

تحلیل عددی تأثیر شیب بالادست جریان بر کارایی آدیاباتیک خنک‌کاری لایه‌ای

فؤاد جعفریان

نیما امانی‌فرد*

حامد محدث‌دیلیمی

محمد نقاش‌نژاد

کارشناس ارشد، گروه مکانیک، پردیس بین‌الملل، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی شرق گیلان، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

چکیده

در تحقیق حاضر تأثیر افزودن شیب بالادست جریان بر میدان‌های جریان و دما در روش خنک‌کاری لایه‌ای از طریق یک ردیف سوراخ مجزای استوانه‌ای بر روی مدل صفحه تخت به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه جریان به صورت سه‌بعدی، آشفته، تراکم‌ناپذیر و پایدار در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از یک شبکه سازمان‌یافته، غیریکنواخت و شش وجهی شامل کانال جریان اصلی و مجرای تزریق، توسط مدل آشفتگی Realizable K-ε انجام شده است. مسئله حاضر در زاویه تزریق ۳۰ درجه به ازای نسبت طول به قطر سوراخ ۱۰ و نسبت چگالی ۱، برای نسبت دم‌های ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲ و زوایای شیب بالادست ۰، ۸/۵ و ۱۵ درجه مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که خصوصیات خنک‌کاری لایه‌ای در ناحیه پایین‌دست سوراخ‌های تزریق، به ترکیب زوایای شیب (ارتفاع شیب) با نسبت دم‌ش شدیداً حساس می‌باشد. در واقع وجود شیب بالادست جریان به عنوان تولیدکننده گردابه، اثرات مهمی را بر ساختارهای گردابه‌ای میدان جریان و متعاقباً بر کارایی آدیاباتیک خنک‌کاری لایه‌ای در پایین دست سوراخ تزریق، از خود بر جای می‌گذارد. همچنین نتایج عددی در مقایسه با داده‌های تجربی از همخوانی قابل قبولی برخوردار می‌باشد. **واژه‌های کلیدی:** خنک‌کاری لایه‌ای، شیب بالادست جریان، کارایی آدیاباتیک، تحلیل عددی.

Numerical Investigation of Upstream Ramp Effect on Adiabatic Film Cooling Effectiveness

F. Jafarian

N. Amanifard

H. Mohaddes Deylami

M. Naghashnejad

Mechanical Engineering, International Guilan University Campus, Guilan, Iran

Mechanical Engineering, University of Guilan, Guilan, Iran

Mechanical Engineering, International Guilan University Campus, Guilan, Iran

Mechanical Engineering, University of Guilan, Guilan, Iran

Abstract

In this research, numerical analysis has been conducted to investigate the flow and thermal fields of incompressible, steady, turbulent three dimensional film-cooling by placing an upstream ramp in front of a single row of inclined cylindrical holes over a flat plate model. The computational methodology includes the use of a structured, non-uniform hexahedral grid consisting of the main flow channel and the coolant delivery tube, and the Realizable K-ε model was adopted as the turbulence model. Computations are carried out for the following range of film cooling parameters: upstream ramp angle (0, 8.5 and 15 deg) and blowing ratio (0.4, 0.8 and 1.4) while other constant parameters such as: streamwise injection angle is 30°, length to diameter ratio is 10 and density ratio of the main flow to the cooling jet flow is about unity. The results indicate that upstream ramp acts as a vortex generator and these vortices were used to enhance the mechanism of film cooling. The results have been compared with previous experimental data showing good agreement.

Keywords: Film Cooling, Upstream Ramp, Adiabatic Effectiveness, Numerical Solution.

۱- مقدمه

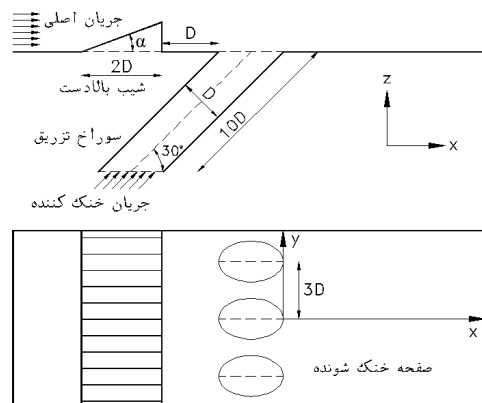
امروزه توربین‌های گازی نوین به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که اجزای آنها در معرض دماهای بسیار بالایی قرار می‌گیرند. در روش خنک‌کاری لایه‌ای با تزریق بخشی از هوای خنک خروجی از کمپرسور به داخل لایه‌مرزی حاصل از جریان گازهای داغ خروجی از محفظه احتراق، یک لایه محافظ در امتداد سطح پره تشکیل می‌شود. بنابراین انتقال حرارت از جریان اصلی گازهای داغ به سطح پره کاهش و بازدهی کلی توربین افزایش می‌یابد.

از جمله مطالعات انجام شده می‌توان به کار تجربی سینها و همکاران [۱] اشاره کرد که با تغییر پارامترهای جریانی نسبت دم‌ش و نسبت چگالی، سه الگوی متفاوت برای جریان خروجی از یک ردیف سوراخ استوانه‌ای مجزا، بر مبنای نسبت مومنتوم گزارش نمودند. موپیدی و ماهش [۲] با استفاده از روش قدرتمند DNS توسط شبکه‌ای بی‌سازمان، به بررسی خط سیر جت تزریقی به جریان اصلی با نسبت چگالی واحد پرداختند. نا و شیه [۳] جهت اصلاح هندسه بالادست سوراخ‌های تزریق، با رهیافت RANS عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای از طریق تعبیه شیب بالادست جریان را بررسی کردند. بریگوزی و

همکاران [۴] و چن و همکاران [۵] نیز مطالعاتی تجربی در راستای بررسی عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای در اثر اعمال شیب بالادست جریان انجام دادند. تیایگی و آچاریا [۶] از روش LES جهت تحلیل خنک‌کاری لایه‌ای از طریق تزریق توسط سوراخ‌های مورب و به ازای دو نسبت طول به قطر سوراخ تزریق متفاوت استفاده کردند. ساکائی و همکاران [۷] با رهیافت‌های RANS و LES به بررسی خنک‌کاری لایه‌ای روی صفحه تخت و مدل نیم‌استوانه‌ای لبه حمله پرداختند. آن‌ها در قسمتی از تحقیق خود با بهره‌گیری از روش DES بر مبنای مدل اسپالارت-آلماراس، خنک‌کاری لایه‌ای از طریق سوراخ‌های دایروی روی صفحه تخت را بررسی کردند. از سویی دیگر در سال‌های اخیر بهره‌گیری از شیب بالادست جریان به عنوان یک روش مؤثر در جهت افزایش کارایی خنک‌کاری لایه‌ای مطرح می‌باشد. در مقاله حاضر به بررسی عددی اثرات اضافه شدن شیب بالادست بر میدان‌های جریان و دما به ازای تغییرات پارامتر هندسی زاویه شیب (α) و پارامتر جریانی نسبت دمشی ($M = \rho_c V_c / \rho_m V_m$) در حالت تزریق از طریق یک ردیف سوراخ مجزای استوانه‌ای با نسبت چگالی واحد پرداخته شده است. سپس کارایی آدیاباتیکی خنک‌کاری لایه‌ای بر حسب پارامترهای مذکور مورد بررسی قرار گرفته و حالت‌های بهینه ارائه شده است.

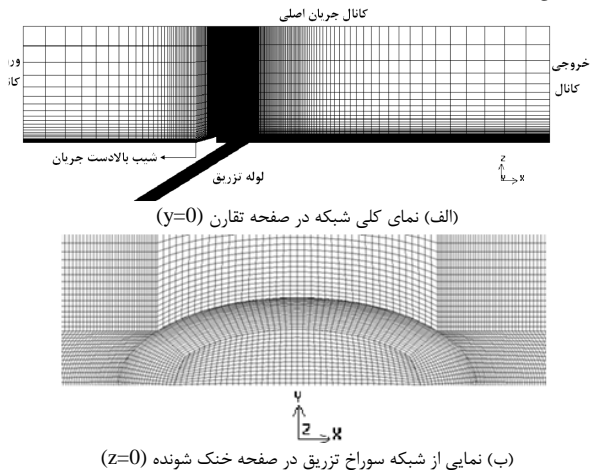
۲- هندسه مسأله و شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

هندسه سه بعدی مورد نظر، متناظر با نمونه تجربی چن و همکاران [۳] می‌باشد. قطر سوراخ تزریق دایروی $D=6/4$ mm و فاصله بین مراکز سوراخ‌های تزریق در جهت جانبی برابر $3D$ است. ابعاد کانال جریان اصلی برابر $49D \times 10D \times 3D$ و فاصله ابتدای کانال تا لبه حمله سوراخ تزریق $19D$ می‌باشد. همچنین ناحیه محاسباتی از لبه حمله سوراخ تزریق تا پایین دست جریان حدوداً $30D$ امتداد یافته که فاصله مناسبی است تا ساختارهای گردابه‌ای ناشی از آمیختگی جت و جریان اصلی به خوبی شبیه‌سازی شوند. طول لوله تزریق هم برابر $10D$ در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی عددی برای زوایای شیب بالادستی 0° ، $8/5^\circ$ و 15° و در سه نسبت دمشی $0/4$ ، $0/8$ و $1/2$ صورت گرفته است. به منظور کاهش زمان و هزینه محاسباتی و با توجه به تقارن هندسی میدان حل، حداقل ناحیه محاسباتی مورد نیاز یعنی از مرکز یک سوراخ تزریق تا وسط فاصله از مرکز سوراخ مجاور انتخاب گردیده که مشخصات هندسی ناحیه محاسباتی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- هندسه ناحیه محاسباتی

شبکه‌بندی با نرم‌افزار GAMBIT انجام گرفته و شبکه سازمان‌یافته، غیر یکنواخت و شش‌وجهی می‌باشد. به‌دلیل بهره‌گیری از مدل آشفتگی Realizable k-ε، برای افزایش دقت محاسبات در لایه مرزی، رفتار دیوار بهبود یافته فعال شده است. بنابراین به‌منظور دستیابی به دقت مورد نظر تراکم شبکه‌بندی به‌گونه‌ای است که در مجاورت دیواره‌ها از تراکم سلولی بیشتری استفاده شده تا کنترل صحیحی روی y^+ انجام پذیرد، به‌نحوی که در تمامی دیواره‌ها y^+ حتی الامکان نزدیک به ۱ می‌باشد. در شکل ۲ نماهایی از شبکه محاسباتی نمایش داده شده است.



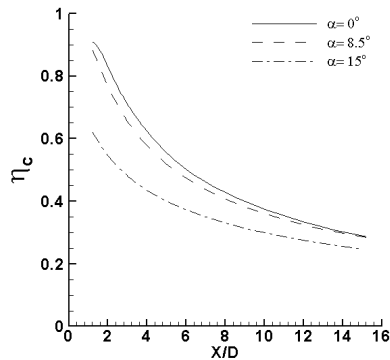
شکل ۲- نماهایی از شبکه محاسباتی

۳- روش حل عددی

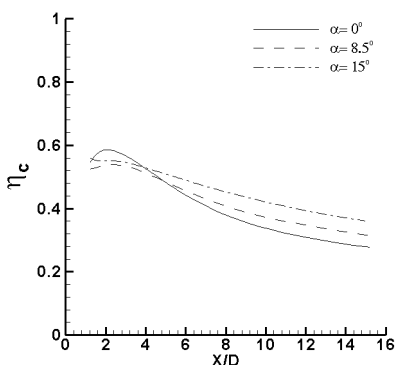
جهت مدل‌سازی آشفتگی جریان، مدل دو معادله‌ای Realizable k-ε بر پایه معادلات ناویر-استوکس متوسط‌گیری شده رینولدز (RANS) به کار رفته و دستگاه معادلات حاکم برای جریان تحت شرایط سه‌بعدی، تراکم‌ناپذیر، پایدار، لزج، تک‌فاز و با صرف‌نظر از نیروهای حجمی، در نظر گرفته شده است. حل عددی معادلات حاکم با استفاده از کد Fluent صورت گرفته است. به منظور یافتن جواب‌های مستقل از شبکه، مقایسه نتایج چند شبکه مختلف برای کارایی آدیاباتیکی خنک‌کاری لایه‌ای (η) روی خط مرکزی ($y, z=0$) در شکل ۳ نشان می‌دهد که شبکه دارای $1,305,000$ سلول برای حل عددی در حالت زاویه شیب $8/5^\circ$ درجه مناسب می‌باشد.

۴- شرایط مرزی

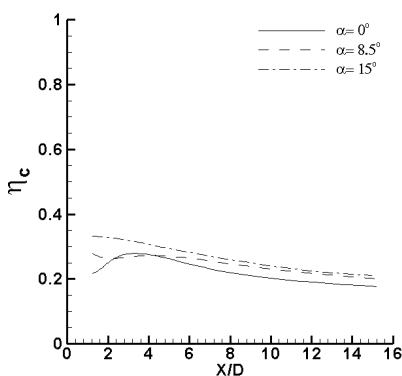
هوا به صورت گاز ایده‌آل تراکم‌ناپذیر می‌باشد. برای ورودی کانال جریان اصلی شرط مرزی ورودی سرعت با مقدار یکنواخت m/s $34/7$ ، دمای $302K$ ، شدت آشفتگی 2% و مقیاس طول آشفتگی برابر یک دهم اندازه بعد عمودی کانال به کار رفته است [۱۵]. در صفحه ورودی کانال تزریق نیز شرط ورودی سرعت لحاظ شده که مقدار یکنواخت سرعت در این سطح متناسب با نسبت دمشی در هر حالت، متغیر می‌باشد. (شدت آشفتگی برابر 2% و مقیاس طول آشفتگی). صفحه خروجی کانال دارای شرط مرز خروجی جریان می‌باشد و در مورد صفحات جانبی کانال جریان اصلی و مجرای تزریق شرط مرزی تقارن به کار برده شده است. دیواره‌های پایینی کانال و مجرای تزریق



شکل ۵- توزیع η_c بر روی خط مرکزی در $M=0.4$ و زوایای شیب مختلف



شکل ۶- توزیع η_c بر روی خط مرکزی در $M=0.8$ و زوایای شیب مختلف



شکل ۷- توزیع η_c بر روی خط مرکزی در $M=1.2$ و زوایای شیب مختلف

همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در نسبت دمشی 0.4 با افزایش زاویه شیب، عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای در راستای خط مرکزی کاهش می‌یابد. دلیل این امر از آنجا ناشی می‌شود که جت خنک‌کننده در نسبت دمشی 0.4 به‌علت فقدان مومنتم کافی، بلافاصله پس از خروج از سوراخ تزریق مغلوب جریان بازگشتی شده و به داخل این ناحیه کشیده می‌شود. به ازای نسبت دمشی 0.8 همان‌گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، با افزایش زاویه شیب عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای ابتدا تا فاصله $X/D = 4$ کاهش و سپس افزایش می‌یابد. اگرچه با افزایش نسبت دمشی، مومنتم جت خنک‌کننده نیز افزایش یافته و تا

هم به صورت عایق، ساکن و بدون لغزش فرض شده‌اند. به منظور یافتن جواب‌های مستقل از شبکه، مقایسه نتایج چند شبکه مختلف برای کارایی آدیباتیک خنک‌کاری لایه‌ای روی خط مرکزی در شکل ۳ نشان می‌دهد که شبکه دارای 0.003051 سلول برای حل عددی در حالت $\alpha=8/5^\circ$ مناسب می‌باشد.

۵- بحث و بررسی نتایج

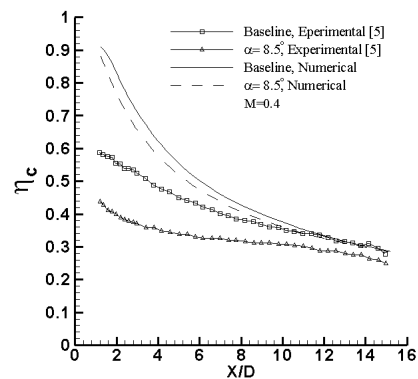
۱-۱- اعتبارسنجی نتایج عددی

جهت حصول اطمینان از صحت جواب‌ها، نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر با نتایج تجربی چن و همکاران [۶] برای کارایی آدیباتیک خنک‌کاری لایه‌ای ($\eta = \frac{(T_m - T_{aw})}{(T_m - T_c)}$) در نسبت دمشی 0.4 مقایسه شده است و همانطور که شکل ۴ بیانگر آن است، تطابق قابل قبولی بین نتایج مشاهده می‌شود.

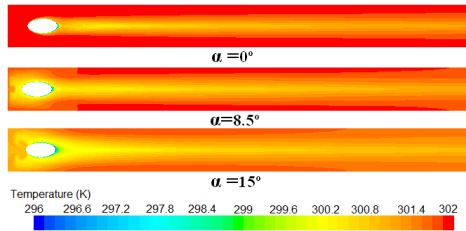
۲-۵- بررسی کارایی خنک‌کاری لایه‌ای در راستای خط

مرکزی

یکی از پارامترهای هندسی مؤثر در تحلیل کارایی خنک‌کاری لایه‌ای در حضور شیب بالادست جریان، زاویه شیب می‌باشد. در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ تأثیر پارامتر زاویه شیب به ازای نسبت دمشی‌های متفاوت بر روی کارایی آدیباتیک خنک‌کاری لایه‌ای روی خط مرکزی (η_c) نشان داده شده است.

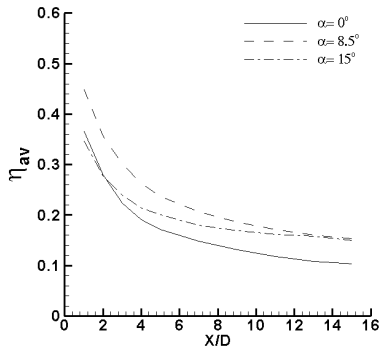


شکل ۴- توزیع η_c بر روی خط مرکزی ($y, z=0$) در نسبت دمشی $M=0.4$

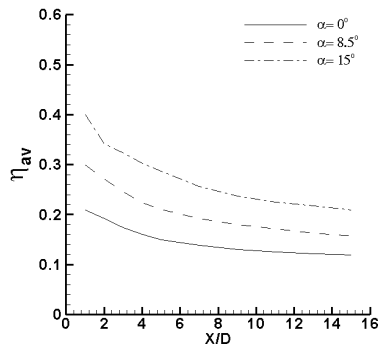


شکل ۱۰- توزیع دمای استاتیک در صفحه خنک‌شونده ($z=0$) به ازای $M=1/2$ و زوایای شیب مختلف

در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ تأثیر پارامتر نسبت دم‌ش به ازای زوایای شیب مختلف بر روی کارایی آدیاباتیک متوسط جانبی خنک‌کاری لایه‌ای (η_{av}) نشان داده شده است. بررسی نتایج مؤید آن است که اعمال شیب بالادست در همه نسبت‌دم‌ش‌ها منجر به بهبود η_{av} می‌گردد، به‌گونه‌ای که در نسبت‌دم‌ش پایین، زاویه شیب $8/15$ درجه و در نسبت‌دم‌ش‌های متوسط و بالا، زاویه شیب 15 درجه بیشترین η_{av} را به خود اختصاص می‌دهند.



شکل ۱۱- توزیع متوسط جانبی در $M=0/4$ و زوایای شیب مختلف

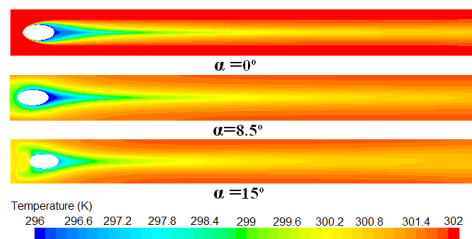


شکل ۱۲- توزیع متوسط جانبی در $M=0/8$ و زوایای شیب مختلف

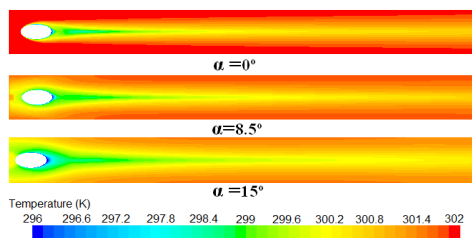
حدی قادر به مقابله با جریان بازگشتی می‌باشد ولی بدلیل برخاستگی بیشتر جت خنک‌کننده در ابتدای پایین‌دست سوراخ تزریق در مقایسه با حالت $\alpha=0^\circ$ افت کارایی خنک‌کاری لایه‌ای مشاهده می‌شود. علت افزایش عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای در فاصله بعد از $X/D = 4$ نیز به دلیل وجود لایه برشی بالای ناحیه بازگشتی است که همانند یک جریان ثانویه در بالای جت خنک‌کننده عمل نموده و مانع از نفوذ آن به داخل جریان اصلی می‌شود. نتایج بدست آمده از شکل ۷ حاکی از آن است که به ازای نسبت دم‌ش $1/2$ با افزایش زاویه شیب، عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای در راستای خط مرکزی افزایش می‌یابد. علت افت کارایی خنک‌کاری لایه‌ای در نسبت دم‌ش $1/2$ در مقایسه با نسبت دم‌ش‌های $0/4$ و $0/8$ را می‌توان به عقب رانده شدن لایه برشی توسط مومنتم قوی جت خنک‌کننده مرتبط دانست.

۳-۵- تحلیل کارایی متوسط جانبی خنک‌کاری لایه‌ای

در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ توزیع دمای استاتیک در صفحه خنک‌شونده ($z=0$) به ازای تغییرات زاویه شیب در نسبت دم‌ش‌های متفاوت نشان داده شده است. در حضور شیب بالادست جریان، به علت اضمحلال قدرت گردابه‌های نعل اسبی و افزایش پخش‌شدگی سیال سرد بر روی صفحه خنک‌شونده، کارایی خنک‌کاری لایه‌ای در راستای جانبی به طور مشهودی بهبود می‌یابد. در واقع در اثر برخورد جریان اصلی به ستون جت تزریقی، در ناحیه لبه حمله سوراخ تزریق یک ناحیه پرفشار و کم سرعت چرخشی شکل می‌گیرد که فشار جریان اصلی سبب گسترش آن در اطراف سوراخ تزریق می‌شود. این ساختار گردابه‌ای نعل‌اسبی از بالادست جت خروجی آغاز و با عبور از پیرامون جت خروجی تا پایین دست جریان اصلی گسترش می‌یابد و بدین ترتیب مانع از نفوذ جت خنک‌کننده در جهت عرضی بر روی سطح پره می‌گردد.



شکل ۸- توزیع دمای استاتیک در صفحه خنک‌شونده ($z=0$) به ازای $M=0/4$ و زوایای شیب مختلف



شکل ۹- توزیع دمای استاتیک در صفحه خنک‌شونده ($z=0$) به ازای $M=0/8$ و زوایای شیب مختلف

جفت گردابه خلاف‌گرد به صفحه خنک‌شونده می‌شود. بدین ترتیب شیب بالادست جریان، با به تعویق انداختن شکل‌گیری ساختار جفت گردابه خلاف‌گرد، منجر به بهبود کارایی خنک‌کاری لایه‌ای می‌شود.

۷- فهرست علائم

K	انرژی جنبشی آشفتگی، m^2/s^2
M	نسبت دمشی
T	دما، K
u	سرعت، m/s

علائم یونانی

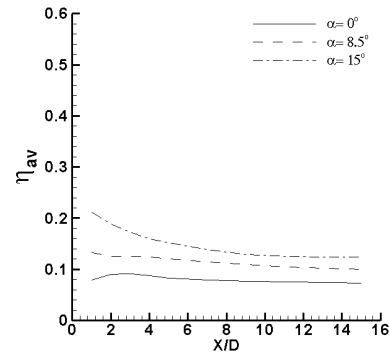
ε	نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی، m^2/s^3
η	کارایی خنک‌کاری لایه‌ای
μ	لزجت دینامیکی، Pa.s
ν	لزجت سینماتیکی، m^2/s
ρ	چگالی، kg/m^3

زیرنویس

aw	دیواره آدیباتیک
c	سیال خنک‌کننده
m	جریان اصلی

۸- مراجع

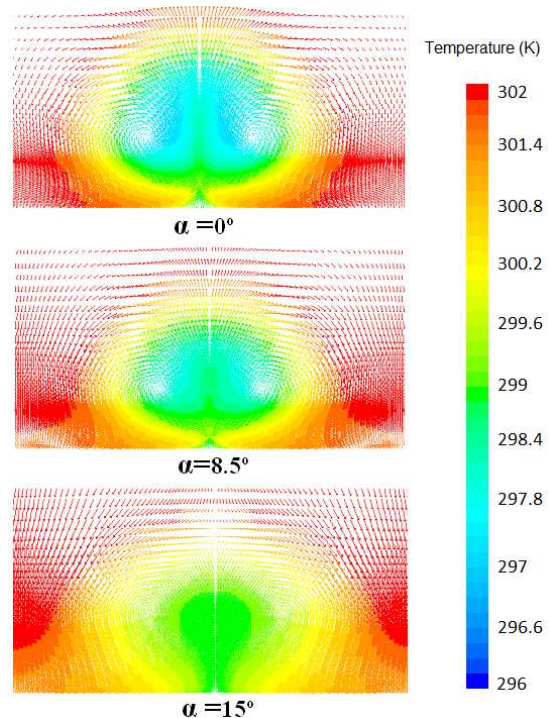
- [1] Sinha A. K., Bogard D. G. and Crawford M., Efficacy of film-cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio, Trans. ASME J. of Turbomachinery, vol.113, pp. 442-449, 1991.
- [2] Muppidi S. and Mahesh K., Study of Trajectories of Jets in Crossflow Using Direct Numerical Simulations, Journal of Fluid Mechanics, vol. 530, pp. 81-100, 2005.
- [3] Na S., Shih T.I.-P., Increasing adiabatic film cooling effectiveness by using an upstream ramp, Proceedings of GT2006, ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea and Air, May 8-11, 2006, Barcelona, Spain, 2006.
- [4] Barigozzi G., Franchini G. and Perdichizzi A., The effect of an upstream ramp on cylindrical and fan-shaped hole film cooling - Part I: aerodynamic results, ASME Paper GT2007-27077, 2007.
- [5] Shuping P., chen Minking K., Chyu, Tom I.-P., Shih, Effects of upstream ramp on the performance of film cooling, INT J THERM SCI, vol. 50, no. 6, pp. 1085-1094, 2011.
- [6] Tyagi M. and Acharya S., Large eddy simulation of film cooling flow from an inclined cylindrical jet, Trans. ASME J. of Turbomachinery, vol. 125, pp. 734-742, 2003.
- [7] Sakai E., Takahashi T., Funazaki K., Bin Salleh, H. and Watanabe, K., Numerical Study on Flat Plate and Leading Edge Film Cooling, Proceedings of ASME, GT2009 - 59517, pp. 491-503, 2009.



شکل ۱۳- توزیع η متوسط جانبی در $M=1/2$ و زوایای شیب مختلف

۵-۳- بررسی تأثیر جفت گردابه خلاف‌گرد بر توزیع دمای استاتیک

شکل ۱۴ به عنوان نمونه اثر جفت گردابه خلاف‌گرد در توزیع دمای استاتیکی را برای حالت $M=0/8$ و $X/D=5$ در زوایای شیب مختلف نشان می‌دهد. در حالت پایه نسبت به حالات اعمال شیب بالادست، مراکز جفت گردابه خلاف‌گرد به یکدیگر نزدیک‌تر می‌باشد که این رویداد منجر به تقویت القای دوطرفه، افزایش سرعت رو به بالا و افزایش فاصله مراکز جفت گردابه خلاف‌گرد از روی صفحه خنک‌شونده می‌شود.



شکل ۱۴- اثر جفت گردابه خلاف‌گرد در توزیع دمای استاتیکی برای $M=0/8$ و $X/D=5$ در زوایای شیب مختلف

با اعمال شیب بالادست جریان، مراکز جفت گردابه خلاف‌گرد نسبت به حالت بدون وجود شیب از یکدیگر دورتر شده و همین موضوع منجر به کاهش القای دوطرفه، کاهش سرعت رو به بالا و نزدیک‌تر بودن مراکز