

## بررسی عددی تاثیر زاویه سوراخ تزریق خنک کننده بر اثربخشی خنک کاری لایه‌ای جریان نوسانی موج مربعی صفحه تخت

سید مهدی حسینی بغدادآبادی، سعادت زیرک\*، مهران رجبی زرگرآبادی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۰۲  
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۷/۰۷  
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۲  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۹/۲۹

### کلمات کلیدی:

خنک کاری لایه‌ای نوسانی  
جریان موج مربعی  
زاویه تزریق  
مدل توربولانسی انتقال تنش برشی  
 $k - \omega$   
فرکانس

**خلاصه:** در این مقاله اثر تغییر زاویه تزریق بر اثربخشی خنک کاری لایه‌ای صفحه تخت با نوسان موج مربعی در فرکانس‌های مختلف بررسی می‌شود. خنک کاری لایه‌ای برای سرد کردن پره‌های توربین و افزایش عمر پره استفاده می‌شود. چهار زاویه تزریق ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه انتخاب شده‌اند. جریان نوسانی در سه فرکانس ۲، ۵۰ و ۵۰۰ هرتز و سیکل کاری ۰/۵ مورد بررسی قرار می‌گیرد. از روش حجم محدود برای حل معادلات جریان استفاده گردید. از مدل انتقال تنش برشی کی-امگا جهت مدل سازی آشفتگی استفاده گردید. نتایج نشان داد زاویه تزریق بین ۲۰ تا ۲۵ درجه در سه فرکانس مورد بررسی بیشترین اثربخشی خنک کاری لایه‌ای خط مرکزی و جانبی را به خصوص در نواحی دور از لبه سوراخ تزریق داشت. فرکانس‌های بالاتر (۵۰۰ هرتز) افزایش اثربخشی خنک کاری لایه‌ای در فواصل ابتدایی پایین دست سوراخ را به دنبال دارد. در فواصل دور دست، فرکانس پایین‌تر (۲ هرتز) بیشترین اثربخشی را داشت. بیشترین تفاوت اثربخشی خط مرکزی در فرکانس ۵۰۰ هرتز و بین زاویه ۲۰ و ۳۵ درجه به دست آمد و برابر ۶۴/۳٪ بود. این مقدار برای اثربخشی جانبی ۹۸/۹٪ بود. نسبت دمش ۰/۵ در مقایسه با نسبت دمش ۰/۷۵ و ۱ در تمامی زوایا و فرکانس‌ها بیشترین اثربخشی را داشت. حداکثر تفاوت مقدار اثربخشی در نسبت دمش ۰/۵ در مقایسه با دو نسبت دمش دیگر برابر ۱۸۷/۴٪ بود.

### ۱- مقدمه

توربین گاز بازی می‌کند [۴]. خنک کاری لایه‌ای تقریباً در همه سطوح خارجی ایرفویل‌هایی که در معرض گازهای احتراق داغ نظیر لبه حمله، نوک پره، بدنه‌های اصلی و انتهای دیواره‌ها قرار دارند، به کار گرفته می‌شود [۱]. در طول دهه‌های گذشته، مطالعات قابل توجهی به منظور درک فیزیک پایه جریان خنک کاری لایه‌ای انجام شده است. مطالعات پیشین نشان داده است خنک کاری لایه‌ای تحت تاثیر عوامل مختلفی نظیر نسبت دمش<sup>۱</sup>، شکل سوراخ، موقعیت و جهت تزریق است [۵]. همچنین خصوصیات جریان اصلی نظیر گرادیان فشار، جریان ثانویه و شدت توربولانس در عملکرد خنک کاری لایه‌ای موثر است [۶]. استفاده از جت‌های نوسانی با هدف خنک کاری لایه‌ای می‌تواند به بهبود اثربخشی منجر شود و بنابراین دمای ورودی به توربین بالاتر را بدون تاثیر بر عمر پره در پی خواهد داشت. بنابراین قیمت موتور با فراهم کردن ظرفیت مشابه کوچک‌تر و موتورهای سبک‌تر، کاهش خواهد یافت. مصرف سوخت کمتر خواهد شد و در

همان‌طور که نیاز به افزایش بازده کلی بالاتر و توان خروجی بیشتر مورد نظر است، سیستم‌های توربین بازی مدرن نیاز به کار در دمای ورودی توربین بالاتر مورد نیاز هستند که در حال حاضر فراتر از سطح قابل قبول مواد است. در نتیجه، طرح‌های خنک کاری موثر بایستی در پره توربین به کار گرفته شود تا آن را از تنش‌های حرارتی حفظ کند [۱]. خنک سازی پره با خالی کردن درون آن و جاری کردن سیال خنک کننده در فضای خالی شده امکان‌پذیر می‌باشد. پره توخالی سبک‌تر از پره توپر بوده و عدد بیو در آن خیلی کوچکتر است و از این رو توزیع دما در آن نسبتاً یکنواخت می‌باشد [۲]. اما دمای ماده تیغه‌های توربین ممکن است از مقدار مجاز تجاوز کند. از این رو سیستم خنک کاری مخصوصی برای سرد کردن پره‌های توربین و افزایش عمرشان استفاده می‌شود [۳]. از سال ۱۹۷۰، استفاده از خنک کاری لایه‌ای نقش بسیار مهمی در توسعه

1 Blowing Ratio

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: s\_zirak@semnan.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 فرمایید.



تراکم ناپذیر و پایدار در نظر گرفته شد و شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از یک شبکه سازمان یافته و غیریکنواخت و مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  رینولدز پایین انجام شد. زاویه تزریق برابر ۳۵ درجه در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد، بهبود کارایی خنک‌کاری لایه‌ای با به کارگیری محرک پلاسما در نسبت دمش‌های پایین‌تر رخ می‌دهد. حسینی و اجارگاه و همکاران [۱۳] مطالعه عددی خنک‌کاری لایه‌ای حول یک پره توربین گاز را با استفاده از رهیافت میانگین‌گیری جزئی از معادلات ناویر استوکس که یکی از موفق‌ترین رهیافت‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بسیار بزرگ در جریان‌های آشفتگی می‌باشد، انجام دادند. نتایج تحلیل آن‌ها نشان داد روش  $k - \omega$  توانایی خوبی در شبیه‌سازی جریان در رینولدزهای بالا دارد.

سینها و همکاران [۱۴] اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای را با استفاده از یک ردیف سوراخ‌های شیب‌دار تحت زاویه ۳۰ درجه که هوای خنک‌شده در عرض یک صفحه تخت آدیاباتیک تزریق می‌شد، مطالعه کردند. با کاهش انتشار جت خنک‌کاری لایه‌ای، نسبت دانسیته کاهش و نسبت شار مومنتوم افزایش و به تبع آن اثربخشی میانگین کاهش یافت. گلدستین<sup>۳</sup> و استون<sup>۴</sup> [۱۵] اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای را برای ردیفی از سوراخ‌ها با تزریق در طول یک دیواره محدب و یک دیواره مقعر در زوایای ۱۵، ۲۵ و ۴۵ درجه با جریان اصلی و در نسبت دانسیته‌های تقریباً برابر با ۱ و ۲ بررسی کردند. آثار زاویه تزریق با نرخ تزریق تغییر می‌کرد: در نسبت‌های دمش کم، زاویه تزریق مهم نبود، در نسبت‌های دمش متوسط، زوایای کمتر اثربخشی بهتری را فراهم می‌کرد و در نسبت‌های دمش بالا، زاویه دمش تندتر اثربخشی بهتری داشت. شرط لایه مرزی محلی، شدت جهش جت و قدرت برهم‌کنش ورتکس<sup>۵</sup> در میان گردابه‌های مقید مجاور جت‌ها ملزومات کلیدی در تفسیر داده‌ها بودند. برای دیواره مقعر، تزریق در زاویه ۱۵ درجه یا کمتر و در نسبت‌های دمش بالا ترجیح داده شد. بر روی دیواره محدب، تزریق در نسبت شار مومنتوم ۰/۲۵، نسبت دانسیته بالا و زاویه تزریق کم بهترین اثربخشی را برای این فاصله‌بندی سوراخ فراهم کرد. لی<sup>۶</sup> و جونگ<sup>۷</sup> [۱۶] آثار نوسانات جریان توده‌ای بر روی خنک‌کاری لایه‌ای با سوراخ‌های زاویه مرکب به صورت تجربی

نتیجه قیمت سوخت پایین‌تر را به دنبال خواهد داشت [۷]. مکانیزم انتقال حرارت جابجایی در جریان‌های تک فاز پایا به طور گسترده بررسی شده است اما دانش کمی درباره چگونگی تاثیر نوسان بر انتقال حرارت، وجود دارد. در بسیاری از کاربردهای صنعتی، جریان متناوب، به دلیل حرکت بخش‌هایی مانند پمپ‌ها، توربین‌ها یا به وسیله ارتعاشات یا نوسانات جریان اتفاق می‌افتد. هنوز واضح نیست که چه ساز و کاری<sup>۱</sup> واقع می‌شود و انتقال حرارت چگونه تحت تاثیر این پدیده قرار می‌گیرد [۸]. پدیده نوسان به طور طبیعی در جریان هوای توربین و کمپرسور وجود دارد و اثر آن بر اثربخشی خنک‌کاری (چه افزایش و چه کاهش) بایستی مد نظر قرار گیرد. شکل موج‌های متفاوت منجر به نتایج متفاوتی می‌شوند. موج مربعی و سینوسی در مطالعات زیاد استفاده می‌شوند. دلیل استفاده از موج مربعی این است که نوسان فشار جریان اصلی در خنک‌کاری لایه‌ای گذرای کاملاً باز یا بسته نتیجه می‌شود [۹]. در جریان‌های نوسانی اندازه و شکل ساختارهای منسجم تحت تاثیر دامنه و فرکانس است. ساختارهای جریان منسجم بزرگ از لایه‌های برشی تشکیل شده بین جریان آزاد و سیال احاطه کننده ایجاد می‌شود. تشکیل و برهم‌کنش ساختارهای جریان می‌تواند از اختلاط بین لایه مرزی<sup>۲</sup> و افزایش مشخص در شدت توربولانس ثبت شده به وسیله جریان‌های نوسانی تاثیر پذیرد [۱۰]. بازدید طهرانی و محمودی [۱۱] تحلیل میدان جریان در خنک‌کاری لایه‌ای سوراخ منفرد بدون نوسان را با استفاده از روش المان محدود انجام دادند. مدل توربولانسی در ناحیه نزدیک دیواره روش تابع دیواره و در ناحیه کاملاً توربولانس مدل استفاده شد. زاویه تزریق خنک‌کننده و نسبت دمش پارامترهای مورد بررسی بودند. عملکرد بهینه در زاویه تزریق خنک‌کننده ۳۵ درجه و نسبت دمش بهینه ۰/۵ به دست آمد. نسبت دمش به صورت نسبت شار گرمی جریان خنک‌کننده به جریان آزاد تعریف می‌شود:

$$M = \frac{\rho_c U_c}{\rho_\infty U_\infty} \quad (1)$$

دولتی و همکاران [۱۲] تاثیر محرک پلاسما بر میدان جریان و دما در خنک‌کاری لایه‌ای روی مدل صفحه تخت را به صورت عددی و با روش حجم محدود بررسی کردند. جریان به صورت دو بعدی، آشفتگی،

3 Goldstein  
4 Stone  
5 Vortex  
6 Lee  
7 Jung

1 Mechanism  
2 Boundary Layer

گردابه‌ای انجام شد. یافته‌های آن‌ها نشان داد، جریان عرضی مکان نسبی جفت ورتکس تولید شده در خروجی سوراخ تزریق را تغییر می‌دهد. کیم<sup>۸</sup> و هی<sup>۹</sup> [۱۹] شکل ورودی همگرا برای سوراخ‌های استوانه‌ای خنک‌کاری لایه‌ای پیشنهاد دادند. از مدل انتقال تنش برشی<sup>۱۰</sup>  $k - \omega$  جهت مدل‌سازی توربولانس استفاده شد. در تحقیق آن‌ها ماکزیمم مقدار اثربخشی متوسط خنک‌کاری لایه‌ای در زاویه ۴۰ درجه به دست آمد.

در بررسی محققان برای جریان نوسانی یکی از دو پارامتر زاویه تزریق سیال خنک‌کننده و فرکانس نوسان ثابت در نظر گرفته شده است. لذا برای اولین بار در این مقاله اثر تغییر همزمان زاویه تزریق و فرکانس جریان خنک‌کننده مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به این‌که در حالت نوسانی فیزیک جریان دستخوش تغییر و لایه خنک‌کننده تحت تاثیر نوسان قرار دارد، لازم است زاویه تزریق بهینه به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای موثر بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای برای حالت نوسانی بررسی شود که در این مقاله برای اولین مرتبه بدان پرداخته می‌شود. در کارهای قبلی محققان، معمولاً فرکانس ثابت بوده یا تمام محدوده فرکانس‌های پایین، میانی و بالا پوشش داده نشده است. در این مقاله، تاثیر جریان با محدوده فرکانس‌های پایین (کمتر از ۱۰ هرتز)، میانی (بین ۱۰ تا ۱۰۰ هرتز) و بالا (بیشتر از ۱۰۰ هرتز) بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای بررسی می‌شود. جهت بررسی تاثیر پارامترهای عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای مطالعات زیادی روی سطح صفحه تخت انجام شده است [۲۰]. لذا در تحقیق حاضر نیز هندسه تخت جهت بررسی، مدل‌سازی شده است. در این مقاله تاثیر زاویه تزریق خنک‌کننده در جریان نوسانی و زاویه تزریق بهینه در حالت جریان نوسانی موج مربعی به دست می‌آید.

## ۲- معادلات حاکم

معادلات پیوستگی و انتقال مومنتوم همراه با معادلات بسته تنش رینولدز و نیز معادله انرژی برای دامنه محاسباتی حل می‌شوند:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

8 Kim

9 Hee

10 Shear-Stress Transport (SST)

بررسی کردند. یک ردیف از پنج سوراخ خنک‌کاری لایه‌ای با زاویه جهت‌گیری صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه در زاویه شیب ثابت مورد توجه قرار گرفت. فرکانس نوسان در ۳۶ هرتز ثابت بود اما تغییرات در نرخ‌های دمش متوسط زمانی ۰/۵، ۱ و ۲ سه عدد استروهل<sup>۱</sup> خنک‌کننده مختلف ( $St_c = \frac{2\pi fL}{U_c}$ )، ۳/۶، ۱/۸ و ۰/۹ را تولید می‌کرد. هنگامی که زاویه جهت‌گیری افزایش می‌یافت، ماده تزریق غلیظ به دلیل نوسانات نسبت به نمونه پایدار بیشتر در جهت جانبی<sup>۲</sup> منتشر می‌شد. با نوسانات اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای آدیاباتیک صرف‌نظر از زاویه جهت‌گیری، کاهش یافت. اولگا<sup>۳</sup> [۷] به کارگیری نوسانات جت در کنترل جریان و خنک‌کاری لایه‌ای توربین گاز را به صورت عددی مورد بررسی قرار داد. در شبیه‌سازی خود مدل‌های توربولانسی مختلف را به کار گرفت. زاویه تزریق برابر ۳۰ درجه در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد، اثربخشی برای حالت پایا بیشتر از حالت نوسانی بود ولی در حالت نوسانی با افزایش عدد استروهل، اثربخشی افزایش می‌یافت. کولتارد<sup>۴</sup> و همکاران [۱۷] به صورت تجربی ردیفی از خنک‌کاری لایه‌ای در جریان عرضی روی صفحه تخت را بررسی کردند. جت‌ها شیب ۳۵ درجه نسبت به سطح در جهت جریان داشتند. نرخ‌های دمش از ۰/۲۵ تا ۱/۵، سیکل‌های کاری از ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ و اعداد استروهل از ۰/۱۱۹ تا ۰/۱۹۰۵ مورد توجه قرار گرفتند. بالاترین اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در نسبت دمش ۰/۵ با دمش پایا به دست آمد. با افزایش نرخ دمش اثربخشی جهش جت کاهش یافت. مولدون و آچاریا<sup>۵</sup> [۱۸] با استفاده از مدل شبیه‌سازی عددی مستقیم<sup>۶</sup> خنک‌کاری لایه‌ای نوسانی را بررسی کردند. هندسه شامل یک جت استوانه‌ای با شیب ۳۵ درجه نسبت به جریان اصلی بود. در فرکانس بالاتر از ۰/۵، بهبود اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای نوسانی به دلیل کاهش جهش در مقایسه با نمونه پایا در نسبت دمش ۱/۵ حاصل شد. ژانگ<sup>۷</sup> و همکاران [۶] خنک‌کاری لایه‌ای سوراخ شکل داده شده را با اثر جریان عرضی انتهای دیواره به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. زاویه تزریق جهت بررسی ۳۰ درجه انتخاب شد. مطالعه عددی به منظور به دست آوردن اطلاعات دقیق ساختارهای

1 Strouhal Number

2 Spanwise

3 Olga

4 Coulthard

5 Muldoon and Acharya

6 Direct Numerical Simulation

7 Zhang

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (7)$$

در این معادلات  $\widetilde{G}_k$  تولید انرژی جنبشی توربولانس به دلیل گرادیان‌های سرعت متوسط را ارائه می‌دهد.  $\widetilde{G}_\omega$  تولید  $\omega$  را بیان می‌کند.  $\Gamma_k, \Gamma_\omega$  ضریب پخش  $k$  و  $\omega$  را به ترتیب نشان می‌دهد که در ادامه محاسبه می‌شوند.  $Y_\omega$  و  $Y_k$  اتلاف  $k$  و  $\omega$  به دلیل توربولانس را ارائه می‌دهد.  $D_\omega$  ترم دیفیوژن عرضی را بیان می‌کند.  $S_k, S_\omega$  ترم‌های چشمه تعریف شده توسط کاربر هستند. جزئیات بیشتر مدل به وسیله منتر [۲۱] بیان شده است.

### ۳- هندسه، مش و مدل محاسباتی

هندسه مساله شامل چهار سوراخ تزریق به قطر ۵ میلی‌متر و  $\frac{L}{D} = 6$  و زوایای تزریق ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه است که به مجرای جریان اصلی متصل است. جهت المان‌بندی هندسه از مش مربعی ساختاریافته استفاده شده است. شکل ۱ شبکه هندسه مساله شامل ابعاد ناحیه محاسباتی، شرایط مرزی و مش ناحیه اطراف سوراخ تزریق را برای سوراخ با زاویه تزریق ۲۵ درجه نشان می‌دهد. جهت بررسی استقلال شبکه چهار شبکه مختلف با تعداد

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (3)$$

جایی که مدل‌های ویسکوزیته ادی یک نسبت تنش-کرنش را به کار می‌گیرد:

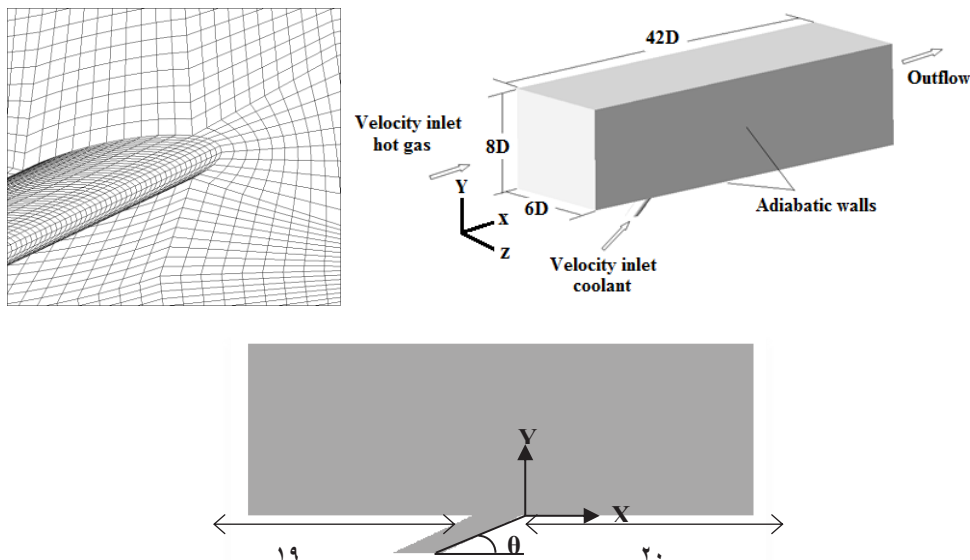
$$\overline{u_i u_j} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \nu_i \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$\rho U_i \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{k}{c_p} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_i} - \rho \overline{u_i T} \right) \quad (5)$$

جهت مدل‌سازی آشفته‌گی از مدل انتقال تنش برشی  $k-\omega$  استفاده شده است که یک تابع امتزاج را به کار می‌گیرد که معادله  $\omega$  نزدیک دیواره را حفظ می‌کند در حالی که با معادله دور از دیواره جفت می‌شود.

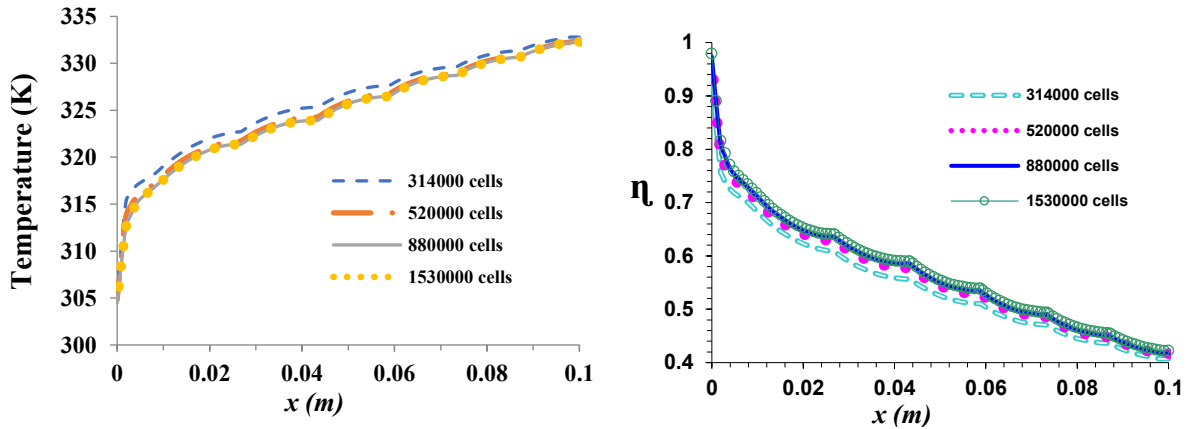
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (6)$$

1 | Menter



شکل ۱: ابعاد ناحیه محاسباتی، شرایط مرزی و مش ناحیه اطراف سوراخ تزریق

Fig. 1. The computational area, boundary conditions and mesh around the injection hole



شکل ۲: توزیع دما و اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای خط مرکزی برای چهار شبکه مختلف

Fig. 2. Temperature distribution and centerline film cooling effectiveness for four different mesh

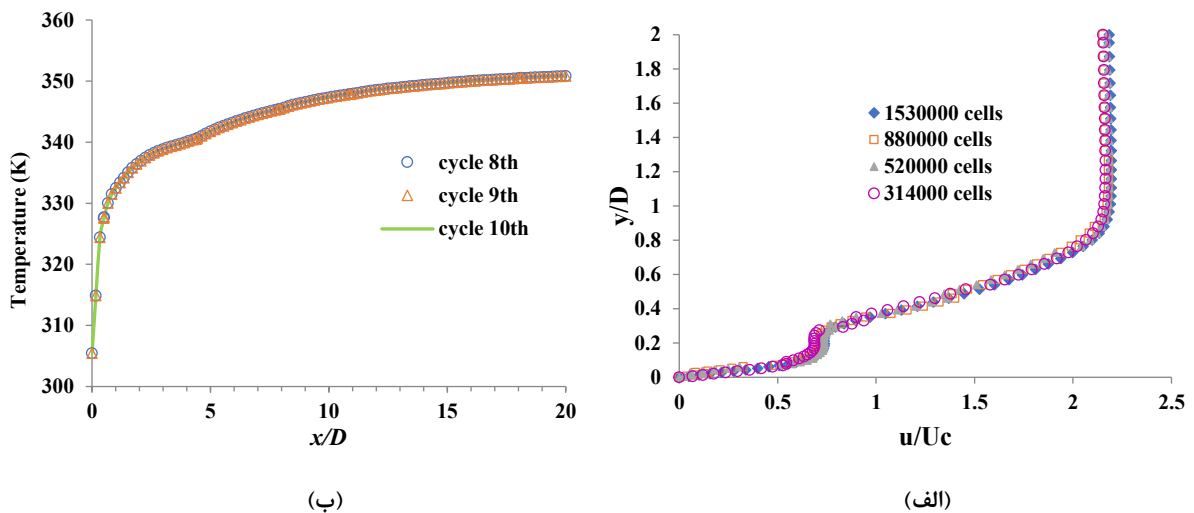
هوای جریان اصلی، دمای  $T_{av}$  آدیاباتیک دیواره که دمای سطح پایین دست سوراخ تزریق در حالت کاملاً عایق شده است و به عبارت دیگر دمای سطح در حالتی است که شرط مرزی شار حرارتی صفر برای دیواره در نظر گرفته شود و  $T_c$  نیز دمای سیال تزریق است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تفاوت مقادیر اثربخشی برای هندسه‌های با تعداد سلول‌های محاسباتی ۸۸۰۰۰۰ و ۱۵۳۰۰۰۰ در فواصل مختلف کمتر از یک درصد است، در نتیجه مش با تعداد سلول‌های ۸۸۰۰۰۰ جهت تحلیل‌های بعدی استفاده گردید. همچنین پروفیل سرعت بدون بعد برای  $\frac{x}{D} = 1$  و چهار شبکه

۳۱۴۰۰۰، ۵۲۰۰۰۰، ۸۸۰۰۰۰ و ۱۵۳۰۰۰۰ سلول محاسباتی در نظر گرفته شد. توزیع دما و اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای خط مرکزی در حالت پایا برای چهار شبکه مذکور در شکل ۲ نشان داده شده است.

اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۱]:

$$\eta = \frac{T_{\infty} - T_{av}}{T_{\infty} - T_c} \quad (8)$$

که در این رابطه  $\eta$  اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای،  $T_{\infty}$  دمای



شکل ۳: (الف): پروفیل سرعت بدون بعد برای چهار شبکه محاسباتی (ب): توزیع دمای خط مرکزی جریان نوسانی مربعی در سه تناوب متوالی

Fig. 3. (a) Non-dimensional velocity profile for four different mesh (b) Centerline temperature distribution of square pulse flow at three cycles

است. معیار همگرایی بر اساس مقادیر باقیمانده ریشه متوسط مربع برای همه پارامترهای جریان به جز انرژی  $1 \times 10^{-5}$  در نظر گرفته شد. برای پارامتر انرژی این مقدار برابر  $1 \times 10^{-6}$  بود.

#### ۴- شرایط مرزی

برای جریان اصلی، سرعت جریان هوا ثابت و برابر  $10 \frac{m}{s}$  در دمای  $353/15 K$  در نظر گرفته شد. پروفیل سرعت هوای خنک کننده به صورت نوسانی مربعی در نظر گرفته شد. جریان موج مربعی به صورت زیر تعریف می شود. دوره یا چرخه کاری<sup>۱</sup> برای جریان نوسانی مربعی و به صورت نسبت مدت زمانی که در یک سیکل جریان باز است به دوره تناوب  $(DC = \frac{t_1}{t_2})$  تعریف می شود.

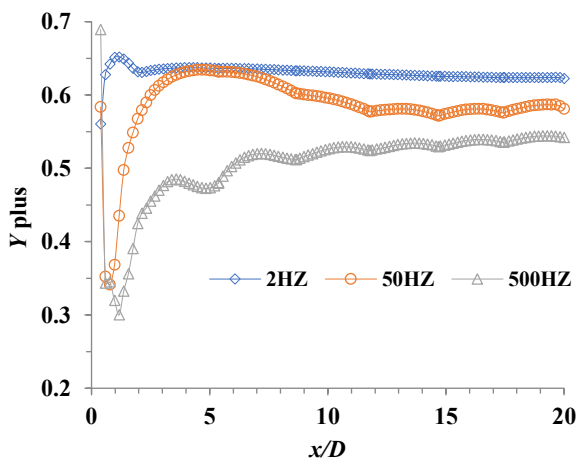
$$u_{coolant} = \begin{cases} u_b & t < t_1 \\ 0 & t_1 < t < t_2 \end{cases} \quad p = t_2 \quad (9)$$

دمای هوای خنک کننده برابر  $303/15 K$  در نظر گرفته شد. شدت توربولانس برای جریان هوای اصلی و خنک کننده  $3/6\%$  فرض شد. برای مرز دیواره شرط مرزی بدون لغزش و آدیاباتیک به کار گرفته شده است.

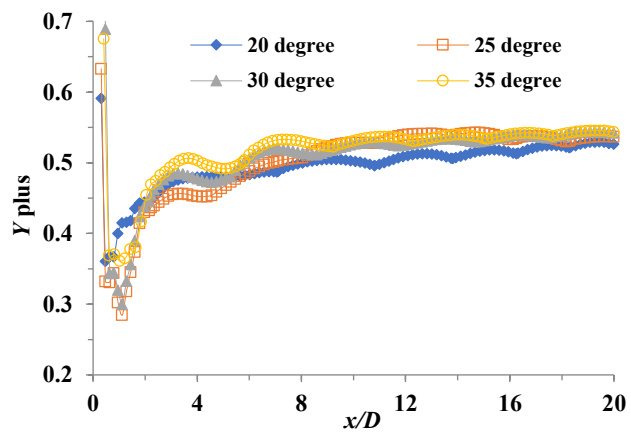
مدل ها و مقادیر پارامترهای به کار رفته در حل عددی در

محاسباتی در شرایط نوسانی ذکر شده در بالا در شکل ۳-الف با یکدیگر مقایسه شده اند. حداکثر تفاوت بین مقادیر سرعت برای هندسه های با تعداد سلول های محاسباتی ۸۸۰۰۰۰ و ۱۵۳۰۰۰۰ کمتر از  $2/8\%$  است. با توجه به این که مساله اصلی جریان نوسانی و در نتیجه ناپایاست، لازم است استقلال از گام زمانی برای نتایج شبیه سازی انجام شود. برای مساله جریان نوسانی مربعی، تعداد سیکل یا تناوب زمانی آن قدر ادامه یافت تا نتایج تحلیل برای یک تناوب با نتایج تناوب قبل از آن تفاوت نداشته باشد. شکل ۳ توزیع دمای خط مرکزی را برای جریان نوسانی مربعی فرکانس ۵۰۰ هرتز و زاویه تزریق ۳۰ درجه در نسبت دمش  $0/5$  نشان می دهد. تفاوت بین توزیع دمای سیکل هشتم و نهم کمتر از  $0/001$  درصد است. بین سیکل نهم و دهم میزان تفاوت برابر صفر است.

لازم به ذکر است که اولین نقطه شبکه در نزدیکی همه سطوح محدود به دیواره جهت لحاظ نمودن خصوصیات فیزیک جریان و انتقال گرما در لایه مرزی، در  $y^+ < 1$  قرار گرفتند. شکل ۴-الف توزیع  $y^+$  روی دیواره پایین دست سوراخ تزریق برای چهار هندسه با زاویه تزریق متفاوت و شکل ۴-ب توزیع آن را برای هندسه با زاویه تزریق سیال خنک کننده ۳۰ درجه در فرکانس های مختلف نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود روی دیواره همواره  $y^+ < 1$



(ب)

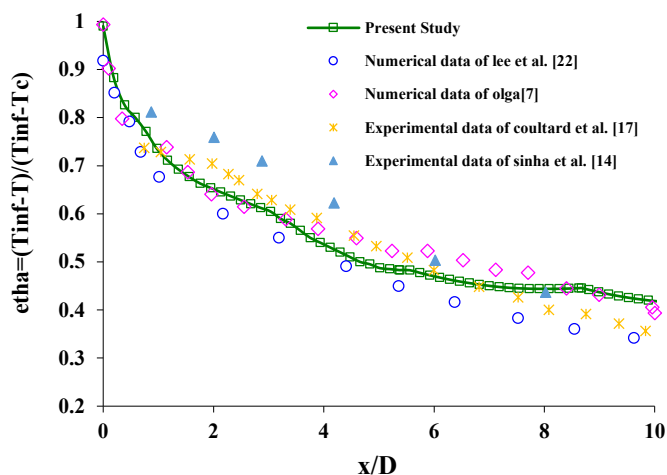


(الف)

شکل ۴: (الف): توزیع  $y^+$  برای چهار زاویه تزریق (ب): توزیع  $y^+$  در فرکانس های مختلف

Fig. 4. (a) Distribution for four injection angles (b) distribution for different frequencies





شکل ۵: مقایسه اثربخشی خط مرکزی با نتایج مراجع

Fig. 5. Comparison of centerline effectiveness with references

نتایج شبیه‌سازی عددی لی و کیم [۲۲] ۳/۶٪ و با مقادیر شبیه‌سازی عددی اولگا [۷] ۹/۱٪ است.

هدف این مقاله بررسی اثر نوسان سیال خنک‌کننده بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای است، لذا تحلیل‌های مرتبط با جریان پایا مختصر و صرفاً جهت مقایسه ارائه شده است.

شکل ۶-الف خطوط جریان را برای جریان اصلی و سیال تزریق در حالت جریان پایا و شکل‌های ۶-ب و ۶-ج این خطوط را در اواسط نیم‌سیکل اول (جریان تزریق باز) و اواسط نیم‌سیکل دوم (جریان تزریق قطع) برای جریان نوسانی مربعی با فرکانس ۵۰ هرتز و زاویه تزریق ۲۰ درجه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای جریان پایا جریان سیال تزریق به دیواره پایین دست چسبیده و فیلم خنک‌کننده کاملاً سطح را پوشانده است. در حالت نوسانی، برای نیم‌سیکل اول که جریان تزریق وصل است، جریان سیال خنک‌کننده در ابتدای پایین دست سوراخ کاملاً به سطح چسبیده نیست و به داخل جریان اصلی نفوذ کرده است. در نیم‌سیکل دوم که جریان سیال تزریق قطع می‌شود، نه تنها سیال خنک‌کننده روی سطح دیواره فیلمی را تشکیل نمی‌دهد، بلکه همان‌طور که از شکل ۶-ج مشخص است، مقداری از جریان اصلی به سوراخ تزریق نفوذ می‌کند. به همین دلیل اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در حالت نوسانی معمولاً از حالت پایا کمتر است.

شکل ۷-الف مقایسه اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای خط مرکزی

Table 1. Models and the parameters used in numerical solution

جدول ۱: مدل‌ها و پارامترهای حل عددی

پارامترها و شرایط	روش‌ها، مدل و مقادیر
بعد	سه بعدی
حل‌کننده	بر مبنای فشار
روش فرمول بندی	ضمنی
الگوریتم توأم سرعت فشار	SIMPLEC
مدل توربولانسی	انتقال تنش برشی $k-\omega$
گسسته سازی فشار	استاندارد، مرتبه دوم
گسسته سازی مومنتوم، توربولانس و انرژی	آپویند مرتبه دوم
زمان	ناپایا
جریان مورد بررسی	پایا و نوسانی موج مربعی
تعداد گام زمانی برای یک دوره تناوب	۲۰
فرکانس	۲، ۵۰ و ۵۰۰ هرتز

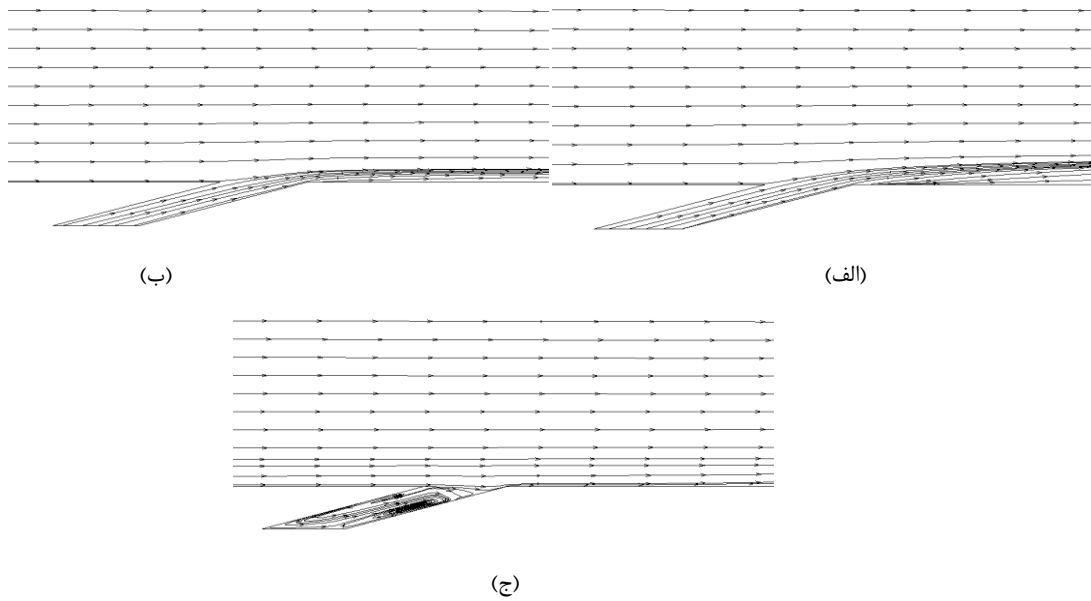
جدول ۱ آمده است. شرط مرزی پروفیل سرعت نوسانی مربعی به صورت کدنویسی توابع توسعه داده شده توسط کاربر در نرم‌افزار فلونتت انجام شده است.

۵- تحلیل نتایج

یک دوره تناوب موج مربعی به بیست گام زمانی مساوی تقسیم شده است و متوسط پروفیل دما در هر گام زمانی محاسبه شده است. برای اثر بخشی خط مرکزی از این متوسط دمای هر گام زمانی استفاده شده است. برای محاسبه اثربخشی متوسط جانبی متوسط دمای هر گام زمانی روی خطوطی به طول سه برابر قطر سوراخ و عمود بر جریان اصلی دوباره میانگین گرفته شده و مقدار آن برای یک نقطه در طول پایین دست جریان در نظر گرفته شده است.

شکل ۵ مقایسه مقادیر اثربخشی خط مرکزی خنک‌کاری شبیه‌سازی حاضر را با نتایج دان لی<sup>۱</sup> و کیم [۲۲]، اولگا [۷]، کولتارد و همکاران [۱۷] و سینها و همکاران [۱۴] برای حالت پایا نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی انطباق خوبی با داده‌های تجربی و عددی محققان دارد. خطای متوسط نسبی مقادیر اثربخشی در مطالعه حاضر با مقادیر تجربی سینها و همکاران [۱۴] ۱۰/۴٪، با نتایج تجربی کولتارد و همکاران [۱۷] ۲/۷٪، با

1 Lee

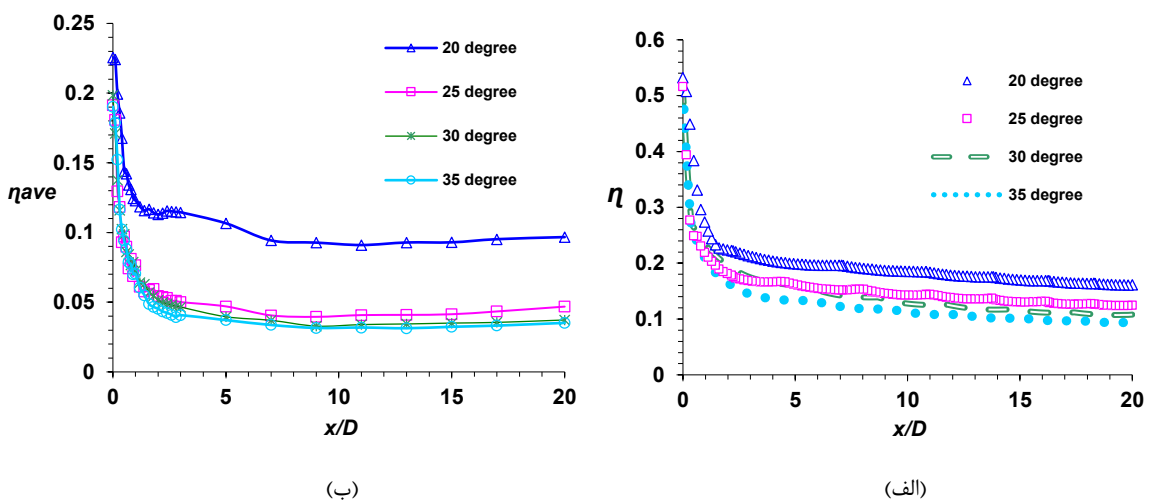


شکل ۶: خطوط جریان برای جریان اصلی و سیال تزریق (الف) جریان پایا (ب) نیم سیکل اول جریان نوسانی (ج) نیم سیکل دوم جریان نوسانی

Fig. 6. Streamlines for mainstream and inject fluid (a): steady flow (b): The first half of the pulsed flow (c): The second half of the pulsed flow

روی سطح بین زاویه ۲۰ و ۳۵ درجه مشاهده می‌شود و مقدار آن ۵۸/۲٪ است. این مقدار برای متوسط اثربخشی جانبی برابر ۹۰/۸٪ است. در فواصل ابتدایی پایین دست سوراخ تزریق، مقدار اثربخشی برای زاویه ۳۰ درجه بیشتر از زاویه ۳۵ درجه است. تا فاصله تقریباً ۵ D شیب کاهش میزان اثربخشی زیاد است و همچنین اثربخشی

و شکل ۷-ب اثربخشی خنک‌کاری جانبی را برای فرکانس ۲ Hz در زوایای مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این فرکانس تقریباً در تمام نواحی پایین دست سوراخ تزریق، اثربخشی خط مرکزی و جانبی در زاویه تزریق ۲۰ درجه نسبت به زوایای دیگر بیشتر است. بیشترین تفاوت مقدار متوسط اثربخشی خط مرکزی



شکل ۷: مقایسه اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای نوسانی در زوایای مختلف و فرکانس ۲ هرتز (الف): خط مرکزی (ب): متوسط جهت جانبی

Fig. 7. Comparison of the pulse film cooling effectiveness at different angles and 2 Hz (a): centerline (b): averaged laterally



با فرکانس ۲ Hz نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در یک تناوب به دلیل تغییر دبی هوای تزریق، پوشش خنک‌کننده سطح نیز تغییر کرده و منجر به تغییر توزیع دمای سطح و به تبع آن توزیع اثربخشی می‌شود. همچنین به دلیل پایین بودن فرکانس، با قطع جریان هوای خنک‌کننده در نیم سیکل دوم، فرصت کافی برای حذف لایه خنک‌کننده و افزایش دمای سطح وجود دارد.

همان‌طور که از شکل ۹ مشاهده می‌شود، در ابتدای سیکل ( $t=0$ ) جریان تزریق وصل می‌شود (شکل ۱۰-الف) ولی هنوز فرصت کافی برای تشکیل فیلم خنک‌کاری روی سطح را پیدا نکرده و لذا مقادیر اثربخشی پایین است. در ادامه سطح خنک شده و با تشکیل لایه خنک‌کننده میزان اثر بخشی در نیم سیکل ابتدایی که جریان تزریق وصل است، به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. با قطع جریان در نیم سیکل دوم تناوب دمای سطح شروع به افزایش می‌کند و اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای نیز کاهش می‌یابد و این فرایند در تناوب‌های بعدی تکرار می‌شود. در نمودارهای توزیع اثربخشی برای خط مرکزی و بخش جانبی، متوسط‌گیری زمانی در طول یک تناوب انجام شده است. برای بخش جانبی نیز متوسط مکانی اثربخشی، از  $z=1/5 D$  تا  $z=1/5 D$  برای یک  $x$  مشخص صورت گرفته است. شکل ۹-ب نحوه محاسبه اثربخشی خط مرکزی و متوسط جانبی را نشان می‌دهد.

شکل ۱۱-الف مقایسه اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای خط مرکزی و شکل ۱۱-ب اثربخشی خنک‌کاری جانبی را برای فرکانس ۵۰ Hz در زوایای مختلف نشان می‌دهد. با افزایش فاصله از سوراخ تزریق، اختلاط لایه سیال خنک با هوای گرم اطراف صفحه موجب کاهش اثربخشی خنک‌کاری روی خط مرکزی می‌شود.

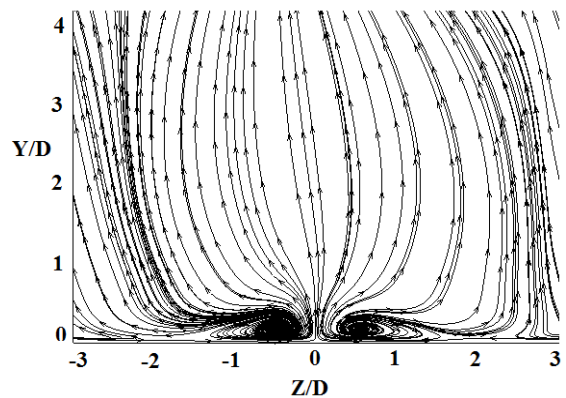
در این حالت تفاوت مقادیر اثربخشی زوایای تزریق مختلف نسبت به فرکانس ۲ هرتز کمتر است. علت این امر این است که در فرکانس ۵۰ هرتز فاصله زمانی قطع و وصل جریان نسبت به فرکانس ۲ هرتز کمتر است. همچنین در این فرکانس مقادیر اثربخشی در فواصل ابتدایی سوراخ نسبت به فرکانس ۲ هرتز بیشتر است اما در فواصل دورتر مقادیر اثربخشی برای فرکانس ۵۰ هرتز بیشتر است. در این فرکانس متوسط اثربخشی خط مرکزی برای زاویه ۲۵ درجه نسبت به بقیه زوایا بیشتر است. با توجه به ناحیه تعریف شده جهت محاسبه اثربخشی جانبی، مقادیر اثربخشی جانبی در تمام فرکانس‌ها از اثربخشی خط مرکزی کمتر است. بیشترین تفاوت اثربخشی خط

بخصوص بخش جانبی در این بخش دارای تغییرات بیشتری نسبت به فواصل دورتر است. علت این امر مربوط به تشکیل جفت ورتکس ناهمسانگرد در فواصل ابتدایی سوراخ تزریق است، در جایی که جریان هوای اصلی و هوای خنک‌کننده به هم می‌رسند و جریان دچار ناپایداری کلون-هلهولتز می‌شود.

علت تغییرات اثربخشی در نواحی نزدیک به سوراخ تزریق نسبت به فواصل دورتر را می‌توان به تشکیل ورتکس‌های ناهمسانگرد در فواصل نزدیک به سوراخ تزریق و تفاوت محل و اندازه آن‌ها در زوایای مختلف تزریق مرتبط دانست. جفت ورتکس ناهمسانگرد به دلیل برهم‌کنش بین جریان سیال خنک‌کننده و جریان اصلی ایجاد می‌شود. ژو و همکاران [۲۳] تفاوت محل تشکیل جفت ورتکس ناهمسانگرد را برای جریان پایا در پایین‌دست لبه حمله به صورت عددی و با سه مدل مختلف آشفتگی بررسی کردند که مدل انتقال تنش برشی  $k-\omega$  نتیجه قابل قبولی را داشت.

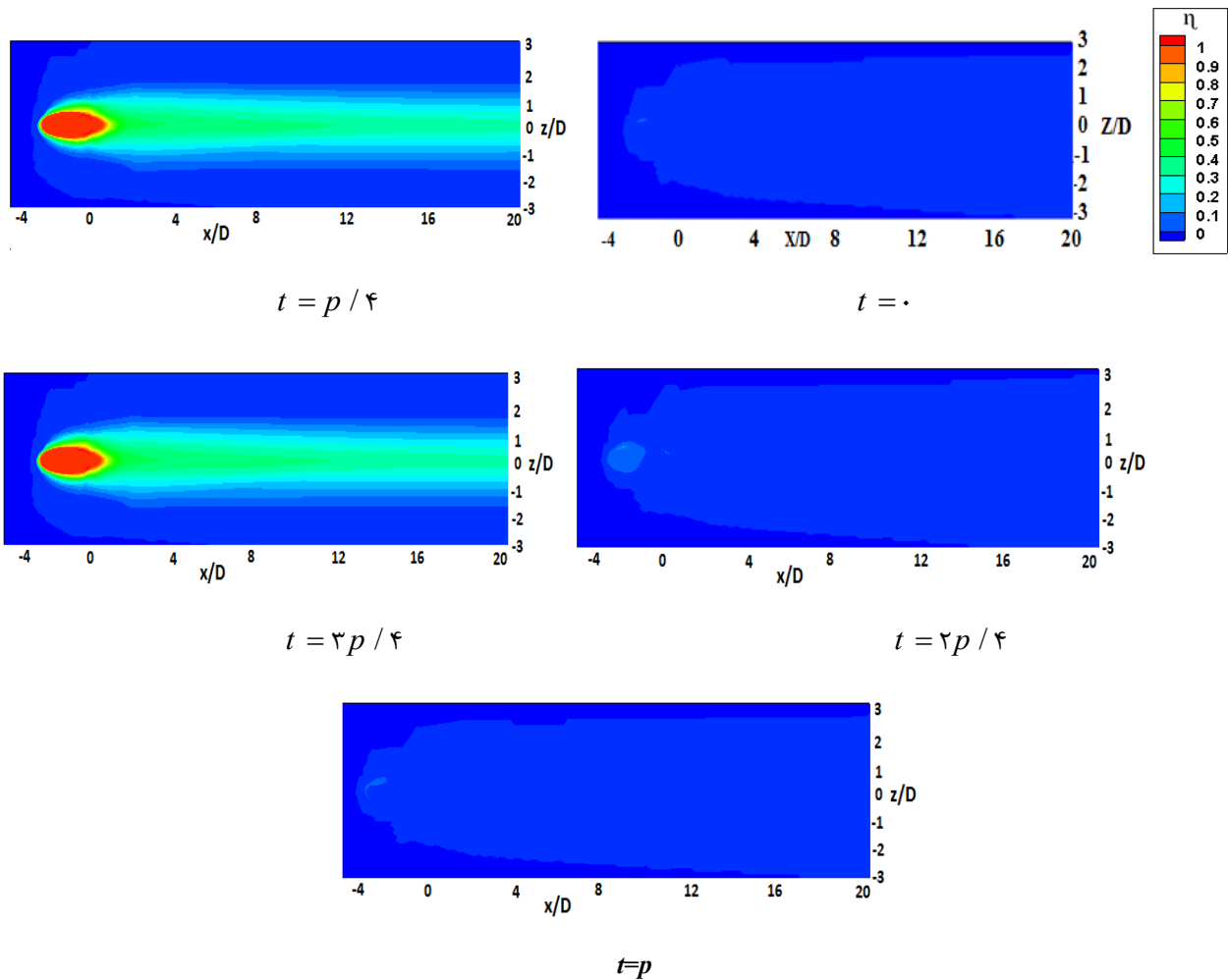
شکل ۸ خطوط جریان در مقطع جانبی و تشکیل ورتکس‌های ناهمسانگرد را برای جریان در حالت پایا نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جفت ورتکس در نزدیکی سطح تشکیل شده و ناحیه پایین‌دست سوراخ تزریق و همچنین بخش جانبی را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

شکل ۹ توزیع اثربخشی را در ناحیه پایین دست سوراخ روی دیواره در گام‌های زمانی مختلف یک تناوب زمانی جریان تزریق موج مربعی



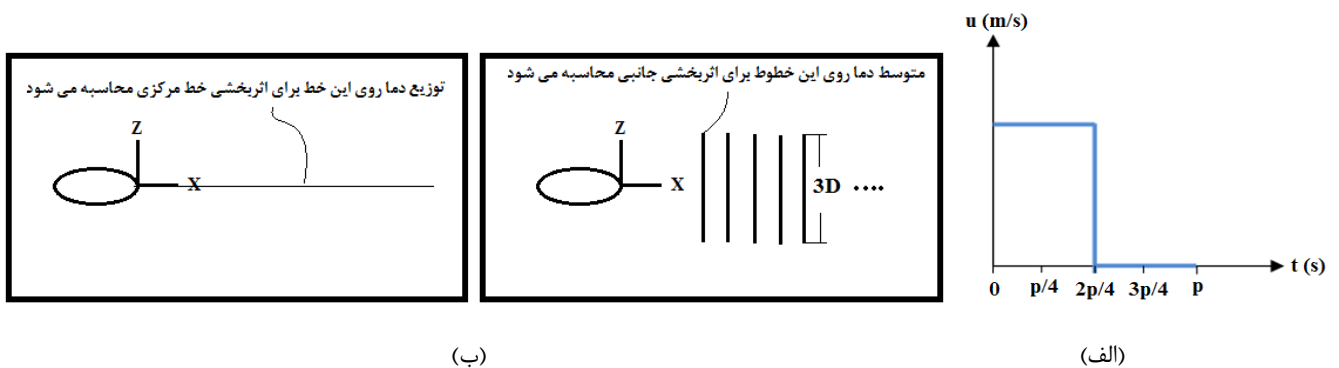
شکل ۸: خطوط جریان در مقطع جانبی و تشکیل ورتکس‌های ناهمسانگرد جریان پایا

Fig. 8. Streamlines in the lateral section and formation of counter vortex rotating pair for steady flow



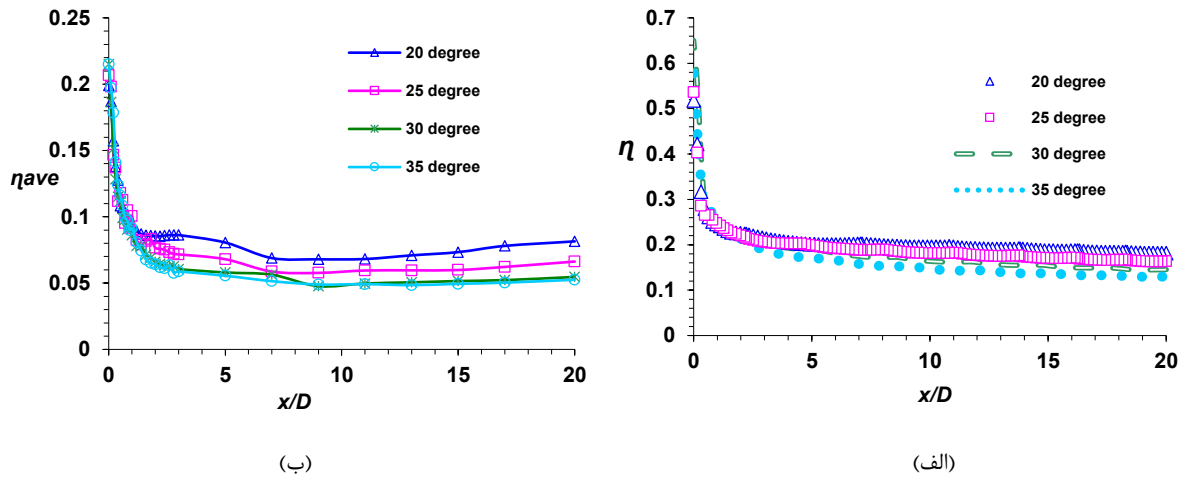
شکل ۹: توزیع اثربخشی در ناحیه پایین دست سوراخ در گام‌های زمانی مختلف یک تناوب زمانی فرکانس ۲ Hz

Fig. 9. Distribution of effectiveness in the downstream of the hole in different time steps frequency of 2 Hz



شکل ۱۰: (الف): یک سیکل پروفیل سرعت نوسانی موج مربعی (ب): نحوه محاسبه اثربخشی خط مرکزی و متوسط جانبی

Fig. 10. A square wave pulse velocity profile cycle (b) How to calculate central and lateral effectiveness



شکل ۱۱: مقایسه اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای نوسانی در زوایای مختلف و فرکانس ۵۰ هرتز (الف): خط مرکزی (ب): متوسط جهت جانبی

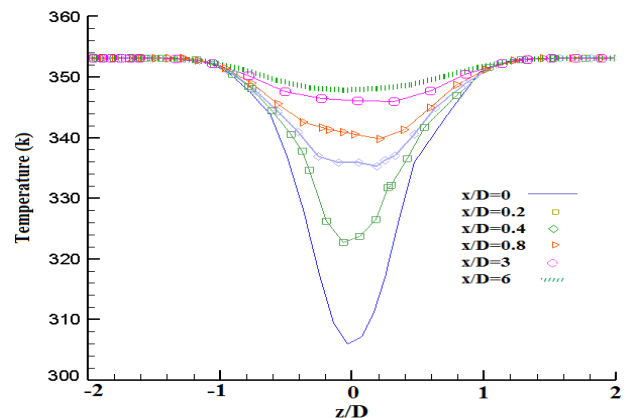
Fig. 11. Comparison of the pulse film cooling effectiveness at different angles and 50 Hz (a): centerline (b): averaged laterally

می‌شود با فاصله گرفتن از لبه سوراخ تزریق دما شروع به افزایش می‌نماید و لذا اثربخشی جانبی نیز روند کاهشی خواهد داشت. پخش هوای خنک‌کننده و دیفیوژن آن در جهت جانبی در فواصل ابتدایی پایین‌دست سوراخ تزریق، نسبت به فواصل پایین‌دست سوراخ بیشتر بوده و ناحیه وسیع‌تری از بخش جانبی را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. به همین دلیل توزیع دمای سطح جانبی در فواصل نزدیک به سوراخ تزریق دارای تغییرات شدیدتری نسبت به فواصل دوردست است.

شکل ۱۳ توزیع اثربخشی را در ناحیه پایین دست سوراخ در گام‌های زمانی مختلف یک تناوب زمانی جریان تزریق موج مربعی با فرکانس ۵۰ Hz نشان می‌دهد. به دلیل توزیع غیر یکنواخت سرعت به دلیل نوسان، جریان خنک‌کننده در خروجی بالای سوراخ مومنوم محلی بالایی دارد. این پدیده نفوذ خنک‌کننده به جریان اصلی را تقویت می‌کند و باعث جدایی خنک‌کننده از سطح خنک‌کاری می‌شود و عملکرد خنک‌کاری را کاهش می‌دهد. در این حالت به دلیل این‌که فاصله زمانی قطع و وصل جریان نسبت به فرکانس ۲ هرتز کم‌تر است لذا با قطع جریان، هوای خنک‌کننده به جا مانده از سیکل قبل هنوز روی سطح وجود دارد و لذا در پایین‌دست سوراخ تزریق اثربخشی خنک‌کاری بیشتر است. در هنگام وصل جریان ( $t=0$ )، میزان اثربخشی در پایین‌دست جریان نسبت به فواصل ابتدایی سوراخ تزریق به دلیل سیال تزریق خنک‌کننده گام زمانی قبل بیشتر است. با گذشت زمان جریان خنک‌کننده گام زمانی تناوب قبلی از سطح خارج

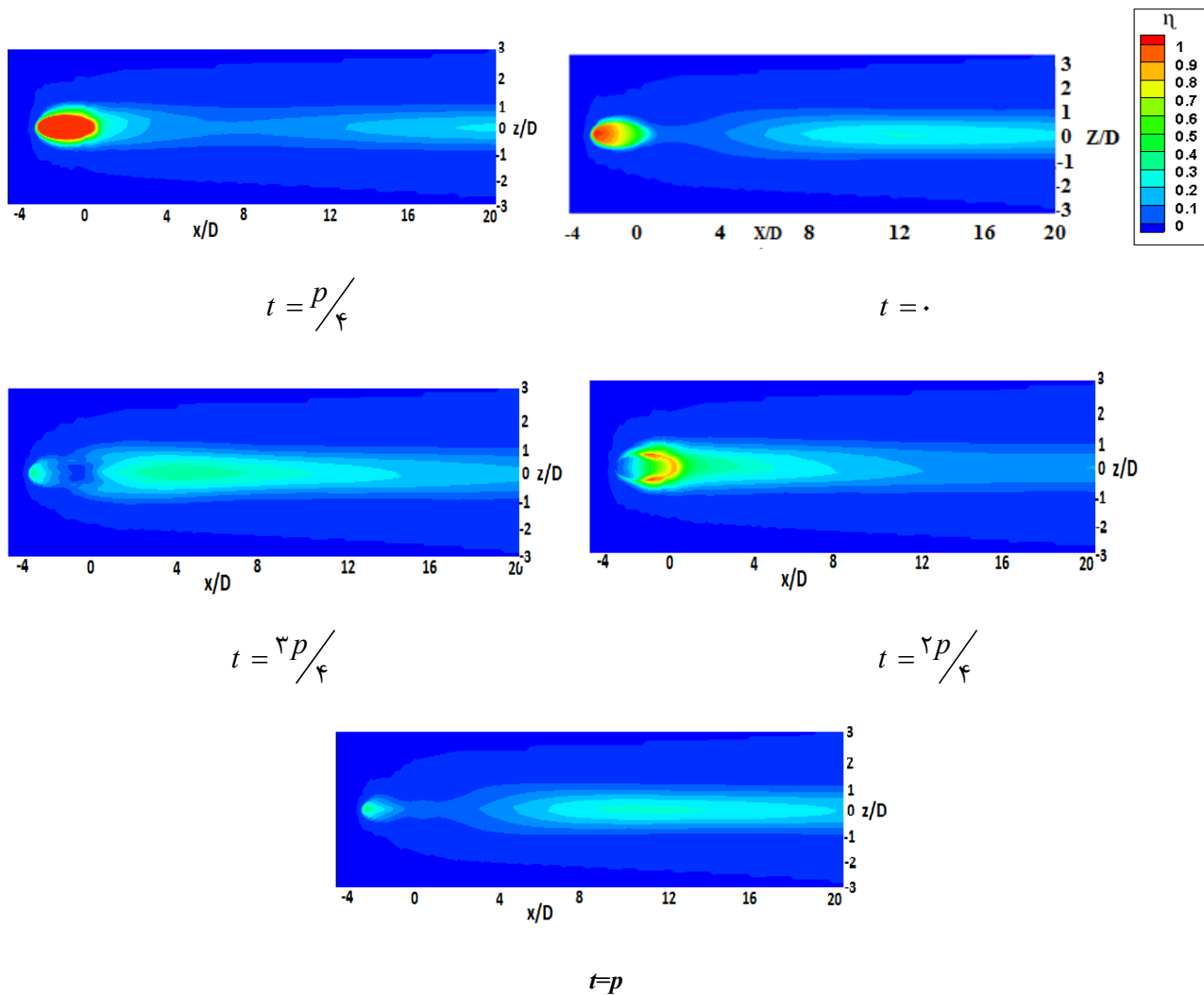
مرکزی در فرکانس ۵۰ هرتز نیز بین زاویه ۲۰ درجه و ۳۵ درجه به دست می‌آید و برابر ۳۷/۱٪ است. این مقدار برای اثربخشی جانبی ۵۵٪ است.

شکل ۱۲ توزیع دمای جهت جانبی را در فواصل مختلف پایین‌دست سوراخ تزریق برای اواسط نیم سیکل اول تناوب و برای فرکانس ۵۰ هرتز و زاویه تزریق ۲۰ درجه نشان می‌دهد. جهت محاسبه اثربخشی جانبی توزیع دمای هر یک از خطوط نشان داده شده در شکل متوسط‌گیری شده است. همان‌طور که مشاهده



شکل ۱۲: توزیع دمای جهت جانبی در فواصل مختلف پایین‌دست سوراخ تزریق

Fig. 12. Distribution of lateral side temperature at different distances of injection hole



شکل ۱۳: توزیع اثربخشی در ناحیه پایین دست سوراخ در گام‌های زمانی مختلف یک تناوب زمانی فرکانس ۵۰ Hz

Fig. 13. Distribution of effectiveness in the downstream of the hole in different time steps frequency of 50 Hz

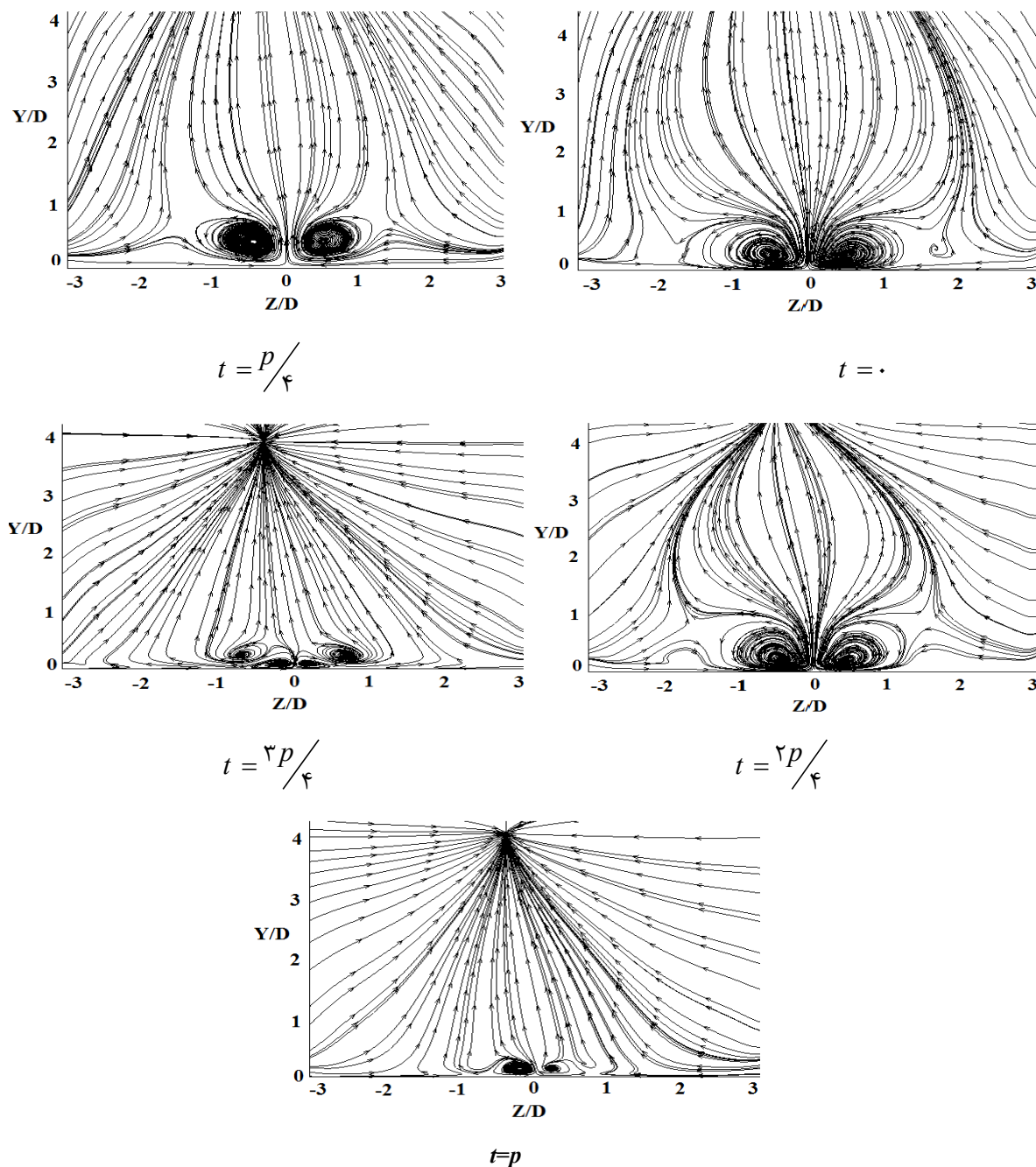
فرکانس ۵۰ هرتز نشان می‌دهد. در ابتدای سیکل جفت ورتکس به سرعت تشکیل می‌شود. در طول نیم سیکل اول با توجه به ثابت بودن سرعت جریان سیال تزریق، اندازه جفت ورتکس ناهمسانگرد نیز تقریباً ثابت است.

در نیم سیکل دوم با قطع دبی سیال تزریق به تدریج اندازه آن کوچک و در انتهای سیکل جفت ورتکس به کوچکترین اندازه خود می‌رسد. توضیحات فوق برای دو فرکانس ۲ و ۵۰۰ هرتز نیز صادق است.

شکل ۱۵-الف مقایسه اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای خط مرکزی و شکل ۱۵-ب اثربخشی خنک‌کاری جانبی را برای فرکانس ۵۰۰ Hz

شده و هوای خنک‌کننده فواصل ابتدایی سوراخ تزریق را می‌پوشاند و اثربخشی در فواصل ابتدایی سوراخ به سمت پایین دست افزایش می‌یابد ( $t = p/4, 2p/4$ ). سپس در ادامه با قطع جریان میزان اثربخشی از فواصل ابتدایی سوراخ تزریق به سمت پایین دست کاهش می‌یابد اما به دلیل فرکانس بالاتر نسبت به فرکانس ۲ هرتز، جریان سیال خنک‌کننده کاملاً از سطح خارج نشده و لذا مقدار متوسط اثربخشی خط مرکزی و جانبی در یک گام زمانی تناوب به صفر نمی‌رسد.

شکل ۱۴ تشکیل و تغییر اندازه جفت ورتکس ناهمسانگرد را در طول مدت زمان یک تناوب جریان تزریق نوسانی مربعی و برای

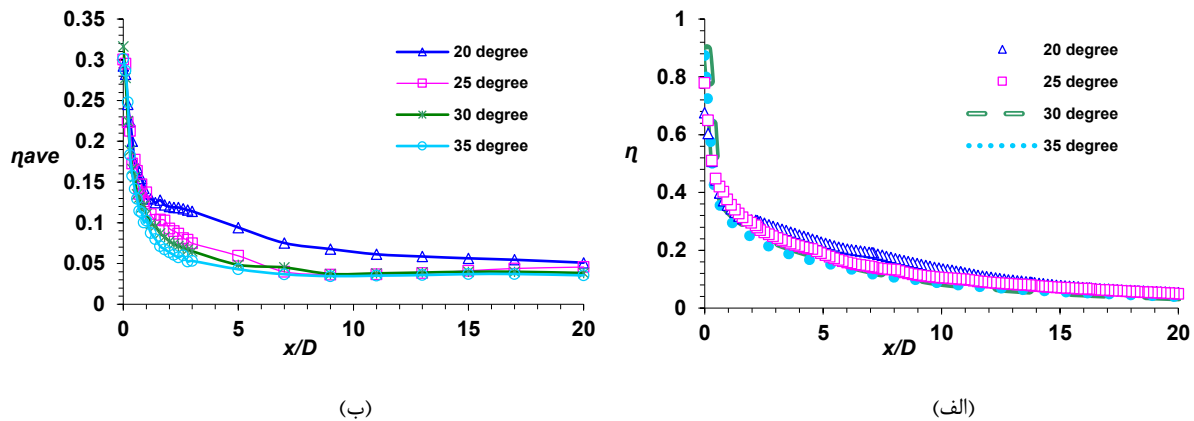


شکل ۱۴: تشکیل و تغییر اندازه جفت ورتکس ناهمسانگرد در طول یک تناوب جریان تزریق نوسانی فرکانس ۵۰ Hz

Fig. 14. Formation and resizing of counter vortex rotating pairs during a pulsed injection flow period

کمتر است که باعث می‌شود اندازه جفت ورتکس ناهمسانگرد نسبت به دو فرکانس دیگر تغییر کمتری داشته باشد و توزیع و پوشش بهتر هوای خنک‌کننده روی سطح را به دنبال دارد. این روند باعث کاهش بیشتر دمای سطح و افزایش مقدار اثربخشی می‌شود. در این حالت مقدار اثربخشی خط مرکزی بلافاصله بعد از سوراخ تزریق برای زاویه

در زوایای مختلف نشان می‌دهد. مقادیر اثربخشی خط مرکزی و جانبی در این حالت برای چهار زاویه تزریق به هم نزدیک و نسبت به فرکانس ۲ و ۵۰ هرتز بیشتر است. علت بیشتر بودن مقادیر اثربخشی در فرکانس ۵۰۰ Hz نسبت به دو فرکانس دیگر این است که تغییر مومنوم هوای خنک‌کننده در این فرکانس نسبت به دو فرکانس دیگر



شکل ۱۵: مقایسه اثربخشی خنک کاری لایه‌ای نوسانی در زوایای مختلف و فرکانس ۵۰۰ هرتز (الف): خط مرکزی (ب): متوسط جهت جانبی

Fig. 15. Comparison of the pulse film cooling effectiveness at different angles and 500 Hz (a): centerline (b): averaged laterally

مختلف و برای زوایای سوراخ ذکر شده در بالا نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در همه زوایای تزریق نسبت دم‌ش ۰/۵ بیشترین اثربخشی را نسبت به دو نسبت دیگر دارد. این تفاوت با فاصله گرفتن از لبه سوراخ تزریق سیال خنک‌کننده افزایش می‌یابد. میزان کاهش اثربخشی برای نسبت دم‌ش ۱ نسبت به دو نسبت دم‌ش دیگر بیشتر است.

مومن‌توم جت خنک‌کننده بالاتر باعث پوشش طولانی‌تر لایه خنک‌کاری می‌شود تا زمانی که جت متصل به دیواره باشد. وقتی نسبت دم‌ش افزایش می‌یابد، جت خنک‌کننده از سطح بلند شده و کاهش مومن‌توم سیال خنک‌کاری پوشش لایه خنک‌کننده در بخش جانبی نیز زیاد می‌شود.

شکل ۱۸ توزیع اثربخشی خط مرکزی را برای نسبت‌های دم‌ش ۰/۷۵ و ۱ در فرکانس ۵۰ هرتز نشان می‌دهد. در این دو نسبت دم‌ش، جریان سیال تزریق وارد جریان اصلی شده و فیلم خنک‌کننده کاملاً روی سطح را نمی‌پوشاند و همان‌طور که مشاهده می‌شود بلافاصله در پایین دست سوراخ تزریق اثربخشی به سرعت کاهش می‌یابد. همچنین اثر تغییر زاویه روی اثربخشی خط مرکزی با افزایش نسبت دم‌ش، کاهش می‌یابد.

### ۶- نتیجه‌گیری

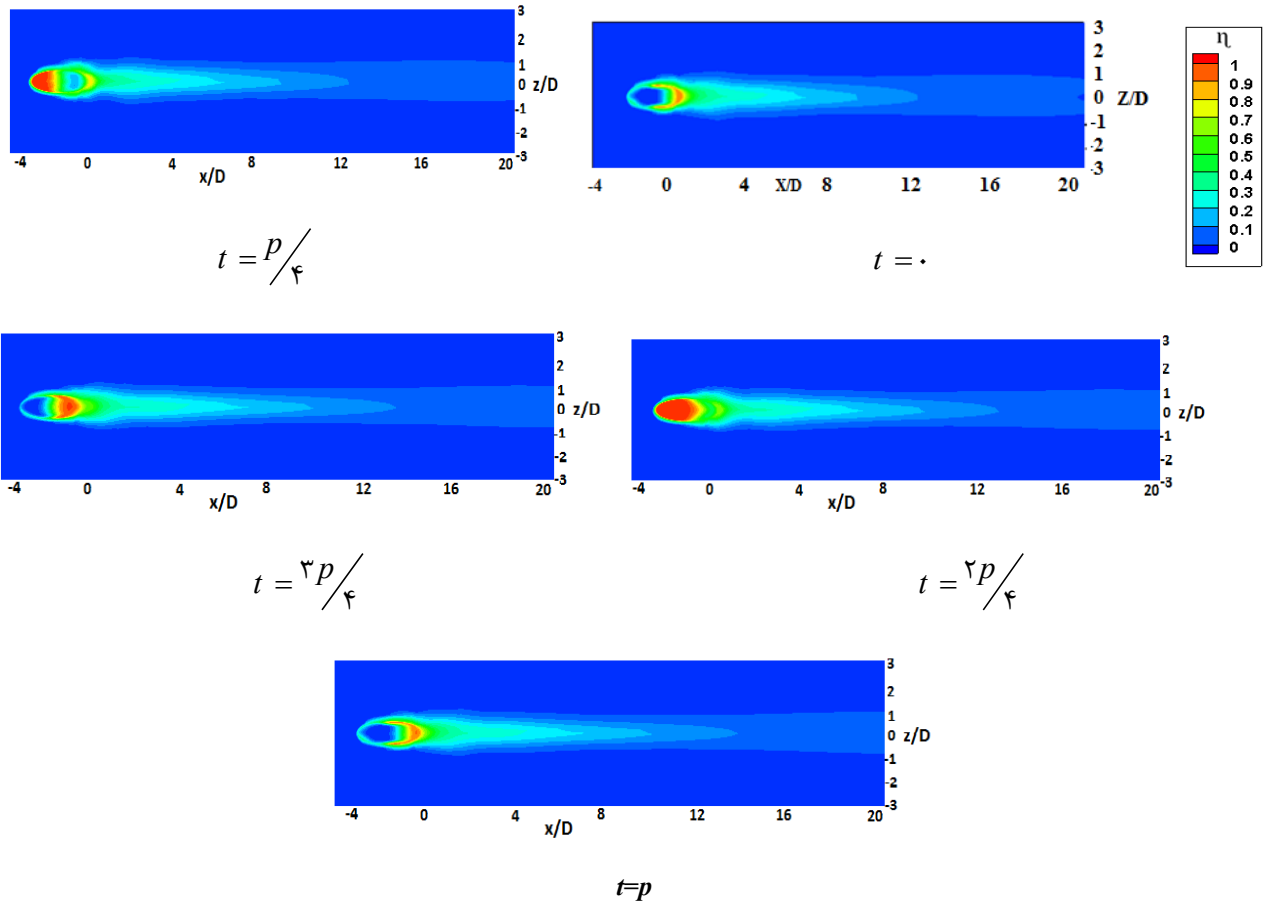
اثر تغییر زاویه تزریق بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای با نوسان موج مربعی در فرکانس‌ها و نسبت دم‌ش‌های مختلف بررسی شد.

۳۰ درجه نسبت به زوایای دیگر بیشتر است. بعد از آن تا فاصله  $2/5 D$  و همچنین فاصله  $15 D$  تا  $20 D$  میزان اثربخشی خط مرکزی برای زاویه ۲۵ درجه نسبت به زوایای دیگر بیشتر است. مقدار اثربخشی در فواصل دیگر برای زاویه تزریق ۲۰ درجه نسبت به زوایای دیگر اندکی بیشتر است. در این حالت متوسط اثربخشی خط مرکزی برای دو زاویه ۲۰ و ۲۵ درجه به هم نزدیک و نسبت به دو زاویه دیگر بیشتر است. بیشترین تفاوت اثربخشی خط مرکزی در فرکانس ۵۰۰ هرتز نیز بین زاویه ۲۰ درجه و ۳۵ درجه به دست می‌آید و برابر  $64/3\%$  است. این مقدار برای اثربخشی جانبی  $98/9\%$  است.

شکل ۱۶ توزیع اثربخشی را در ناحیه پایین دست سوراخ در گام‌های زمانی مختلف یک تناوب زمانی جریان تزریق موج مربعی با فرکانس ۵۰۰ Hz نشان می‌دهد. در این حالت به دلیل این که فاصله زمانی قطع و وصل جریان بسیار کم است کاهش و افزایش دمایی سطح نیز به تدریج صورت می‌گیرد و لذا اثربخشی نیز دارای تغییرات کمتری در یک تناوب است. در فرکانس ۵۰۰ هرتز، به دلیل بهبود عمده یکنواختی مومن‌توم در خروجی سوراخ در مقایسه با دو فرکانس دیگر، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای نیز نسبت به دو فرکانس دیگر بیشتر است.

### ۵-۱- بررسی اثر نسبت دم‌ش

برای فرکانس ۵۰ هرتز تحلیل‌ها برای نسبت دم‌ش ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ انجام شد. شکل ۱۷ اثربخشی خط مرکزی را در نسبت‌های دم‌ش



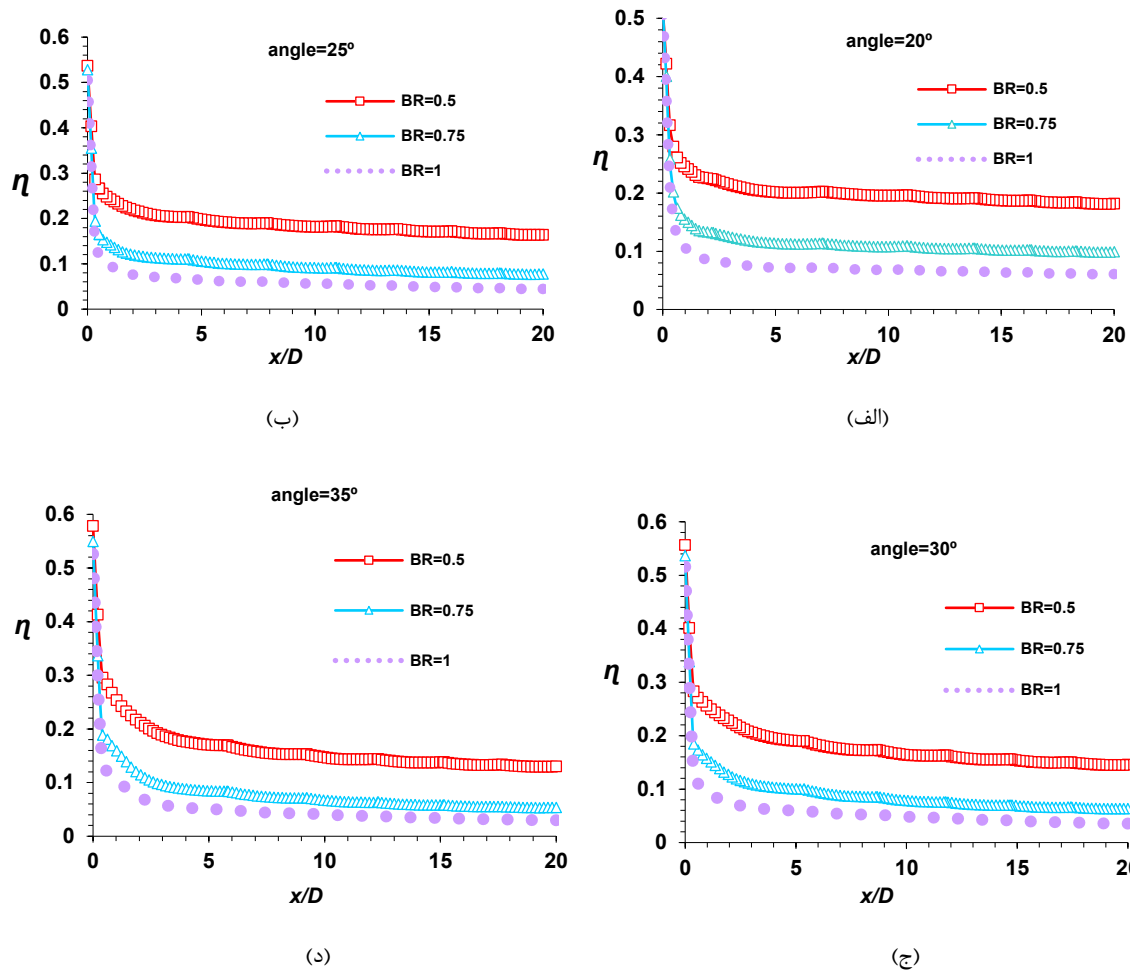
شکل ۱۶: توزیع اثربخشی در ناحیه پایین دست سوراخ در گام‌های زمانی مختلف یک تناوب زمانی فرکانس ۵۰۰ Hz

Fig. 16. Comparison of the pulse film cooling effectiveness at different angles and 500 Hz (a): centerline (b): averaged laterally

افزایش فرکانس، تفاوت مقدار اثربخشی خنک‌کاری خط مرکزی و جانبی در زوایای مختلف کاهش می‌یابد. با افزایش فرکانس فاصله زمانی قطع و وصل جریان کاهش یافته و در نتیجه اثربخشی لحظه‌ای نیز دارای تغییرات کندتری نسبت به فرکانس‌های پایین‌تر است. (۵) با افزایش فرکانس، شیب کاهش اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای افزایش می‌یابد. (۶) نسبت دمش ۰/۵ نسبت به نسبت دمش ۰/۷۵ و ۱ در تمامی زوایا و فرکانس‌ها بیشترین اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای را داشت.

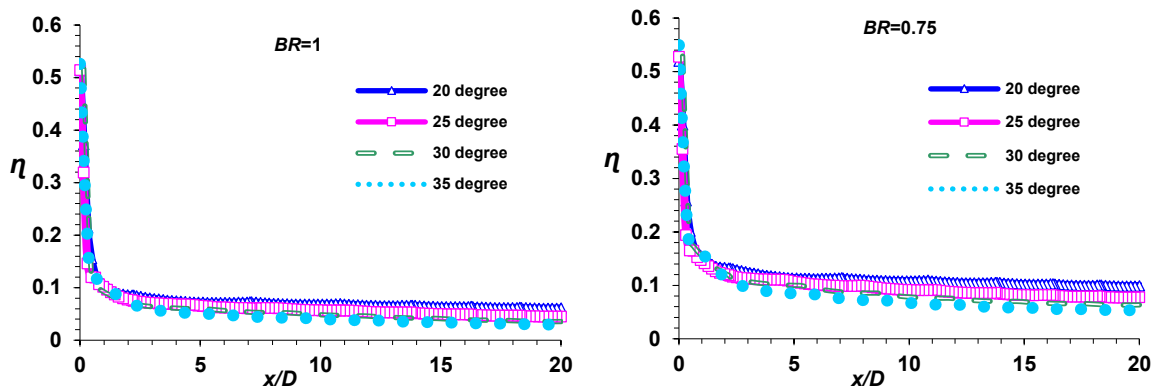
نتایج عمده به دست آمده به صورت زیر است:  
 (۱) زاویه تزریق بین ۲۰ تا ۲۵ درجه در سه فرکانس مورد بررسی بیشترین اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای خط مرکزی و جانبی را به خصوص در نواحی دور از لبه سوراخ تزریق داشت.  
 (۲) در فواصل نزدیک پایین دست سوراخ تزریق، در فرکانس‌های مختلف زوایای ۳۰ و ۳۵ درجه بیشترین اثربخشی خط مرکزی و جانبی را داشت.  
 (۳) به طور کلی در زاویه تزریق خنک‌کننده بین ۲۰ تا ۲۵ درجه بیشترین میزان اثربخشی متوسط کلی، در حالت نوسانی موج مربعی، به دست آمد.  
 (۴) بیشترین اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در فواصل ابتدایی پایین دست سوراخ در فرکانس ۵۰۰ هرتز به دست آمد. در فواصل دور دست، فرکانس پایین‌تر (۲ هرتز) بیشترین اثربخشی را دارد. با





شکل ۱۷: اثربخشی خط مرکزی در نسبت‌های دم‌ش مختلف

Fig. 17. Centerline effectiveness at different blowing ratios



شکل ۱۸: توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای نوسانی خط مرکزی در نسبت دم‌ش ۰/۷۵ و ۱ در زوایای مختلف و فرکانس ۵۰ هرتز

Fig. 18. Distribution of centerline film cooling effectiveness at frequency of 50Hz and blowing ratios 0.75 and 1

turbine rotor blade cooling through staggered holes using CFD, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 4(7) (2015) 425-432.

## ۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

- [4] L. Liu, J. H. Liu, Y. B. Liu, Film cooling modeling of a turbine vane with multiple configurations of holes, Case Studies in Thermal Engineering, 11 (2018) 71-80.
- [5] A. H. Moeini, M. R. Zargarabadi, Genetic algorithm optimization of film cooling effectiveness over a rotating blade, International Journal of Thermal Sciences, 125 (2018) 248-255.
- [6] Y. Li, Y. Zhang, X. Su, X. Yuan, Experimental and numerical investigations of shaped hole film cooling with the influence of endwall cross flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, 120 (2018) 42-55.
- [7] V. K. Olga, A computational study for the utilization of jet pulsations in gas turbine film cooling and flow control, Cleveland State University, 2012.
- [8] H. M. Hofmann, D. L. Martin, M. Kind, H. Martin, Influence of a pulsation on heat transfer and flow structure in submerged impinging jets, International Journal of Heat and Mass Transfer, 50(17) (2007) 3638-3648.
- [9] K. Zhaoqing, J. Wang, Numerical investigations of pulsed film cooling on an entire turbine vane, Applied Thermal Engineering, 87(2015) 117-126.
- [10] R. Zulkifli, K. Sopian, S. Abdullah, M. S. Takriff, Effect of pulsating circular hot air jet frequencies on local and average nusselt number, American Journal of Engineering and Applied Sciences, 1(2008) 58-62.
- [11] F. Bazdidi Tehrani, A.A. Mahmoodi, Finite element analysis of flowfield in the single hole film cooling technique, Annals of the New York Academy of Sciences, 934(1) (2001) 393-400.

$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه، $J/kg \cdot K$
$D$	قطر سوراخ تزریق، $m$
$DC$	چرخه یا سیکل کاری
$f$	فرکانس
$k$	ضریب رسانش هوا
$L$	طول سوراخ تزریق، $m$
$p$	دوره تناوب، $s$
$P$	فشار
$St$	عدد استروهال
$T$	دما، $K$
$t$	زمان، $s$
$U$	سرعت جریان، $m/s$
$x$	فاصله از لبه سوراخ تزریق در راستای جریان اصلی، $m$
$y$	مختصات نرمال بر دیوار، $m$
$z$	مختصات جانبی، $m$

علائم یونانی

$\eta$	اثربخشی خنک کاری لایه‌ای
$\omega$	فرکانس، $Hz$
$\nu$	ویسکوزیته سینماتیک، $m^2/s$
$\rho$	دانسیته، $kg/m^3$
$\delta$	دلتای کروئکر

زیرنویس

$aw$	آدیاباتیک دیواره
$c$	سیال تزریق یا خنک کننده
$\infty$	جریان اصلی

## منابع

- [1] W. J. Gao, Z. f. Yue, L. Li, Z. N. Zhao, F.J. Tong, Numerical simulation on film cooling with compound angle of blade leading edge model for gas turbine, International Journal of Heat and Mass Transfer, 115 (2017) 839-855.
- [2] S. M. Yahya, Turbines Compressors and Fans, Tata McGraw-Hill Education, 1987.
- [3] S. Priyanka, O. P. Shukla, Heat transfer analysis of gas

- field temperature results, *Journal of Turbomachinery*, 129(2) (2007) 232-246.
- [18] F. Muldoon, S. Acharya, DNS study of pulsed film cooling for enhanced cooling effectiveness, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(13) (2009) 3118-3127.
- [19] K. J. Hee, K.Y. Kim, Film-cooling performance of converged-inlet hole shapes, *International Journal of Thermal Sciences*, 124 (2018) 196-211.
- [20] L. Zeng, P. Chen, X. Li, J. Ren, H. Jiang, Influence of simplifications of blade in gas turbine on film cooling performance, *Applied Thermal Engineering*, 128(2018) 877-886.
- [21] F.R. Menter, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA J*, 32(1994) 1598-1605.
- [22] K. D. Lee, K. Y. Kim, Surrogate based optimization of a laidback fan-shaped hole for film-cooling, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 32(1) (2011) 226-238.
- [23] G. Xu, J. Zhu, Z. Tao, Application of the TLVA model for predicting film cooling under rotating frames, [12] S. Dolati, N. Amanifard, H. M. Deilami, Numerical analysis of the effect of plasma stimulator on film cooling effectiveness on the flat plate model, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 49(3) (2016) 605-616 (in Persian).
- [13] N. H. Vajargah, M. R. Salimi, M. Tayebi Rahni, Numerical simulation of film cooling around the gas turbine blade by partial averaging method of Navier-Stokes equations, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 48(3) (2016) 267-280 (in Persian).
- [14] A. Sinha, D. Bogard, M. Crawford, Film-cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio, *Journal of Turbomachinery*, 113(3) (1991) 442-449.
- [15] R. J. Goldstein, L. D. Stone, Row-of-holes film cooling of curved walls at low injection angles, *Journal of Turbomachinery*, 119(3) (1997) 574-579.
- [16] J. S. Lee, I. S. Jung, Effect of bulk flow pulsations on film cooling with compound angle holes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(1) (2002) 113-123.
- [17] S. M. Coulthard, J. R. Volino, K. A. Flack, Effect of jet pulsing on film cooling-part I: effectiveness and flow-