



Experimental and Numerical Investigation of Square Wave Pulsed Film Cooling Performance on a Flat Plate

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. Experimental and Numerical Investigation of Square Wave Pulsed Film Cooling Performance on a Flat Plate. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(2):329-340.

ABSTRACT

In this research, the effect of square wave pulsating air on temperature distribution and film cooling effectiveness of flat plate at different frequencies and blowing ratios is experimentally and numerically investigated. Hot air is injected through the holes at an angle of 25 degrees. Square wave pulsed flow is generated at four frequencies of 2, 10, 50, 100 Hz, and five blowing ratios of 0.5, 1, 1.5, 2.4 and 3. To study the film cooling, Navier-Stokes equations are solved by a Reynolds average method. The SST k- ω model was used for turbulent modeling. The results showed that the film cooling effectiveness decreases with increasing of blowing ratio along with an increase in its rate of changes. The difference of centerline film cooling effectiveness between the numerical and experimental values decreases with increasing distance from the edge of injection hole. In general, pulsating decreases film cooling effectiveness in comparison with steady-state. The lift-off of the local jet increases under pulsation. In the pulsating state, the overall film cooling effectiveness decreases by increasing the blowing ratio at a constant frequency. On the other hand, increasing the frequency increases the overall efficiency of film cooling. The maximum averaged centerline effectiveness was obtained at a frequency of 100 Hz and a blowing ratio of 0.5 and the minimum value was obtained for a frequency of 2 Hz and a blowing ratio of 3. For pulsed flow, the maximum and minimum differences of the averaged centerline film cooling effectiveness between experimental and numerical results were 25.55%

Keywords Film Cooling; Pulsed Square Wave; Experimental Test; Frequency; SST k- ω Model

CITATION LINKS

[1] Turbine blade film cooling using PSP technique [2] Enhanced film cooling performance of a row of cylindrical holes embedded in the saw tooth slot [3] Pulsed film cooling on a turbine blade leading edge [4] Computational study of film cooling and flowfields on a stepped vane endwall with a row of cylindrical hole and interrupted slot injections [5] Vortical structure of a 45 degree inclined pulsed jet in crossflow [6] The jet engine [7] Experimental investigations of SYCEE film cooling performance on a plate and a tested vane of an F-class gas turbine [8] Effects of side hole position and blowing ratio on sister hole film cooling performance in a flat plate [9] Effect of pulsating circular hot air jet frequencies on local and average nusselt number [10] The effect of freestream turbulence on film cooling adiabatic effectiveness [11] The effect of injection hole length on film cooling with bulk flow pulsations [12] Bulk flow pulsations and film cooling-II. Flow structure and film effectiveness [13] Effects of bulk flow pulsations on film cooling with compound angle holes: Heat transfer coefficient ratio and heat flux ratio [14] Effect of pulsed film cooling on leading edge film effectiveness [15] Numerical analysis of cooling of vanes of the first row of a turbine of a specific engine with film cooling and thermal shield coating and its numerical optimization [16] Theoretical analysis of film cooling [17] Estimation of the turbulent Prandtl number in film cooling flow [18] Numerical simulation of continuous and pulsed film cooling on a turbine-blade leading-edge model, including surface conductance [19] Numerical simulation of the sinusoidal wave pulsed film cooling effectiveness due to the changing cooling injection parameters [20] Optimization of the Coanda bump to improve the film cooling effectiveness of an inclined slot [21] Optimized inlet geometry of a laidback fan-shaped film cooling hole-Experimental study of film cooling performance [22] Effect of jet pulsing on film cooling-part I: Effectiveness and flow-field temperature results

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: January 31, 2019

Accepted: May 19, 2019

ePublished: February 01, 2020

بررسی تجربی و عددی عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای نوسانی موج مربعی روی صفحه تخت

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

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

چکیده

در این تحقیق اثر هوای تزریق نوسانی موج مربعی بر توزیع دما و اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای صفحه تخت در فرکانس‌ها و نسبت‌های دمش مختلف به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. هوای گرم از طریق سوراخ‌های با زاویه ۲۵ درجه تزریق می‌شود. جریان نوسانی موج مربعی در چهار فرکانس ۲، ۱۰ و ۵۰ و ۱۰۰ هرتز و پنج نسبت دمش ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲/۴ و ۳ ایجاد می‌شود. معادلات ناویر-استوکس به روش میان‌گیری رینولدز برای بررسی خنک‌کاری لایه‌ای حل شدند. برای در نظر گرفتن اثرات توربولانس از مدل انتقال تنش برشی کی-امگا استفاده شد. نتایج نشان داد که در حالت پایا با افزایش نسبت دمش اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای کاهش و شیب آن افزایش می‌یابد. اختلاف مقادیر اثربخشی خط مرکزی بین حالت عددی و تجربی با فاصله گرفتن از لبه سوراخ تزریق کاهش می‌یابد. در حالت نوسانی در مقایسه با حالت پایا به طور کلی مقدار اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای کاهش می‌یابد. بلندشدن محلی جت تحت تاثیر نوسان افزایش می‌یابد. در حالت نوسانی نیز با افزایش نسبت دمش در یک فرکانس ثابت به طور کلی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای کاهش می‌یابد. با افزایش فرکانس به طور کلی مقدار اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار متوسط اثربخشی خط مرکزی در فرکانس ۱۰۰ هرتز و نسبت دمش ۰/۵ و کمترین مقدار آن در فرکانس ۲ هرتز و نسبت دمش ۳ به دست آمد. در حالت نوسانی بیشترین اختلاف متوسط اثربخشی خط مرکزی بین نتایج تجربی و عددی برابر ۲۵/۵۵٪ و کمترین اختلاف برابر ۰/۷۱۷٪ بود.

کلیدواژه‌ها: خنک‌کاری لایه‌ای، نوسان موج مربعی، آزمون تجربی، فرکانس، مدل توربولانسی $SST k - \omega$

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۲۹

*نویسنده مسئول: z_zirak@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

تکنولوژی‌های خنک‌کاری پیشرفته شامل خنک‌کاری داخلی و خارجی پره است. هوای ثانویه خنک‌کننده از یک مرحله کمپرسور توربین گرفته می‌شود. یکی از روش‌های خنک‌کاری خارجی پره توربین به‌وسیله خنک‌کاری لایه‌ای و ایجاد پوشش مانع انتقال حرارت به‌دست می‌آید [1]. خنک‌کاری لایه‌ای یکی از تکنیک‌های مهم و کلیدی خنک‌کاری است. هوای خنک‌کننده از طریق سوراخ‌های گسسته در داخل پره توربین جریان می‌یابد و به جریان اصلی تزریق می‌شود تا فیلم خنک‌کننده ایجاد شود و سطح بیرونی پره را از جریان گاز داغ محافظت کند. اثربخشی لایه‌ای بیشتر هدف اصلی

بررسی خنک‌کاری لایه‌ای است [2]. خنک‌کاری اجزای توربین یک فرآیند ترمودینامیکی گران است. هوا از مرحله کمپرسور خارج می‌شود و در میان کانال‌های مارپیچ در میان اجزای مسیر گاز داغ، قبل از تزریق به داخل سوراخ‌های خنک‌کننده، مسپرده می‌شود. سوراخ‌های خنک‌کننده برای فراهم‌کردن پوشش لایه‌ای جهت حفاظت سطوح از گاز داغ جریان آزاد ایجاد می‌شوند. ورود خنک‌کننده به توربین دمای حجمی کل سیال کاری را کاهش می‌دهد. هدف اصلی این است که اجزا خنک شوند و از اختلاط سیال خنک‌کننده با جریان آزاد اجتناب شود. یکی از چالش‌های مهندسی استفاده از خنک‌کننده تا حد ممکن کم و به‌کارگیری آن در بخش توربین است [3]. جهت دستیابی به اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای بالا، طراحان نیاز به فهم برهم‌کنش بین تزریق خنک‌کننده و جریان ثانویه در شرایط مختلف دارند [4].

یک روش بهبود جت‌های معمولی در جریان عرضی که به نظر می‌رسد پتانسیل خوبی برای توسعه کنترل با امکان تزریق جریان جرمی کمتر داشته باشد، استفاده از جت‌های پالسی در جریان عرضی است. البته ساختار اساسی جریان و مشخصه‌های وابسته به زمان در جریان نوسانی هنوز ناشناخته است [5]. یکی از مشکلات خنک‌کاری لایه‌ای این است که تزریق هوای سردتر به جریان راندمان توربین را کاهش می‌دهد. همچنین افت راندمان به‌وسیله افزایش جریان خنک‌کاری بیشتر نیز می‌شود [6]. البته افت راندمان از طریق افزایش اثربخشی کلی ناشی از افزایش دمای توربین جبران می‌شود.

مطالعات زیادی روی صفحه تخت جهت بررسی پارامترهای موثر بر عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای انجام شده است. هان و همکاران [7] اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای بر صفحه تخت را با استفاده از رنگ حساس به فشار اندازه‌گیری کردند. آنها دریافتند متوسط اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای با افزایش نسبت دمش کاهش می‌یابد.

وو و همکاران [8] اثر مکان سوراخ جانبی و نسبت دمش بر خنک‌کاری لایه‌ای سوراخ تزریق صفحه تخت را بررسی کردند. آنها دریافتند سوراخ‌های کناری می‌تواند قدرت جفت ورتکس ناهمسان‌گرد سوراخ اصلی را کاهش داده و برخاستگی خنک‌کننده را کاهش دهد. حدود ۲۰ تا ۲۵٪ هوای کمپرسور برای خنک‌کاری موتورهای توربین در عملکرد بالا استفاده می‌شود. بازده موتور بالاتر با مینیمم‌سازی جریان جرمی خنک‌کننده با اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای مشابه یا بالاتر می‌تواند حاصل شود. مطالعات تجربی نشان داد که نوسان جریان خنک‌کننده ممکن است به بهبود خنک‌کاری لایه‌ای کمک کند درحالی‌که باعث کاهش نرخ جریان خنک‌کننده شود [9].

می‌هیو و همکاران [10] عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای صفحه تخت در حضور توربولانس کم و زیاد جریان آزاد را با استفاده از دمانگاری کریستالی مایع مورد بررسی قرار دادند. در نسبت دمش کم، توربولانس جریان آزاد به‌وضوح سطح پوشش هوای خنک‌کاری را به دلیل افزایش اختلاط با جریان اصلی کاهش می‌دهد. در نسبت

توانایی قابل قبولی در پیش‌بینی پارامترهای موثر در خنک‌کاری لایه‌ای دارند.

استنجر و همکاران^[18] اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای لبه حمله پره توربین را به‌صورت عددی در حالت سه‌بعدی بررسی کردند. شبیه‌سازی‌ها برای نسبت‌های دمش از ۷۵٪ تا ۲ انجام شدند. توربولانس با استفاده از مدل انتقال تنش برشی $SST k - \omega$ شبیه‌سازی شد. نتایج برای دو نوع شرایط دیواره به‌دست آمد که یکی دیواره آدیاباتیک و دیگری دیواره رسانا بود. دیواره آدیاباتیک اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای را در ناحیه دور از پایین‌دست برای نسبت‌های دمش کم، بیشتر پیش‌بینی می‌کرد.

همان‌طور که پیشینه محققان نشان می‌دهد، بررسی اثر نوسان هوای تزریق بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای محدود است و معمولاً در شرایط فرکانس ثابت یا نسبت‌های دمش خاص انجام شده است. همچنین تحلیل‌های تجربی و عددی عموماً به‌صورت جداگانه انجام شده است. بر این اساس، تاثیر جریان نوسانی بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در فرکانس‌های مختلف و همچنین نسبت‌های دمش گوناگون و نیز بررسی توأم عددی و تجربی این پدیده در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- تجهیزات تست تجربی

بخش‌های عمده تجهیزات تست شامل ایجاد جریان هوای اصلی به‌وسیله فن، هوای تزریق به‌وسیله کمپرسور و گرم‌کردن آن توسط هیتر و صفحه تست ایجاد خنک‌کاری لایه‌ای است. جریان هوای خروجی از کمپرسور و فن جریان اصلی را نیز می‌توان در دبی‌های مختلف تنظیم نمود. هوای فشرده‌شده از یک هیتر گرمایی عبور نموده و سپس وارد پلنوم می‌شود. این هیتر ۲ کیلووات است و توانایی گرم‌کردن هوای عبوری تا ۲۰۰ درجه سلسیوس را دارا است. به دلیل حجم کمتر هوای عبوری از پلنوم نسبت به داکت اصلی و به‌منظور کاهش هزینه مربوط به هیتر برای گرمایش هوا، هوای عبوری از پلنوم را گرم می‌نماییم. اختلاف دمای بین هوای اصلی و ورودی به پلنوم قابل تنظیم است. لوله پیتوت و سرعت‌سنج سیم داغ، سرعت هوای ورودی به پلنوم و داکت اصلی را اندازه‌گیری می‌نمایند. دو ترموکوپل نیز وظیفه اندازه‌گیری دمای هوای ورودی به پلنوم و داکت اصلی را برعهده دارند. داکت اصلی از جنس پلکسی‌گلس با ضریب هدایت حرارتی پایین ساخته شده است تا کمترین اتلاف حرارتی از داکت اصلی روی دهد. اطراف این داکت نیز به‌خوبی درزبندی شده تا منفذی برای خروج جریان هوا وجود نداشته باشد. جریان اصلی به‌صورت مستقیم از هوای محیط توسط فن دریافت می‌شود و پس از عبور از لانه‌زنبوری وارد داکت اصلی می‌شود. این لانه‌زنبوری به‌منظور ایجاد یک پروفیل سرعت یکنواخت در ابتدای داکت اصلی نصب شده است. از دوربین مادون قرمز برای اندازه‌گیری دمای صفحه خنک‌کاری استفاده می‌نماییم. سطح صفحه‌ای که دوربین مادون قرمز روی آن قرار می‌گیرد با رنگ مشکی

دمش بالا، توربولانس بالای جریان آزاد، افزایش اختلاط را به عامل مضری تغییر می‌دهد؛ بدین صورت که مقداری از خنک‌کننده به جریان اصلی نفوذ می‌کند و با هوای نزدیک سطح مخلوط می‌شود. سنو و همکاران^[11] اثر طول سوراخ تزریق بر خنک‌کاری لایه‌ای با نوسانات جریان توده‌ای به‌صورت تغییرات سینوسی سرعت و فشار استاتیک را در اعداد استروهال تزریق‌کننده از ۱/۱ تا ۱۰/۱ بررسی کردند. توزیع عدد استانتون متوسط جانبی به‌طور عمومی با فرکانس نوسان افزایش می‌یافت. در برخی حالت‌ها هنگامی که فرکانس نوسان افزایش می‌یافت، نسبت‌های عدد استانتون اندکی کاهش یافت.

لیگرانی و همکاران^[12] آثار نوسانات جریان توده‌ای بر خنک‌کاری لایه‌ای را به‌صورت تجربی و بر اثربخشی لایه‌ای و ساختار جریان بررسی کردند. تغییرات عمده‌ای در اثربخشی لایه‌ای محلی و اثربخشی جانبی هنگامی که عدد استروهال خنک‌کننده از ۱ الی ۲ افزایش می‌یافت، ایجاد شد.

جونگ و همکاران^[13] نسبت شار حرارتی و نسبت ضریب انتقال حرارت را برای آثار نوسانات جریان توده‌ای بر خنک‌کاری لایه‌ای با سوراخ‌های زاویه مرکب به‌صورت تجربی بررسی کردند. اعداد استروهال خنک‌کننده بزرگ‌تر از یک، عموماً کاهش اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای را نسبت به حالت بدون نوسان نشان می‌دهد.

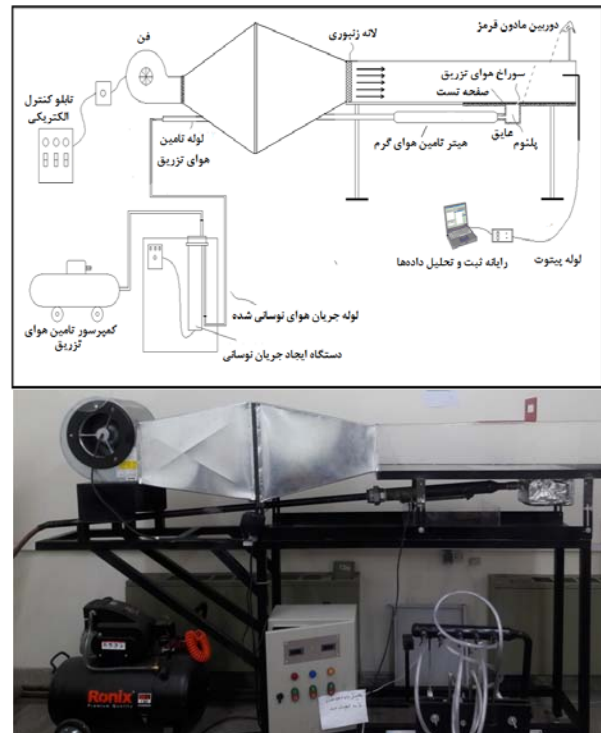
ال‌گبری و ریویر^[14] اثربخشی لایه‌ای را بر سطح لبه حمله استوانه‌ای برای جریان‌های نوسانی و پایا اندازه‌گیری کردند. دو نسبت سرعت جت به جریان عرضی ۱ و ۲ مورد توجه قرار گرفتند که به‌ترتیب به نسبت دمش ۱ و ۲ مربوط بودند. مقایسه بین اثربخشی لایه‌ای بین پوشش نوسانی و پوشش پیوسته نشان داد برای نسبت دمش مشابه وقتی جریان نوسانی می‌شود، اثربخشی با ضریب ۲ افت می‌کند. تغییرات دمای دیواره آدیاباتیک سطح اندازه‌گیری‌شده در مدت نوسان خیلی کم بود.

شهداد و همکاران^[15] خنک‌کاری لایه‌ای لبه حمله پره توربین را به‌صورت عددی بررسی کردند. از مدل توربولانسی $SST k - \omega$ جهت بررسی آثار آشفتگی و با توجه به عدد ماخ جریان، مدل هوای تراکم‌پذیر استفاده شد.

اکبری و پولادگر^[16] خنک‌کاری لایه‌ای را به‌صورت تحلیلی بررسی کردند. نتایج کارشان نشان داد با افزایش دمای جریان عرضی، بازده خنک‌کاری افزایش می‌یابد. با افزایش دمای جت تزریق، بازده خنک‌کاری نیز افزایش می‌یابد. با افزایش میزان آشفتگی، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای سیر نزولی خواهد داشت.

مهابادی‌نادر و همکاران^[17] جریان و انتقال حرارت آشفته در جریان خنک‌کاری لایه‌ای برای یک سوراخ استوانه‌ای در حالت سه‌بعدی را به‌صورت عددی شبیه‌سازی کردند. شار حرارتی آشفته و معادله انرژی توسط مدل پخش گردابه‌ای ساده و با فرض عدد پرانتل آشفتگی ثابت مدل‌سازی شد. مقایسه نتایج تحلیل عددی با مقادیر تجربی نشان داد که مدل‌های مرتبه دوم جبری- صریح شار حرارتی آشفته،

با قابلیت نشر بالا پوشانده شده است. شکل ۱ شماتیک تجهیزات تست تجربی و بخش‌های مختلف دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل (۱) تجهیزات تست تجربی

یک صفحه مسی به ضخامت ۰/۵mm به‌عنوان سطح مبنا استفاده شد. حسینی بغدادآبادی و همکاران [19] تاثیر زاویه سوراخ تزریق را بر توزیع دما و اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای نوسانی به‌صورت عددی بررسی کردند. نتایج بررسی آنها نشان داد در حالت نوسانی زاویه تزریق بهینه بین ۲۰ تا ۲۵ درجه است. لذا در تحقیق پیش رو لوله تزریق تحت زاویه ۲۵ درجه نسبت به صفحه متصل شد. روی صفحه ۵ سوراخ تزریق به قطر ۷/۵mm و نسبت طول به قطر سوراخ $L/D = 8$ ایجاد شد. لوله‌ها به‌وسیله جوش نقره به صفحه مسی متصل شدند. جهت ایجاد شرایط آدیاباتیک، در زیر صفحه مسی از عایق پشم شیشه و پس از آن صفحه‌ای آهنی جهت اتصال به پلنوم استفاده شد. شکل ۲ صفحه تست مذکور، ابعاد و محل سوراخ‌های تزریق را نشان می‌دهد.



شکل (۲) صفحه تست به‌همراه ابعاد و سوراخ‌های تزریق

۳- آنالیز عدم قطعیت

اندازه‌گیری دقیق زمانی دمای سطح به‌دست آمده و نشان می‌دهد که حداقل در طول دوره پالس هیچ تغییری را نشان نمی‌دهد که

بیان‌کننده این است که اینرسی حرارتی بزرگ است و دمای دیواره پایدار است. دمای جریان اصلی و هوای تزریق با استفاده از ترموکوپل نوع K با دقت $\pm 0.5\%$ و دمای سطح دیواره به‌وسیله دوربین مادون قرمز با دقت $\pm 1\%$ اندازه‌گیری شدند. رابطه اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\eta = \frac{T_{\infty} - T_w}{T_{\infty} - T_{injection\ air}} \quad (1)$$

خطای مطلق اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای به‌صورت زیر بیان می‌شود.

$$\Delta \eta = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial T_{\infty}} \Delta T_{\infty}^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial T_{injection\ air}} \Delta T_{injection\ air}^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial T_w} \Delta T_w^2\right)\right)} \quad (2)$$

با توجه به رابطه اثربخشی، خطای مطلق به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Delta \eta = \sqrt{\frac{(T_w - T_{injection\ air})^2 \Delta T_{\infty}^2}{(T_{\infty} - T_{injection\ air})^4} + \frac{(T_{\infty} - T_w)^2 \Delta T_{injection\ air}^2}{(T_{\infty} - T_{injection\ air})^4} + \frac{\Delta T_w^2}{(T_{\infty} - T_{injection\ air})^2}} \quad (3)$$

بنابراین خطای نسبی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\Delta \eta}{\eta} = \sqrt{\frac{(T_w - T_{injection\ air})^2 \Delta T_{\infty}^2}{(T_{\infty} - T_{injection\ air})^2 \cdot (T_{\infty} - T_w)^2} + \frac{\Delta T_{injection\ air}^2}{(T_{\infty} - T_{injection\ air})^2} + \frac{\Delta T_w^2}{(T_{\infty} - T_w)^2}} \quad (4)$$

طبق نتایج به‌دست آمده، خطای نسبی اثربخشی کمتر از ۵/۶٪ است.

۴- شبیه‌سازی عددی

معادلات جریان شامل پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای ناحیه محاسباتی حل می‌شوند.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (6)$$

تانسور تنش τ_{ij} به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

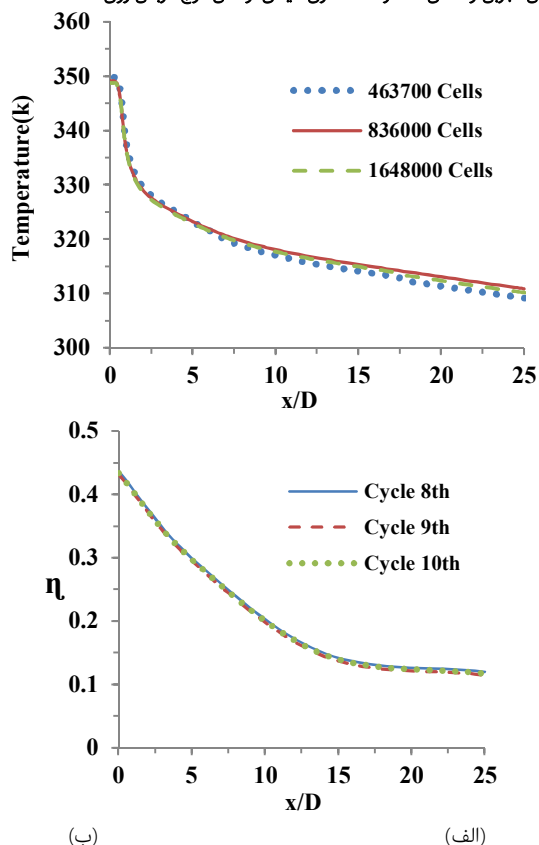
$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (7)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{(\mu + \mu_t)}{Pr} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right] \quad (9)$$

از مدل توربولانسی $k - \omega SST$ جهت مدل‌سازی آشفتگی استفاده شده است. شکل ۳ ناحیه محاسباتی، شرایط مرزی و مش ناحیه اطراف سوراخ تزریق را نشان می‌دهد.

برای بررسی عدم وابستگی هندسه به مش، سه شبکه مختلف با تعداد ۴۶۳۷۰۰، ۸۳۶۰۰۰ و ۱۶۴۸۰۰۰ سلول محاسباتی در نظر گرفته شد. همان‌طور که از نمودار ۱-الف مشاهده می‌شود، تفاوت مقادیر توزیع دما برای هندسه‌های با تعداد المان‌های محاسباتی ۸۳۶۰۰۰ و ۱۶۴۸۰۰۰ در فواصل مختلف کمتر از یک درصد است؛ درنتیجه شبکه با تعداد المان‌های ۸۳۶۰۰۰ برای ادامه تحلیل‌ها استفاده شد. با توجه به اینکه مساله اصلی جریان پالسی و درنتیجه ناپایاست، لازم است استقلال از گام زمانی برای نتایج شبیه‌سازی انجام شود. برای مساله جریان نوسانی مربعی، تعداد سیکل یا تناوب زمانی به



نمودار ۱) توزیع دمای خط مرکزی برای سه شبکه مختلف (الف)، توزیع اثربخشی خط مرکزی در سه سیکل متفاوت (ب)

جدول ۱) مدل‌ها و متغیرها و روش‌های استفاده‌شده در شبیه‌سازی

پارامتر	مدل، روش حل و مقدار
هندسه	سه‌بعدی
حل‌کننده	بر اساس فشار
فرمولاسیون	ضمنی
الگوریتم حل توأم سرعت-فشار	سیمپل‌سی
مدل توربولانسی	انتقال تنش برشی $k-\omega$
گسسته‌سازی فشار	استاندارد، مرتبه دوم
گسسته‌سازی مومنتوم، آشفستگی و انرژی	آپویند مرتبه دوم
زمان	ناپایا
جریان‌های مورد بررسی	جریان پایا و نوسانی مربعی
بسامد	۲، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ هرتز
چرخه یا دوره کاری	۰/۵
نسبت دمش	۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲/۴ و ۳
شرط مرزی دیواره‌ها	آدیاباتیک

۵- تحلیل نتایج

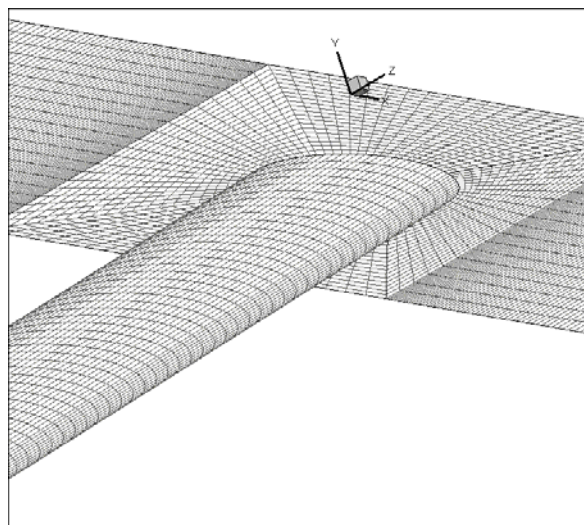
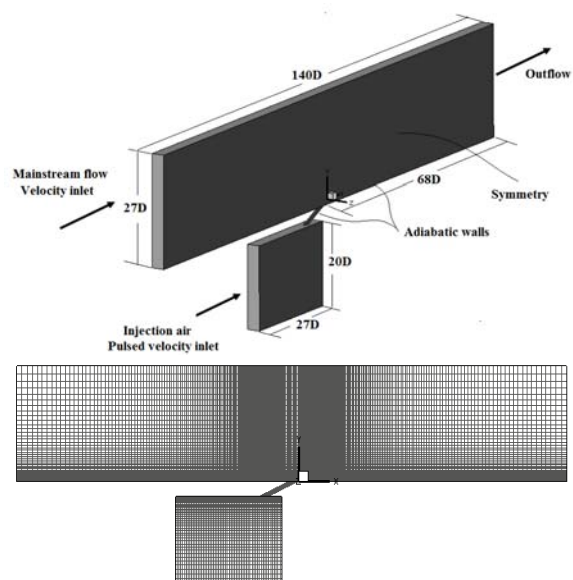
نمودار ۲ مقایسه اثربخشی خط مرکزی را برای نسبت‌های دمش مختلف جریان پایا در حالت تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت عددی، در نسبت دمش ۰/۵ مقدار اثربخشی خط مرکزی به‌تدریج در طول سطح کاهش می‌یابد. با افزایش نسبت دمش، شیب کاهش اثربخشی با فاصله‌گرفتن از سوراخ تزریق، افزایش می‌یابد. در نسبت دمش ۳، مقدار اثربخشی از لبه سوراخ تزریق تا فاصله $5D$ به‌سرعت کاهش

قدری تکرار شد تا نتایج تحلیل برای یک تناوب با نتایج تناوب قبل از آن تفاوت نداشته باشد.

جریان موج مربعی به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$u_{injection\ air} = \begin{cases} u & t < t_0 \\ 0 & t_0 < t < t_1 \end{cases} \quad p = t_1 \quad (10)$$

دوره یا چرخه کاری برای جریان نوسانی مربعی به‌صورت نسبت مدت زمان اتصال جریان در یک تناوب به دوره تناوب تعریف می‌شود. نمودار ۱- ب توزیع اثربخشی خط مرکزی را در سه تناوب متفاوت نشان می‌دهد. تفاوت بین توزیع اثربخشی تناوب هشتم و نهم کمتر از ۰/۰۱٪ است. بین سیکل نهم و دهم میزان تفاوت برابر صفر است. برای جریان اصلی، سرعت جریان برابر 5 m/s در نظر گرفته شد و دبی جریان هوای خنک‌کننده بر اساس نسبت‌های دمش به ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲/۴ و ۳ تغییر می‌کرد. دمای جریان اصلی $297/65\text{ K}$ و دمای سیال خنک‌کننده $349/15\text{ K}$ بود. نسبت دانسیته $1/172$ بود. شدت توربولانس برای هر دو جریان اصلی و خنک‌کننده ۵٪ در نظر گرفته شد. مدل‌ها و مقادیر پارامترهای به‌کاررفته در حل عددی در جدول ۱ آمده است.



شکل ۳) ناحیه محاسباتی، شرایط مرزی و مش ناحیه اطراف سوراخ تزریق

متوسط اثربخشی خط مرکزی برای هر نسبت دمش در حالت عددی و پایا در جدول ۲ مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار متوسط اثربخشی در نسبت دمش ۵/۰ به‌دست می‌آید. با افزایش نسبت دمش مقدار متوسط اثربخشی کاهش می‌یابد. علت این پدیده این است که نسبت‌های دمش کمتر، جت‌های چسبیده با اثربخشی بالا در پایین‌دست سوراخ ایجاد می‌کند. نسبت‌های دمش بالاتر، جت‌های قوی‌تر تولید می‌کند که در جهت پایین‌دست سوراخ تمایل به بلندشدن دارد. همچنین جت‌ها در سرعت‌های جت کم تحت فشار قرار می‌گیرند، درحالی‌که جت‌های با سرعت بالاتر قبل از از دست دادن مومنتوم حرکت بیشتری در پایین‌دست سوراخ تزریق می‌کند و همچنین جهت جانبی دارد. اثر جت در پایین‌دست سوراخ به دلیل کاهش پوشش هوای تزریق کاهش می‌یابد. هنگامی که نسبت دمش افزایش می‌یابد، ناحیه‌ای که در آن اثر خنک‌کاری لایه‌ای بالا است، به تدریج کاهش پیدا می‌کند. نسبت دمش خیلی بالا باعث بلندشدن بیشتر خنک‌کننده از دیواره شده و در نتیجه اثربخشی کمتر خنک‌کاری لایه‌ای را به دنبال دارد [20]. حداکثر اختلاف حل عددی و تست تجربی در حالت پایا مربوط به نسبت دمش ۱ و برابر ۲۸/۳۹٪ است. کمترین اختلاف متوسط اثربخشی خط مرکزی نیز در نسبت دمش ۳ به‌دست آمد و برابر ۱۱/۹۴٪ بود.

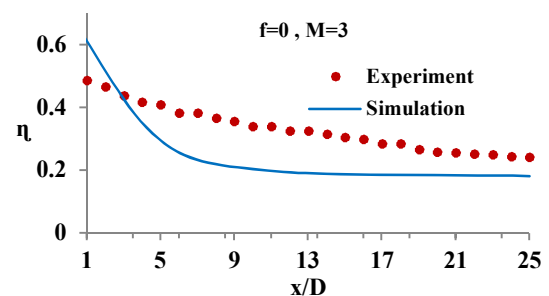
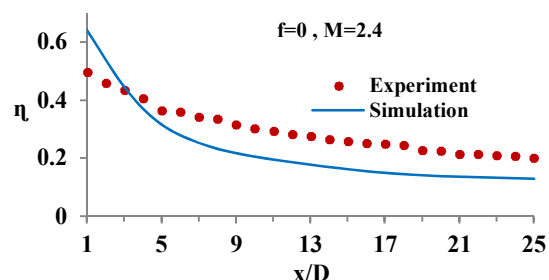
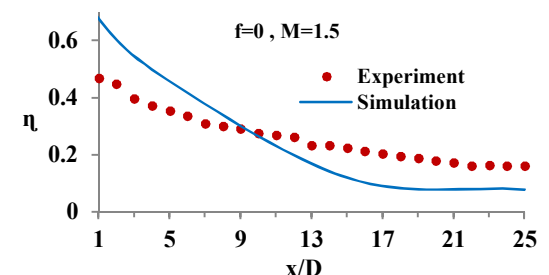
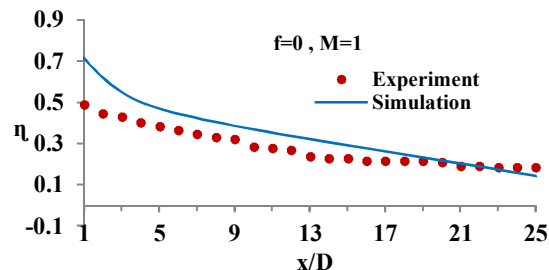
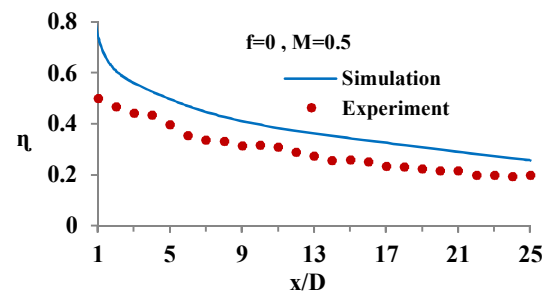
جدول ۲) مقایسه متوسط اثربخشی خط مرکزی در حالت تجربی و عددی و اختلاف آنها در نسبت‌های دمش مختلف جریان پایا ($f=0$)

نسبت دمش	$\bar{\eta}_{Centerline}$ (شبه‌سازی)	$\bar{\eta}_{Centerline}$ (تجربی)	اختلاف (%)
۵/۰	۰/۴۸۳۷	۰/۳۷۹۹	۲۷/۳۲
۱	۰/۴۶۵۸	۰/۳۶۲۸	۲۸/۳۹
۱/۵	۰/۳۸۴۷	۰/۳۰۲۱	۲۷/۳۴
۲/۴	۰/۳۵۵۳	۰/۳۰۵۹	۱۶/۱۵
۳	۰/۳۷۷۹	۰/۳۳۷۶	۱۱/۹۴

نمودار ۳ مقایسه اثربخشی خط مرکزی را برای نسبت‌های دمش مختلف جریان نوسانی و فرکانس ۲ هرتز نشان می‌دهد. در این حالت مقدار اثربخشی نسبت به حالت پایا کاهش می‌یابد. به‌طور کلی، بلندشدن محلی جت تحت تاثیر نوسان افزایش می‌یابد و به همین دلیل محافظت خنک‌کاری کمتری به‌وسیله جت‌های نوسانی ایجاد می‌شود. ضرایب انتقال حرارت در حالت پایا در مقایسه با دمش نوسانی کمتر هستند و به این علت به‌طور عمومی مقدار متوسط اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در حالت نوسانی از حالت پایا کمتر است.

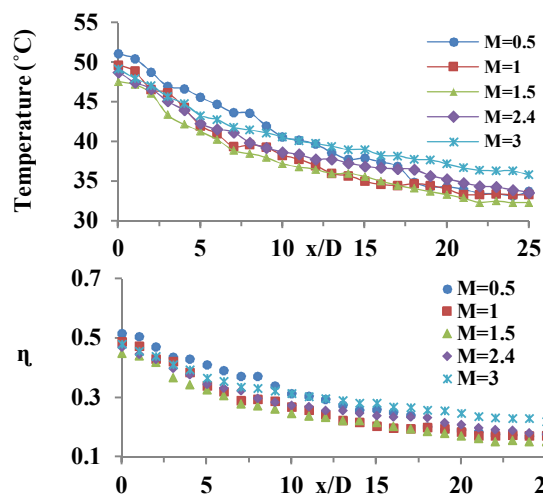
با افزایش نسبت دمش از ۵/۰ تا ۳ مقدار متوسط اثربخشی خط مرکزی کاهش می‌یابد. تفاوت مقادیر اثربخشی در حالت تجربی و عددی نسبت به حالت پایا کمتر است. در نواحی ابتدایی پایین‌دست سوراخ تزریق وقتی لایه مرزی جریان اصلی اطراف جت هوای تزریق را می‌پوشاند، باعث تشکیل ورتکس نعل اسبی می‌شود. در نسبت‌های دمش کم، اثر گردابه نعل اسبی کمتر و مقدار اثربخشی

می‌یابد و پس از این فاصله مقدار اثربخشی تغییر کمی با فاصله دارد. برای نتایج تجربی میزان کاهش اثربخشی با افزایش نسبت دمش و افزایش فاصله از لبه سوراخ تزریق، به دلیل اثر هدایت حرارتی سطح کاهش می‌یابد. همچنین با فاصله‌گرفتن از لبه سوراخ تزریق، اختلاف مقادیر اثربخشی خط مرکزی شبه‌سازی و تجربی کاهش می‌یابد. جهت مقایسه عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای در نسبت‌های دمش مختلف، متوسط اثربخشی خط مرکزی برای حالت شبه‌سازی و تجربی محاسبه شده است.



نمودار ۲) مقایسه توزیع اثربخشی خط مرکزی در حالت تجربی و شبه‌سازی در نسبت‌های دمش مختلف برای جریان پایا

نمودار ۴ نتایج تجربی مقایسه توزیع دما و اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای خط مرکزی را در نسبت‌های دمش مختلف در فرکانس ۲ هرتز نشان می‌دهد. در حالت نوسانی سرعت‌های محلی در ابتدای تناوب که جریان وصل است، دو برابر حالت پایاست. ناحیه بالادست سوراخ تا حدی سرعت بالاتری از ناحیه پایین‌دست دارد. بیشترین مقدار اثربخشی تا فاصله $9D$ در نسبت دمش 5% به‌دست آمد، ولی در فاصله $9 < x/y < 25$ ، بیشترین مقدار اثربخشی مربوط به نسبت دمش ۳ بود. در نسبت دمش ۳ در فواصل ابتدایی، جریان هوای تزریق از سطح جدا می‌شود ولی در فواصل دورتر پایین‌دست جریان بخشی از هوای تزریق دوباره به سطح می‌چسبد. به همین علت در فواصل دورتر از سوراخ تزریق، نسبت دمش ۳ اثربخشی خنک‌کاری بیشتری در مقایسه با نسبت دمش 5% دارد. بیشترین مقدار متوسط اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در فرکانس ۲ هرتز در نسبت دمش 5% و کمترین آن در نسبت دمش $1/5$ به‌دست آمد.



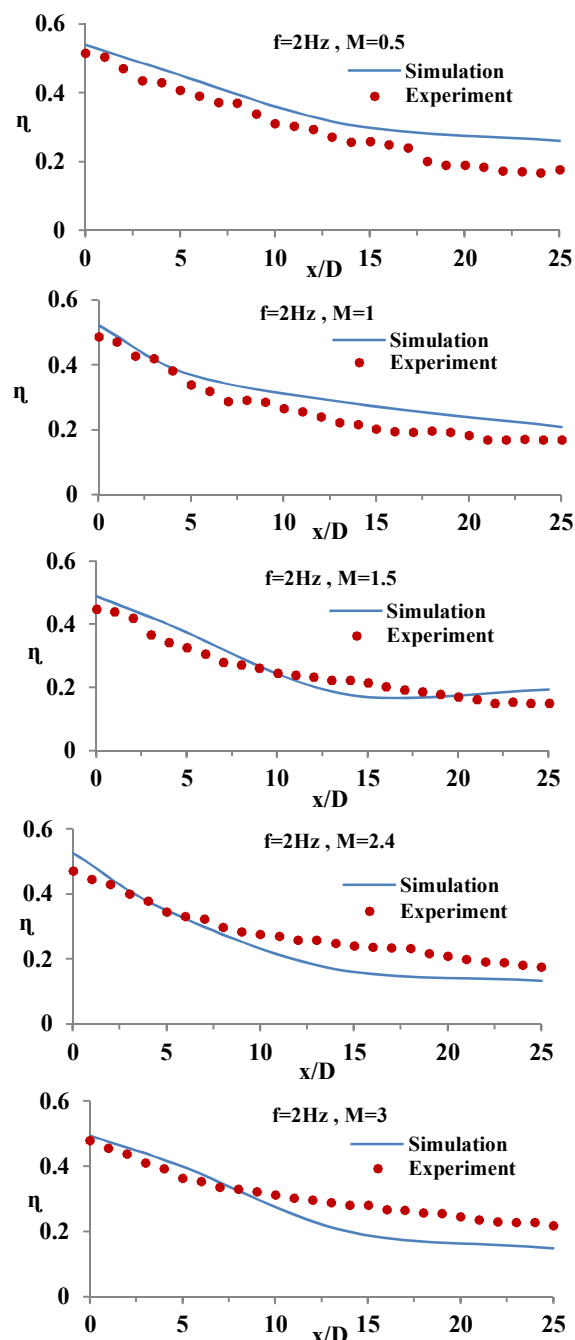
نمودار ۴) مقایسه توزیع دما و اثربخشی خط مرکزی در حالت تجربی در نسبت‌های دمش مختلف برای جریان نوسانی در فرکانس ۲ هرتز

متوسط اثربخشی خط مرکزی برای هر نسبت دمش در حالت عددی و فرکانس ۲ هرتز در جدول ۳ مقایسه شده است. همان طور که در جدول مشاهده می‌شود، مقدار متوسط اثربخشی خط مرکزی در حالت عددی و تجربی با افزایش نسبت دمش، کاهش می‌یابد. بیشترین اختلاف بین مقادیر متوسط اثربخشی در حالت عددی و تجربی مربوط به نسبت دمش 5% و برابر $21/85\%$ و کمترین اختلاف مربوط به نسبت دمش ۳ و برابر $3/16\%$ است.

جدول ۳) مقایسه متوسط اثربخشی خط مرکزی در حالت تجربی و عددی و اختلاف آنها در نسبت‌های دمش مختلف جریان نوسانی فرکانس ۲ هرتز

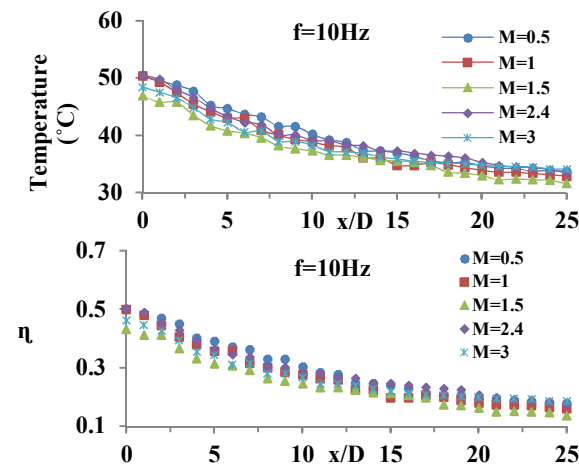
نسبت دمش	$\eta_{Centerline}$ (شبه‌سازی)	$\eta_{Centerline}$ (تجربی)	اختلاف (%)
5%	$0/3948$	$0/3240$	$21/85$
۱	$0/3458$	$0/2879$	$20/11$
$1/5$	$0/3159$	$0/2681$	$17/83$
$2/4$	$0/2955$	$0/2823$	$4/68$
۳	$0/2873$	$0/2785$	$3/16$

بیشتر است. در نسبت‌های دمش 5% و ۱ در تمام فواصل پایین‌دست سوراخ تزریق مقادیر اثربخشی حل عددی بیشتر از مقادیر تست تجربی است. در نسبت‌های دمش بالاتر مقادیر اثربخشی در حالت تجربی در فواصل دور از لبه سوراخ تزریق به علت اثر هدایت حرارتی سطح در حالت شبه‌سازی کمتر از مقادیر تجربی است. در نسبت‌های دمش بالا، بلندشدن هوای تزریق، اثربخشی کم و برهم‌کنش قوی‌تر با جریان اصلی و در نتیجه توربولانس بیشتر اتفاق می‌افتد. همچنین با افزایش نسبت دمش، عدم تقارن افزایش می‌یابد و جت تنگ می‌شود. در نتیجه، اثربخشی خنک‌کننده فیلم در نسبت‌های دمش بزرگ در مقایسه با حالت پایه کاهش می‌یابد^[21].



نمودار ۵) مقایسه توزیع اثربخشی خط مرکزی در حالت تجربی و شبه‌سازی در نسبت‌های دمش مختلف برای جریان نوسانی در فرکانس ۲ هرتز

فاصله $25 < x/y < 20$ ، اثربخشی بیشینه را داشت. بیشترین مقدار متوسط اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در فرکانس 10°Hz در نسبت دمش $0.5/\%$ و کمترین آن در نسبت دمش $2/4$ به‌دست آمد.



نمودار ۶) مقایسه توزیع دما و اثربخشی خط مرکزی در حالت تجربی در نسبت‌های دمش مختلف برای جریان نوسانی در فرکانس 10°Hz

متوسط اثربخشی خط مرکزی برای هر نسبت دمش در حالت عددی و فرکانس 10°Hz در جدول ۴ مقایسه شده است. در این حالت بیشترین اختلاف متوسط اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای نوسانی بین حل عددی و تست تجربی در نسبت دمش $0.5/\%$ به‌دست آمد و این اختلاف برابر $16/37\%$ است. کمترین اختلاف متوسط اثربخشی نیز در نسبت دمش $2/4$ مشاهده شد و برابر 0.717% است.

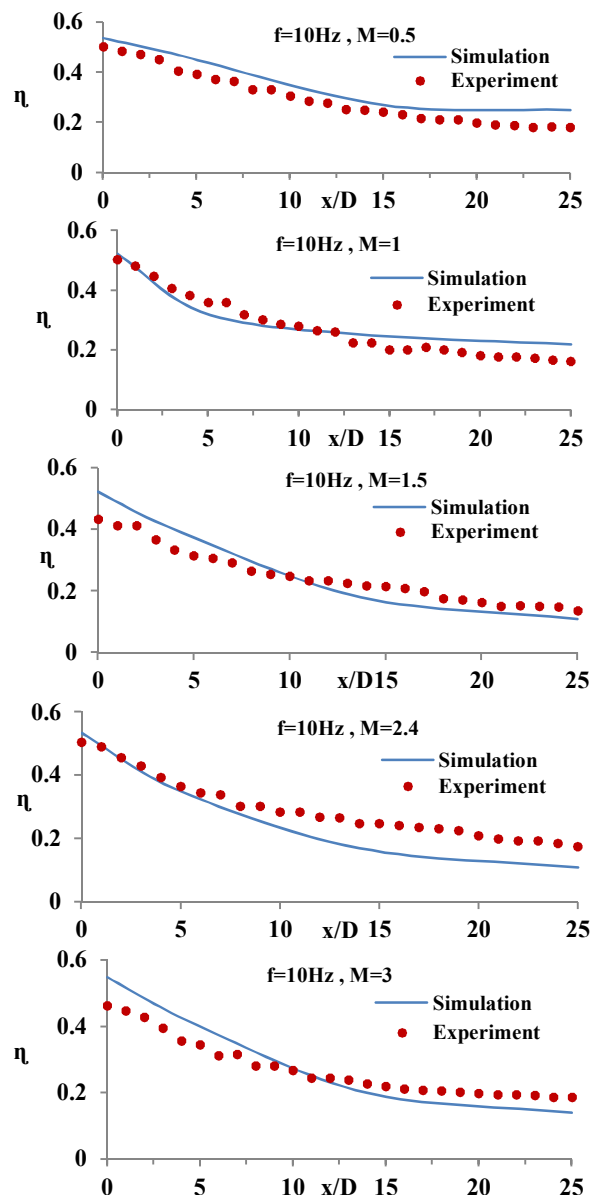
جدول ۴) مقایسه متوسط اثربخشی خط مرکزی در حالت تجربی و عددی و اختلاف آنها در نسبت‌های دمش مختلف جریان نوسانی فرکانس 10°Hz

نسبت دمش	$\bar{\eta}_{\text{Centerline}}$ (شبه‌سازی)	$\bar{\eta}_{\text{Centerline}}$ (تجربی)	اختلاف (%)
۰/۵	۰/۳۸۱۸	۰/۳۲۸۱	۱۶/۳۷
۱	۰/۳۲۸۲	۰/۲۸۴۹	۱۵/۲۰
۱/۵	۰/۳۰۲۹	۰/۲۶۸۲	۱۲/۹۴
۲/۴	۰/۲۹۰۸	۰/۲۹۲۹	-۰/۷۱۷
۳	۰/۳۲۲۰	۰/۲۷۲۴	۱۸/۲۱

نمودار ۷ مقایسه اثربخشی خط مرکزی را برای نسبت‌های دمش مختلف جریان نوسانی و فرکانس 50°Hz نشان می‌دهد. در این حالت مقادیر اثربخشی خصوصاً در فواصل ابتدایی پایین‌دست سوراخ تزریق نسبت به فرکانس ۲ و 10°Hz بیشتر است. علت این پدیده این است که با افزایش فرکانس، فاصله زمانی بین قطع و وصل جریان کاهش می‌یابد و جریان به جریان پایا نزدیک‌تر می‌شود. در این حالت نیز بیشترین مقدار اثربخشی مربوط به نسبت دمش $0.5/\%$ است. با افزایش نسبت دمش مقدار متوسط اثربخشی مانند حالت‌های قبل کاهش می‌یابد.

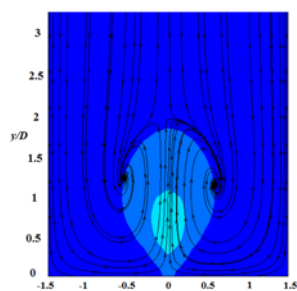
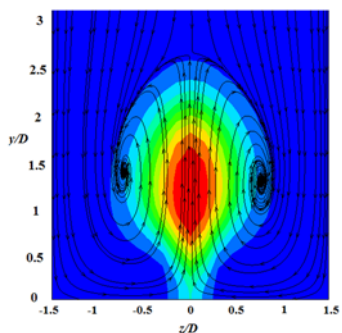
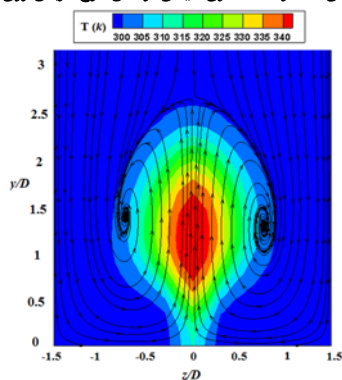
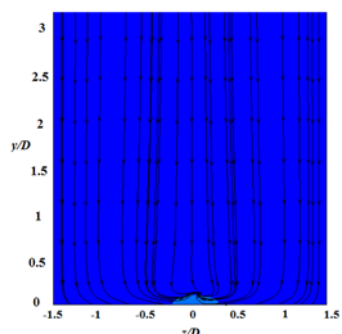
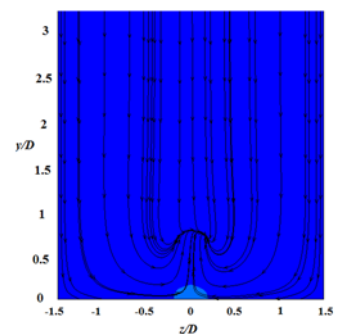
هنگامی که فرکانس افزایش می‌یابد، تعداد گردابه‌های آغازین در واحد زمان افزایش می‌یابد. قدرت لحظه‌ای و رتکس نعل اسبی اطراف جت در طول زمان قطع جت در یک سیکل کاهش می‌یابد. نمودار ۸ توزیع دمای بخش جانبی، تشکیل و تغییر اندازه جفت گردابه

نمودار ۵ مقایسه اثربخشی خط مرکزی را برای نسبت‌های دمش مختلف جریان نوسانی و فرکانس 10°Hz نشان می‌دهد. در این حالت در مقایسه با فرکانس 2°Hz تغییرات اثربخشی پایین است که بیشترین مقدار متوسط اثربخشی در نسبت دمش $0.5/\%$ و کمترین مقدار آن در نسبت دمش $2/4$ به‌دست آمد. در شروع هر سیکل نوسانی یک ورتکس اولیه ظاهر می‌شود. ورتکس آغازین اختلاط بیشتر را القا می‌کند و افزایش انتقال حرارت و کاهش اثربخشی را به‌دنبال دارد.



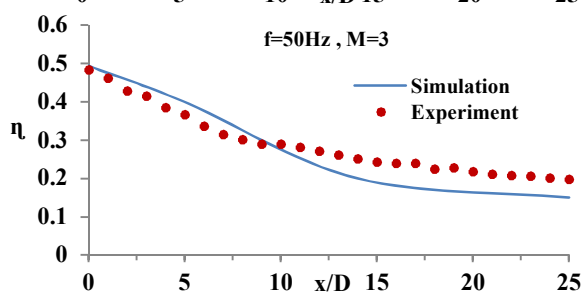
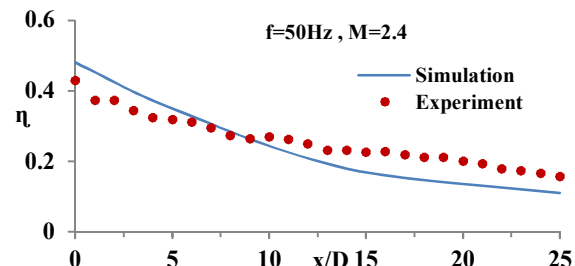
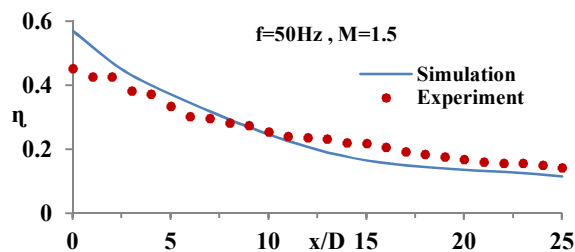
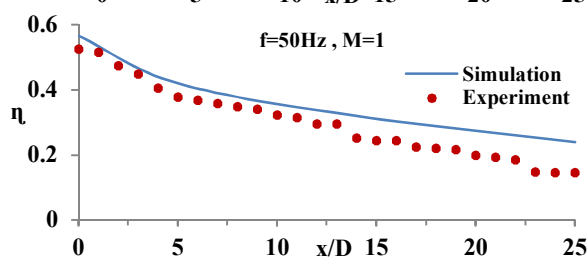
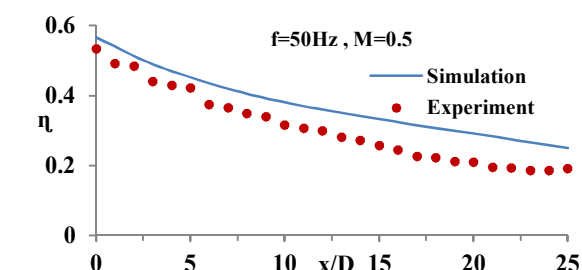
نمودار ۵) مقایسه توزیع اثربخشی خط مرکزی در حالت تجربی و شبیه‌سازی در نسبت‌های دمش مختلف برای جریان نوسانی در فرکانس 10°Hz

نمودار ۶ نتایج تجربی مقایسه توزیع دما و اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای خط مرکزی را در نسبت‌های دمش مختلف در فرکانس 10°Hz نشان می‌دهد. بیشترین مقدار اثربخشی تا فاصله حدود $10D$ در نسبت دمش $0.5/\%$ به‌دست آمد ولی در فاصله $20 < x/y < 10$ ، بیشترین مقدار اثربخشی مربوط به نسبت دمش $2/4$ بود. نسبت دمش ۳ در


 $(t = 2p/4)$
 $(t = p/4)$
 $(t = 0)$

 $(t = p)$
 $(t = 3p/4)$

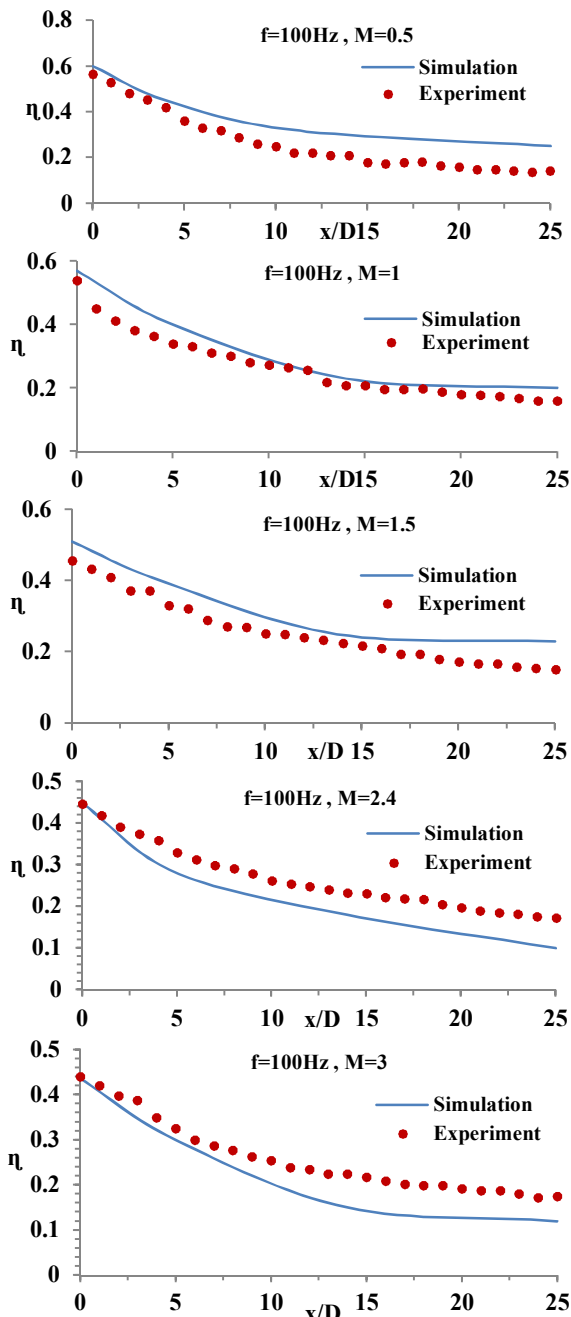
نمودار ۸) مقایسه توزیع دمای جانبی و جفت گردابه ناهمسان‌گرد در زمان‌های مختلف یک تناوب جریان نوسانی در فرکانس ۵هرتز و نسبت دمش ۵/۵

غیرهمسان‌گرد را برای $\frac{x}{D}=2$ و در زمان‌های مختلف یک تناوب جریان نوسانی نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، در ابتدای سیکل با وصل جریان هوای تزریق جفت گردابه ناهمسان‌گرد با قدرت بالا در پایین‌دست سوراخ تزریق تشکیل می‌شود. جفت گردابه باعث اختلاط هوای اصلی و تزریق می‌شود و لذا همان‌گونه که در زمان $t=0$ و $t=p/4$ مشاهده می‌شود، ناحیه وسیعی از بخش جانبی دستخوش تغییر دما می‌شود. در ادامه سیکل با قطع جریان هوای تزریق در زمان $t=2p/4$ قدرت و اندازه جفت گردابه ناهمسان‌گرد با کاهش دبی هوای تزریق، به سرعت کاهش یافته و به تبع آن توزیع دمای بخش جانبی را تحت تاثیر قرار می‌دهد.



نمودار ۷) مقایسه توزیع اثر بخشی خط مرکزی در حالت تجربی و شبیه‌سازی در نسبت‌های دمش مختلف برای جریان نوسانی در فرکانس ۵هرتز

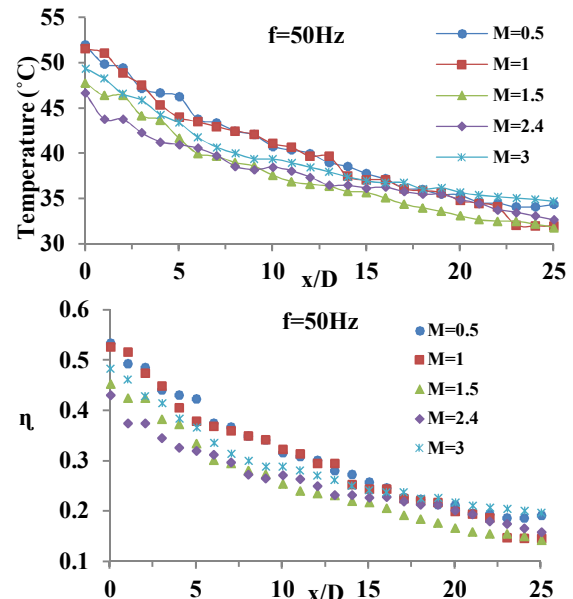
فرکانس‌های دیگر بیشتر است. سیال تزریق در نمونه با فرکانس بالاتر، نزدیک دیواره باقی می‌ماند و نسبت به فرکانس‌های پایین‌تر برهم‌کنش کمتر با جریان اصلی دارد و لذا اثربخشی بالاتری نسبت به فرکانس‌های پایین‌تر دارد. مقادیر اثربخشی در حالت شبیه‌سازی در سه نسبت‌های دمش ۰/۵، ۱ و ۱/۵ به‌طور متوسط بیشتر از مقادیر تجربی است. در نسبت‌های دمش ۲/۴ و ۳ به‌طور متوسط مقادیر اثربخشی در حالت تجربی بیشتر از مقدار عددی است.



نمودار ۱۰) مقایسه توزیع اثربخشی خط مرکزی در حالت تجربی و شبیه‌سازی در نسبت‌های دمش مختلف برای جریان نوسانی در فرکانس ۱۰۰هرتز

نمودار ۱۱ نتایج تجربی مقایسه توزیع دما و اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای خط مرکزی را در نسبت‌های دمش مختلف در فرکانس

نمودار ۹، نتایج تجربی مقایسه توزیع دما و اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای خط مرکزی را در نسبت‌های دمش مختلف در فرکانس ۵۰هرتز نشان می‌دهد. بیشترین مقدار اثربخشی تا فاصله حدود $13D$ در نسبت دمش ۰/۵ و ۱ به‌دست آمد ولی در فاصله $25 < x/y < 13$ ، بیشترین مقدار اثربخشی مربوط به نسبت دمش ۳ بود. هنگامی که سرعت جت افزایش می‌یابد، هسته خنک‌کاری لایه‌ای به سمت پایین‌دست از دیواره دور می‌شود [22]. بیشترین مقدار متوسط اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در فرکانس ۵۰هرتز در نسبت دمش ۰/۵ و کمترین آن در نسبت دمش ۱/۵ به‌دست آمد.



نمودار ۹) مقایسه توزیع دما و اثربخشی خط مرکزی در حالت تجربی در نسبت‌های دمش مختلف برای جریان نوسانی در فرکانس ۵۰هرتز

متوسط اثربخشی خط مرکزی برای هر نسبت دمش در حالت عددی و فرکانس ۵۰هرتز در جدول ۵ مقایسه شده است. بیشترین اختلاف آن بین شبیه‌سازی و تست تجربی در نسبت دمش ۰/۵ و برابر ۲۵/۵۵٪ و کمترین اختلاف برابر ۷/۱٪ و مربوط به نسبت دمش ۳ است.

جدول ۵) مقایسه متوسط اثربخشی خط مرکزی در حالت تجربی و عددی و اختلاف آنها در نسبت‌های دمش مختلف جریان نوسانی فرکانس ۵۰هرتز

نسبت دمش	$\bar{\eta}_{Centerline}$ (شبیه‌سازی)	$\bar{\eta}_{Centerline}$ (تجربی)	اختلاف (%)
۰/۵	۰/۴۱۴۲	۰/۳۲۹۹	۲۵/۵۵
۱	۰/۳۸۶۷	۰/۳۱۵۸	۲۲/۴۵
۱/۵	۰/۳۱۶۳	۰/۲۶۵۰	۱۹/۳۶
۲/۴	۰/۲۸۰۱	۰/۲۵۹۸	۷/۸۱
۳	۰/۳۱۱۱	۰/۲۹۰۵	۷/۱

نمودار ۱۰ مقایسه اثربخشی خط مرکزی را برای نسبت‌های دمش مختلف جریان نوسانی و فرکانس ۱۰۰هرتز نشان می‌دهد. در این حالت مقادیر اثربخشی خط مرکزی و متوسط آن نسبت به

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر جریان تزریق نوسانی موج مربعی بر توزیع دما و اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در فرکانس‌ها و نسبت‌های دمش مختلف به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. از روش حجم محدود برای حل معادلات حاکم و مدل $SST k - \omega$ برای مدل‌سازی آشفتگی استفاده شد. نتایج نشان داد، در حالت پایا با افزایش نسبت دمش، مقدار اثربخشی خط مرکزی کاهش می‌یابد. شیب کاهش اثربخشی نیز با افزایش نسبت دمش، افزایش می‌یابد. با فاصله‌گرفتن از لبه سوراخ تزریق اختلاف مقادیر اثربخشی خط مرکزی شبیه‌سازی و تجربی کاهش می‌یابد. در حالت نوسانی در مقایسه با حالت پایا به طور کلی مقدار اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای کاهش می‌یابد. بلندشدن محلی جت تحت تاثیر نوسان افزایش می‌یابد. در حالت نوسانی نیز با افزایش نسبت دمش در یک فرکانس ثابت به طور کلی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای کاهش می‌یابد. با افزایش فرکانس، به طور کلی مقدار اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای افزایش می‌یابد. به طور عمومی بیشترین مقدار متوسط اثربخشی خط مرکزی در فرکانس ۱۰۰ هرتز و نسبت دمش ۵٪ به دست آمد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان از دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان در تهیه و نصب تجهیزات تست تشکر می‌نمایند.
تأییدیه اخلاقی: این مقاله در زمان ارسال به نشریه مهندسی مکانیک مدرس، به هیچ نشریه ایرانی یا خارجی ارسال نشده است.
تعارض منافع: تعارضی بین عوامل تولیدکننده این مقاله وجود ندارد.

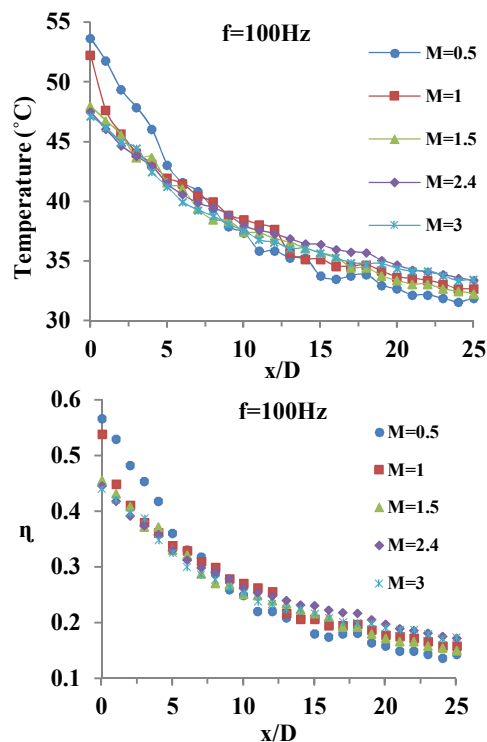
سهم نویسندگان: سیدمهدی حسینی بغدادآبادی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۴۰٪)؛ سعادت زیرک (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۴۰٪)؛ مهران رجبی زرگرآبادی (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی (۲۰٪)

منابع مالی: هزینه پژوهش از اعتبار پژوهشی مربوط به پایان‌نامه دکترا و همچنین دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان تامین شده است.

۷- پی‌نوشت

D	قطر سوراخ (m)
f	فرکانس
k	ضریب رسانش هوا
L	طول سوراخ (m)
P	فشار
p	دوره تناوب
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
z	مختصات جانبی (m)

۱۰۰ هرتز نشان می‌دهد. بیشترین مقدار اثربخشی تا فاصله حدود $5D$ در نسبت دمش ۵٪ به دست آمد. در فاصله $5 < x/y < 11$ ، بیشترین مقدار اثربخشی مربوط به نسبت دمش ۱ بود. در فاصله $11 < x/y < 20$ ، نسبت دمش ۲/۴ اثربخشی بیشینه را داشت. همچنین در فاصله $20 < x/y < 25$ در نسبت دمش ۳، اثربخشی بیشینه بود. بیشترین مقدار متوسط اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در فرکانس ۱۰۰ هرتز در نسبت دمش ۵٪ و کمترین آن در نسبت دمش ۲/۴ به دست آمد.



نمودار ۱۱) مقایسه توزیع دما و اثربخشی خط مرکزی در حالت تجربی در نسبت‌های دمش مختلف برای جریان نوسانی در فرکانس ۲ هرتز

متوسط اثربخشی خط مرکزی برای هر نسبت دمش در حالت عددی و فرکانس ۱۰۰ هرتز در جدول ۶ مقایسه شده است. همان طور که از جدول مشخص است، با افزایش نسبت دمش در این حالت نیز مقدار متوسط اثربخشی خط مرکزی نوسانی کاهش می‌یابد. برای فرکانس ۱۰۰ هرتز، اختلاف بیشینه متوسط اثربخشی در حالت عددی و تجربی در نسبت دمش ۱/۵ به دست آمد و مقدار آن برابر ۲۵/۰۴٪ است. کمینه اختلاف نیز مربوط به نسبت دمش ۳ و برابر ۵/۱۱٪ است.

جدول ۶) مقایسه متوسط اثربخشی خط مرکزی در حالت تجربی و عددی و اختلاف آنها در نسبت‌های دمش مختلف جریان نوسانی فرکانس ۱۰۰ هرتز

نسبت دمش	$\bar{\eta}_{Centerline}$ (شبیه‌سازی)	$\bar{\eta}_{Centerline}$ (تجربی)	اختلاف (%)
۵٪	۰/۴۰۵۱	۰/۳۳۴۵	۲۱/۱۱
۱	۰/۳۵۱۱	۰/۲۸۶۳	۲۲/۶۳
۱/۵	۰/۳۴۷۵	۰/۲۷۷۹	۲۵/۰۴
۲/۴	۰/۲۵۲۰	۰/۲۶۷۲	-۵/۶۹
۳	۰/۲۴۶۷	۰/۲۵۹۹	-۵/۱۱

Flow. 2003;24(5):669-679.

11- Seo HJ, Lee JS, Ligrani PM. The effect of injection hole length on film cooling with bulk flow pulsations. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1998;41(22):3515-3528.

12- Ligrani PM, Gong R, Cuthrell JM, Lee JS. Bulk flow pulsations and film cooling-II. Flow structure and film effectiveness. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1996;39(11):2283-2292.

13- Jung IS, Lee JS, Ligrani PM. Effects of bulk flow pulsations on film cooling with compound angle holes: Heat transfer coefficient ratio and heat flux ratio. Journal of Turbomachinery. 2002;124(1):142-151.

14- El-Gabry LA, Rivir RB. Effect of pulsed film cooling on leading edge film effectiveness. Journal of Turbomachinery. 2012;134(4):041005.

15- Shahdad MH, Adami M, Mostoufi Zadeh AR. Numerical analysis of cooling of vanes of the first row of a turbine of a specific engine with film cooling and thermal shield coating and its numerical optimization. Proceedings of the 14th Conference of Iranian Aerospace Society; 2015, March 3-5; Tehran. Tehran: Scientific Information Database (SID); 2015. [Persian]

16- Akbari N, Pooladgar Y. Theoretical analysis of film cooling. Proceedings of the 14th Conference of Iranian Aerospace Society; 2015, March 3-5; Tehran. Tehran: Scientific Information Database (SID); 2015. [Persian]

17- Mahabadi Naderi H, Rajabi Zargarabadi M, Biglari M. Estimation of the turbulent Prandtl number in film cooling flow. Modares Mechanical Engineering. 2012;12(4):69-79.[Persian]

18- Stenger D, Ghia U, Ou S, Thornburg H. Numerical simulation of continuous and pulsed film cooling on a turbine-blade leading-edge model, including surface conductance. Proceedings of the 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition; 2010, June 4-7; Orlando, Florida. Reston: AIAA; 2010.

19- Hosseini Baghdad Abadi SM, 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. [Persian]

20- Choi JU, Kim GM, Lee HC, Kwak JS. Optimization of the Coanda bump to improve the film cooling effectiveness of an inclined slot. International Journal of Thermal Sciences. 2019;139:376-386.

21- Fraas M, Glasenapp T, Schulz A, Bauer HJ. Optimized inlet geometry of a laidback fan-shaped film cooling hole- Experimental study of film cooling performance. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019;128:980-990.

22- 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.

علامه یونانی

اثر بخشی	η
ویسکوزیته سینماتیک (m^2/s)	ν
تنش	τ
دانشیته (kg/m^3)	ρ
دلتای کرونگر	δ
جریان اصلی	∞
زیر نویس ها	
دیواره	w
هوای تزریق	<i>injection air</i>

منابع

- 1- Han JC, Rallabandi AP. Turbine blade film cooling using PSP technique. Frontiers in Heat and Mass Transfer. 2010;1(1):013001.
- 2- Li GC, Yang P, Zhang W, Wu Z, Kou ZH. Enhanced film cooling performance of a row of cylindrical holes embedded in the saw tooth slot. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019;132:1137-1151.
- 3- Rutledge JL. Pulsed film cooling on a turbine blade leading edge [dissertation]. Ohio: Air Force Institute of Technology; 2009.
- 4- Qingzong X, Qiang D, Pei W, Junqiang Z. Computational study of film cooling and flowfields on a stepped vane endwall with a row of cylindrical hole and interrupted slot injections. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019;134:796-806.
- 5- Dano B, Liburdy J. Vortical structure of a 45 degree inclined pulsed jet in crossflow. Proceedings of the 36th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit; 2006, June 5-8; San Francisco. Reston: AIAA; 2006.
- 6- Rolls Royce P. The jet engine. 5th edition. New York: John Wiley and Sons; 2015.
- 7- Han C, Ren J, Jiang H. Experimental investigations of SYCEE film cooling performance on a plate and a tested vane of an F-class gas turbine. Proceedings of the ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. Volume 5b: Heat transfer; 2014, June 16-20; Dusseldorf, Germany. New York: American Society of Mechanical Engineers.
- 8- Wu H, Cheng H, Li Y, Rong C, Ding S. Effects of side hole position and blowing ratio on sister hole film cooling performance in a flat plate. Applied Thermal Engineering. 2016;93:718-730.
- 9- Zulkifli R, Sopian K, Abdullah S, Takriff MS. Effect of pulsating circular hot air jet frequencies on local and average nusselt number. American Journal of Engineering and Applied Sciences. 2008;1(1):57-61.
- 10- Mayhew JE, Baughn JW, Byerley AR. The effect of freestream turbulence on film cooling adiabatic effectiveness. International Journal of Heat and Fluid