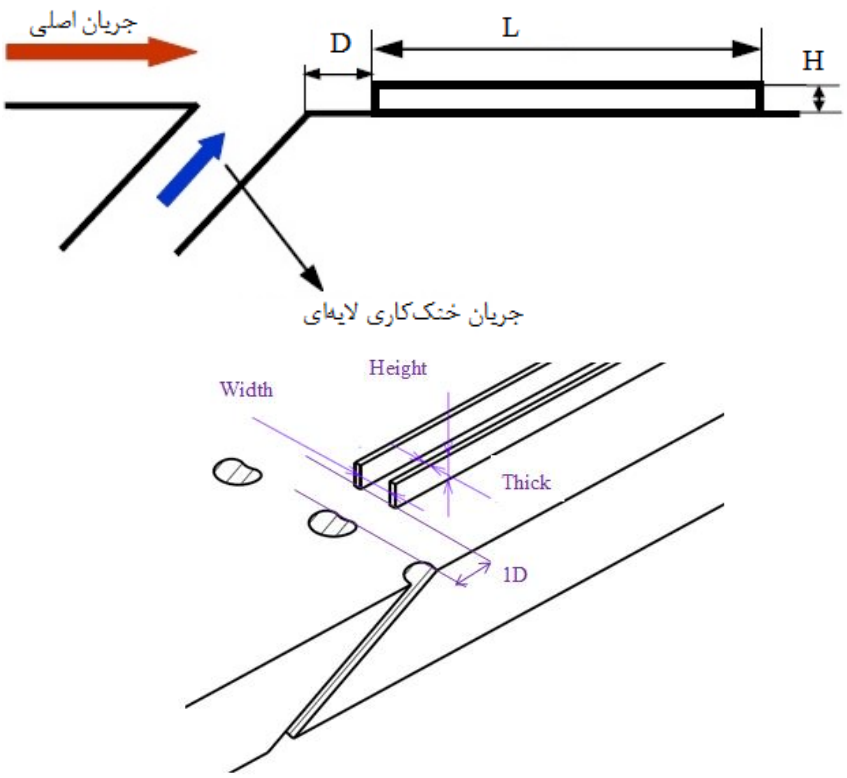
2 PT 100 Type α

شکل ۱: دستگاه و تجهیزات به‌کار رفته در تحقیق حاضر

Fig. 1. Set up and equipments used in the present study

سپس، با عبور جریان هوا از میان تیغه‌های حائل داخل محفظه‌ی جت‌ها، از طریق کانال روزنه‌ی جت‌ها به روی سطح تزریق می‌شود. برای اندازه‌گیری دمای جریان اصلی ورودی (T_m) نیز از سنسور پی.تی.۱۰۰ در بالادست جریان اصلی استفاده شده است. شدت آشفتگی و سرعت جریان آزاد نیز با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ اندازه‌گیری شده‌اند. در تمام آزمایش‌ها، اختلاف دمای جریان اصلی و جت ۲۰/۳ درجه سانتی‌گراد اعمال شده است. در بازه‌های مختلف زمانی انجام آزمایش‌ها، دمای جریان اصلی بین ۱۴ الی ۲۳ درجه سانتی‌گراد متغیر بوده است که به همان میزان، دمای جریان جت بین ۳۴/۳ الی ۴۳/۳ درجه سانتی‌گراد اعمال شده تا اختلاف دمای مورد نظر حفظ گردد. ضمناً، نسبت ضخامت لایه‌مرزی به قطر جت(δ/d) نیز برابر با ۹۸/۰ بوده است.

برای انجام هر آزمایش، دمای جریان اصلی که همان دمای هوای تونل باد است توسط سنسور دمای با دقت بالا اندازه‌گیری شده است. برای هر طرح، چهار آزمایش(در چهار نسبت دمش مختلف) انجام شده است که در هر آزمایش دمای جریان اصلی به طور جداگانه ثبت شده و به طبع آن دمای جت نیز تغییر داده شده است. به علاوه، دمای هوای تونل پس از رسیدن به حالت تعادل اندازه‌گیری شده است. بنابراین، در انجام هر آزمایش، دمای هوای تونل ثابت بوده است. همچنین، آزمایش‌ها در مواقعی انجام شده است که دمای هوا رطوبت خیلی کمی داشته و شرایط جوی مناسب بوده است. لذا، لازم نیست که دمای هوا ثابت نگه داشته شود. یعنی در انجام هر آزمایش، اگر دمای جریان اصلی کم‌ترین تغییر را داشته باشد، به همان اندازه دمای جت را متناسب با آن تغییر داده می‌شود تا اختلاف دمای جت و جریان اصلی ثابت باشد. لذا، با توجه به اینکه پارامتر اندازه‌گیری شده اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای می‌باشد (اختلاف دمای دیواره‌ی آدیاباتیک و دمای جریان اصلی تقسیم بر اختلاف دمای جت و دمای جریان اصلی)، تغییر دمای جریان اصلی با درنظر گرفتن تمهیدات فوق بر نتایج اثر منفی نخواهد داشت. ضمناً، همان‌طور که در انجام آزمایش مشاهده شد، تغییرات دمای تونل که پس از رسیدن به حالت تعادل اندازه‌گیری شد، تغییرات ناچیزی داشته که در عدم قطعیت تکرارپذیری لحاظ و محاسبه شده است.



شکل ۲: نمای هندسی زائده‌های طولی در پایین‌دست روزنه‌ی شکل‌داده شده نخودی

Fig. 2. Geometric view of longitudinal tabs at the downstream of the Pea shaped holes

۲- ۲- اندازه‌گیری اثربخشی خنک‌کاری با استفاده از روش مادون قرمز

در آزمایش‌های خنک‌کاری لایه‌ای این تحقیق، اندازه‌گیری دمای سطح به روش دمانگاری مادون قرمز با استفاده از دوربین حرارتی *FLIR C2* انجام شده است. دوربین مادون قرمز مذکور دارای محدوده‌ی کاری ۱۰- تا ۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و دقت ۲٪ می‌باشد. در کلیه‌ی آزمایش‌ها، سرعت جریان اصلی برابر با ۲۷ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده که بر اساس قطر معادل روزنه‌ی جت، عدد رینولدز آن برابر با ۱۰۰۰۰ می‌شود. پس از تزریق جریان جت‌ها روی سطح آزمون، دمای سطح (T_{aw}) توسط دوربین مادون قرمز اندازه‌گیری می‌شود. با اندازه‌گیری دما، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای روی سطح صفحه (η) را می‌توان با استفاده از رابطه (۱) محاسبه نمود. توزیع دما و در نتیجه توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در هر پیکسل، از توزیع دقیق دمای سطح به دست آمده توسط نرم‌افزار دوربین مادون قرمز، محاسبه می‌شود.

۲- ۳- ترکیب‌های هندسی روزنه‌ی تزریق

گسترش پوشش لایه‌ای جانبی و تغییر ساختار گردابه‌ای، دو روش اصلی برای بهبود کارایی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای روزنه‌ی استوانه‌ای است. همانند استفاده از تولیدکننده‌ی گردابه در مرجع [۲۸] تشریح شده، قرار دادن زائده در پایین‌دست روزنه‌ی جت‌ها می‌تواند دو هدف فوق را تحقق بخشد. با این حال، شکل زائده و خنک‌کاری خود زائده نیز دارای اهمیت می‌باشد. بر اساس این تحلیل، طرح استفاده از زائده‌های طولی پایین‌دست برای روزنه‌ی شکل‌داده‌شده‌ی نخودی در تحقیق حاضر پیشنهاد شده است.

در شکل‌های ۲ و ۳، نمای دقیقی از هندسه‌ی بررسی‌شده و صفحه‌ی آزمون به کار رفته برای مطالعه‌ی ردیفی از هفت جت تزریق شده روی سطح در حضور زائده‌های طولی ردیف‌کننده‌ی جریان نشان داده شده است. زاویه‌ی تزریق جت‌ها ۳۰ درجه نسبت به سطح در جهت محوری می‌باشد و فاصله‌ی جت‌ها از یکدیگر در جهت عرضی (نسبت گام) و نسبت طول به قطر کانال جت‌ها به ترتیب۱۷/۲ و ۵/۲۲ است. مساحت سطح مقطع هندسه‌ی نخودی معادل با دایره‌ای به قطر۵/۷۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده که برابر با $۲۵/۸۵\text{mm}^۲$ می‌باشد. روزنه‌های مذکور با استفاده

شکل ۳: نمایی از صفحه‌ی آزمون شامل هفت جت تزریق شده روی سطح و زائده‌های طولی مربوطه

Fig. 3. A view of the test plate consists of seven injected jets on the surface and corresponding longitudinal tabs

Table 1. Geometric parameters investigated for longitudinal tabs

جدول ۱: پارامترهای هندسی مطالعه‌شده برای زائده‌های طولی

شماره‌ی طرح	ارتفاع زائده	فاصله دو زائده مجاور	طول زائده
۱	۰/۳۴۸D	D	۲۴D
۲	۰/۵۲۲D	D	۲۴D
۳	۰/۶۹۶D	D	۲۴D
۴	۰/۵۲۲D	۰/۸D	۲۴D
۵	۰/۵۲۲D	۱/۲D	۲۴D
۶	۰/۵۲۲D	D	۱۶D
۷	۰/۵۲۲D	D	۸D

از دستگاه کنترل عددی توسط رایانه[1] در داخل صفحه‌ای از جنس پلکسی گلاس به ضخامت ۱۵ میلی‌متر که دارای ضریب هدایت حرارتی پایین می‌باشد($k = ۰/۱۸۷ \mathrm{m^{-1}k^{-1}}$)، ایجاد شده است. ابعاد صفحه‌ی مذکور $۴۰۰\mathrm{mm} \times ۲۵۰\mathrm{mm} \times ۱۵\mathrm{mm}$ در نظر گرفته شده و ردیف روزنه‌های خنک‌کاری لایه‌ای در فاصله‌ی ۱۸ سانتی‌متری از لبه‌ی تیزشده صفحه‌ی آزمون واقع شده است. جزئیات بیش‌تر هندسه‌ی شکل‌یافته‌ی نخودی در مرجع [۲۷] آمده است.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، زائده‌های شکل‌یافته‌ی مستطیلی، در فاصله $۱D$ در پایین‌دست روزنه‌های خنک‌کاری لایه‌ای قرار گرفته‌اند. پارامترهای طراحی در نظر گرفته شده برای زائده‌های مذکور، مطابق آنچه که در جدول ۱ ارائه شده است، شامل ۷ طرح می‌باشد که

1 Computer Numerical Control (CNC)

Table 2. Uncertainty values of measured quantities to calculate the film cooling effectiveness [29]

جدول ۲: مقادیر عدم قطعیت کمیت‌های اندازه‌گیری شده برای محاسبه اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای[۲۹]

مقدار اندازه‌گیری‌شده	عدم قطعیت کلی	عدم قطعیت تکرارپذیری	عدم قطعیت بایاس
T_∞	±۰/۲۸ °C	±۰/۲۰ °C	±۰/۲۰ °C
T_{surf}	±۰/۳۲ °C	±۰/۲۳ °C	±۰/۲۳ °C
T_j	±۰/۲۰ °C	±۰/۰۳ °C	±۰/۲۰ °C

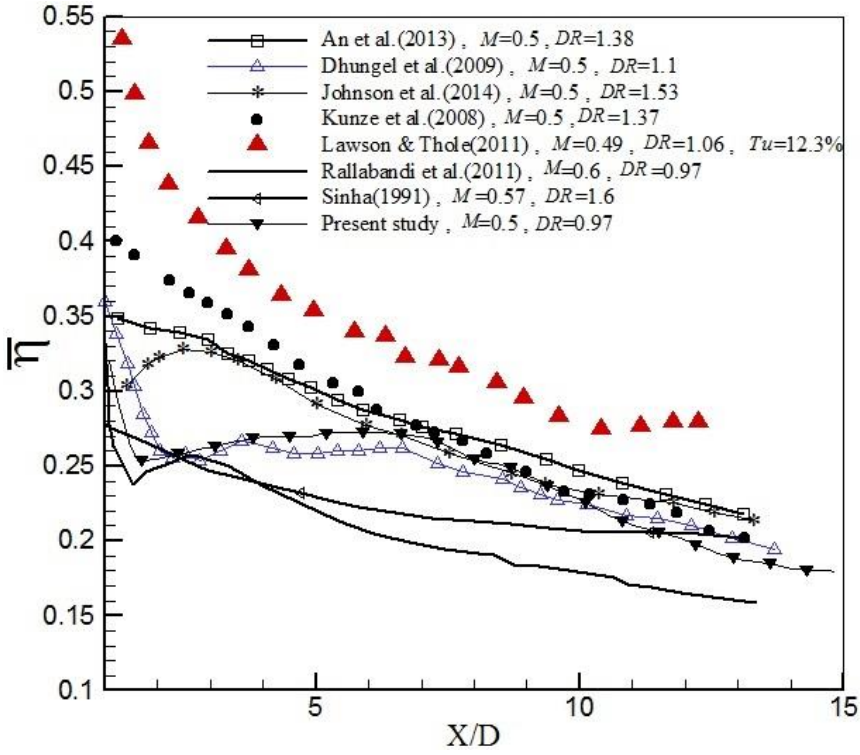
همگی دارای ضخامت $0/174D$ می‌باشند. در شکل مذکور، پارامترهای H و L به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ارتفاع و طول زائده‌ها هستند و W عرض و یا فاصله‌ی عرضی بین دو زائده‌ی مجاور است. هندسه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که برای هر پارامتر هندسی زائده، سه حالت بررسی شود. با توجه به جدول ۱، طرح‌های ۱، ۲ و ۳ دارای ارتفاع زائده‌های مختلف هستند. طرح‌های ۲، ۴ و ۵ دارای عرض‌های مختلف بین دو زائده‌ی مجاور می‌باشند و تغییرات طول زائده‌ها در طرح‌های ۲، ۶ و ۷ در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب، هفت ترکیب هندسی با پارامترهای مختلف زائده تولید شده است.

چگونگی انتخاب و دسته‌بندی طرح‌ها به این صورت است که ابتدا برای بررسی ارتفاع زائده سه حالت در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر، در طرح‌های ۱، ۲ و ۳ به بررسی ارتفاع زائده پرداخته شده است. با توجه به اینکه ارتفاع بهینه در طرح شماره‌ی ۲ مشاهده گردید ($H=0/522D$)، با فرض این ارتفاع بهینه، به بررسی فاصله‌ی بین دو زائده‌ی مجاور (طرح‌های ۲، ۴ و ۵) پرداخته شده است. چون فاصله‌ی بهینه‌ی بین دو زائده‌ی مجاور در طرح ۲ مشاهده گردید ($W=1D$)، در طرح‌های ۲، ۶ و ۷ به بررسی طول زائده پرداخته شده است (در این حالت، فاصله‌ی بین دو زائده برابر با فاصله‌ی بهینه‌ی به دست آمده از قدم دوم جایگذاری شده و طول بهینه‌ی $L=24D$ به دست آمده است). به طور خلاصه، آزمایش‌ها با این فلسفه و منطق انجام شده که در قدم اول، سه طرح اولیه با تغییر پارامتر اول تهیه و آزمایش شده است. سپس بر اساس طرح بهینه از بین سه طرح یاد شده، با تغییر پارامتر بعدی، دیگر طرح‌ها تهیه شده و آزمایش‌های مورد نیاز انجام شده تا مقدار بهینه دو پارامتر دیگر نیز به دست آید. بدین ترتیب، طرح‌های اضافی به‌طور هوشمندانه حذف گردیده و رویه دسته‌بندی و بررسی پارامترها، به صورت منظم و گام به گام پیش برده شده است.

با توجه به محدودیت‌های ساخت، زائده‌های دارای ارتفاع‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر انتخاب شده است که معادل با $0/348D$، $0/522D$ و $0/696D$ می‌باشد. ضمناً، فاصله‌ی دو زائده با ضرایب ۰/۸، ۱ و ۱/۲ برابر قطر معادل روزنه‌ی جت نخودی شکل در نظر گرفته شده است. مشخص است که اگر فاصله‌ی دو زائده را خیلی کم و یا خیلی زیاد در نظر گرفته شود، اثرگذاری زائده تضعیف می‌گردد. یعنی اگر مثلاً فاصله‌ی دو زائده بیش از حد کم باشد، مقدار کمی از جت بین دو زائده محدود می‌شود و بیشتر سیال خنک‌کننده در جریان اصلی نفوذ می‌کند. از طرفی اگر فاصله دو زائده مربوط به یک جت بیش از حد زیاد باشد، باز اثرگذاری زائده‌ها به شدت کاهش می‌یابد. در این حالت، زائده در امر ردیف کردن جریان جت موفق نخواهد بود. به علاوه، در هر دو حالت یاد شده، با نزدیک شدن دو زائده کناری مربوط به دو جت مجاور می‌تواند برای جریان اصلی مزاحمت ایجاد کند و ساختارهای جریان را بهم بریزد. بنابراین، فاصله‌ی بین دو زائده‌ی مجاور با اختلاف‌های $0/2D$ روی صفحه‌ی آزمون ایجاد شده‌اند. همچنین، طول زائده‌ها به صورت مضربی از $8D$ پیشنهاد شده است. توجه شود که طول زائده بیشتر از $24D$ ضرورتی ندارد، زیرا که بعد از آن ردیف بعدی روزنه‌های خنک‌کاری لایه‌ای ایجاد می‌شود.

۲- ۴- عدم قطعیت نتایج

عدم قطعیت نتایج، براساس روش شرح داده شده توسط موفات [۲۹] مطالعه شده است. دمای جریان اصلی، T_∞ و درجه حرارت جت T_j، در مقطع آزمون و محفظه‌ی جت‌ها با استفاده از حسگر دمای پی‌تی۱۰۰ اندازه‌گیری شده است. خطای بایاس مربوط به سنسور دمای پی‌تی۱۰۰، ۰/۲± درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد. عدم قطعیت تکرارپذیری برای حسگرهای دمای جت و جریان اصلی، با قرائت هر ۱۰ ثانیه یک بار، تعیین شده است. انحراف معیار آن داده‌ها، در طول حالت پایدار فرض شده برای مقطع آزمون، به عنوان



شکل ۴: مقایسه‌ی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده‌ی جانبی تحقیق حاضر، با نتایج منتشرشده از تحقیقات قبلی در نسبت دمش ۰/۵

Fig. 4. A view of the test plate consists of seven injected jets on the surface and corresponding longitudinal tabs

عدم قطعیت تکرارپذیری درنظر گرفته شد. عدم قطعیت تکرارپذیری برای دمای جریان اصلی ۰/۲± درجه‌ی سانتی‌گراد به دست آمد، در حالی که عدم قطعیت تکرارپذیری در اندازه‌گیری دمای جت خنک‌کننده ۰/۰۳± درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد.

خطای بایاس برای داده‌های مادون قرمز، ریشه‌ی دوم مجموع مربعات از بایاس پی.تی۱۰۰ ($\pm 0/2^{\circ}C$) و متوسط اختلاف بین داده‌های مادون قرمز کالیبره شده و اندازه‌گیری پی.تی۱۰۰ ($\pm 0/11^{\circ}C$) است. در این روش، خطای بایاس برای اندازه‌گیری‌های دمای سطح $\pm 0/23^{\circ}C$ بود. خطای تکرارپذیری برای اندازه‌گیری مادون قرمز دمای سطح با در نظر گرفتن انحراف معیار نقاط مشابه در ۱۰ تصویر گرفته شده در حالت پایا در همان محل به دست آمده است. از این روش، خطای تکرارپذیری برای اندازه‌گیری مادون قرمز دمای سطح $\pm 0/23^{\circ}C$ به دست آمده است که عدم قطعیت کلی برای اندازه‌گیری مادون قرمز دمای سطح $\pm 0/32^{\circ}C$ به دست می‌آید. افت فشار در داخل لوله اریفیس با استفاده از دو مبدل فشار اندازه‌گیری شد که عدم قطعیت کل آن $\pm 1/01Pa$ است. سرعت ورودی با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ اندازه‌گیری شد. برای انجام اندازه‌گیری‌ها از فشارسنج تک کاناله استفاده شده است. فشارسنج دارای خطای بایاس $\pm 0/625Pa$ است [۱۵]. پس از انجام آزمایش‌های خطای تکرارپذیری $\pm 0/18Pa$ نیز به دست آمد. بنابراین عدم قطعیت کل $0/22\ Pa$ بود.

عدم قطعیت بایاس، تکرارپذیری و کلی همه دماهای اندازه‌گیری شده که برای محاسبه η_{meas} مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در جدول ۲ خلاصه شده است. عدم قطعیت کلی در فاصله‌ی طولی $0 < X/D < 15$ برای مقدار $\eta_{meas} = 0/9$ ، برابر $\pm 0/0181$ می‌باشد، درحالی که برای مقدار کمتر از $\eta_{meas} = 0/2$ ، عدم قطعیت کلی محاسبه شده $\pm 0/0194$ می‌باشد. لازم به ذکر است که با فاصله گرفتن از خروجی جت‌ها، اثربخشی کاهش می‌یابد و در عمل، باید از ردیف جت‌های دیگری برای محافظت سطح استفاده شود.

۳- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج تجربی حاصل از تحقیق ارائه شده و مورد بحث قرار گرفته است. آزمایش‌ها برای هفت هندسه و چیدمان متفاوت زائده‌ها در چهار نسبت دمش (نسبت گذر جرمی جریان جت به جریان اصلی

$M = (\rho V)_j / (\rho V)_\infty$ مختلف شامل ۰/۴، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۸ که در مجموع ۲۸ آزمایش می‌شود، انجام شده است. لازم به ذکر است که استفاده از نسبت دمش‌های بالاتر از یک، غالباً با هدف اختلاط جریان صورت می‌گیرد که با هدف اصلی خنک‌کاری لایه‌ای در تضاد است. از طرف دیگر، افزایش نسبت دمش باعث افزایش مصرف جریان خنک‌کننده گرفته شده از کمپرسور می‌شود که خود می‌تواند اثرات منفی در پی داشته باشد. لذا در تحقیقات خنک‌کاری لایه‌ای، نسبت‌های دمش کمتر از یک مورد علاقه و توجه می‌باشد. در ادامه، ضمن ارائه خلاصه‌ای از صحت‌سنجی نتایج، اثرات پارامترهای هندسی زائده‌های طولی (طرح‌های مختلف) بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای بررسی شده است. سپس، نتایج طرح دارای بالاترین اثربخشی با نتایج طرح بدون زائده در نسبت دمش‌های مختلف مقایسه و ارزیابی شده است.

۳- ۱- صحت‌سنجی نتایج و اثرات پارامترهای هندسی زائده‌های طولی

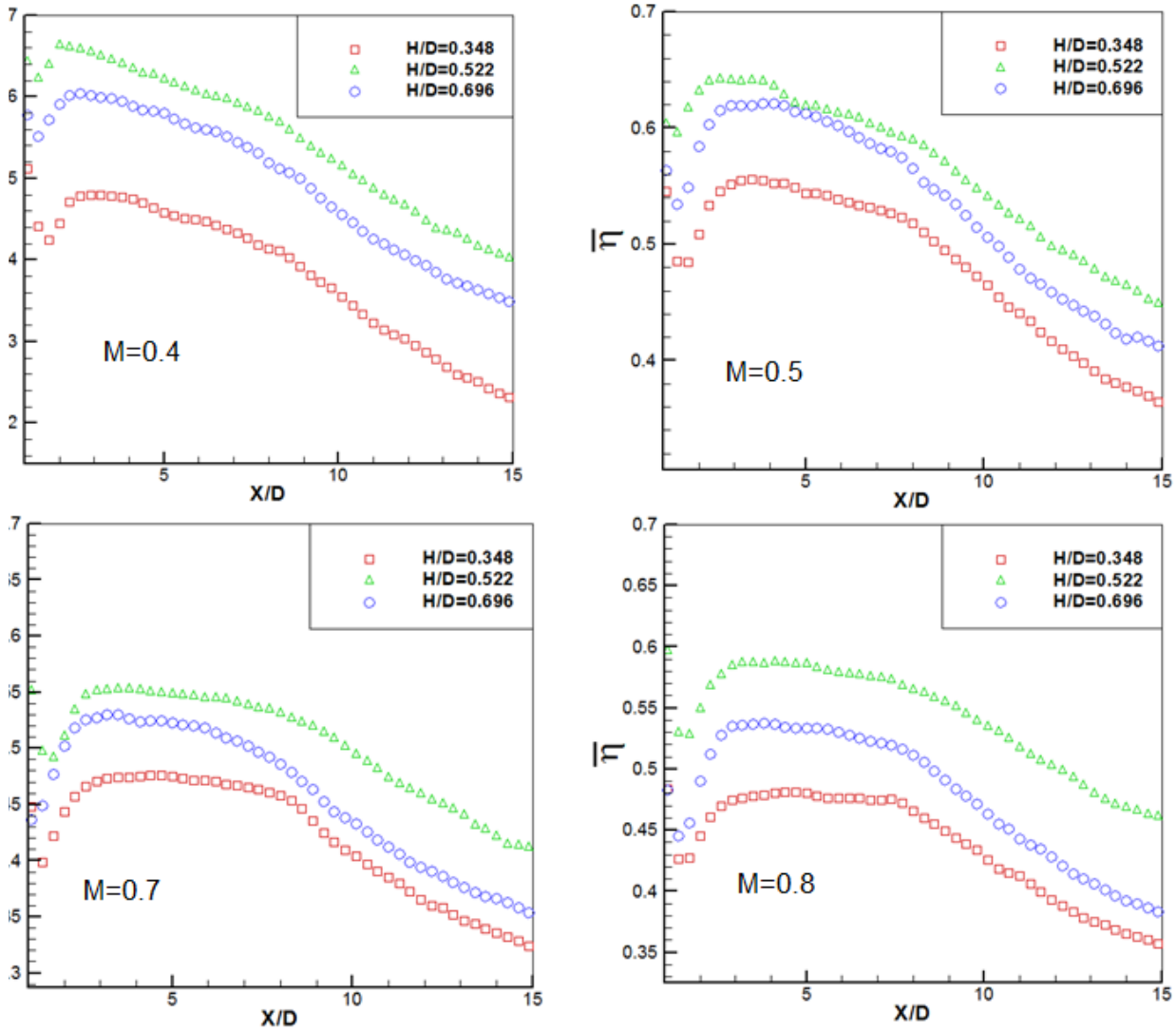
به منظور صحت‌سنجی نتایج تحقیق، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری‌شده جانبی حاصل از آزمایش روزنه‌های استوانه‌ای با نتایج تحقیقات مشابه قبلی مقایسه شده است. از آن‌جا که شرایط آزمایش و زاویه‌ی تزریق جت‌ها در تحقیقات مختلف دقیقاً یکسان نمی‌باشد، چند تحقیق مشابه برای مقایسه انتخاب شده است. شکل۴، مقایسه‌ی توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری‌شده‌ی جانبی را برای موارد آزمایشی نسبتاً مشابه نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای بی‌دررو اندازه‌گیری شده برای روزنه‌های استوانه‌ای است. جهت صحت‌سنجی اندازه‌گیری‌های مادون قرمز برای تحقیقات خنک‌کاری لایه‌ای تیغه توربین، داده‌های اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای تحقیق حاضر با تحقیقات قبلی دارای شرایط آزمایش مشابه و یا قابل قیاس، مقایسه شده‌اند. با توجه به این که شرایط آزمایش و هندسه روزنه‌ها مشابه است، شکل۳-۱، مقایسه‌ی توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده‌ی جانبی را برای موارد آزمایشی با نسبت دمش ۵/۰، نسبت چگالی ۹۷/۰ و نسبت گام ۳ را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای بی‌دررو اندازه‌گیری شده برای روزنه‌های استوانه‌ای است[۲۹].

نتایج اندازه‌گیری شده با استفاده از روش مادون قرمز(یعنی داده‌های تحقیق حاضر و هانگل و همکاران [۳۰])، در فاصله $1 < X / D < 13$ تطابق خوبی را نشان می‌دهد. تفاوت کوچک مشاهده شده بین داده‌های مربوطه، ممکن است در اثر اختلاف نسبت چگالی و شدت آشفتگی باشد.

توجه شود که نتایج حاصل از آزمایش‌های مادون قرمز لاوسون و تول [۳۱]، مقادیر اثربخشی خیلی بالاتری در مقایسه با تحقیق حاضر است که در شدت آشفتگی جریان اصلی بالای ۱۲/۳ درصد، نسبت چگالی کمی بالاتر و نسبت سرعت کمی پایین‌تر انجام شده است. شرایط آزمایش کُنز و همکاران [۳۲]، جانسون و همکاران [۳۳] و ان و همکاران [۲۸] شبیه پژوهش حاضر است که میزان اثربخشی کم‌تری در مقایسه با لاوسون و تول دارند. اما در اثر نسبت چگالی و شدت آشفتگی متفاوت، دارای اثربخشی خنک‌کاری بالاتری در مقایسه با پژوهش حاضر هستند. مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌ها با نتایج سینها و همکاران [۳۴]، اختلافات آشکاری را نشان می‌دهد که ناشی از بالاتر بودن نسبت دمش (۰/۵۷)، نسبت چگالی بالاتر (۱/۶)، شدت آشفتگی بسیار کم‌تر و همچنین نسبت طول به قطر کانال جت کمتر ($L / D = ۱/۷۵$) است. همچنین، مقایسه با نتایج رالابندی و همکاران [۲۴]، اختلافاتی را نشان می‌دهد که در اثر نسبت سرعت بیش‌تر و شدت آشفتگی کم‌تر می‌باشد. پژوهش‌های مذکور با استفاده از روش‌های رنگ حساس به فشار[1]، دمانگاری مادون قرمز[2] و ترموکوپل استخراج شده است [۲۹]. مقایسه‌ی انجام شده، تطابق قابل قبولی را نشان داده است که بیانگر صحت روش انجام آزمایش و دقت نتایج می‌باشد.

از آن جایی که سطوح گسترش‌یافته می‌توانند انتقال‌حرارت را افزایش دهند و این امر در سمت گاز داغ نامطلوب است، زائده‌ها را می‌توان با پوشش سد حرارتی[3] با استفاده از پوشش سرامیکی که دارای هدایت حرارتی بسیار کمی است، پوشش داد [۴]. به علاوه، جهت انتقال‌حرارت یکنواخت روی دیواره‌ی آزمون و اندازه‌گیری دقیق اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در تحقیق حاضر، زائده‌های طولی از جنس صفحه‌ی آزمون (آکریلیک به رنگ مشکی) در نظر گرفته شده است. در بین سه پارامتر مورد بررسی، ارتفاع زائده نقش مهمی را در افزایش اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای ایفا می‌کند. شکل ۵، توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده‌ی جانبی (متوسط‌گیری شده در Z/D بین ۱/۵- الی ۱/۵)را برای تغییرات H/D و در نسبت دمش‌های مختلف نشان می‌دهد. در این شکل، میانگین جانبی اثربخشی بر حسب فاصله طولی از مرکز روزنه‌ی خنک‌کاری نشان داده شده است. نتایج در فاصله D تا $۱۵D$ از مرکز روزنه‌ها برای همه هندسه‌های مذکور، ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمام نسبت دمش‌ها، نسبت ارتفاع به قطر $H / D = ۰/۵۲۲$ دارای بیش‌ترین مقدار اثربخشی خنک‌کاری

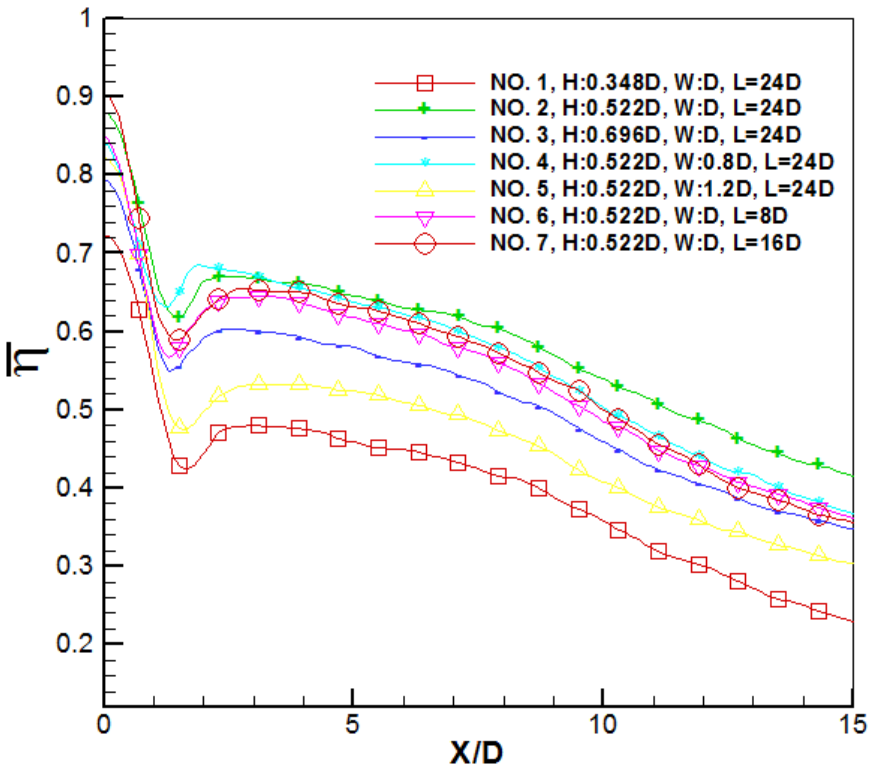
1 Pressure Sensitive Paint (PSP) Technique
2 InfraRed (IR) Imaging Technique
3 Thermal-Barrier Coating (TBC)



شکل ۵: توزیع اثربخشی خنک‌کاری متوسط‌گیری‌شده‌ی جانبی در نسبت ارتفاع به قطرهای مختلف زائده برای نسبت دمش‌های مختلف

Fig. 5. Distribution of the laterally averaged cooling effectiveness at different ratios of tab height to diameters considering various blowing ratios

متوسط‌گیری شده‌ی جانبی می‌باشد. به عبارت دیگر، ارتفاع بهینه‌ی زائده‌ی مربوط طرح شماره‌ی ۲ است که دارای ارتفاع معادل ۳ میلی‌متر می‌باشد. اگر نسبت ارتفاع به قطر زائده بیش‌تر از ۰/۵۲۲ باشد، اثربخشی کاهش می‌یابد. در همه نسبت دمش‌های مورد بررسی، مقدار اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده‌ی جانبی برای نسبت ارتفاع به قطر $H/D=۰/۳۴۸$ کمینه است. یعنی با به‌کار بردن طرح شماره‌ی ۱، زائده کم‌ترین نقش را در کنترل جریان خنک‌کننده دارد. اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای زائده دارای ارتفاع $۰/۵۲۲D$ در حدود ۶۰٪ بالاتر از زائده دارای ارتفاع $۰/۳۴۸D$ در نسبت دمش ۰/۴ است. با این حال، در نسبت دمش ۰/۷، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای زائده‌ی دارای ارتفاع $۰/۵۲۲D$ حدود ۲۳/۸٪ بالاتر از زائده‌های دارای ارتفاع $۰/۳۴۸D$ است. بنابراین، تفاوت ۳۶/۲ درصدی در میزان اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای بین دو نسبت دمش مشاهده می‌شود. تضعیف و اضمحلال بیش‌تر گردابه‌های خلاف هم در طرح ۲ نسبت به طرح‌های ۱ و ۳، سبب توزیع بهتر جت خنک‌کننده در هر دو جهت محوری و جانبی خواهد شد. هندسه طرح ۲، در ناحیه پایین‌دست مجاور و دور از روزنه و در نسبت دمش‌های ۰/۴، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۸، اثربخشی خنک‌کاری برتری در مقایسه با دیگر زائده‌های در نظر گرفته شده دارد. نتایج مربوط به بررسی طول و فاصله دو زائده مجاور نشان می‌دهد که فاصله‌ی بهینه‌ی $W=۱D$ و طول زائده‌ی بهینه $L=۲۴D$ است. در نسبت دمش ۰/۵ اثربخشی خنک‌کاری متوسط‌گیری شده‌ی جانبی عرض بهینه نسبت



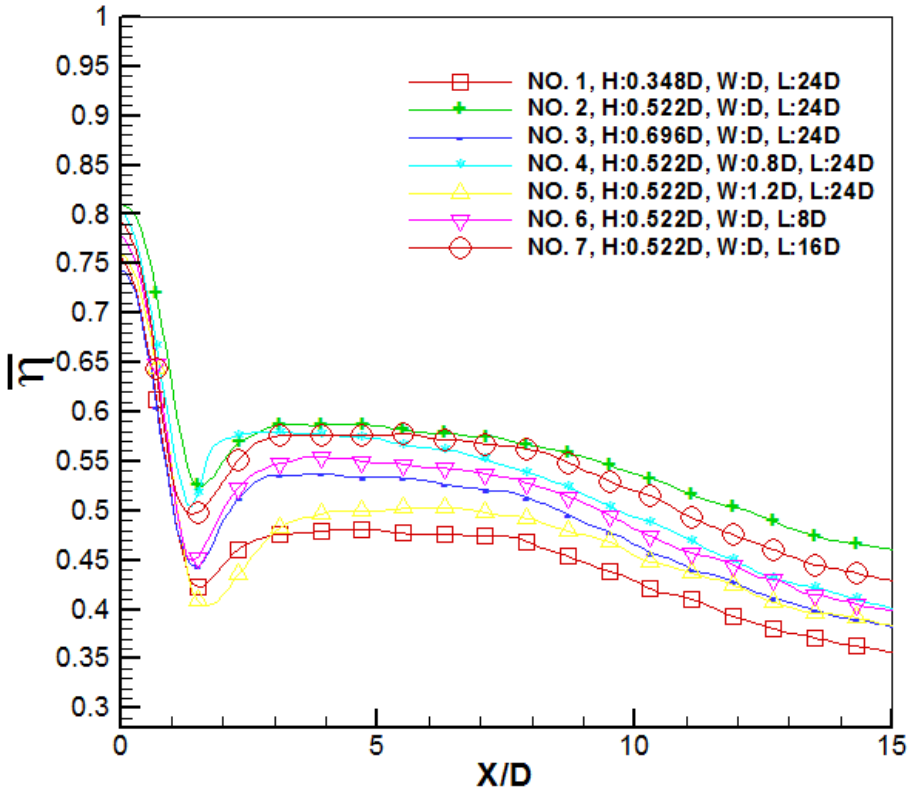
شکل ۶: اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری‌شده‌ی جانبی برای طرح‌های مختلف زائده‌های طولی در نسبت دمش ۰/۴

Fig. 6. The laterally averaged film cooling effectiveness for different designs of longitudinal tabs at the blowing ratio of 0.4

به طرح‌های ۴ و۵ دارای بیش‌ترین اختلاف است. اما در نسبت دمش ۰/۷ دارای اختلاف کمینه‌ای است. همچنین، اثربخشی فاصله‌ی $W = ۰/۸D$ بیش‌تر از فاصله‌ی $W = ۱/۲D$ است. نتایج برای چهار نسبت دمش یاد شده در سه طول زائده‌ی بررسی شده نشان می‌دهد که با افزایش طول زائده، اثربخشی نیز افزایش خواهد یافت.

شکل ۶، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده‌ی جانبی در نسبت دمش ۰/۴ را برای هفت طرح بررسی‌شده در تحقیق حاضر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، طرح شماره‌ی ۱ کم‌ترین اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای را در بین هفت طرح در فاصله‌ی پایین‌دست روزنه خروجی جت‌ها حاصل نموده است. در بین هفت طرح مذکور، طرح شماره‌ی ۲ بهترین اثربخشی را ایجاد کرده است. تنها تفاوت هندسی بین طرح‌های ۱، ۲ و ۳، ارتفاع زائده است که با مقایسه‌ی نتایج، ارتفاع بهینه‌ی زائده برابر با $۰/۵۲۲D$ می‌باشد. تفاوت بین طرح‌های ۲، ۴ و ۵، فاصله‌ی بین زائده است. طرح شماره‌ی ۴ که دارای فاصله‌ی زائده‌ی $۰/۸D$ است، در فاصله نزدیک به خروجی روزنه، بیش‌ترین بازده را در بین هفت طرح دارد. اما با در نظر گرفتن کل فاصله پایین‌دست جت، طرح شماره‌ی ۲ دارای بیش‌ترین مقدار متوسط اثربخشی است. تفاوت هندسی بین طرح‌های ۲، ۶ و۷ طول زائده است که با افزایش طول زائده، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای نیز افزایش می‌یابد.

شکل۷، مقایسه‌ی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده‌ی جانبی در نسبت دمش ۰/۸ را برای هفت طرح بررسی‌شده در تحقیق حاضر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مذکور قابل مشاهده است، در این نسبت دمش، طرح‌های ۲ و ۱ به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده‌ی جانبی را ایجاد می‌نمایند. بعد از طرح ۲، طرح ۷ اثربخشی بیشینه‌ای را ایجاد کرده است. با توجه به نمودارهای مربوط به دو نسبت دمش ۰/۴ و ۰/۸، طرح ۲ بهینه است. لازم به ذکر است که در نسبت دمش‌های ۰/۵ و ۰/۷ نیز نتایج بررسی شده که حاکی از برتری طرح ۲ در مقایسه با دیگر طرح‌های مذکور است. همان‌طور که قبلاً در جدول ۱ ذکر شد، تنها تفاوت در طرح‌های ۲، ۴ و ۵ عرض بین دو زائده‌ی مجاور است. در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که عرض بین دو زائده تأثیر قابل



شکل ۷: اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری‌شده‌ی جانبی برای طرح‌های مختلف زائده‌های طولی در نسبت دمش ۰/۸

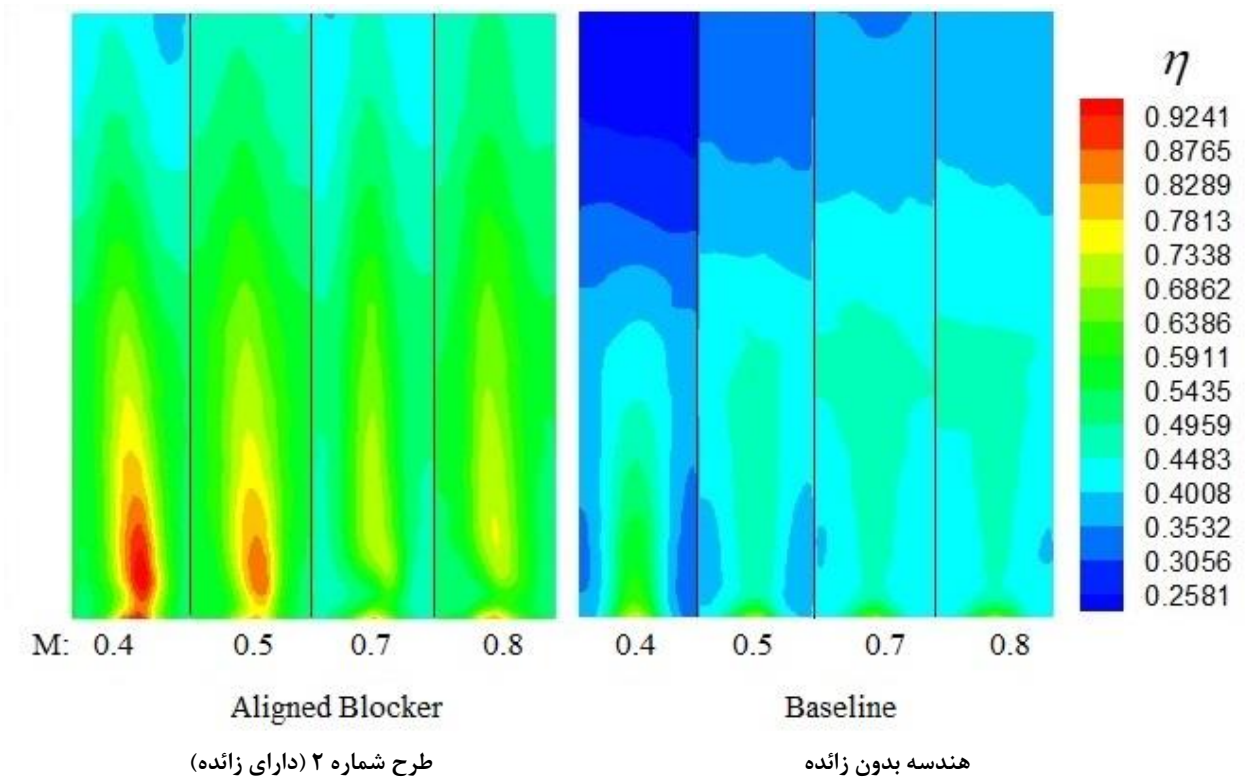
Fig. 7. The laterally averaged film cooling effectiveness for different designs of longitudinal tabs at the blowing ratio of 0.8

توجهی بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای دارد. ارزیابی بیش‌تر داده‌های حاضر نشان می‌دهد که مقدار بهینه‌ای در عرض بین زائده‌ها وجود دارد که در بررسی حاضر این فاصله معادل قطر جت (D) می‌باشد. مطالعات مقایسه‌ای روی طرح‌های ۶، ۷ و ۲ اثرات طول زائده را بر عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای نشان می‌دهد. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که طول زائده‌ی $24D$ دارای بالاترین میزان اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای برای هر دو نسبت دمش ۰/۴ و ۰/۸ است.

به‌طور متوسط، اختلاف بین بهترین و بدترین اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده‌ی جانبی برای طرح‌های مختلف زائده‌ها در تمام نسبت دمش‌ها ٪۳۳/۷ است. علاوه بر این، مشاهده شده که ارتفاع زائده پارامتر مهمی در مطالعه حاضر است. همان‌طور که در شکل‌های مذکور نشان داده شده، در توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده‌ی جانبی، طرح شماره‌ی ۱ با کم‌ترین ارتفاع زائده دارای کم‌ترین مقدار اثربخشی در بین تمام طرح‌های مورد آزمایش است. همچنین، طرح شماره‌ی ۳ با بالاترین ارتفاع، پس از طرح‌های ۱و ۵ دارای بدترین عملکرد در میان تمام طرح‌های آزمایش‌شده است. به علاوه، هندسه‌ی طرح ۴ نسبت به دیگر هندسه‌های پیشنهادی، با فاصله گرفتن از روزنه جت، با شیب بیش‌تری دچار کاهش اثربخشی می‌شود.

۳- ۲- مقایسه‌ی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای حالت‌های دارای زائده و بدون زائده

عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای زائده‌های کنترل‌کننده‌ی جریان، با اندازه‌گیری حرارتی روی صفحه‌ای تخت که ردیفی از هفت جت روی آن تزریق می‌شود، بررسی شده است. بر اساس نتایج طرح‌های مختلف زائده مطالعه‌شده در قسمت قبل، هندسه‌ی طرح شماره‌ی ۲ که بهترین عملکرد اثربخشی را داشته، برای مقایسه با حالت بدون زائده انتخاب شده است. بدین منظور، توزیع دما و اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در هر چهار نسبت دمش مورد نظر، برای دو حالت دارای زائده و بدون زائده با یکدیگر مقایسه شده است.



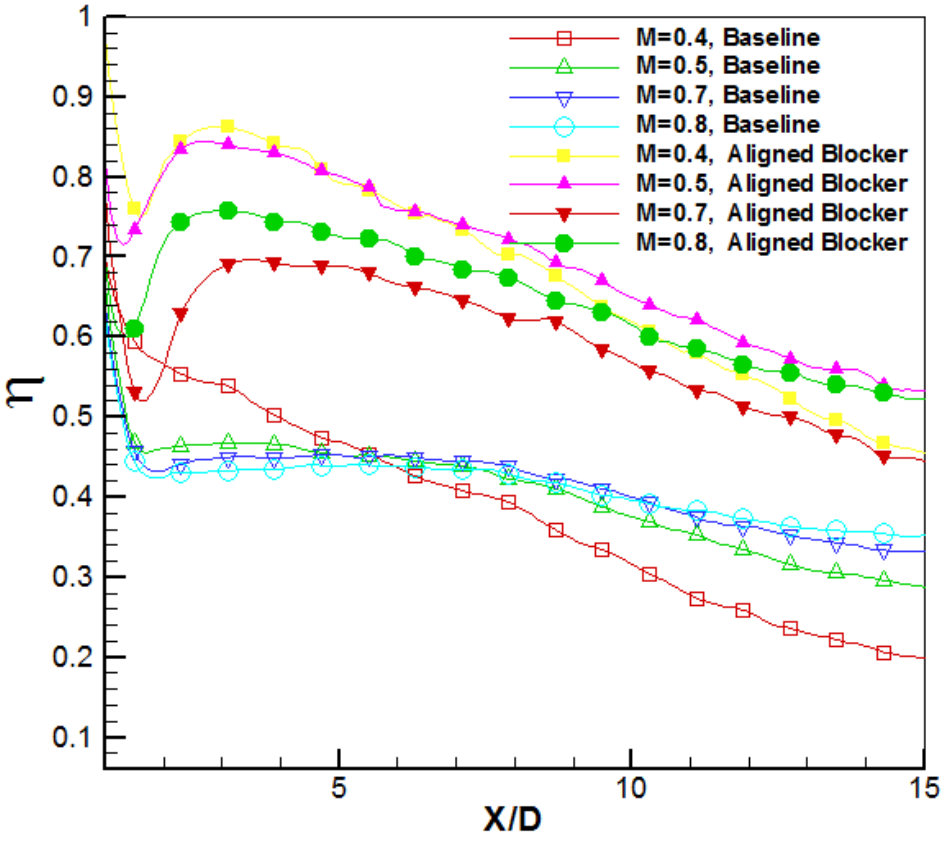
طرح شماره ۲ (دارای زائده) **هندسه بدون زائده**

شکل ۸: توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای روی دیواره بی‌دررو با استفاده از دمانگاری مادون قرمز برای روزنه‌های بدون زائده و طرح شماره‌ی ۲ در نسبت دمش‌های مختلف

Fig. 8. Distribution of the film cooling Effectiveness on adiabatic wall using the infrared thermography for non-tab holes and design 2 in different blowing ratios

در شکل۸، خطوط هم‌تراز اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای موضعی در چهار نسبت دمش مختلف برای دو حالت دارای زائده و بدون زائده نشان داده شده است. در این شکل، اثرات نسبت دمش بر توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای طرح شماره‌ی ۲ و روزنه‌های بدون زائده نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در پایین‌دست روزنه‌ی جت‌ها در هندسه بدون زائده، ابتدا جریان جت به سطح می‌چسبد ولی با فاصله گرفتن از روزنه‌ها، جریان جت تقریباً از روی سطح جدا شده و اثر آن تضعیف می‌گردد. بنابراین، در ناحیه‌ی پایین‌دست مجاور به خروجی جت، بیش‌ترین اثربخشی حاصل شده است. در همه نسبت دمش‌ها، تفاوت عملکرد روزنه‌های بدون زائده و طرح۲ کاملاً مشهود است. به‌عبارت دیگر، در هر چهار نسبت دمش بررسی‌شده (۰/۴، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۸)، برای روزنه‌های بدون زائده، اثر جت روی سطح در پایین‌دست دور از جت تقریباً از بین می‌رود. اما در هندسه دارای زائده‌ی طولی، هم‌چنان اثر خنک‌کنندگی جت باقی است و فاصله‌ی اثرگذاری بالاتری دارد. یعنی در طرح جدید، با فاصله گرفتن جت خنک‌کننده در پایین‌دست روزنه، اثربخشی جت دچار کاهش کم‌تری شده است. بنابراین، طرح دارای زائده‌های طولی، توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای جت خنک‌کننده بهتری را نشان می‌دهد.

برای مطالعه بیش‌تر اثرات زائده‌های طولی کنترل‌کننده‌ی جریان بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای، اثربخشی مرکزی ($Z/D=۰$) و متوسط‌گیری شده‌ی جانبی در چهار نسبت دمش به‌ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ ترسیم شده است. اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای مرکزی با زائده‌های طولی کنترل‌کننده‌ی جریان در تمام نسبت دمش‌های آزمایش‌شده افزایش یافته است. این افزایش، تقریباً از X/D برابر با ۱ و به سمت پایین‌دست جریان کاملاً آشکار است $X/D=۱$، نشان‌دهنده‌ی لبه‌ی حمله زائده‌های ردیف‌کننده‌ی جریان است. شکل۹، توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای مرکزی مربوط به طرح ۲ و حالت بدون زائده‌ی طولی را در نسبت دمش‌های مختلف مقایسه می‌کند. همان طورکه مشاهده می‌شود، برای حالت دارای زائده‌های طولی، نسبت دمش بهینه ۰/۵ است. به علاوه، در



شکل ۹: توزیع اثربخشی مرکزی ($Z/D=0$) در نسبت دمش‌های مختلف برای طرح شماره‌ی ۲ و حالت بدون زائده

Fig. 9. Central effectiveness distribution (Z/D = 0) at varios blowing ratios for design 2 and non-tab mode

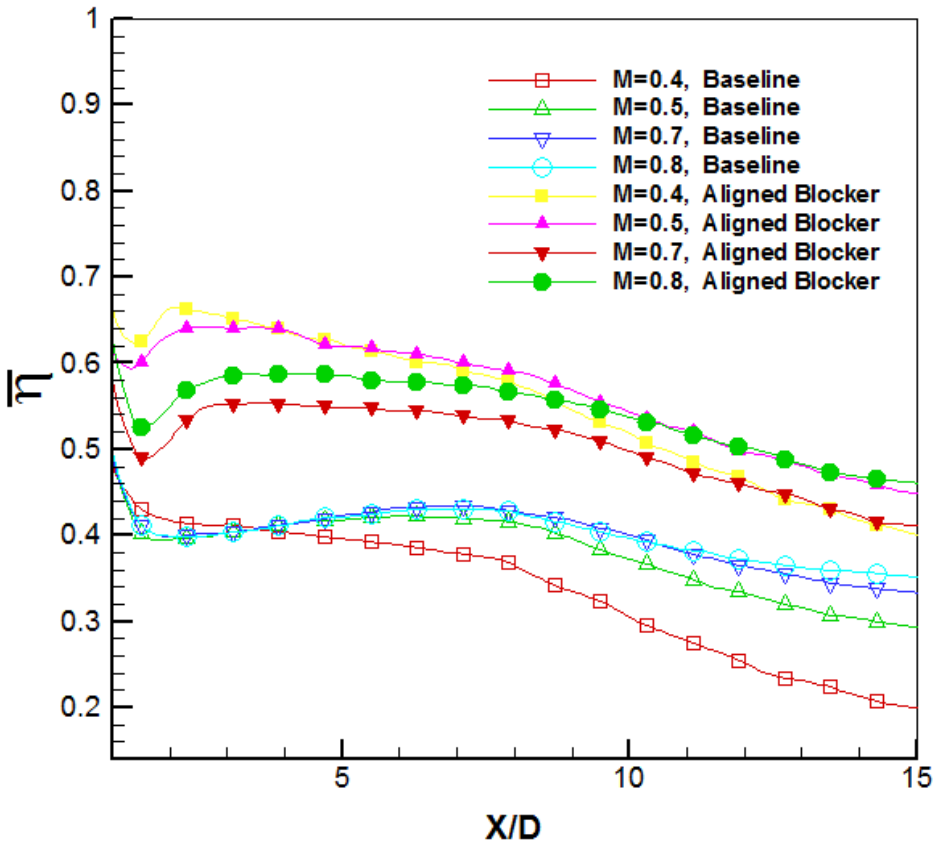
نسبت دمش۰/۷، اثربخشی خنک‌کاری کمینه‌ای حاصل شده است. در تمام نسبت دمش‌ها، طرح دارای زائده‌های طولی برتری قابل مقایسه‌ای نسبت به طرح بدون زائده دارد. به علاوه، در نسبت دمش ۰/۴ برای طرح جدید و همچنین حالت بدون زائده، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای مرکزی به طور غیریکنواخت کاهش می‌یابد. اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای مرکزی طرح شماره ۲ در مقایسه با حالت بدون زائده ۲۷٪ الی ۸۳٪ افزایش داشته است. بیش‌ترین تغییرات مربوط به نسبت دمش ۰/۴ و کم‌ترین تغییرات اثربخشی مربوط به نسبت دمش ۰/۷ می‌باشد.

شکل ۱۰، مقایسه‌ی توزیع اثربخشی خنک‌کاری متوسط‌گیری شده‌ی جانبی برای طرح شماره‌ی ۲ و حالت بدون زائده را نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است، با به‌کارگیری زائده‌های طولی در بالادست روزنه، نسبت دمش بهینه از ۰/۷ به ۰/۵ کاهش می‌یابد. یعنی با به‌کاربردن سیال خنک‌کننده کم‌تر، اثربخشی بالاتری حاصل می‌گردد. برای هندسه‌ی روزنه‌ی خنک‌کاری لایه‌ای دارای زائده‌های طولی، بعد از نسبت دمش ۰/۵، در نسبت دمش ۰/۸ اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده‌ی جانبی بیشینه‌ای حاصل شده است. بوضوح دیده می‌شود که در همه نسبت دمش‌ها، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری‌شده جانبی افزایش قابل توجهی داشته است. به‌طور کلی، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری‌شده جانبی از ۲۲٪ الی ۷۳/۸٪ درصد افزایش داشته است. لازم به ذکر است که در $X/D=15$، کم‌ترین افزایش اثربخشی مربوط به نسبت دمش۰/۷ و به‌مقدار ۲۴٪ است. همچنین در مکان مذکور، بیش‌ترین تغییرات اثربخشی در نسبت دمش۰/۴، به میزان ۱۰۵٪ است. بنابراین، در پایین‌دست دور از خروجی جت نیز اثربخشی افزایش می‌یابد. به علاوه، با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ دیده می‌شود که اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای مرکزی و متوسط‌گیری‌شده جانبی کمینه‌ای در نسبت دمش۰/۷ ایجاد شده است. نکته قابل توجه این است که در نسبت دمش۰/۷ برای هندسه‌ی زائده‌دار، در مقایسه با حالت بدون زائده در تمام نسبت دمش‌ها، مقادیر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای بالاتر است. همچنین، در هر چهار نسبت دمش

Table 3. Area averaged cooling effectiveness for all cases

جدول ۳: اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده‌ی کل ناحیه برای تمام آزمایش‌های انجام شده

	مرکزی	طرح ۱	طرح ۲	طرح ۳	طرح ۴	طرح ۵	طرح ۶	طرح ۷
$M=۰/۴$	۰/۳۵۲۶	۰/۴۰۴۵	۰/۵۶۸۰	۰/۵۱۳۱	۰/۵۶۴۲	۰/۴۶۳۹	۰/۵۴۴۰	۰/۵۵۴۶
$M=۰/۵$	۰/۳۹۵۹	۰/۴۹۹۴	۰/۵۷۸۰	۰/۵۴۹۰	۰/۵۳	۰/۴۴۷۴	۰/۵۳۹۸	۰/۵۴۴۶
$M=۰/۷$	۰/۴۱۳۷	۰/۴۳۶۱	۰/۵۱۸۶	۰/۴۶۹۶	۰/۴۷۷۵	۰/۴۹۹۵	۰/۴۵۹۱	۰/۵۱۲۸
$M=۰/۸$	۰/۴۱۵۵	۰/۴۵۲۹	۰/۵۵۷۲	۰/۴۹۰۸	۰/۵۲۶۸	۰/۴۷۲۴	۰/۵۰۷۶	۰/۵۳۷۱

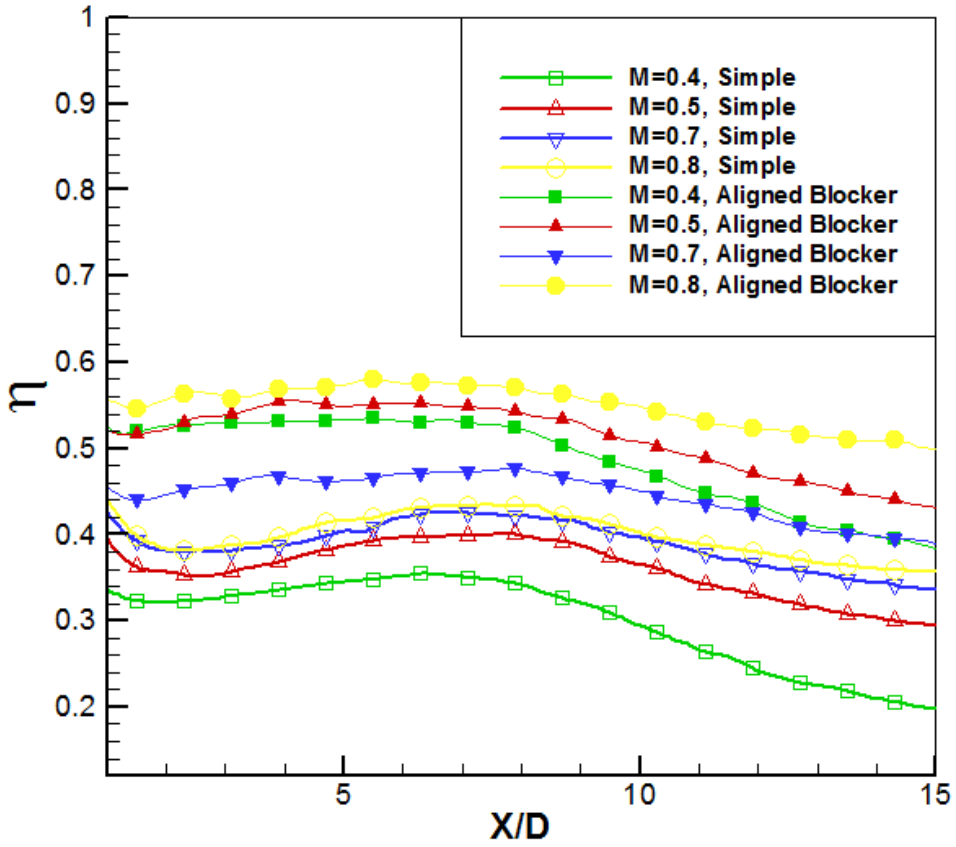


شکل ۱۰: توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری‌شده‌ی جانبی در نسبت دمش‌های مختلف برای طرح شماره‌ی ۲ و حالت بدون زائده

Fig. 10. Distribution of laterally averaged film cooling effectiveness at various blowing ratios for design 2 and non-tab mode

یاد شده، طرح ۲ در فاصله $۱<X/D<۱۵$ بیش‌ترین مقدار اثربخشی را به نمایش می‌گذارد.

یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های مربوط به طرح خنک‌کاری لایه‌ای، پوشش یا توزیع جانبی جت خنک‌کننده در ناحیه‌ی بین روزنه‌ای پایین‌دست جریان جت‌ها می‌باشد. این ناحیه، شامل ناحیه‌ی پایین‌دست جت‌ها با Z/D بین ۰/۵ الی ۱/۵ می‌باشد. لازم به ذکر است که جت‌ها در Z/D بین ۰/۵- الی

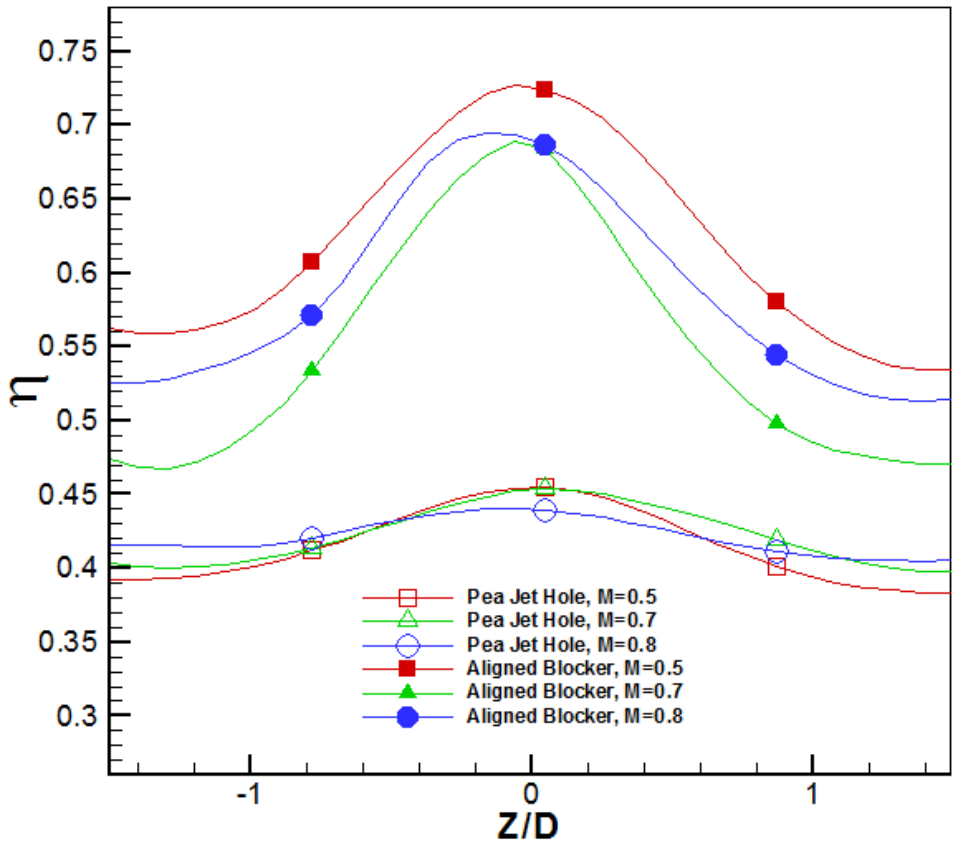


شکل ۱۱: توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری‌شده‌ی جانبی بین روزنه‌ای در نسبت دمش‌های مختلف برای حالت‌های دارای زائده و بدون زائده

Fig. 11. Streamwise distribution of the inter-hole spanwise averaged film cooling effectiveness at various blowing ratios for for cases with tabs and without tabs

۰/۵ تزریق می‌شوند. در واقع، ناحیه‌ی بین روزنه‌ای مکانی است که بین دو جت واقع شده و مستقیماً تزریق جریانی در بالادست آن انجام نمی‌شود. در شکل ۱۱، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری‌شده‌ی جانبی بین روزنه‌ای مربوط به هندسه جدید زائده‌دار و حالت بدون زائده نشان داده شده است. در این حالت نیز همانند آنچه که در شکل ۱۰ مشاهده شد، حضور زائده‌ها باعث افزایش اثربخشی لایه‌ای می‌شود. با این حال، میزان افزایش اثربخشی متوسط‌گیری شده‌ی جانبی بین روزنه‌ای کم‌تر از مقدار متوسط‌گیری‌شده‌ی جانبی (Z/D بین ۱/۵- الی ۱/۵) است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در تمام نسبت دمش‌ها، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده‌ی بین‌روزنه‌ای مربوط به هندسه زائده‌دار بیش‌تر از هندسه بدون زائده است. به عبارت دیگر، مزیت مهم دیگری که استفاده از زائده دارد این است که با به‌کار بردن زائده‌های طولی در پایین‌دست روزنه جت‌ها، توزیع جت خنک‌کننده در هر دو راستای محوری و جانبی افزایش یافته است. بدین ترتیب، جت خنک‌کننده توانسته است سطح بین روزنه‌ها را بهتر پوشش دهد. اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری شده‌ی بین روزنه‌ای ۱۵/۴٪ الی ۷۷/۲۵٪ افزایش داشته است. همچنین، در هر چهار نسبت دمش بررسی‌شده، زائده‌های ردیف‌کننده‌ی جریان در فاصله‌ی $1<X/D<15$ باعث اثربخشی بین روزنه‌ای بیش‌تری شده‌اند. البته در نسبت دمش ۰/۷، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای مربوط به هندسه‌ی دارای زائده، کم‌ترین تغییرات را در مقایسه با حالت بدون زائده داشته است.

شکل ۱۲، توزیع اثربخشی خنک‌کاری برای دو هندسه زائده‌دار و بدون زائده را در $X/D=5$ در سه نسبت دمش ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۸ بر حسب Z/D نشان می‌دهد. کاملاً آشکار است که در سه نسبت دمش مذکور، هندسه دارای زائده‌های طولی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای جانبی بیش‌تری در مقایسه با هندسه‌ی بدون زائده دارد. هنگامی‌که از روزنه‌ی دارای زائده‌های طولی استفاده می‌شود، نفوذ سیال خنک‌کننده در جهت جانبی بهتر صورت می‌گیرد. به علاوه، در شکل مذکور مشاهده است که طرح دارای زائده‌های طولی، توزیع بهتر جریان جت را روی سطح فراهم می‌کند.

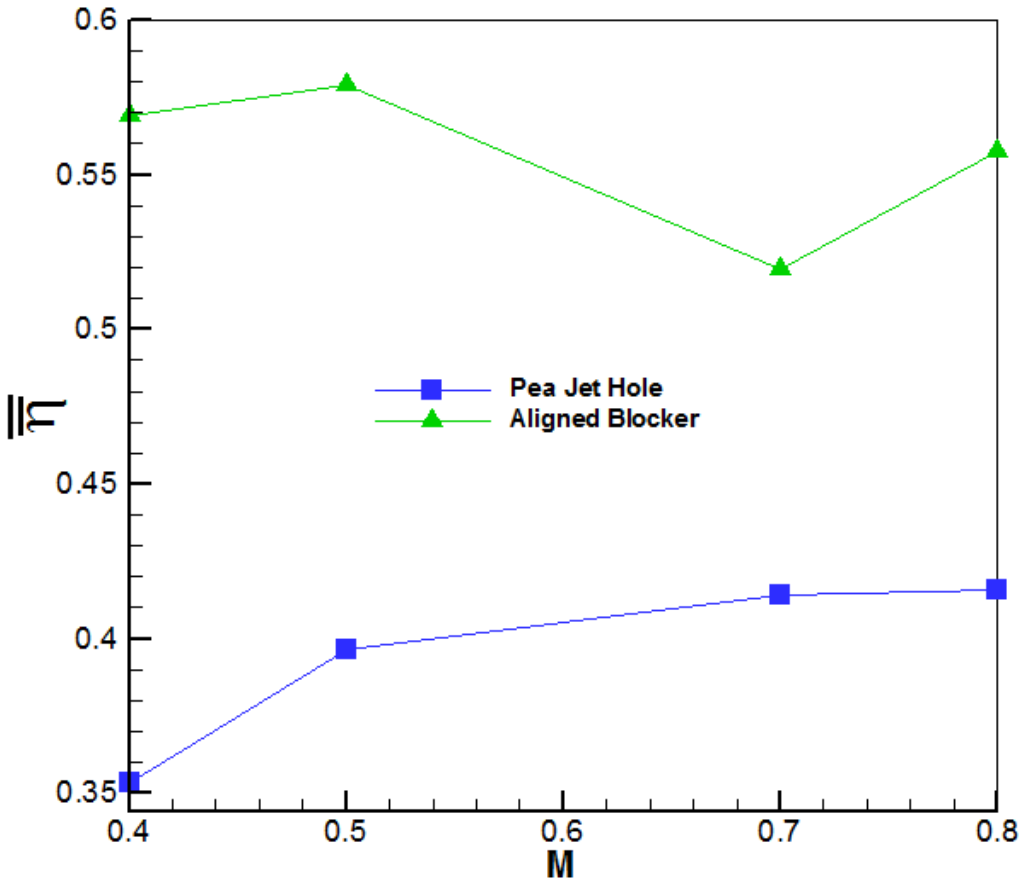


شکل ۱۲: توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای جانبی در $X/D=5$

Fig. 12. Lateral cooling effectiveness distribution in X/D = 5

بنابراین، اثربخشی خنک‌کاری جانبی در پایین‌دست جت افزایش می‌یابد. برای هندسه دارای زائده در نسبت دمش ۰/۵، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای جانبی بیشینه است و در نسبت دمش ۰/۷، مقدار کمینه‌ای دارد. لازم به ذکر است که در هر سه نسبت دمش مورد بررسی، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای مربوط به هندسه‌ی دارای زائده بیش‌تر از حالت بدون زائده آن است. همان طور که شکل مذکور مشاهده می‌شود، در هر دو هندسه مذکور، کم‌ترین اثربخشی جانبی در نسبت دمش ۰/۷ حاصل شده است. همچنین، در نسبت دمش ۰/۵، بیش‌ترین اثربخشی خنک‌کاری جانبی به دست آمده است. با به کار بردن هندسه‌ی جدید زائده‌های طولی مقدار سیال خنک‌کننده بیش‌تری روی سطح آزمون نگه داشته می‌شود و عملاً جدایش جت کم‌تر رخ می‌دهد. در هندسه‌ی ساده‌ی استوانه‌ای، با کاهش نسبت دمش پوشش سیال خنک‌کننده در ناحیه میانی کاهش می‌یابد و کافی نیست. در هندسه‌ی زائده‌های مستطیلی‌شکل هدایت‌کننده‌ی جریان، برای مرکز و ناحیه میانی دو جت مجاور اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای جانبی در نسبت دمش ۰/۵بیشینه است.

شکل ۱۳، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری‌شده در کل ناحیه‌ی بالادست جت‌ها (سطح واقع در $0<X/D<15$ و $-1/5<Z/D<1/5$) برای هر دو حالت بدون زائده و دارای زائده‌های طولی را در نسبت دمش‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر چهار نسبت دمش بررسی شده، اثربخشی کل ناحیه برای هندسه‌ی دارای زائده‌های طولی، اختلاف قابل‌توجهی با هندسه‌ی بدون زائده دارد. بیش‌ترین اثربخشی کل ناحیه برای حالت بدون زائده، در نسبت دمش ۰/۷ حاصل می‌شود و برای حالت دارای زائده، در نسبت دمش ۰/۵ رخ می‌دهد. درصد افزایش اثربخشی کل ناحیه در نسبت دمش بهینه مربوط به هر هندسه، حدود ۴۱/۴٪ است. در این شکل به وضوح مشخص است که با استفاده از هندسه‌ی دارای زائده‌ی طولی، در مقایسه با هندسه‌ی بدون زائده، در تمام نسبت دمش‌ها اثربخشی خنک‌کاری بالاتری به دست می‌آید. به عبارت دیگر، در هر چهار نسبت دمش، مزیت استفاده از هندسه‌ی



شکل ۱۳: اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای متوسط‌گیری‌شده کل ناحیه در نسبت دمش‌های مختلف

Fig. 13. Area averaged cooling effectiveness at different blowing ratios

دارای زائده‌های طولی کاملاً مشهود است و زائده‌های ردیف‌کننده‌ی جریان می‌توانند در هندسه‌ی روزنه‌ی نخودی نیز به‌طور قابل توجهی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای را بهبود بخشند. به علاوه، در نسبت دمش ۰/۵ فاصله‌ی بین دو نمودار بیشینه و در نسبت دمش ۰/۷ فاصله‌ی بین دو نمودار کمینه است. این نمودار نشان می‌دهد که در نسبت دمش‌های پایین‌تر، زائده‌های طولی عملکرد بهتری دارند. یعنی با مصرف دبی کم‌تری از هوای کمپرسور، توزیع بهتری از هوای خنک‌کننده در جهت جانبی و محوری ایجاد می‌شود. بنابراین، طرح جدید یادشده، کارآیی بهتری خواهد داشت.

هرچقدر قدرت گردابه‌های خلاف هم‌گرد و ناحیه چرخشی که ایجاد می‌کنند بزرگ‌تر باشد، جت از سطح صفحه بیش‌تر فاصله گرفته و اختلاط جریان جت با جریان هوای داغ افزایش می‌یابد. این افزایش اختلاط باعث کاهش اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای می‌شود [۲۹]. در طرح جدید، جریان جت خنک‌کننده بین دو زائده محدود می‌شود و اجازه افزایش رشد و فاصله گرفتن از سطح آزمون را نخواهد داشت. به عبارت دیگر، چون جت نمی‌تواند خیلی از سطح فاصله بگیرد، در نتیجه از رشد آن جلوگیری شده و اختلاط و نفوذ گاز داغ در داخل جریان اصلی کاهش می‌یابد.

لازم به ذکر است که قبلاً توسط سایر محققین، اثرات استفاده از زائده‌های طولی بر جریان تزریق از جت‌های استوانه‌ای بررسی شده است. ضمناً، مؤثرتر بودن استفاده از جت‌های دارای مقطع نخودی در مقایسه با جت‌های دارای مقطع استوانه‌ای، نیز قبلاً توسط نویسندگان مقاله حاضر اثبات شده است. در تحقیق حاضر، اثرات اعمال زائده‌های طولی بر بهبود اثربخشی جت‌های دارای مقطع نخودی بررسی شده است. بدیهی است که چگونگی اثرات زائده‌ها بر جریان ناشی از سایر هندسه‌های تزریق، باید به طور موردی بررسی گردد. البته، هرچند که از لحاظ مطالعه‌ی فیزیک جریان تشابهات زیادی وجود دارد، ولی تعیین میزان دقیق اثرات بر سایر هندسه ها نیاز به مطالعه دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ایده استفاده از زائده‌های طولی ردیف‌کننده‌ی جریان، به منظور افزایش اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای جت‌های تزریق شده از روزنه‌های نخودی شکل ارائه شده است. تحقیق به صورت تجربی در تونل باد در چهار نسبت دمش انجام شده و اثرات سه پارامتر فاصله بین زائده‌ها، ارتفاع زائده‌ها و طول زائده‌ها در نسبت دمش‌های مذکور بررسی شده است. هفت طرح مختلف از اندازه و چیدمان زائده‌ها مورد مطالعه قرار گرفت که اهم نتایج به دست آمده عبارتند از:

الف) زائده‌های مورد مطالعه در جلوگیری از پخش جریان جت‌ها بسیار مؤثر هستند و می‌توانند با محدود کردن جریان خنک‌کننده‌ی بین زائده‌ها، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای را افزایش دهند. به طوری که در تمام نسبت دمش‌های مورد بررسی، با استفاده از زائده‌های طولی، اثربخشی خنک‌کاری افزایش می‌یابد. ضمناً برای زائده‌های مورد مطالعه، اثربخشی خنک‌کاری بین روزنه‌ای در پایین‌دست دور از جت نیز تقریباً می‌تواند به اندازه‌ای که در نزدیک خروجی جت‌ها است، بالا باشد. یعنی فاصله‌ی اثرگذاری جت روی سطح افزایش می‌یابد.

ب) از بین طرح‌های مختلف مورد بررسی، طرح دوم که زائده‌های طولی بکار رفته در آن دارای ارتفاع، ضخامت و طول به ترتیب $0.522D$ ،D و $24D$ است دارای بیش‌ترین اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای مرکزی و متوسط‌گیری‌شده‌ی جانبی می‌باشد.

ج) از مقایسه نتایج مربوط به طرح دوم با نتایج طرح بدون زائده مشاهده شد که در نسبت دمش ۰/۴، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای مرکزی و میانگین‌گیری شده‌ی جانبی به ترتیب حدود ۸۳ و ۷۳/۸ درصد افزایش می‌یابد.

د) در هر چهار نسبت دمش بررسی شده، اثربخشی متوسط‌گیری شده در کل ناحیه‌ی پایین‌دست جت برای هندسه دارای زائده‌های طولی، اختلاف قابل‌توجهی با هندسه‌ی بدون زائده دارد. بیش‌ترین اثربخشی کل ناحیه برای حالت بدون زائده، در نسبت دمش ۰/۷ حاصل می‌شود و برای حالت دارای زائده، در نسبت دمش ۰/۵ رخ می‌دهد.

منابع

[1] A. M. M. Abdala and F. N. M. Elwekeel, An influence of Novel Upstream Steps on Film Cooling Performance, Heat Mass Transf, 93(2) (2016) 86–96.

[2] M. Suo, Turbine Cooling, Aerothermodynamics of Aircraft Engine Components, AIAA, New York, 1985.

[3] F. Bazdidi-Tehrani and N.Bohlooli and M.Jadidi, Influence of Film Cooling Jet Inlet Boundary Condition on Large Eddy Simulation of Model Turbine Blade Leading Edge, Computational Fluid Dynamics, 15(4) (2015) 214–227.

[4] T.I.-P. Shih, Na and M. Chyu, Preventing Hot Gas Ingestion by Film-Cooling Jets via Flow-Aligned Blockers, ASME Turbo Expo, 3 (2006) 921–929.

[5] M. J. F.Bazdidi-Tehrani,S.M.Mousavi and M.Jadidi, Investigation of Film Cooling on Model Turbine Blade Leading Edge using DES and LES Approaches, Modares Mech. Eng., 15(8) (2015) 260–270.

[6] D. G. Bogard and K. A Thole, Gas Turbine Film Cooling, J. Propulsion and Power, 22(2) (2006) 249–270.

[7] A. M. M. Abdala, N. M. Elwekeel, and D. Huang, Film Cooling Effectiveness and Flow Structures for Novel Upstream Steps, Appl. Therm. Eng, 105(10) (2016) 397-410.

[8] Y. Yu, C. Yen, T. I. Shih, and M. K. Chyu, Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer Coefficient Distributions Around Diffusion Shaped Holes, ASME J. Heat Transf., 124(5) (2002) 820–827.

[9] C. M. Bell, H. Hamakawa, and P. M. Ligrani, Film Cooling From Shaped Holes, ASME J. Heat Transf., 122(2) (2000) 224–232.

[10] S. Gritsch, M., Schulz, A., and Wittig, Adiabatic Wall Effectiveness Measurements of Film-Cooling Holes With Expanded Exits, Journal of Turbomachinary, 120(3) (2008) 549–556.

[11] R. S. Bunker, A Review of Shaped Hole Turbine Film-Cooling Technology, J. Heat Transfer, 127 (2005) 441–453.

[12] R. B. R.J. Goldstein, E.G. Eckert, Effects of Hole Geometry and Density on Three-Dimensional Film

Cooling, Int. J. Heat Mass Transf., 17(5) (1974) 595–607.

[13] H. Nadali Najafabadi, M. Karlsson, E. Utriainen, M. Kinell, and L. Wang, Film-Cooling Performance of Multiple Arrays of Cylindrical and Fan-Shaped Holes, J. Propuls. Power, 31(6) (2015) 1621–1630.

[14] B. Laveau and R. S. Abhari, Influence of Flow Structure on Shaped Hole Film Cooling Performance, ASME Turbo Expo, 4 (2010) 1677–1689.

[15] 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., 18(3) (2018) 302–310.

[16] J. Kim and K. Kim, Film-Cooling Performance of Converged-inlet Hole Shapes, Int. J. Therm. Sci., 124(8) (2018) 196–211.

[17] L. M. Wright and E. L. Martin, Film Cooling Effectiveness Distributions on a Flat Plate With a Double Hole Geometry Using PSP, in: ASME/JSME 2011 8th Thermal Engineering Joint Conferace , 2011.

[18] B. A. Ely, M. J., and Jubran, A Numerical Evaluation on the Effect of Sister Holes on Film Cooling Effectiveness and the Surrounding Flow Field, Heat Mass Transf., 45(11) (2009) 1435–1446.

[19] J. D. Heidmann and S. Ekkad, A Novel Anti-Vortex Turbine Film Cooling Hole Concept, ASME Journal of Turbomachinary, 130(3) (2008) 487-496.

[20] 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., 133(3) (2011) 031202.

[21] 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., 9(1) (2016) 33–42.

[22] S. Na and T. I.-P. Shih, Increasing Adiabatic Film-Cooling Effectiveness by Using an Upstream Ramp, J. Heat Transfer, 129(4) (2007) 464–471.

[23] W. Zhou and H. Hu, A Novel Sand-Dune-Inspired Design for Improved Film Cooling Performance, Int. J. Heat Mass Transf., 110(7) (2017) 908–920.

[24] A. P. Rallabandi, J. Grizzle, and J. Han, Effect of Upstream Step on Flat Plate Film-Cooling Effectiveness Using PSP, J. ASME Turbomach., 133 (2011) 1–8.

[25] G. Barigozzi, G. Franchini, A. Perdichizzi, and S. Ravelli, Effects of Trenched Holes on Film Cooling of a Contoured Endwall Nozzle Vane, ASME J. Turbomach., 134(4) (2012) 041009.

[26] Shuping Chen, Film Cooling Enhancement with Surface Restructure, University of Pittsburgh, 2008.

[27] 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, 7(2) (2018) 33-45.

[28] 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, 135 (2013) 031702.