



Numerical Simulation of the Sinusoidal Wave Pulsed Film Cooling Effectiveness Due to the Changing Cooling Injection Parameters

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Hosseini Baghdad Abadi S.M.¹
MSc, Zirak S.^{1*} PhD,
Rajabi Zargar Abadi M.¹ PhD

How to cite this article

Hosseini Baghdad Abadi S.M, Zirak S, Rajabi Zargar Abadi M. Numerical Simulation of the Sinusoidal Wave Pulsed Film Cooling Effectiveness Due to the Changing Cooling Injection Parameters. Modares Mechanical Engineering, 2019; 19(1):191-200.

¹Energy conversion Department, Mechanical Engineering Faculty, Semnan University, Semnan, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Semnan University, In Front of the Sookan park, Semnan, Iran.
Postal Code: 1911135131
Phone: +98 (23) 31533350
Fax: +98 (23) 33654122
s_zirak@semnan.ac.ir

Article History

Received: July 24, 2018
Accepted: October 8, 2018
ePublished: January 01, 2019

ABSTRACT

In this paper, the effect of the angle of injection on the film cooling effectiveness with sinusoidal wave pulsation is investigated at various frequencies. Four angles of injection are selected at 20, 25, 30, and 35 degrees. The pulsed flow is investigated at 3 frequencies of 2, 50, and 500 Hz. Geometry was simulated in Gambit and numerical analysis was done by Fluent software. The SST $k-\omega$ model was used for modeling turbulence. The results showed that the injection angle between 20 and 25 degrees in the frequencies studied had the most film cooling effectiveness of the central and lateral line, especially in the areas far from the edge of the hole. Higher frequencies (500 Hz) increase the effectiveness of the film cooling at the lower initial distances of the hole. At far distances, the lower frequency (2 Hz) is the most effectiveness. As the frequency increases, the difference in the cooling efficiency of the central and lateral lines decreases at different angles. As the frequency increases, the interruptions of the flow-off and the flow-on are reduced, and as a result, the instantaneous effectiveness also has a slower variation than the lower frequencies. The blowing ratio of 0.5 had the most value in comparison with the blowing ratio of 0.75 and 1 in all angles and frequencies.

Keywords Pulsed Film Cooling; Sinusoidal Wave; Angle of Injection; SST $k-\omega$ Model; Frequency

CITATION LINKS

[1] Turbines compressors and fans. New delhi [2] Heat transfer analysis of gas turbine rotor blade cooling through staggered holes using CFD [3] Numerical simulation on film cooling with compound angle of blade leading edge model for gas turbine [4] Genetic algorithm optimization of film cooling effectiveness over a rotating blade [5] Experimental and numerical investigations of shaped hole film cooling with the influence of endwall cross flow [6] Influence of a pulsation on heat transfer and flow structure in submerged impinging jets [7] A computational study for the utilization of jet pulsations in gas turbine film cooling and flow control [8] Numerical investigations of pulsed film cooling on an entire turbine vane [9] Finite element analysis of flowfield in the single hole film cooling technique [10] Effect of jet pulsing on film cooling - Part I: Effectiveness and flow-field temperature results [11] Effect of jet pulsation and duty cycle on film cooling from a single jet on a leading edge model [12] DNS study of pulsed film cooling for enhanced cooling effectiveness [13] Row-of-holes film cooling of curved walls at low injection angles [14] Effect of bulk flow pulsations on film cooling with compound angle holes [15] Film-cooling performance of converged-inlet hole shapes [16] Influence of simplifications of blade in gas turbine on film cooling performance [17] Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [18] Surrogate based optimization of a laidback fan-shaped hole for film-cooling [19] Film-cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio [20] Application of the TLVA model for predicting film cooling under rotating frames

شبیه‌سازی عددی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای نوسانی موج سینوسی با توجه به تغییر پارامترهای تزریق خنک‌کننده

سیدمهدی حسینی بغدادآبادی MSc

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

سعادت زیرک* PhD

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

مهران رجبی زرگرآبادی PhD

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

در این مقاله اثر تغییر زاویه تزریق بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای با نوسان موج سینوسی در فرکانس‌های مختلف بررسی می‌شود. چهار زاویه تزریق ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه انتخاب شده‌اند. جریان نوسانی در سه فرکانس ۲، ۵۰ و ۵۰۰ هرتز مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل‌سازی هندسه در نرم‌افزار گمبیت و تحلیل عددی توسط نرم‌افزار فلونت انجام شد. از مدل $k - \omega$ SST برای مدل‌سازی آشفتگی استفاده شد. نتایج نشان داد که زاویه تزریق بین ۲۰ تا ۲۵ درجه در سه فرکانس مورد بررسی، بیشترین اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای خط مرکزی و جانبی را به‌خصوص در نواحی دور از لبه سوراخ تزریق داشت. فرکانس‌های بالاتر (۵۰۰ هرتز) افزایش اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در فواصل ابتدایی پایین‌دست سوراخ را به دنبال دارند. در فواصل دوردست، فرکانس پایین‌تر (۲ هرتز) بیشترین اثربخشی را دارد. با 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. نسبت دمش ۰/۵ به نسبت دمش ۰/۱۷۵ و ۱ در تمامی زوایا و فرکانس‌ها بیشترین اثربخشی را داشت.

کلیدواژه‌ها: خنک‌کاری لایه‌ای نوسانی، موج سینوسی، زاویه تزریق، مدل توربولانسی SST k- ω ، فرکانس

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۱۶

*نویسنده مسئول: s_zirak@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

از سیستم‌های خنک‌کاری به‌منظور بهینه‌سازی و افزایش راندمان استفاده می‌شود تا پره آسیب نبیند. با افزایش دمای گازهای احتراق ورودی به توربین، بازده چرخه توربین گاز افزایش می‌یابد. با توجه به این که افزایش دمای ورودی به توربین یک مزیت اجتناب‌ناپذیر است، اما باید برای خنک‌کاری پره‌های توربین، تمهیدات لازم اندیشیده شود^[1]. توربین‌های مدرن امروزی به‌دلیل افزایش توان خروجی، بازده حرارتی و عملکرد توربین، در دماهای خیلی بالا کار می‌کنند. اما دمای ذوب ماده تیغه‌های توربین ممکن است از مقدار مجاز تجاوز کند. از این رو از سیستم خنک‌کاری مخصوصی برای سردکردن پره‌های توربین و افزایش عمرشان استفاده می‌شود^[2].

خنک‌کاری لایه‌ای تقریباً در همه سطوح خارجی ایرفویل‌هایی به کار گرفته می‌شود که در معرض گازهای احتراق داغ نظیر لبه حمله، نوک پره، بدنه‌های اصلی و انتهای دیواره‌ها قرار دارند^[3]. در طول دهه‌های گذشته، مطالعات قابل توجهی به‌منظور درک فیزیک پایه جریان خنک‌کاری لایه‌ای انجام شده است. مطالعات پیشین نشان داده که خنک‌کاری لایه‌ای تحت تاثیر عوامل مختلفی نظیر نسبت دمش، شکل سوراخ، موقعیت و جهت تزریق است^[4]. همچنین خصوصیات جریان اصلی نظیر گرادیان فشار، جریان ثانویه و شدت توربولانس در عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای موثر است^[5]. مکانیزم انتقال حرارت جابه‌جایی در جریان‌های تک‌فاز پایا به‌طور گسترده

بررسی شده است، اما دانش کمی درباره چگونگی تاثیر نوسان بر انتقال حرارت وجود دارد. در بسیاری از کاربردهای صنعتی، جریان متناوب به‌دلیل حرکت بخش‌ها مانند پمپ‌ها یا توربین‌ها یا به‌وسیله ارتعاشات یا نوسانات جریان اتفاق می‌افتد. هنوز واضح نیست که چه مکانیزمی واقع می‌شود و چگونه انتقال حرارت تحت تاثیر این پدیده قرار می‌گیرد^[6]. جت و جریان نوسانی به‌دلیل کاهش در مقدار هوای دفع‌شده از کمپرسور، یک تکنیک نویدبخش است، در حالی که به افزایش بازده توربین کمک می‌کند. دمای ورودی به توربین فشار بالا به‌طور عمده بر عملکرد توربین گاز موثر است. این تکنیک به‌کارگیری هوای خنک تخلیه‌شده از ردیفی از سوراخ‌ها به داخل جریان داغ است. استفاده از جت‌های نوسانی با هدف خنک‌کاری لایه‌ای می‌تواند به بهبود اثربخشی کمک کند و بنابراین دمای ورودی بالاتر به توربین 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 نتیجه قیمت سوخت پایین‌تر را به دنبال خواهد داشت^[7]. خواه نوسانی کردن اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای را افزایش دهد یا نه، حذف نوسان القا شده به‌وسیله برهم‌کنش ناپایدار و تناوبی روتور-استاتور یا نوسان جریان اصلی غیرممکن است، بنابراین مهم است که اثرات خنک‌کاری لایه‌ای نوسانی را بررسی کنیم. شکل موج‌های متفاوت منجر به نتایج متفاوتی می‌شوند و در مطالعات از موج سینوسی و سینوسی زیاد استفاده می‌شود. در شرایط حرکت آبشاری، برهم‌کنش روتور-استاتور منجر به تغییرات تدریجی تزریق هوای خنک‌کننده می‌شود که به موج سینوسی شبیه‌تر است^[8].

بازدید-تهرانی و محمودی^[9] تحلیل میدان جریان در خنک‌کاری لایه‌ای سوراخ منفرد با استفاده از روش المان محدود را انجام دادند. در این روش هوای خنک‌کننده از یک سوراخ به جریان اصلی تزریق می‌شود و بنابراین جریان به‌طور طبیعی سه‌بعدی است. معادلات حاکم گذرا و جریان تراکم‌ناپذیر و توربولانس در نظر گرفته شد. مدل توربولانسی در ناحیه نزدیک دیواره، روش تابع دیواره و در ناحیه به‌طور کامل توربولانس، مدل $k - \epsilon$ استفاده شد. پارامترهای مورد بررسی، زاویه تزریق خنک‌کننده و نرخ دمش بودند. عملکرد بهینه در زاویه تزریق خنک‌کننده ۳۵ درجه و نرخ دمش بهینه ۰/۵ به دست آمد. **کارتوزووا**^[7] به‌کارگیری نوسانات جت در کنترل جریان و خنک‌کاری لایه‌ای توربین گاز را به‌صورت عددی مورد بررسی قرار داد. در شبیه‌سازی خود مدل‌های توربولانسی مختلف را به کار گرفت و زاویه تزریق برابر ۳۰ درجه در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که اثربخشی برای حالت پایا بیشتر از حالت نوسانی است، ولی در حالت نوسانی با افزایش عدد استروهاال، اثربخشی افزایش می‌یافت. **کوتارد و همکاران**^[10] به‌صورت 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. نسبت‌های دمش از ۰/۲۵ تا ۱/۵، سیکل‌های کاری از ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ و اعداد استروهاال از ۰/۱۱۹ تا ۰/۱۹۰۵ مورد توجه قرار گرفتند. بیشترین مقدار اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در نسبت دمش ۰/۵ با دمش پایا به دست آمد. با افزایش نسبت دمش، اثربخشی جهش جت کاهش یافت. **کاد و همکاران**^[11] اثر نوسان جت و سیکل کاری را روی خنک‌کاری لایه‌ای یک جت منفرد واقع روی لبه حمله مدور بدنه یخ بررسی کردند. خصوصیات خنک‌کاری لایه‌ای برای سیکل کاری از ۰/۱ تا ۱ در نسبت‌های دمش نامی از ۰/۵ تا ۲ و فرکانس‌های نوسان از ۵ تا ۱۰۰ هرتز تست شدند. این بررسی

در بررسی محققان برای جریان پایا، زاویه تزریق بهینه ۳۰ یا ۳۵ درجه در نظر گرفته شده و در حالت نوسانی نیز این دو زاویه مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به این که در حالت نوسانی فیزیک جریان دست‌خوش تغییر و فیلم خنک‌کننده تحت تاثیر نوسان قرار دارد، لازم است زاویه تزریق بهینه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای موثر بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای برای حالت نوسانی بررسی شود که در این مقاله بدان پرداخته می‌شود. مطالعات زیادی به‌منظور بررسی تاثیر پارامترهای عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای روی سطح صفحه تخت انجام شده است [16]. در تحقیق حاضر نیز هندسه تخت به‌منظور بررسی، مدل‌سازی شده است. در این مقاله اثر تغییر زاویه تزریق سیال خنک‌کننده روی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای نوسانی سینوسی و تعیین زاویه بهینه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- معادلات حاکم

معادلات پیوستگی و انتقال مومنوم همراه با معادلات بسته تنش رینولدز و نیز معادله انرژی برای دامنه محاسباتی حل می‌شوند [4].

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (2)$$

به‌طوری که مدل‌های ویسکوزیته ادی براساس نسبت تنش-کرنش، ترم تنش رینولدز را به‌صورت زیر در نظر می‌گیرد:

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

$$\rho U_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho \overline{u_i T} \right) \quad (4)$$

که ν_t ویسکوزیته ادی است که با حل یک گروه از معادلات انتقال توربولانس به دست می‌آید. به‌منظور مدل‌سازی آشفتگی، مدل انتقال تنش برشی $SST k - \omega$ مورد استفاده قرار گرفته که به‌وسیله منتر [17] بهبود داده شده است و یک تابع امتزاج را به کار می‌گیرد که معادله ω نزدیک دیواره را حفظ می‌کند، در حالی که به ε دور از دیواره جفت می‌شود [17].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \overline{G}_k - Y_k + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \overline{G}_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (6)$$

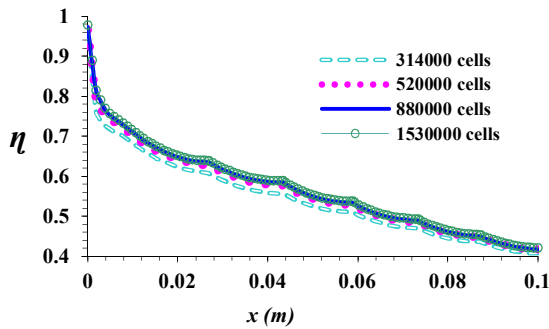
در این معادلات \overline{G}_k تولید انرژی جنبشی توربولانس به‌دلیل گرادیان‌های سرعت متوسط را ارایه می‌دهد. \overline{G}_ω تولید ω را بیان می‌کند. Γ_k, Γ_ω ضریب پخش k و ω را به‌ترتیب نشان می‌دهد که در ادامه محاسبه می‌شوند. Y_ω و Y_k اتلاف k و ω به‌دلیل توربولانس را ارایه می‌دهد. D_ω ترم دیفیوژن عرضی را بیان می‌کند. S_k و S_ω ترم‌های چشمه تعریف‌شده توسط کاربر هستند. جزئیات بیشتر مدل به‌وسیله منتر بیان شده است [17].

۳- هندسه، مش و مدل محاسباتی

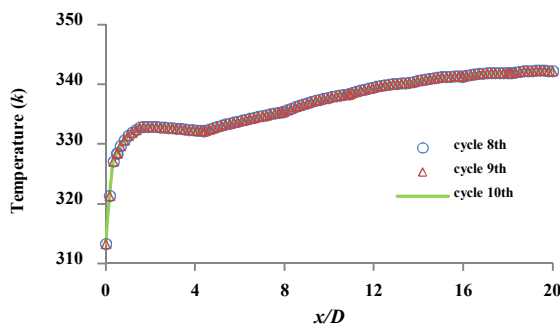
هندسه مساله شامل چهار سوراخ تزریق به قطر ۵ میلی‌متر، $\frac{L}{D} = 7$ و زوایای تزریق ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه بوده که به مجرای جریان اصلی متصل است. به‌منظور المان‌بندی هندسه از مش مربعی

نشان داد که اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای بالاتر در نرخ‌های دمشی کاهشی به دست می‌آید و اثر تغییر فرکانس نوسانی قابل صرف نظر است. مولدون و آچاریا [12] با استفاده از مدل شیبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS)، 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 به‌دلیل کاهش جهش در مقایسه با نمونه پایا در نسبت دمش ۱/۵ حاصل شد. گلدشتاین و استون [13] 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 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 نرخ‌های دمش بالا، زاویه دمش تندتر اثربخشی بهتری داشت. شرط لایه مرزی محلی، شدت جهش جت و قدرت برهم‌کنش ورتکس 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. روی دیواره محدب، تزریق در نسبت شار مومنوم ۰/۲۵، نسبت دانسیته بالا و زاویه تزریق کم بهترین اثربخشی را برای این فاصله‌بندی سوراخ فراهم کرد. لی و جانگ [14]، آثار نوسانات جریان توده‌ای روی خنک‌کاری لایه‌ای با سوراخ‌های زاویه مرکب را به‌صورت تجربی 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. نوسانات فشار استاتیکی به‌وسیله آرایه‌ای از شش تیغه با دریچه چرخان ایجاد می‌شد که در عرض محدوده خروجی مقطع تست تونل باد توسعه می‌یافت. فرکانس نوسان در ۳۶ هرتز ثابت بود، اما تغییرات در نرخ‌های دمش متوسط زمانی ۰/۵، ۱ و ۲، سه عدد استرومال خنک‌کننده مختلف ($St_c = \frac{2\pi fL}{U_c}$) ۱/۸، ۳/۶ و ۰/۹ را تولید می‌کرد. هنگامی که زاویه جهت‌گیری افزایش می‌یافت، ماده تزریق غلیظ به‌دلیل نوسانات نسبت به نمونه پایدار بیشتر در جهت جانبی منتشر می‌شد. با نوسانات اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای آدیاباتیک صرف نظر از زاویه جهت‌گیری کاهش یافت. لی و همکاران [5]، خنک‌کاری لایه‌ای سوراخ شکل‌داده‌شده را با اثر جریان عرضی انتهای دیواره به‌صورت تجربی و عددی بررسی کردند. زاویه تزریق برای بررسی ۳۰ درجه انتخاب و مطالعه عددی به‌منظور به‌دست‌آوردن اطلاعات دقیق ساختارهای گردابه‌ای انجام شد. یافته‌های آنها نشان داد که جریان عرضی، مکان نسبی جفت ورتکس تولیدشده در خروجی سوراخ تزریق را تغییر می‌دهد. کیم و کیم [15] شکل ورودی همگرا برای سوراخ‌های استوانه‌ای خنک‌کاری لایه‌ای را پیشنهاد دادند و از مدل $SST k - \omega$ ، برای مدل‌سازی توربولانس استفاده کردند. ماکزیمم مقدار اثربخشی متوسط خنک‌کاری لایه‌ای در زاویه ۴۰ درجه به دست آمد. که و انگ [8] خنک‌کاری لایه‌ای نوسانی روی پره توربین شامل پنج ردیف سوراخ خنک‌کاری لایه‌ای، سه ردیف در لبه حمله و دو ردیف دیگر در سمت فشار و مکش را به‌صورت عددی بررسی کردند. عملکرد اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در سه نسبت دمش و چهار فرکانس مختلف بررسی شد. در لبه حمله و سمت فشار، وقتی نسبت دمش یا فرکانس افزایش می‌یافت، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای دارای کاهش بود، اما در قسمت مکش روند برعکس بود.

برای مرز دیواره، شرط مرزی بدون لغزش و آدیاباتیک به کار گرفته شده است. شرط مرزی پروفیل سرعت نوسانی سینوسی به صورت کدنویسی UDF در نرم‌افزار فلوئنت انجام شده است. مدل‌ها و مقادیر پارامترهای به‌کاررفته در حل عددی در جدول ۱ آمده است.



نمودار (۱) اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای خط مرکزی برای چهار شبکه مختلف



نمودار (۲) توزیع دمای خط مرکزی جریان نوسانی سینوسی در سه تناوب متوالی

جدول (۱) مدل‌ها و مقادیر پارامترهای به‌کاررفته در حل عددی

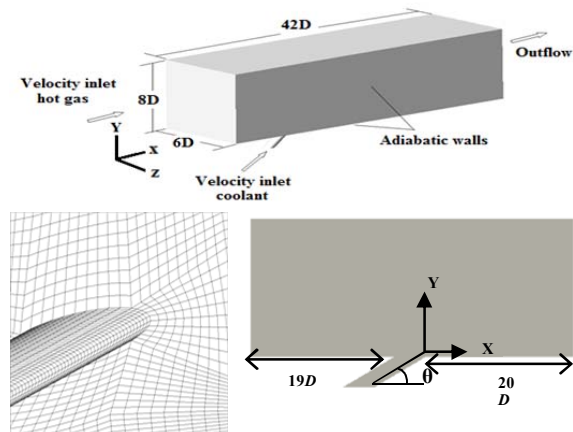
پارامترها و شرایط	روش‌ها، مدل و مقادیر
بُعد	سه‌بُعدی
حل‌کننده	براساس فشار
روش فرمول‌بندی	ضمنی
الگوریتم کوپلینگ سرعت فشار	سیمپل سی
مدل توربولانسی	$SST k - \omega$
گسسته‌سازی فشار	استاندارد، مرتبه دوم
گسسته‌سازی مومنتوم، توربولانس و انرژی	آپویند مرتبه دوم
زمان	ناپایا
جریان مورد بررسی	نوسانی سینوسی
تعداد گام زمانی در نظر گرفته شده برای یک دوره	۲۰ گام زمانی
تناوب در جریان نوسانی	
فرکانس (هرتز)	۲,۵۰,۵۰۰
نسبت دمش	۰/۵
شرط مرزی دیواره‌ها	آدیاباتیک

۴- تحلیل نتایج

یک دوره تناوب موج سینوسی به ۲۰ گام زمانی مساوی، تقسیم و متوسط پروفیل دما در هر گام زمانی محاسبه شده است. برای اثربخشی 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 سه‌برابر 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.

نمودار ۳، مقایسه مقادیر اثربخشی خط مرکزی خنک‌کاری شبیه‌سازی حاضر را با نتایج لی و کیم^[18]، کارتزوزو^[7]، کولتارد و

ساختر یافته استفاده شده است. شکل ۱، شبکه هندسه مساله را برای سوراخ با زاویه تزریق ۲۵ درجه نشان می‌دهد.



شکل (۱) هندسه مساله و مش ناحیه اطراف سوراخ تزریق

به‌منظور بررسی استقلال شبکه، چهار شبکه مختلف با تعداد ۳۱۴۰۰۰، ۵۲۰۰۰۰، ۸۸۰۰۰۰ و ۱۵۳۰۰۰۰ سلول محاسباتی در نظر گرفته شد. اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای خط مرکزی در حالت پایا برای چهار شبکه مذکور در نمودار ۱ نشان داده شده است. اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{T_{\infty} - T_{aw}}{T_{\infty} - T_c} \quad (7)$$

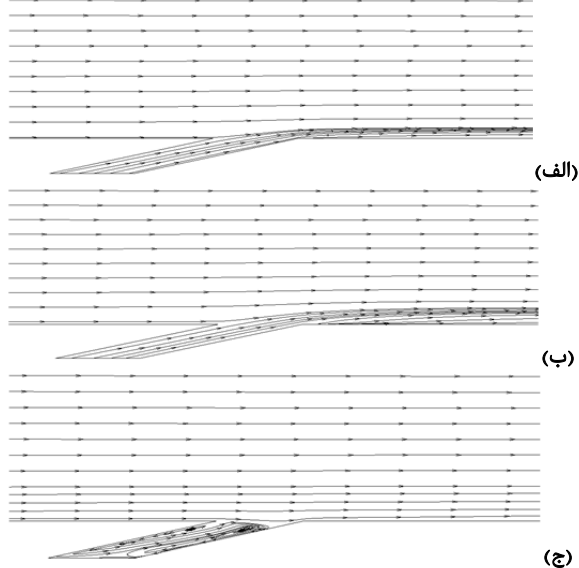
که در این رابطه، η اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای، T_{∞} دمای هوای جریان اصلی و T_{aw} دمای آدیاباتیک دیواره که از شبیه‌سازی یا اندازه‌گیری به دست می‌آید و T_c نیز دمای سیال تزریق است. همان طور که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود، تفاوت مقادیر اثربخشی برای هندسه‌های با تعداد سلول‌های محاسباتی ۸۸۰۰۰۰ و ۱۵۳۰۰۰۰ در فواصل کمتر از ۱٪ است. در نتیجه مش با تعداد سلول‌های ۸۸۰۰۰۰ برای تحلیل‌های بعدی استفاده شد.

با توجه به این که در مساله اصلی، جریان به‌صورت نوسانی و در نتیجه ناپایاست، لازم است استقلال از گام زمانی برای نتایج شبیه‌سازی انجام شود. برای مساله جریان نوسانی سینوسی، تعداد سیکل یا تناوب زمانی آن قدر ادامه یافت تا نتایج تحلیل برای یک تناوب با نتایج تناوب قبل از آن تفاوت نداشته باشد. نمودار ۲ توزیع دمای خط مرکزی را برای جریان نوسانی سینوسی فرکانس ۵۰ هرتز و زاویه تزریق ۳۰ درجه در نسبت دمش ۰/۵ نشان می‌دهد. تفاوت بین توزیع دمای سیکل هشتم و نهم کمتر از ۰/۰۱٪ بوده و بین سیکل نهم و دهم میزان تفاوت برابر صفر است.

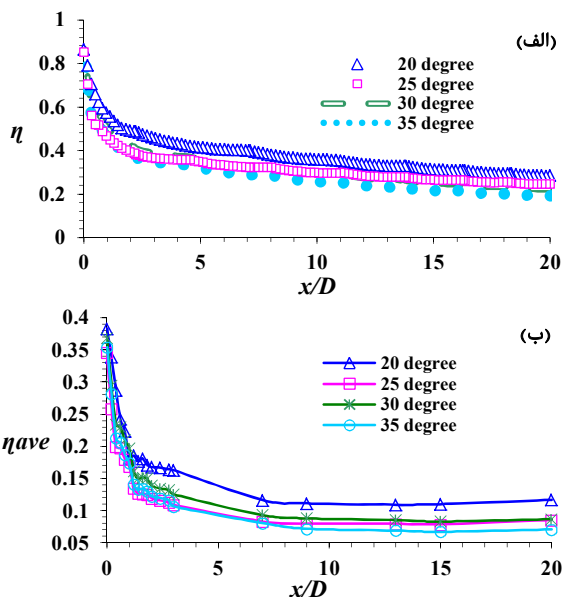
لازم به ذکر است که اولین نقطه شبکه در نزدیکی همه سطوح محدود به دیواره به‌منظور لحاظ نمودن خصوصیات فیزیک جریان و انتقال گرما در لایه مرزی، در $y^+ > 1$ کمتر از یک قرار گرفتند. معیار همگرایی براساس مقادیر باقیمانده ریشه متوسط مربع برای همه پارامترهای جریان به‌جز انرژی 1×10^{-6} در نظر گرفته شد. برای پارامتر انرژی این مقدار برابر 1×10^{-1} بود. 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 خنک‌کننده به‌صورت نوسانی سینوسی در نظر گرفته شد. جریان موج سینوسی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$u_{coolant} = u_a \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

دمای هوای خنک‌کننده برابر $303/15 K$ در نظر گرفته و شدت توربولانس برای جریان هوای اصلی و خنک‌کننده، ۳/۱۶٪ فرض شد.



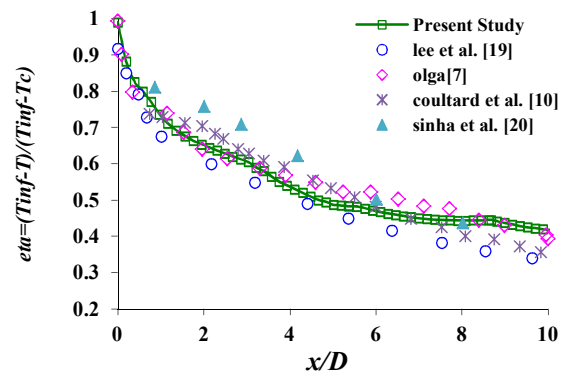
نمودار ۴) خطوط جریان برای جریان اصلی و سیال تزریق، الف) جریان پایا، ب) نیم‌سیکل اول جریان نوسانی، ج) نیم‌سیکل دوم جریان نوسانی



نمودار ۵) مقایسه اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای نوسانی در زوایای مختلف و فرکانس ۲هرتز، الف) خط مرکزی، ب) متوسط جهت جانبی

نمودار ۶، خطوط جریان در مقطع جانبی و تشکیل ورتکس‌های ناهمسان‌گرد را برای جریان در حالت پایا نشان می‌دهد. بیشترین تفاوت اثربخشی خط مرکزی در فرکانس ۲هرتز بین زاویه ۲۰ و ۳۵ درجه به دست می‌آید و برابر ۳۸/۲٪ بوده و این مقدار برای اثربخشی جانبی ۵۲/۷۵٪ است. نمودار ۷، توزیع اثربخشی را در ناحیه پایین‌دست سوراخ در گام‌های زمانی مختلف یک تناوب زمانی جریان تزریق موج سینوسی با فرکانس ۲هرتز نشان می‌دهد. همان طور که از نمودار ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، در ابتدای سیکل (t=0) جریان تزریق به دلیل تغییرات تدریجی از گام زمانی قبل روی سطح وجود دارد. در ادامه با افزایش دبی خنک‌کننده، سطح خنک‌تر می‌شود و با تشکیل لایه خنک‌کننده میزان اثربخشی در نیم‌سیکل ابتدایی به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. با کاهش دبی جریان در نیم‌سیکل دوم تناوب، دمای سطح شروع به افزایش می‌کند و اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای نیز کاهش می‌یابد و این

همکاران [10] و سینها و همکاران [19] برای حالت پایا نشان می‌دهد. همان طور 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 [19] ۱۰/۴٪، با نتایج تجربی کولتارد و همکاران [10] ۲/۷٪، با نتایج شبیه‌سازی عددی لی و کیم [18] ۳/۶٪ و با مقادیر شبیه‌سازی عددی کارتوزوو [7] ۹/۱٪ است.

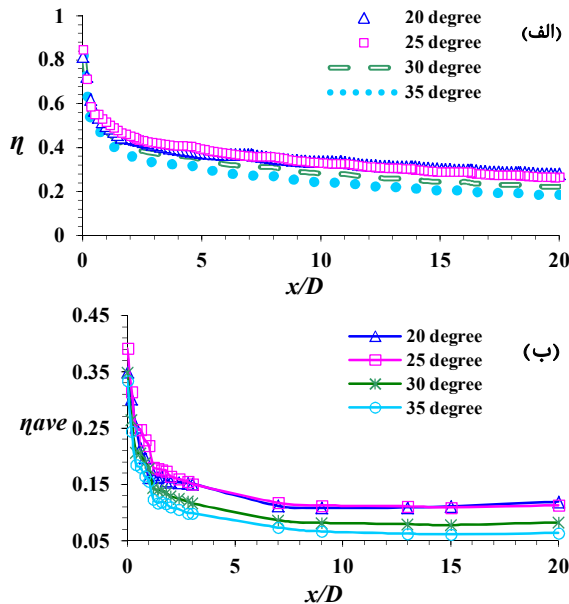


نمودار ۳) مقایسه اثربخشی خط مرکزی با نتایج مراجع

نمودار ۴- الف، خطوط جریان را برای جریان اصلی و سیال تزریق در حالت جریان پایا و نمودار ۴- ب و ج، این خطوط را در زمان $T/4$ و $3T/4$ ، سیکل برای جریان نوسانی سینوسی با فرکانس ۵۰هرتز و زاویه تزریق ۲۰ درجه نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، برای جریان پایا، جریان سیال تزریق به دیواره پایین‌دست چسبیده و فیلم خنک‌کننده به‌طور کامل سطح را پوشانده است. در حالت نوسانی، برای نیم‌سیکل اول که جریان تزریق سیال خنک‌کننده افزایش می‌یابد، جریان سیال خنک‌کننده در ابتدای پایین‌دست سوراخ به‌طور کامل به سطح چسبیده نیست و به داخل جریان اصلی نفوذ کرده است. در نیم‌سیکل دوم که جریان سیال تزریق کاهش می‌یابد، نه‌تنها سیال خنک‌کننده روی سطح دیواره فیلمی را تشکیل نمی‌دهد، بلکه همان طور که از نمودار ۴- ج مشخص است، مقداری از جریان اصلی به سوراخ تزریق نفوذ می‌کند. به همین دلیل اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در حالت نوسانی در بیشتر شرایط از حالت پایا کمتر است.

نمودار ۵- الف مقایسه اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای خط مرکزی و نمودار ۵- ب اثربخشی خنک‌کاری جانبی را برای فرکانس ۲هرتز در زوایای مختلف نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، در این فرکانس نیز تقریباً در تمام نواحی پایین‌دست سوراخ تزریق، اثربخشی در زاویه تزریق ۲۰ درجه نسبت به زوایای دیگر بیشتر است. بعد از آن تا فاصله تقریباً $8D$ ، بیشترین اثربخشی مربوط به زاویه ۳۰ درجه است. اما در فواصل دورتر از $8D$ ، زاویه ۲۵ درجه تزریق، اثربخشی بالاتری نسبت به دو زاویه دیگر دارد. علت این 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. ثرو و همکاران [20] تفاوت محل تشکیل جفت ورتکس ناهمسان‌گرد را برای جریان پایا در پایین‌دست لبه حمله به‌صورت عددی و با سه مدل مختلف آشفتگی بررسی کردند که مدل $k-\omega$ SST نتیجه قابل قبولی داشت.

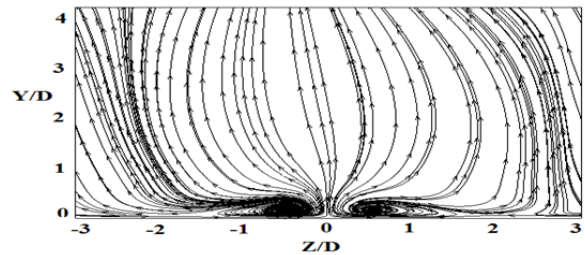
نمودار ۹- الف مقایسه اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای خط مرکزی و نمودار ۹- ب اثربخشی خنک‌کاری جانبی را برای فرکانس ۵۰ هرتز در زوایای مختلف نشان می‌دهد. در این حالت تا فواصل تقریباً برابر ۱۱D، زاویه تزریق ۲۵ درجه بیشترین اثربخشی را دارد، اما در فواصل دورتر، میزان اثربخشی برای زاویه ۲۰ درجه از بقیه زوایا بیشتر است. در این حالت تفاوت مقادیر اثربخشی زوایای تزریق مختلف نسبت به فرکانس ۲ هرتز کمتر است. در این فرکانس متوسط اثربخشی خط مرکزی برای زاویه ۲۵ درجه نسبت به بقیه زوایا بیشتر 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. با توجه به ناحیه تعریف‌شده برای محاسبه اثربخشی جانبی، مقادیر اثربخشی جانبی در تمام فرکانس‌ها از اثربخشی خط مرکزی کمتر است. بیشترین تفاوت اثربخشی خط مرکزی در فرکانس ۵۰ هرتز بین زاویه ۲۵ و ۳۵ درجه به دست می‌آید و برابر ۲۴/۹٪ بوده و این مقدار برای اثربخشی جانبی ۴۶/۲٪ است.



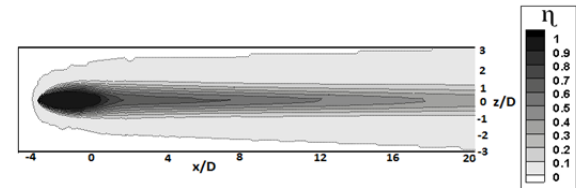
نمودار ۹) مقایسه اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای نوسانی در زوایای مختلف و فرکانس ۵۰ هرتز، الف) خط مرکزی، ب) متوسط جهت جانبی

نمودار ۱۰، توزیع دمای جهت جانبی را در فواصل مختلف پایین‌دست سوراخ تزریق برای اواسط نیم‌سیکل اول تناوب و برای فرکانس ۵۰ هرتز و زاویه تزریق ۲۰ درجه نشان می‌دهد. به‌منظور محاسبه اثربخشی جانبی، توزیع دمای هر یک از خطوط نشان‌داده‌شده در نمودار، متوسط‌گیری شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با فاصله‌گرفتن از لبه سوراخ تزریق، دما شروع به افزایش می‌نماید و لذا اثربخشی 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 است 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.

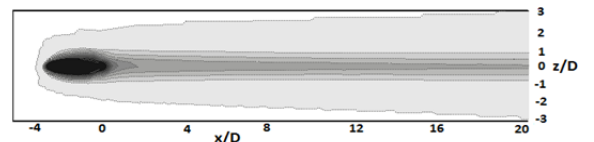
نمودار ۱۱، توزیع اثربخشی را در ناحیه پایین‌دست سوراخ در گام‌های زمانی مختلف یک تناوب زمانی جریان تزریق موج سینوسی با فرکانس ۵۰ هرتز نشان می‌دهد. در این حالت به دلیل



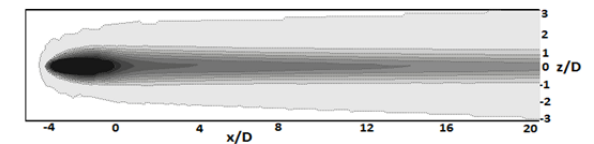
نمودار ۶) خطوط جریان در مقطع جانبی و تشکیل ورتکس‌های ناهمسانگرد جریان پایا



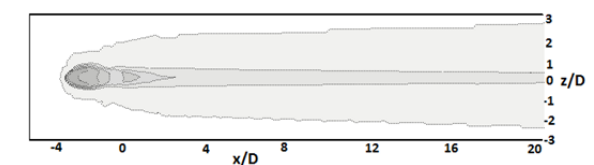
نمودار ۷) توزیع اثربخشی در ناحیه پایین‌دست سوراخ در گام‌های زمانی مختلف یک تناوب زمانی فرکانس ۲ هرتز، الف) $t=0$ ، ب) $t=T/4$ ، ج) $t=2T/4$ ، د) $t=3T/4$ ، ر) $t=T$



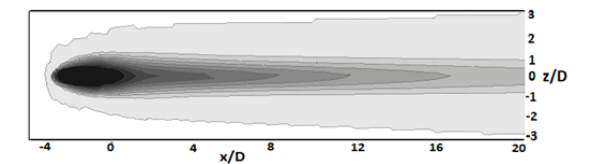
نمودار ۷) توزیع اثربخشی در ناحیه پایین‌دست سوراخ در گام‌های زمانی مختلف یک تناوب زمانی فرکانس ۲ هرتز، الف) $t=0$ ، ب) $t=T/4$ ، ج) $t=2T/4$ ، د) $t=3T/4$ ، ر) $t=T$



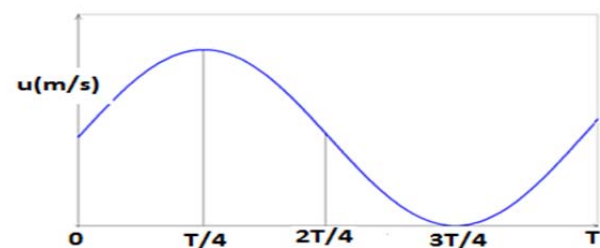
نمودار ۷) توزیع اثربخشی در ناحیه پایین‌دست سوراخ در گام‌های زمانی مختلف یک تناوب زمانی فرکانس ۲ هرتز، الف) $t=0$ ، ب) $t=T/4$ ، ج) $t=2T/4$ ، د) $t=3T/4$ ، ر) $t=T$



نمودار ۷) توزیع اثربخشی در ناحیه پایین‌دست سوراخ در گام‌های زمانی مختلف یک تناوب زمانی فرکانس ۲ هرتز، الف) $t=0$ ، ب) $t=T/4$ ، ج) $t=2T/4$ ، د) $t=3T/4$ ، ر) $t=T$

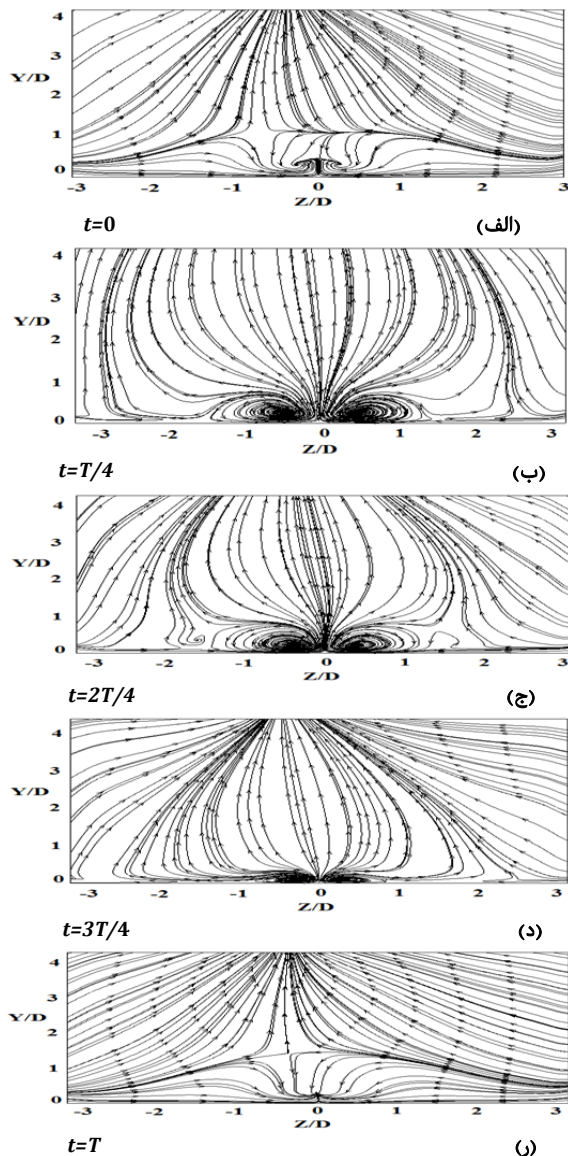


نمودار ۷) توزیع اثربخشی در ناحیه پایین‌دست سوراخ در گام‌های زمانی مختلف یک تناوب زمانی فرکانس ۲ هرتز، الف) $t=0$ ، ب) $t=T/4$ ، ج) $t=2T/4$ ، د) $t=3T/4$ ، ر) $t=T$



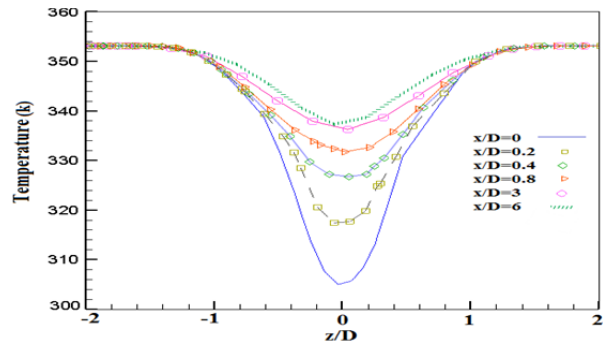
نمودار ۸) یک سیکل پروفیل سرعت نوسانی موج سینوسی

نمودار ۱۲، تشکیل و تغییر اندازه جفت ورتکس ناهمسان‌گرد را در طول مدت‌زمان یک تناوب جریان تزریق نوسانی نشان می‌دهد. در ابتدای سیکل، جفت ورتکس به تدریج در حال شکل‌گرفتن است. با افزایش سرعت جریان سیال تزریق، اندازه جفت ورتکس ناهمسان‌گرد نیز بزرگ‌تر می‌شود تا این که در نیم‌سیکل دوم با کاهش دبی سیال تزریق به تدریج اندازه آن کوچک و در انتهای سیکل تقریباً حذف می‌شود. در طول یک سیکل، ابتدا با افزایش تدریجی سرعت جریان سیال تزریق، جریان‌های ثانویه براساس تئوری کلونین-هلمهولتز تشکیل می‌شود. در ادامه با افزایش دبی جریان سیال خنک‌کننده، اندازه جفت ورتکس ناهمسان‌گرد نیز افزایش می‌یابد. در نیم‌سیکل دوم با کاهش دبی سیال تزریق به تدریج اندازه جفت ورتکس ناهمسان‌گرد کوچک و کوچک‌تر می‌شود، از قدرت آن کاسته می‌شود و در انتهای سیکل، جفت ورتکس به کوچک‌ترین اندازه خود می‌رسد. با تغییر اندازه و قدرت جریان‌های ثانویه، میزان اثربخشی خط مرکزی و متوسط جانبی نیز به صورت لحظه‌ای تغییر می‌نماید. توضیحات فوق برای دو فرکانس ۲ و ۵۰۰ هرتز نیز صادق است.

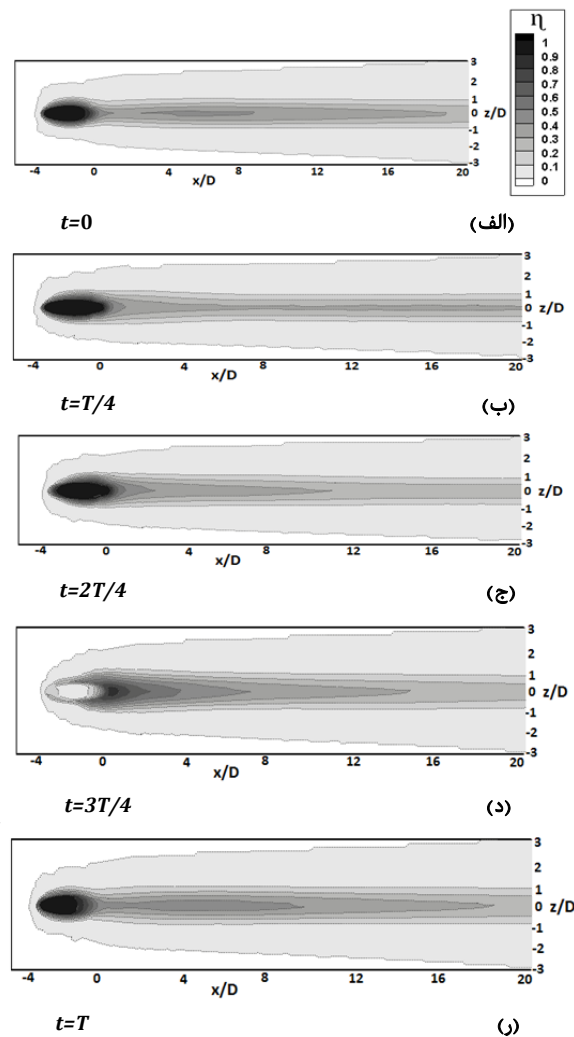


نمودار ۱۲) تشکیل و تغییر اندازه جفت ورتکس ناهمسان‌گرد در طول یک تناوب جریان تزریق نوسانی، الف) $t=0$ ، ب) $t=T/4$ ، ج) $t=2T/4$ ، د) $t=3T/4$ ، ر) $t=T$

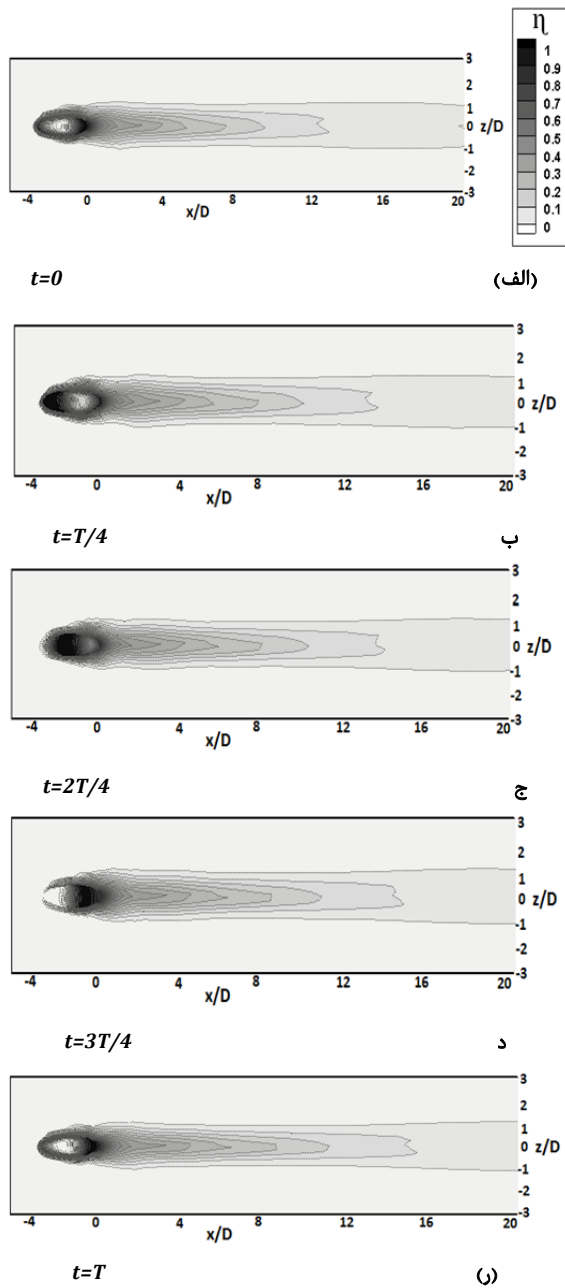
این که فاصله زمانی کاهش و افزایش جریان نسبت به فرکانس ۲ هرتز کمتر است، لذا جریان هوای خنک‌کننده به‌جامانده از سیکل قبل هنوز روی سطح وجود دارد و در پایین‌دست سوراخ تزریق، اثربخشی خنک‌کاری بیشتر است. در یک‌چهارم اول سیکل، میزان اثربخشی به دلیل افزایش دبی سیال تزریق خنک‌کننده افزایش می‌یابد. در نیم‌سیکل میانی با کاهش سرعت سیال خنک‌کننده، اثربخشی شروع به کاهش می‌نماید ($t=T/4, 2T/4$). سپس در ادامه در یک‌چهارم پایانی سیکل با افزایش سرعت جریان خنک‌کننده، میزان اثربخشی به تدریج افزایش می‌یابد.



نمودار ۱۰) توزیع دمای جهت جانبی در فواصل مختلف پایین‌دست سوراخ تزریق



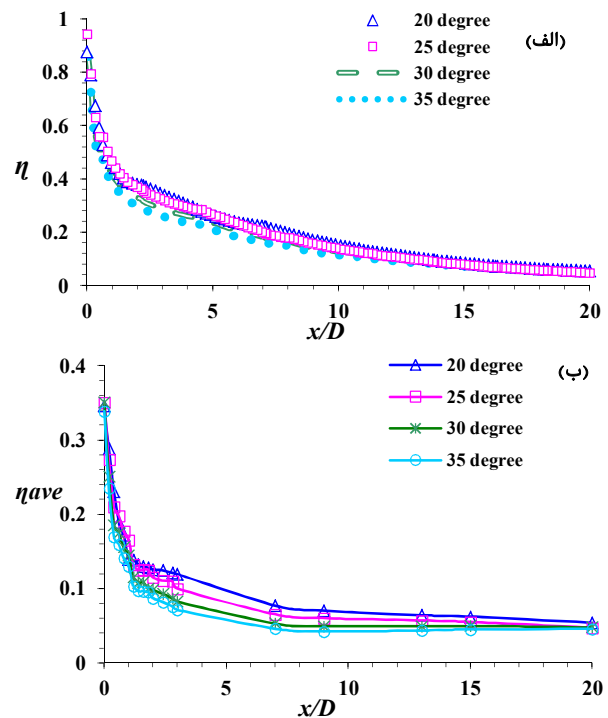
نمودار ۱۱) توزیع اثربخشی در ناحیه پایین دست سوراخ در گام‌های زمانی مختلف یک تناوب زمانی فرکانس ۵۰۰ هرتز، الف) $t=0$ ، ب) $t=T/4$ ، ج) $t=T/4$ ، د) $t=2T/4$ ، ر) $t=T$



نمودار ۱۴) توزیع اثربخشی در ناحیه پایین دست سوراخ در گام‌های زمانی مختلف یک تناوب زمانی فرکانس ۵۰۰هرتز، الف) $t=0$ ، ب) $t=T/4$ ، ج) $t=2T/4$ ، د) $t=3T/4$ ، و) $t=T$

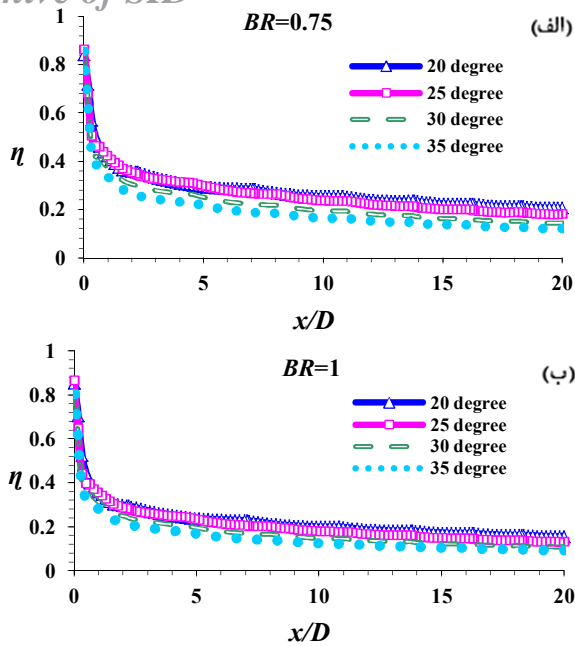
بررسی اثر نسبت دمش: برای فرکانس ۵۰۰هرتز، تحلیل‌ها برای نسبت دمش ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ انجام شد. نمودارهای ۱۵، اثربخشی خط مرکزی را در نسبت‌های دمش مختلف و برای زوایای سوراخ ذکر شده در بالا نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، در همه زوایای تزریق، نسبت دمش ۰/۵ بیشترین اثربخشی را نسبت به دو نسبت دمش دیگر دارد. این تفاوت با فاصله‌گرفتن از لبه سوراخ تزریق سیال خنک‌کننده افزایش می‌یابد. این تفاوت با فاصله‌گرفتن 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 می‌شود و کاهش مومنتوم سیال

نمودار ۱۳- الف مقایسه اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای خط مرکزی و نمودار ۱۳- ب اثربخشی خنک‌کاری جانبی را برای فرکانس ۵۰۰هرتز 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 ۵۰هرتز در فواصل نزدیک به سوراخ بیشتر بوده، اما در فواصل دورتر نسبت به دو فرکانس دیگر میزان اثربخشی کمتر است. 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 مقدار اثربخشی خط مرکزی بلافاصله بعد از سوراخ تزریق تا فاصله $2D$ برای زاویه ۲۵درجه نسبت به زوایای دیگر بیشتر است. بعد از آن از فاصله $2D$ تا $4D$ و همچنین فاصله $6D$ تا $11D$ ، میزان اثربخشی خط مرکزی برای زاویه ۲۰درجه نسبت به زوایای دیگر بیشتر است. مقدار اثربخشی در فواصل دیگر برای زاویه تزریق ۲۰ و ۲۵درجه تقریباً برابر و نسبت به دو زاویه دیگر اندکی بیشتر است. در این حالت متوسط اثربخشی خط مرکزی برای دو زاویه ۲۰ و ۲۵درجه به هم نزدیک و نسبت به دو زاویه دیگر بیشتر است. بیشترین تفاوت اثربخشی خط مرکزی در فرکانس ۵۰۰هرتز نیز بین زاویه ۲۰ و ۳۵درجه به دست می‌آید و برابر ۳۱/۱٪ بوده و این مقدار برای اثربخشی جانبی ۶۷/۷٪ است.



نمودار ۱۳) مقایسه اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای نوسانی در زوایای مختلف و فرکانس ۵۰۰هرتز، الف) خط مرکزی، ب) متوسط جهت جانبی

نمودار ۱۴، توزیع اثربخشی را در ناحیه پایین دست سوراخ در گام‌های زمانی مختلف یک تناوب زمانی جریان تزریق موج سینوسی با فرکانس ۵۰۰هرتز نشان می‌دهد. در این حالت به دلیل این که فاصله زمانی کاهش و افزایش جریان بسیار کم است، کاهش و افزایش دمای سطح نیز به تدریج صورت می‌گیرد و لذا اثربخشی نیز دارای تغییرات کمتری در یک تناوب است. در فرکانس ۵۰۰هرتز 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.



نمودار ۱۶) توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای نوسانی خط مرکزی در نسبت دمش ۰/۷۵ و ۱ در زوایای مختلف و فرکانس ۵۰ هرتز، الف) نسبت دمش ۰/۷۵، ب) نسبت دمش ۱

۵- نتیجه‌گیری

اثر تغییر زاویه تزریق بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای با نوسان موج سینوسی در فرکانس‌ها و نسبت دمش‌های مختلف بررسی شد. نتایج عمده به‌دست آمده به‌صورت زیر است:

۱- نتایج نشان داد زاویه تزریق بین ۲۰ تا ۲۵ درجه در سه فرکانس مورد بررسی بیشترین اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای خط مرکزی و جانبی را به‌خصوص در نواحی دور از لبه سوراخ تزریق داشت. در فواصل نزدیک پایین‌دست سوراخ تزریق در فرکانس‌های مختلف، زوایای ۳۰ و ۳۵ درجه بیشترین اثربخشی خط مرکزی و جانبی را داشت.

۲- بیشترین اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در فواصل ابتدایی پایین‌دست سوراخ در فرکانس ۵۰۰ هرتز به دست آمد.

۳- در فواصل دوردست، فرکانس پایین‌تر (۲ هرتز) بیشترین اثربخشی را دارد. با افزایش فرکانس، تفاوت مقدار اثربخشی خنک‌کاری خط مرکزی و جانبی در زوایای مختلف کاهش می‌یابد.

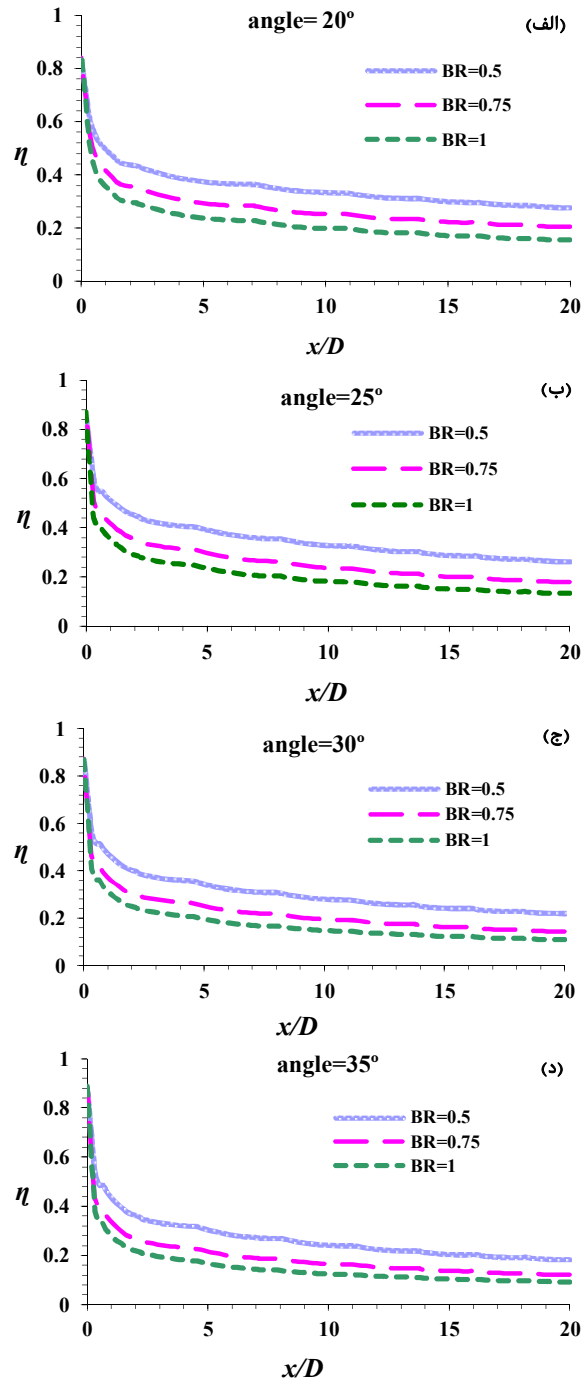
۴- با افزایش فرکانس، فاصله زمانی قطع و وصل جریان کاهش می‌یابد و در نتیجه اثربخشی لحظه‌ای نیز دارای تغییرات کندتری نسبت به فرکانس‌های پایین‌تر است.

۵- با افزایش فرکانس، شیب کاهش اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای افزایش می‌یابد. نسبت دمش ۰/۵ نسبت به نسبت دمش ۰/۷۵ و ۱ در تمامی زوایا و فرکانس‌ها بیشترین اثربخشی را داشت.

۶- به‌طور کلی زاویه تزریق سیال خنک‌کننده بین ۲۰ تا ۲۵ درجه و نسبت دمش ۰/۵ به‌عنوان نسبت دمش بهینه در حالت جریان نوسانی سینوسی به دست آمد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت دانشکده مهندسی مکانیک و همچنین مرکز محاسبات سریع دانشگاه سمنان در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی نمایند.
تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. همچنین محتویات علمی و ادبی مقاله از فعالیت

خنک‌کاری پوشش لایه خنک‌کننده در بخش جانبی نیز زیاد می‌شود.



نمودار ۱۷) اثربخشی خط مرکزی در نسبت‌های دمش مختلف، الف) ۲۰ درجه، ب) ۲۵ درجه، ج) ۳۰ درجه، د) ۳۵ درجه

نمودارهای ۱۶، 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 می‌شود و فیلم خنک‌کننده به‌طور کامل روی سطح را نمی‌پوشاند و همان‌طور که مشاهده می‌شود بلافاصله در پایین‌دست سوراخ تزریق، اثربخشی به‌سرعت کاهش می‌یابد. همچنین اثر تغییر زاویه روی اثربخشی خط مرکزی با افزایش نسبت دمش کاهش می‌یابد.

- blade. International Journal of Thermal Sciences. 2018;125:248-255.
- 5- Li Y, Zhang Y, Su X, Yuan X. Experimental and numerical investigations of shaped hole film cooling with the influence of endwall cross flow. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018;120:42-55.
- 6- Hofmann HM, Movileanu DL, Kind M, Martin H. Influence of a pulsation on heat transfer and flow structure in submerged impinging jets. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2007;50(17-18):3638-3648.
- 7- Kartuzova OV. A computational study for the utilization of jet pulsations in gas turbine film cooling and flow control [Dissertation]. Cleveland: Cleveland State University; 2010.
- 8- Ke Z, Wang J. Numerical investigations of pulsed film cooling on an entire turbine vane. Applied Thermal Engineering. 2015;87:117-126.
- 9- Bazdidi Tehrani F, Mahmoodi AA. Finite element analysis of flowfield in the single hole film cooling technique. Annals of the New York Academy of Sciences. 2001;934:393-400.
- 10- Coulthard SM, Volino RJ, Flack KA. Effect of jet pulsing on film cooling - Part I: Effectiveness and flow-field temperature results. Journal of Turbomachinery. 2006;129(2):232-246.
- 11- Ekkad SV, Ou S, Rivir RB. Effect of jet pulsation and duty cycle on film cooling from a single jet on a leading edge model. Journal of Turbomachinery. 2006;128(3):564-571.
- 12- Muldoon F, Acharya S. DNS study of pulsed film cooling for enhanced cooling effectiveness. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009;52(13-14):3118-3127.
- 13- Goldstein RJ, Stone LD. Row-of-holes film cooling of curved walls at low injection angles. Journal of Turbomachinery. 1997;119(3):574-579.
- 14- Lee JS, Jung IS. Effect of bulk flow pulsations on film cooling with compound angle holes. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2002;45(1):113-123.
- 15- Kim JH, Kim KY. Film-cooling performance of converged-inlet hole shapes. International Journal of Thermal Sciences. 2018;124:196-211.
- 16- Zeng L, Chen P, Li X, Ren J, Jiang H. Influence of simplifications of blade in gas turbine on film cooling performance. Applied Thermal Engineering. 2018;128:877-886.
- 17- Menter FR. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal. 1994;32(8):1598-1605.
- 18- Lee KD, Kim KY. Surrogate based optimization of a laidback fan-shaped hole for film-cooling. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2011;32(1):226-238.
- 19- Sinha AK, Bogard DG, Crawford ME. Film-cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio. Journal of Turbomachinery. 1991;113(3):442-449.
- 20- Xu G, Zhu J, Tao Z. Application of the TLVA model for predicting film cooling under rotating frames. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010;53(15-16):3013-3022.

علمی خود نویسنندگان به دست آمده و صحت و اعتبار نتایج و متن مقاله برعهده نویسندگان مقاله است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچگونه تعارض منافی با رساله و طرح پژوهشی ندارد.

سهم نویسندگان: سیدمهدی حسینی-بغدادآبادی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۶۰٪)؛ سعادت زیرک (نویسنده دوم)، روش شناس/پژوهشگر کمکی (۲۰٪)؛ مهرا رجبی زرگرآبادی (نویسنده سوم)، روش شناس/پژوهشگر کمکی (۲۰٪)

منابع مالی: منابع مالی تحقیق از طریق دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان تامین شده است.

۶- پی نوشت

علایم	شرح
علایم اختصاری	
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه (j/kg.k)
D	قطر سوراخ (m)
k	ضریب رسانش هوا
L	طول سوراخ (m)
P	فشار
t	زمان (s)
T	دما (K)
u	سرعت (ms^{-1})
x	فاصله از لبه سوراخ تزریق در راستای جریان اصلی (m)
y	مختصات نرمال بر دیوار (m)
z	مختصات جانبی (m)
علایم یونانی	
η	اثربخشی
\mathcal{O}	ویسکوزیته سینماتیک (m^2/s)
ϕ	فاز
ρ	دانشیته (kg/m^3)
ω	فرکانس
δ	دلتای کروئکر
∞	جریان اصلی
زیرنویس ها	
a	دامنه
aw	آدیاباتیک دیواره
C	سیال تزریق
$coolant$	خنک کننده

منابع

- 1- Yahya SM. Turbines compressors and fans. New delhi: McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited; 2010. pp. 430-433.
- 2- Singh P, Shukla OP. Heat transfer analysis of gas turbine rotor blade cooling through staggered holes using CFD. International Journal of Engineering Research and General Science. 2016;4(2):538-545.
- 3- Gao W, Yue Z, Li L, Zhao Z, Tong F. Numerical simulation on film cooling with compound angle of blade leading edge model for gas turbine. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017;115(Pt A):839-855.
- 4- Moeini AH, Rajabi Zargarabadi M. Genetic algorithm optimization of film cooling effectiveness over a rotating