



بررسی عددی تأثیر شیب بالادست جریان روی عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای همراه با سوراخ خنک‌کاری استوانه‌ای و لایه‌گستر

سید شهاب موسوی^۱، نیما امانی‌فرد^۱، حامد محدث دیلمی^{۲*}، محمد نقاش‌نژاد^۲

^۱دانشکده فنی و مهندسی شرق گیلان، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
^۲دانشکده مهندسی هوافضا و مکانیک، دانشگاه اکلاهما، اکلاهما، آمریکا

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۶ دی ۱۳۹۴
بازنگری: ۲۶ اسفند ۱۳۹۴
پذیرش: ۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۲۱ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

شیب بالادست
خنک‌کاری لایه‌ای
سوراخ تزریق لایه‌گستر
کارایی آدیباتیک

چکیده: در تحقیق حاضر، تأثیر شیب بالادست جریان اصلی بر میدان‌های جریان و دما در روش خنک‌کاری لایه‌ای از طریق یک ردیف سوراخ مجزای استوانه‌ای و سوراخ تزریق لایه‌گستر به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه، جریان به صورت سه‌بعدی، آشفته، تراکم‌ناپذیر و پایا در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از یک شبکه سازمان‌یافته غیریکنواخت و توسط مدل آشفتگی کی- ϵ پسیلون رینولدز پایین انجام شده است. مسئله حاضر در زاویه تزریق ۳۵ درجه و به ازای نسبت طول به قطر سوراخ ۱/۷۵ و نسبت چگالی ۲ و همچنین برای نسبت دم‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت سوراخ تزریق استوانه‌ای و لایه‌گستر در نسبت دم‌های پایین (کمتر از ۱)، حضور شیب بالادست جریان مفید نخواهد بود. استفاده از سوراخ تزریق لایه‌گستر باعث ایجاد عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای بهتری در همه نسبت دم‌ها در مقایسه با سوراخ تزریق استوانه‌ای می‌شود. همچنین در هر دو حالت سوراخ تزریق لایه‌گستر و استوانه‌ای با افزایش نسبت دم‌ها، وجود شیب بالادست باعث بهبود کارایی آدیباتیک خنک‌کاری لایه‌ای می‌شود. و حالت بهینه برای شرایط مورد مطالعه در حالت صفحه تخت همراه با سوراخ تزریق لایه‌گستر برای نسبت دم‌ها ۰/۵ رخ می‌دهد.

۱- مقدمه

عملکرد و بازده حرارتی موتور توربین‌های گاز به شدت به دمای ورودی توربین وابسته است. به‌گونه‌ای که با افزایش دمای ورودی، بازده حرارتی موتور افزایش می‌یابد. امروزه با افزایش تکنیک‌های خنک‌کاری پره‌های توربین گاز این امکان فراهم آمده است که دمای ورودی توربین‌ها افزایش یابد. یکی از تکنیک‌های خنک‌کاری پره‌های توربین، خنک‌کاری لایه‌ای^۱ است که به‌طور گسترده‌ای در توربین‌های گاز به منظور جلوگیری از آسیب قسمت‌های داغ پره در دمای بالا استفاده می‌شود. در این روش سیال خنک‌کننده که معمولاً از هوای خنک کمپرسور استخراج می‌شود، از کانال‌های درونی پره عبور کرده و از سوراخ‌های تعبیه شده در سطح پره خارج می‌شود. بنابراین لایه خنک‌کننده تزریق شده، سطح پره را در مقابل جریان گازهای داغ محافظت می‌کند. امروزه طراحان به‌طور فزاینده‌ای در تلاش هستند که برای حصول بازده بیشتر خنک‌کاری، از هوای خنک‌کننده کمتری استفاده کنند. زیرا هوای خنک‌کننده از طریق کمپرسور تأمین می‌شود، که کاهش این مصرف باعث بهبود کارایی توربین می‌شود.

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در حوزه خنک‌کاری لایه‌ای بر روی تأثیر پارامترهای اصلی که شامل پارامترهای هندسی و جریانی می‌شود صورت

گرفته است که می‌توان به کارهای تجربی سینها و همکاران [۱] و پیترزیک و همکاران [۲] اشاره نمود. آن‌ها خصوصیات هیدرودینامیکی و دمایی را برای یک ردیف سوراخ گسسته متمایل ۳۵ درجه با نسبت طول به قطرهای کوچک مورد بررسی قرار دادند.

بیشتر مطالعات محاسباتی انجام شده در حوزه خنک‌کاری لایه‌ای، بر روی تقابل سه بعدی جت‌های گسسته با جریان اصلی عبوری تمرکز کرده‌اند. در حقیقت تقابل جریان جت با جریان عبوری در خنک‌کاری لایه‌ای از اهمیت فراوانی برخوردار است. از جمله کارهای عددی صورت گرفته در این راستا می‌توان به مطالعات روزاتی و تفتی [۳] و والترز و لیلیک [۴] اشاره کرد. آن‌ها دریافته‌اند که ارتباط بین کارایی خنک‌کاری و پارامترهای مؤثر لزوماً خطی نبوده و تأثیر همزمان دو یا چند پارامتر مؤثر که ارتباط غیر خطی دارند، سبب پیچیدگی جریان می‌شود. نقاش‌نژاد و همکاران [۵] با بهره‌گیری از نتایج حل عددی و استفاده از شبکه عصبی نوع جی‌ام‌دی‌اچ^۲ یک رابطه ریاضی پیوسته برای کارایی آدیباتیک خنک‌کاری لایه‌ای برحسب پارامترهای جریانی و هندسی ارائه نمودند.

نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در نسبت دم‌های بالا، خنک‌کاری لایه‌ای با استفاده از سوراخ تزریق استوانه‌ای کارایی آدیباتیک

1 Film Cooling

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hmohaddesd@guilan.ac.ir

تاکنون بررسی عددی جامعی در خصوص تأثیر حضور شیب بالادست جریان همراه با سوراخ تزریق لایه‌گستر بر کارایی خنک‌کاری لایه‌ای صورت نگرفته است. در مطالعه حاضر به بررسی تأثیر همزمان شیب بالادست جریان و سوراخ تزریق لایه‌گستر بر میدان‌های جریان و دما در نسبت چگالی $1/6$ و در چهار نسبت دمش 0.5 ، 1 ، 1.5 و 2 پرداخته شده است. سپس به مقایسه کارایی خنک‌کاری لایه‌ای در حالت شیب بالادست، برحسب پارامترهای مذکور با حالت صفحه تخت در حالت تزریق از طریق سوراخ تزریق لایه‌گستر و استوانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و بهترین حالت ارائه شده است.

۲- هندسه مسئله و شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

مطابق شکل ۱، هندسه سه بعدی مورد مطالعه بدون شیب بالادست، شامل کانال جریان اصلی، محفظه تزریق و مجرای تزریق سیال خنک‌کننده می‌باشد. شکل نشان داده شده متناظر با نمونه تجربی سینها و همکاران [۱] است. قطر سوراخ تزریق دایروی $D=12\text{mm}$ و گام سوراخ‌های خنک‌کاری در یک ردیف سوراخ برابر $3D$ است. ابعاد کانال جریان اصلی برابر $49D \times 10D \times 3D$ و فاصله ابتدای کانال تا لبه حمله سوراخ تزریق $19D$ می‌باشد. طول لوله تزریق $1/75D$ در نظر گرفته شده است. ابعاد محفظه تزریق نیز برابر $8D \times 4D \times 3D$ می‌باشد؛ همچنین زاویه مجرای تزریق نسبت به جریان اصلی 35° است.

در شکل ۲ (الف) هندسه سوراخ تزریق لایه گستر به تصویر کشیده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تا فاصله $0.75D$ از طول لوله تزریق به

کمی دارد. بنابراین محققین استفاده از سوراخ‌های شکل داده شده^۱ را پیشنهاد دادند. از جمله این کارها می‌توان به مطالعه عددی هیماس و لیلیک [۶] و همچنین سامویر و اسکولز [۷] اشاره کرد. آن‌ها با بررسی اشکال مختلف سوراخ تزریق، به این نتیجه رسیدند که استفاده از سوراخ لایه‌گستر^۲ به دلیل بازشدگی در جهت جانبی باعث پخش بهتر سیال سرد در سطح پره می‌شود. همچنین با افزایش سطح مقطع خروجی سوراخ تزریق، مومنتوم جریان خنک‌کننده در خروجی کاهش یافته و نفوذ سیال سرد به جریان اصلی کمتر می‌شود.

البته ذکر این نکته ضروری است که تزریق جت خنک‌کننده در جریان اصلی داغ، منجر به تشدید اغتشاشات هیدرودینامیکی در لایه مرزی آشفته می‌گردد و بنابراین جت‌های سه‌بعدی به شدت متأثر از گردابه‌های ناشی از اختلاط جت و جریان اصلی هستند و این اختلاط باعث کاهش کارایی خنک‌کاری لایه‌ای می‌شود. به همین علت در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از شیب بالادست جریان^۳ به عنوان یک روش مؤثر در جهت افزایش کارایی خنک‌کاری لایه‌ای مطرح شده است. از جمله مطالعات صورت گرفته در این حوزه می‌توان به مطالعه تجربی چن و همکاران [۸] و همچنین مطالعه عددی نا و شیبه [۹] اشاره کرد. جعفریان و همکاران [۱۰] نیز با بررسی زوایای مختلف شیب بالادست جریان به این نتیجه رسیدند که وجود شیب در بالادست جریان به عنوان تولیدکننده گردابه، اثرات مهمی را بر ساختارهای گردابه‌ای میدان جریان و متعاقباً بر کارایی آدیاباتیک خنک‌کاری لایه‌ای در پایین‌دست سوراخ تزریق، از خود بر جای می‌گذارد.

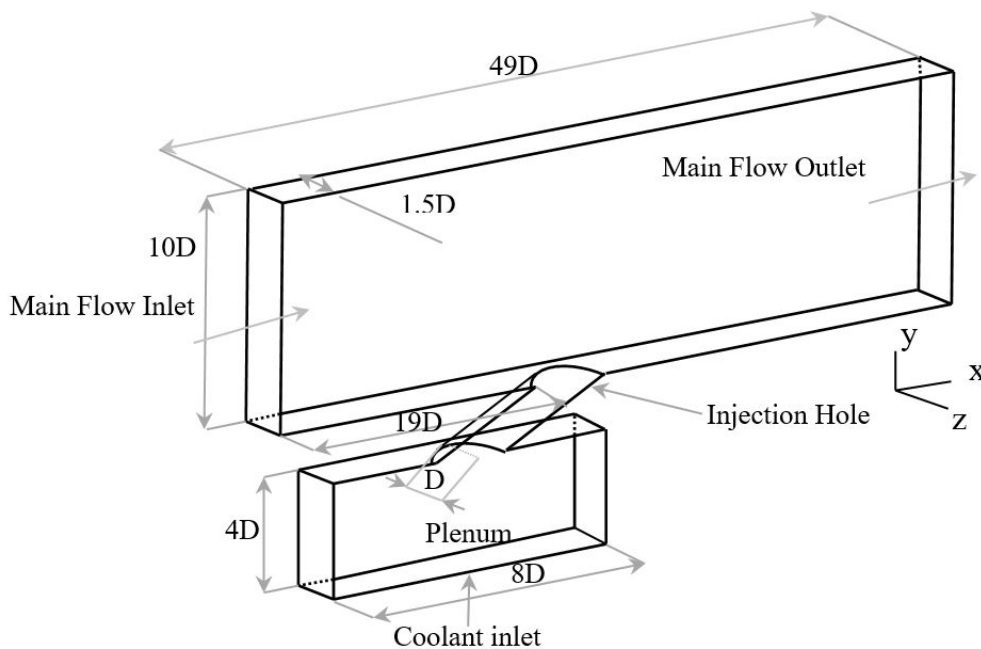


Fig. 1. 3-D view of the Computational domain

شکل ۱: نمای سه‌بعدی دامنه محاسباتی

- 1 Shaped-hole
- 2 Fan-shaped Hole
- 3 Upstream Ramp

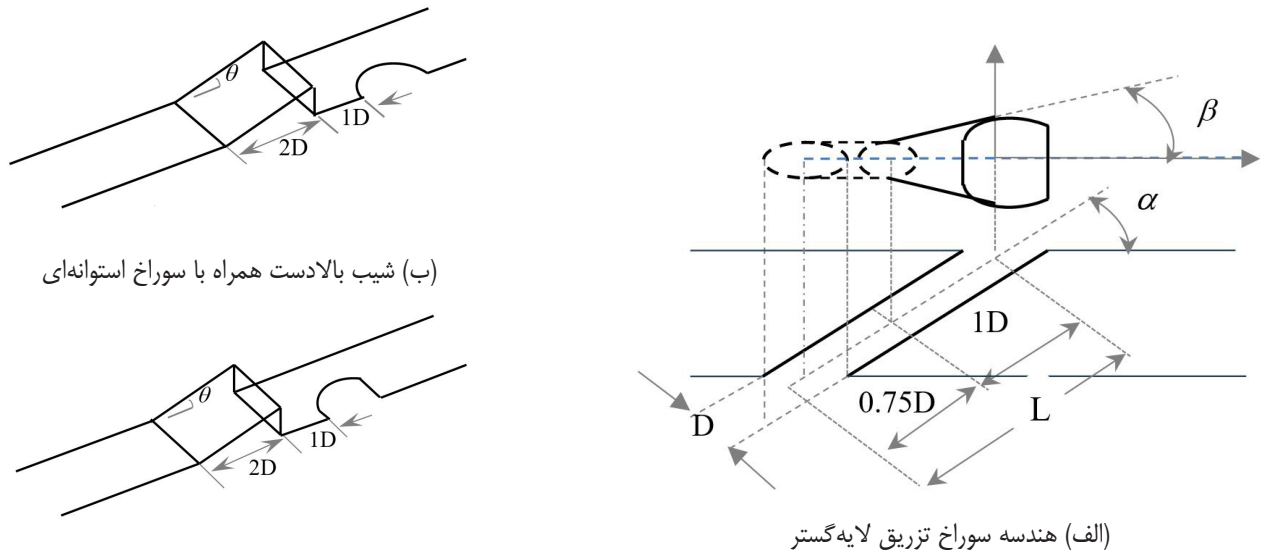


Fig. 2. Schematic view of the upstream ramp and details of the fan-shaped hole geometry

شکل ۲: هندسه سوراخ تزریق لایه گستر و شیب بالادست

تعداد سلول ۸۰۹۵۹۶ استفاده شده است.

همچنین برای دیگر شرایط نیز استقلال شبکه بررسی شده است.

۳- معادلات حاکم و روش حل عددی

معادلات حاکم برای جریان تحت شرایط سه بعدی، تراکم ناپذیر، پایا، لزج، تک فاز با صرف نظر از نیروهای حجمی شامل معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی است. معادلات حاکم عبارتند از:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\tau_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}] \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + P)] = -\frac{\partial}{\partial x_j}\left[K_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})e_{eff}\right] \quad (3)$$

در معادلات بالا، u_{ij} مؤلفه سرعت در هر یک از راستاهای اصلی، ρ چگالی سیال، P فشار و E انرژی درونی سیال است. $-\overline{\rho u_i u_j}$ نمایانگر تنش‌های رینولدز است که باید برای جریان آشفته به درستی مدل شود. همچنین τ_{ij} مؤلفه تانسور تنش متقارن است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (4)$$

در تحقیق حاضر جهت مدل‌سازی ترم‌های آشفتگی، مدل دو معادله‌ای کی-اِپسیلون رینولدز پایین^۲ با ثابت عمومی پیشنهاد شده توسط لاندرو

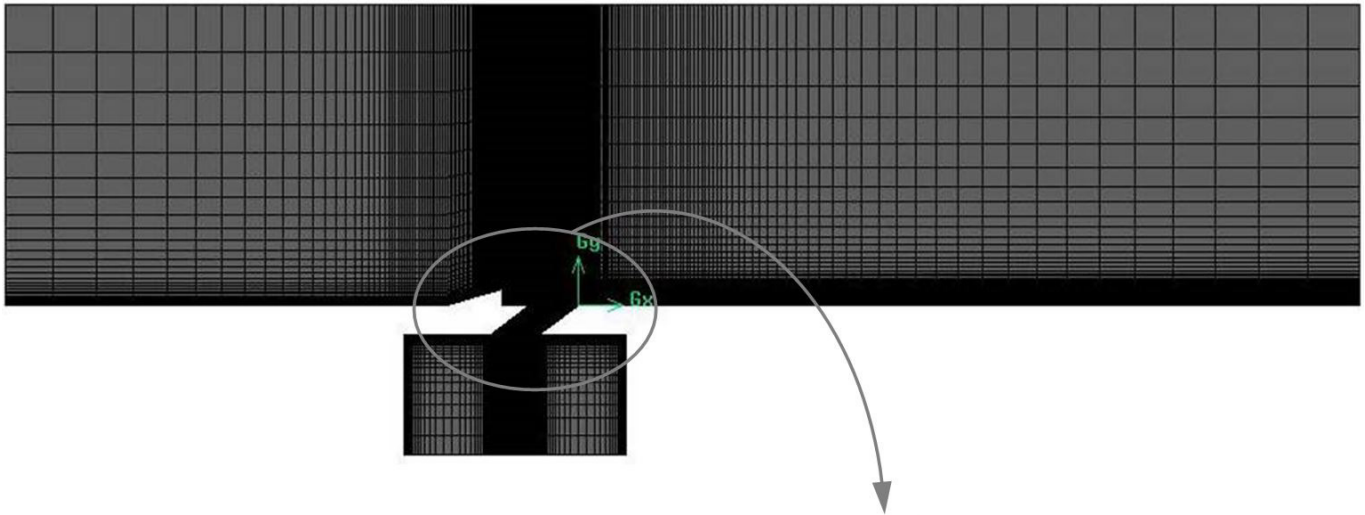
صورت استوانه‌ای و مابقی طول لوله تزریق در راستای عرضی با زاویه برابر $\beta=13^\circ$ ، گسترش می‌یابد.

در شکل ۲ (ب) و شکل ۲ (ج) به ترتیب، هندسه شیب بالادست در نزدیکی سوراخ استوانه‌ای و سوراخ لایه گستر نمایش داده شده است. مبدأ مختصات در لبه فرار سوراخ تزریق در نظر گرفته شده و محورهای x ، y و z به ترتیب منطبق با جهت‌های طولی، عمودی و جانبی می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فاصله شیب بالادست تا لبه حمله سوراخ تزریق $1D$ در نظر گرفته شده است و فاصله افقی شیب بالادست در راستای x برابر $2D$ می‌باشد. لازم به ذکر است که زاویه شیب بالادست جریان برابر با $\theta=15^\circ$ در نظر گرفته شده 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 است. شبکه بندی هندسه‌های مورد بررسی به کمک نرم‌افزار گمبیت^۱ [۱۱] انجام گرفته و شبکه ایجاد شده به صورت سازمان‌یافته، غیریکنواخت و شش‌وجهی می‌باشد. برای افزایش دقت محاسبات در لایه مرزی، تراکم شبکه بندی در نزدیکی دیواره‌ها بیشتر است به گونه‌ای که y^+ در نزدیکی تمامی دیواره‌ها کمتر از ۳ می‌باشد. در شکل ۳ شبکه محاسباتی نمایش داده شده است.

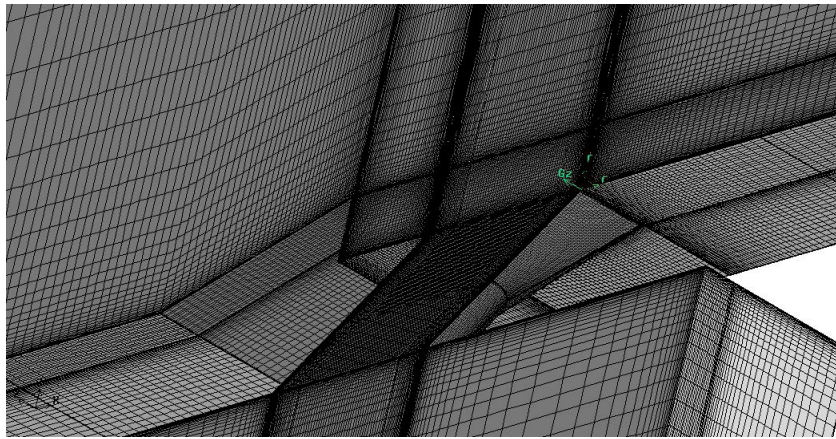
به منظور یافتن نتایج مستقل از شبکه محاسباتی، مقایسه کارایی آدیاباتیکی خنک‌کاری لایه‌ای روی خط مرکزی در حالت صفحه تخت در نسبت دمش ۰/۵، برای شبکه بندی‌های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کارایی آدیاباتیکی خنک‌کاری لایه‌ای در شبکه‌هایی با تعداد سلول ۸۰۹۵۹۶ و ۱۰۱۳۴۷۴ تقریباً یکسان است. بنابراین به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی در تحلیل عددی از شبکه با

2 Low-Re k-ε Model

1 Gambit



(الف) شبکه‌بندی در صفحه $x-y$



(ب) شبکه‌بندی اطراف سوراخ تزریق لایه گستر همراه با شیب بالادست

Fig. 3. Schematic view of the grid generation

شکل ۳: شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

شارما [۱۲]، بر پایه معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس به کار گرفته شده است. جریان سیال کاملاً آشفته و از اثرات لزجت مولکولی صرف نظر شده است. معادلات انرژی جنبشی آشفتگی (کی) و نرخ اتلاف آشفتگی (اپسیلون) به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho k u_i - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = P - \rho \varepsilon - \rho D \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho \varepsilon u_i - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] = \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} f_1 \rho - C_{\varepsilon 2} f_2 \rho \varepsilon) - \rho E \quad (6)$$

که در معادلات فوق:

$$\mu_t = c_\mu f_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

- 1 k
- 2 ε

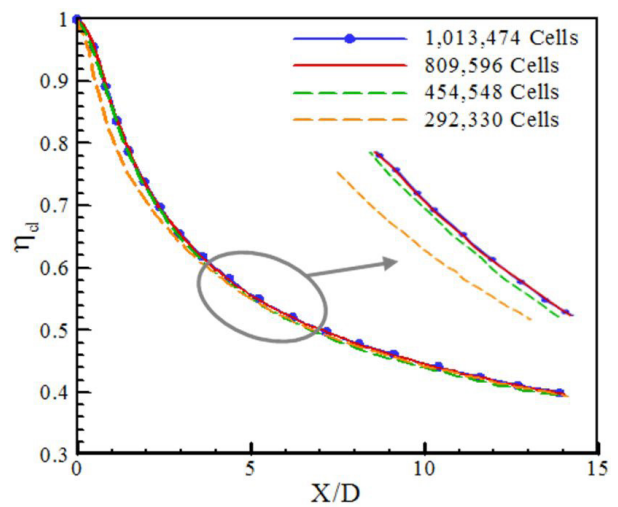


Fig. 4. Grid independence test for the centerline adiabatic effectiveness

شکل ۴: توزیع η بر روی خط مرکزی برای $(y, z=0)$ برای شبکه‌بندی‌های مختلف

۵- نتایج

حالت‌های هندسی مورد مطالعه در این پژوهش شامل چهار هندسه مختلف: کانال صفحه تخت همراه با سوراخ تزریق استوانه‌ای، کانال با شیب بالادست جریان همراه با سوراخ تزریق استوانه‌ای، کانال صفحه تخت همراه با سوراخ تزریق لایه‌گستر و کانال با شیب بالادست جریان همراه با سوراخ تزریق لایه‌گستر است. برای تمامی شرایط مورد مطالعه، چهار مقدار برای نسبت دمش ۲ و ۱/۵، ۱، ۰/۵، $M=0/5$ و یک مقدار برای نسبت چگالی، $DR=1/6$ در نظر گرفته شده است. به منظور مقایسه بین حالت‌های مختلف، دمای استاندارد دیواره آدیاباتیکی (T_{aw})، به صورت کارایی آدیاباتیکی خنک‌کاری لایه‌ای تعریف می‌شود و همچنین کارایی متوسط جانبی به عنوان پارامتر اصلی مقایسه بین هندسه‌های مختلف تحقیق حاضر محسوب می‌شود. نسبت دمش، کارایی خنک‌کاری لایه‌ای خط‌مرکزی و کارایی خنک‌کاری متوسط جانبی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

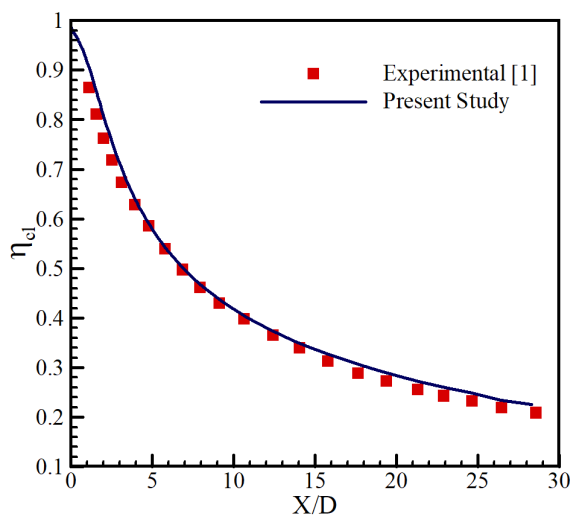
$$M = \frac{(\rho U)_c}{(\rho U)_\infty} \quad (10)$$

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_\infty}{T_c - T_\infty} \quad (11)$$

$$\eta_{ave} = \frac{1}{Z} \int_{z=0}^{z=p} \eta dz \quad (12)$$

۵-۱- اعتبارسنجی نتایج

جهت حصول اطمینان از صحت جواب‌ها، مقایسه نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر با نتایج تجربی سینها و همکاران [۱] در نسبت دمش ۰/۵ و نسبت چگالی ۱/۶ در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده



$DR=1/6$ ، $M=0/5$ (الف)

Fig. 5. Comparison of numerical and experimental results for flat plate model

شکل ۵: مقایسه نتایج عددی و تجربی برای صفحه تخت

$$P = \tau_{ij}^{urb} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

در این مدل تنش‌های رینولدز با استفاده از رابطه بوزینسک^۱ به گرادیان میدان سرعت متوسط مرتبط می‌شوند:

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (9)$$

حل عددی معادلات حاکم با استفاده از کد فلونت^۲ ۱۵ [۱۳] بر اساس روش حجم محدود و توسط حل‌کننده بر پایه فشار صورت گرفته و جهت گسسته‌سازی ترم‌های معادلات از تقریب مرتبه دوم و همچنین برای حل همزمان میدان فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل^۳ استفاده شده است. به منظور تشخیص همگرایی حل، محاسبات برای معادلات پیوستگی و مومنتم و انرژی تا دستیابی به مانده‌های در مرتبه حداکثر 10^{-6} و برای معادلات آشفتگی از مرتبه 10^{-5} پیگیری شده است. کلیه محاسبات توسط پردازشگر اینتل^۴ هسته‌ای و ۲/۴ گیگاهرتز^۴ و به صورت پردازش موازی انجام شده و زمان محاسبات در حدود ۴-۶ ساعت برای هر حل بوده که متناسب با هندسه حل متغیر است.

۴- خواص ترمودینامیکی و شرایط مرزی

در مطالعه حاضر هوا به عنوان سیال عامل مورد استفاده قرار گرفته و از آنجایی که در سرعت‌های پایین ($Ma < 0/3$) هوا به صورت تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود، لذا در تحقیق حاضر هوا به صورت گاز ایده‌آل تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است. در ورودی کانال جریان اصلی شرط مرزی ورودی سرعت یکنواخت ۲۰ m/s و دمای ۳۰۲ K، همچنین شدت آشفتگی ۲٪ و مقیاس طول آشفتگی، یک دهم اندازه بعد عمودی کانال می‌باشد. در ورودی محفظه جریان خنک‌کننده نیز شرط ورودی سرعت لحاظ شده که متناسب با نسبت دمش در هر حالت متغیر است. دمای ورودی این صفحه ۱۵۳ K می‌باشد. در این صفحه نیز شدت آشفتگی برابر ۲٪ و مقیاس طول آشفتگی، یک‌دهم بعد جانبی محفظه جریان خنک‌کننده در نظر گرفته شده است. صفحه خروجی کانال جریان اصلی دارای شرط مرزی فشار خروجی می‌باشد. در مورد صفحات جانبی کانال جریان اصلی، محفظه جریان خنک‌کننده و مجرای تزریق از شرط مرزی تقارن استفاده شده است. همچنین صفحه بالایی کانال جریان اصلی به دلیل اینکه در فاصله کافی $10D$ از صفحه پایینی قرار داشته و گرادیان متغیرها در راستای عمود بر این سطح ناچیز می‌باشد، از شرط مرزی تقارن برای این صفحه استفاده شده است. دیواره‌های پایین کانال جریان اصلی، دیواره بالایی محفظه جریان خنک‌کننده و همچنین مجرای تزریق به صورت عایق، ساکن و بدون لغزش می‌باشند.

- 1 Boussinesq
- 2 Fluent 15
- 3 SIMPLE
- 4 Intel Core i8 2.4 GHz

خنک کاری لایه‌ای در امتداد خط مرکزی بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. در این حالت شیب بالا دست همراه با سوراخ استوانه‌ای دارای کمترین کارایی خنک کاری لایه‌ای است زیرا به علت عدم وجود مومنتم کافی، جریان جت خنک‌کننده بلافاصله پس از خروج از سوراخ تزریق مغلوب جریان بازگشتی شده و به داخل ناحیه بازگشتی کشیده می‌شود. در نتیجه دبی جرمی جت خنک‌کننده جهت محافظت از سطح پره در پایین دست سوراخ تزریق کاهش یافته و کارایی خنک کاری لایه‌ای در امتداد خط مرکزی کاهش می‌یابد.

در شکل ۶ (ب)، به ازای نسبت دمش ۱، در حالت کانال صفحه تخت همراه با سوراخ تزریق لایه‌گستر تا فاصله $X/D < 9$ ، بهترین کارایی آدیباتیک خنک کاری مشاهده می‌شود. اما در فواصل دورتر از $X/D = 9$ شیب بالادست

می‌شود تطابق قابل قبولی بین نتایج عددی و نتایج تجربی، برای کارایی آدیباتیک خنک کاری لایه‌ای مشاهده می‌شود.

۵-۲- کارایی آدیباتیک خنک کاری لایه‌ای بر روی خط مرکزی

کارایی آدیباتیک خنک کاری لایه‌ای بر روی خط مرکزی در نسبت دمش‌های مختلف و برای نسبت چگالی $1/6$ ، در حالت‌های صفحه تخت همراه با سوراخ استوانه‌ای، شیب بالادست با سوراخ استوانه‌ای، صفحه تخت همراه با سوراخ لایه‌گستر و شیب بالادست با سوراخ لایه‌گستر در شکل ۶ به تصویر کشیده شده است.

همان‌گونه که در شکل ۶ (الف) نشان داده شده است، در نسبت دمش $0/5$ و در حالت صفحه تخت همراه با سوراخ لایه‌گستر، کارایی آدیباتیک

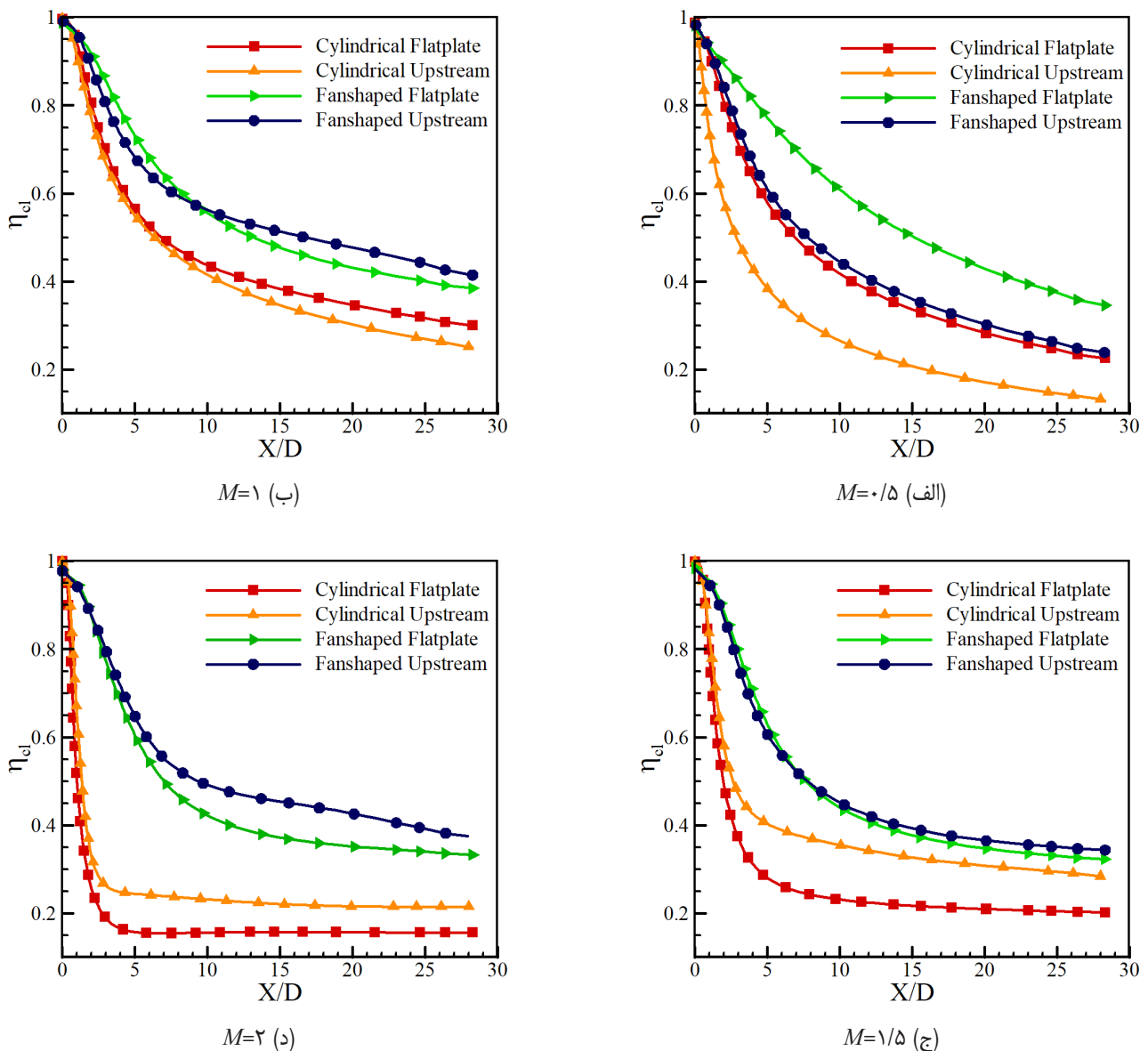


Fig. 6. The centerline adiabatic film cooling effectiveness a) $M=0.5$, b) $M=1$, c) $M=1.5$ and d) $M=2$

شکل ۶: کارایی آدیباتیک خنک کاری لایه‌ای بر روی خط مرکزی (الف) $M=0/5$ ، (ب) $M=1$ ، (ج) $M=1/5$ و (د) $M=2$

در نسبت دمش ۲، کاهش کارایی آدیباتیک خنک‌کاری در حالت سوراخ تزریق استوانه‌ای در مقایسه با نسبت دمش‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ مشاهده می‌شود. علت این امر را می‌توان به عقب رانده شدن لایه برشی توسط مومنتم قوی جت خنک‌کننده مرتبط دانست. اما در حالت صفحه تخت با سوراخ تزریق لایه‌گستر افزایش کارایی آدیباتیک خنک‌کاری لایه‌ای مشاهده می‌شود.

۵-۳- توزیع دمای استاتیک

در شکل ۷ توزیع دمای استاتیک بر روی صفحه خنک‌شونده در حالت‌های مختلف و در نسبت دمش‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ نشان داده شده است. واضح است که در نسبت دمش ۰/۵ و در حالت صفحه تخت، در نزدیکی سوراخ

باعث تضعیف اثر گردابه‌های نعل‌اسبی^۱ شده و منجر به افزایش کارایی آدیباتیک خنک‌کاری می‌شود. همان‌گونه که با افزایش نسبت دمش، مومنتم جت خنک‌کننده نیز افزایش یافته و تا حدی قادر به مقابله با جریان بازگشتی می‌باشد، ولی به دلیل برخاستگی بیشتر جت خنک‌کننده در ابتدای پایین دست سوراخ تزریق در مقایسه با حالت صفحه تخت، افت کارایی خنک‌کاری لایه‌ای در امتداد خط مرکزی مشاهده می‌شود.

در نسبت دمش ۱/۵ همان‌گونه که در شکل ۶ (ج) مشاهده می‌شود، در حالت سوراخ تزریق استوانه‌ای شیب بالادست کارایی بهتری نسبت به صفحه تخت دارد و در حالت سوراخ تزریق لایه‌گستر در فاصله بعد از $X/D=7$ شیب بالادست کارایی بهتری دارد که این به دلیل وجود لایه برشی بالای ناحیه بازگشتی است که همانند یک جریان ثانویه در بالای سوراخ تزریق عمل نموده و مانع از نفوذ آن به جریان اصلی می‌شود.

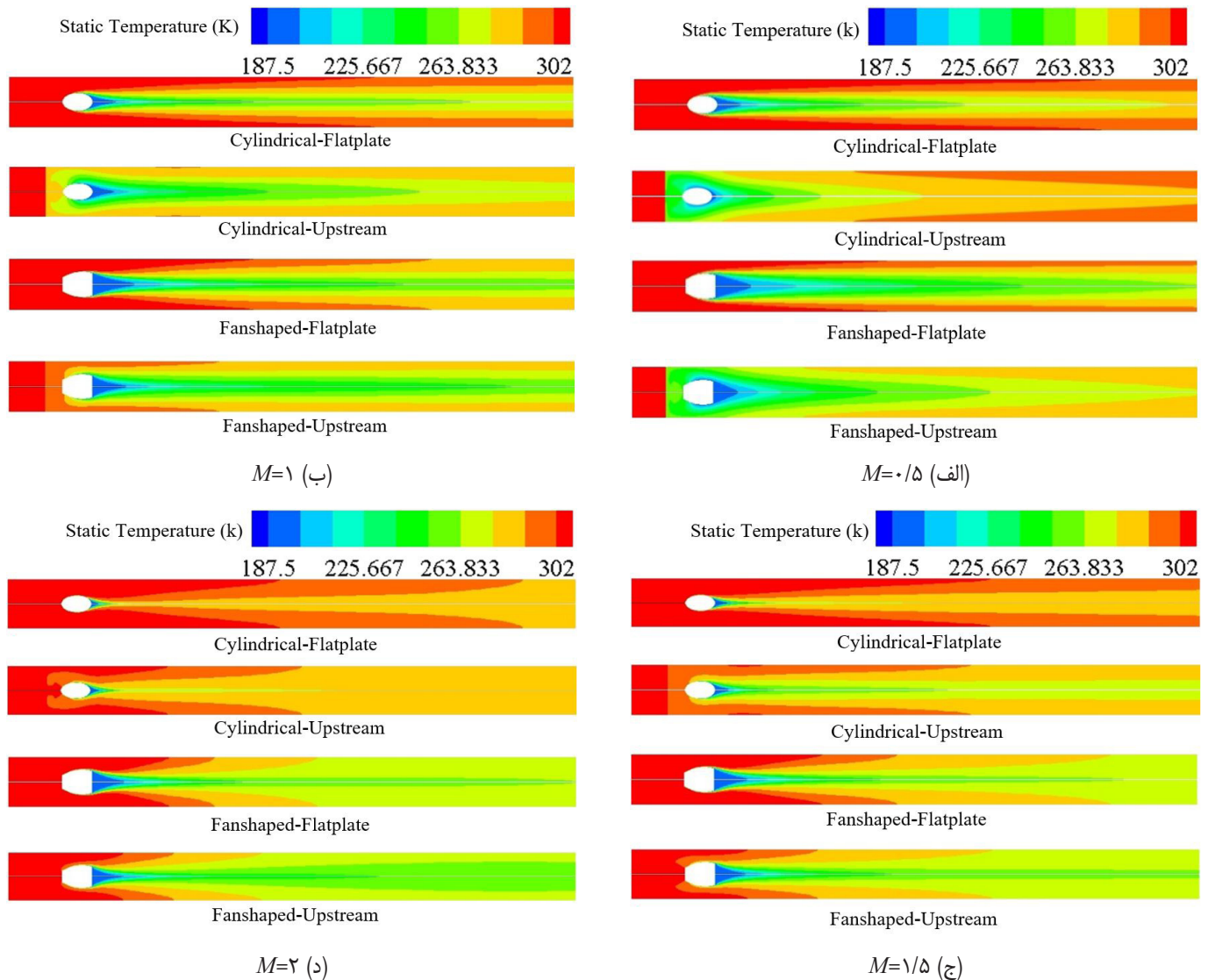


Fig. 7. The static temperature distribution for cooling plate a) $M=0.5$, b) $M=1$, c) $M=1.5$ and d) $M=2$
 شکل ۷: توزیع دمای استاتیک در صفحه خنک‌شونده (الف) $M=0.5$ ، (ب) $M=1$ ، (ج) $M=1.5$ و (د) $M=2$

خنک کاری در پایین دست جریان و در نسبت دمش های بزرگتر از ۱ تضعیف خنک کاری مشاهده می شود. اما در حالت شیب بالادست با سوراخ لایه گستر، با افزایش نسبت دمش تا $M=1/5$ تضعیف خنک کاری در پایین دست جریان و سپس با افزایش نسبت دمش بهبود خنک کاری لایه ای مشاهده می شود.

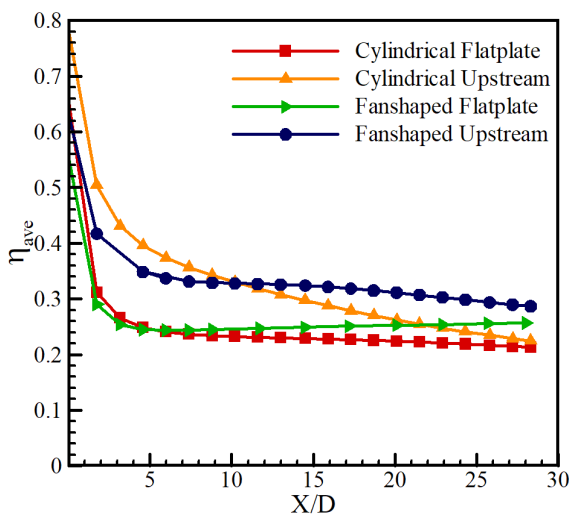
۵-۴- کارایی آدیاباتیکی خنک کاری متوسط جانبی

توزیع کارایی متوسط جانبی مربوط به صفحه خنک شونده به ازای نسبت دمش های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ در حالت های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است.

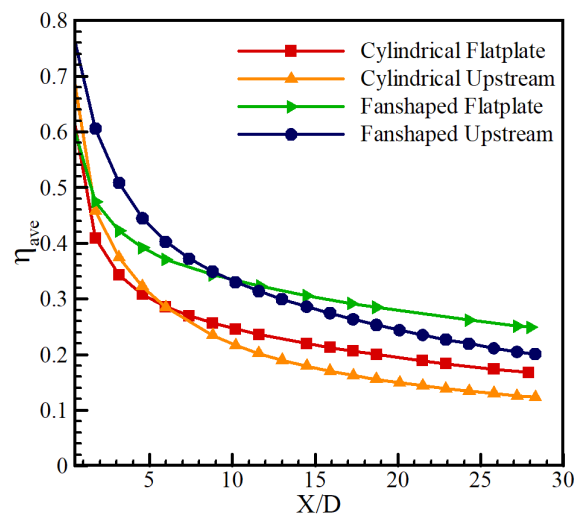
مطابق شکل ۸ (الف) در نسبت دمش ۰/۵، هندسه سوراخ لایه گستر در هر دو حالت حضور و عدم حضور شیب بالادست کارایی متوسط جانبی

تزریق استوانه ای کاهش دما مشاهده می شود اما در پایین دست جریان، دما دوباره افزایش پیدا می کند. همچنین استفاده از سوراخ تزریق لایه گستر باعث پخش شدگی بیشتر سیال خنک کننده و در نتیجه کاهش دمای بیشتر نسبت به سوراخ تزریق استوانه ای شده که در تمام نسبت دمش ها مشهود است. کاملاً مشخص است که استفاده از شیب بالادست جریان همراه با سوراخ تزریق لایه گستر باعث بهبود خنک کاری صفحه خنک شونده در نسبت دمش های بزرگ ($M > 1$) است.

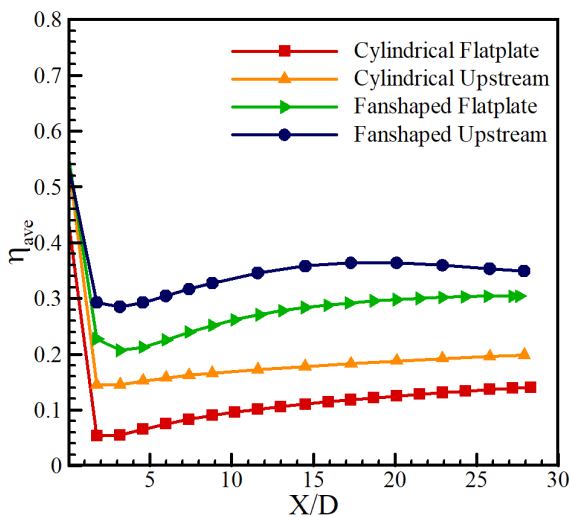
همان گونه که در شکل ۷ مشاهده می شود، با افزایش نسبت دمش در حالت صفحه تخت همراه با سوراخ تزریق استوانه ای و همچنین سوراخ تزریق لایه گستر میزان خنک کاری لایه ای کاهش می یابد. اما در حالت شیب بالادست با سوراخ تزریق استوانه ای با افزایش نسبت دمش تا $M=1$ بهبود



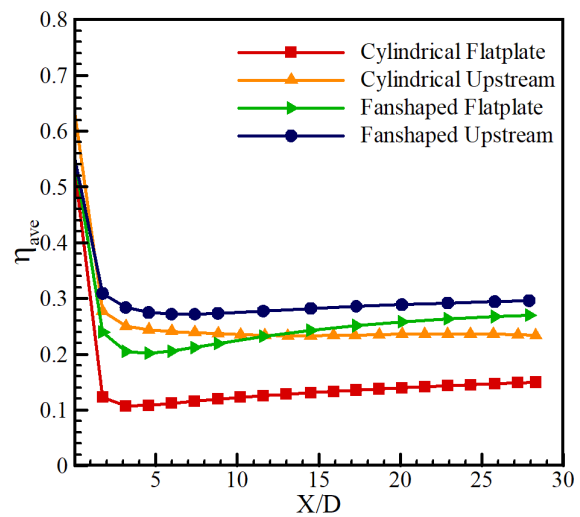
$M=1$ (ب)



$M=0.5$ (الف)



$M=2$ (د)



$M=1.5$ (ج)

Fig. 8. The laterally averaged film cooling effectiveness a) $M=0.5$, b) $M=1$, c) $M=1.5$ and d) $M=2$

شکل ۸: توزیع کارایی خنک کاری متوسط جانبی در صفحه خنک شونده (الف) $M=0.5$ ، (ب) $M=1$ ، (ج) $M=1.5$ و (د) $M=2$

نشان می‌دهد:

- در نسبت دم‌های پایین ($M=0.5$)، حضور شیب بالادست جریان مفید نخواهد بود. زیرا به علت مومنتم پایین جریان خنک‌کننده، این جریان بلافاصله پس از خروج از سوراخ تزریق مغلوب جریان بازگشتی شده و به داخل ناحیه کشیده می‌شود در نتیجه کارایی آدیاباتیک خنک‌کاری کاهش می‌یابد.
- سوراخ تزریق لایه‌گستر عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای بهتری در مقایسه با سوراخ تزریق استوانه‌ای در شرایط یکسان دارد.
- با افزایش نسبت حضور شیب بالادست جریان باعث می‌شود که لایه مرزی ایجاد شده از تبادل جت خنک‌کننده و جریان اصلی دورتر از سطح صفحه تشکیل شود. بنابراین این اتفاق منجر به تضعیف اثر گردابه‌های نعل‌اسبی می‌شود و در نتیجه این امکان را فراهم می‌سازد که جت خنک‌کننده گسترش جانبی بیشتری در عرض جریان داشته باشد. بنابراین شیب بالادست جریان در نسبت دم‌های بالا ($M > 1$)، منجر به افزایش کارایی آدیاباتیک خنک‌کاری لایه‌ای می‌شود.
- حالت بهینه برای شرایط مورد مطالعه در این تحقیق در نسبت دم‌های ۰/۵ و در حالت صفحه تخت همراه با سوراخ تزریق لایه‌گستر رخ می‌دهد.

فهرست علائم

D	قطر سوراخ تزریق، m
K	انرژی جنبشی آشفتگی، m^2/s^2
M	نسبت دم‌ش
T	دما، K
u	سرعت، m/s
L	طول مجرای تزریق
x	راستای طولی
y	راستای عمودی
z	راستای جانبی

علامت یونانی

θ	زاویه شیب در راستای جریان اصلی، deg
β	زاویه گسترش مجرای تزریق در راستای عرضی، deg
α	زاویه مجرای تزریق نسبت به جریان اصلی، deg
ε	نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی، m^2/s^3
η	کارایی خنک‌کاری لایه‌ای
η_{cl}	کارایی خنک‌کاری لایه‌ای بر روی خط مرکزی
η_{ave}	کارایی متوسط جانبی

بهتری در مقایسه با هندسه سوراخ تزریق استوانه‌ای دارد. در حالت سوراخ تزریق لایه‌گستر در فاصله بعد از $X/D=8$ شیب بالادست جریان باعث کاهش کارایی متوسط جانبی می‌شود زیرا سیال خنک‌کننده به دلیل عدم وجود مومنتم کافی مغلوب جریان بازگشتی شده و در نتیجه دبی جرمی جریان خنک‌کننده جهت محافظت از سطح پره در پایین‌دست سوراخ تزریق کاهش یافته و کارایی متوسط جانبی کاهش می‌یابد. همین پدیده برای سوراخ تزریق استوانه‌ای ولی در فاصله بعد از $X/D=6$ رخ می‌دهد.

با توجه به شکل ۸ (ب)، در نسبت دم‌ش ۱، تأثیر مطلوب شیب بالادست جریان در هر دو حالت مجرای تزریق لایه‌گستر و سوراخ تزریق استوانه‌ای مشاهده می‌شود که به دلیل تضعیف اثر گردابه‌های نعل‌اسبی، باعث پخش‌شدگی بهتر جریان جت خنک‌کننده بر روی سطح پره می‌شود.

در نسبت دم‌ش ۱/۵، که در شکل ۸ (ج) به تصویر کشیده شده است، با افزایش مومنتم جت خنک‌کننده، این جریان قادر خواهد بود به خارج از منطقه جدایی تشکیل شده در پایین‌دست جریان نفوذ کند، که در این حالت وجود شیب بالادست باعث افزایش کارایی متوسط جانبی می‌شود. در این نسبت دم‌ش هندسه سوراخ تزریق استوانه‌ای در حالت صفحه تخت، به علت نفوذ زیاد جت خنک‌کننده، کارایی خنک‌کاری لایه‌ای ضعیفی دارد.

در نسبت دم‌ش ۲ همان‌گونه که در شکل ۸ (د) مشاهده می‌شود، عملکرد هندسه سوراخ تزریق لایه‌گستر همراه با شیب بالادست و بدون شیب بالادست رفتار مشابهی دارند. در این حالت با دور شدن از سوراخ تزریق، کارایی خنک‌کاری ابتدا افت شدیدی می‌یابد که علت آن شکل‌گیری ناحیه گردابی ناشی از جدایی و نفوذ جریان اصلی داغ به زیر جت تزریقی می‌باشد و سپس با الحاق مجدد جریان سرد به سطح، کارایی خنک‌کاری افزایش می‌یابد. بنابراین با پیشروی به سمت پایین‌دست جریان، روند کاهش کارایی خنک‌کاری دوباره اتفاق می‌افتد. همچنین در این حالت مقادیر کارایی خنک‌کاری متوسط جانبی بزرگتری در مقایسه با هندسه سوراخ تزریق استوانه‌ای ایجاد می‌شود. در این حالت وجود شیب بالادست باعث ایجاد لایه برشی با آشفتگی بالا در بالای ناحیه بازگشتی شده، که به عنوان یک جریان متقابل، از نفوذ مومنتم جت خنک‌کننده به جریان اصلی جلوگیری می‌کند که منجر به حفاظت بهتر جریان خنک‌کننده از سطح پره می‌شود. کاهش کارایی متوسط جانبی در حالت هندسه سوراخ تزریق لایه‌گستر را می‌توان به نفوذ زیاد جت خنک‌کننده به جریان اصلی دانست که در این حالت، شیب بالادست تأثیر چندانی در بهبود عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای نخواهد داشت.

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مطالعه کارایی آدیاباتیک خنک‌کاری لایه‌ای بر روی چهار هندسه: صفحه تخت با سوراخ تزریق استوانه‌ای، شیب بالادست جریان با سوراخ تزریق استوانه‌ای، صفحه تخت با سوراخ تزریق لایه‌گستر و شیب بالادست جریان همراه با سوراخ تزریق لایه‌گستر در نسبت چگالی ۱/۶ و در نسبت دم‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج

Approach for Film Cooling Effectiveness over a Flat Plate Using GMDH-type Neural Networks, Heat and mass transfer, *Springer*, 50 (2014) 139-149

لزجت دینامیکی، Pa.s	μ
لزجت سینماتیکی، m ² /s	ν
چگالی، kg/m ³	ρ
زیرنویس	
دیواره آدیاباتیک	aw
سیال خنک کننده	c
جریان اصلی	∞

- [6] D.G. Hyams, J.H. Leylek, A detailed analysis of film cooling physics: part III—streamwise injection with shaped holes, *ASME J. of turbomachinery*, 122 (2000) 122-132.
- [7] C. Saumweber, A. Schulz, Effect of Geometry Variations on the Cooling Performance of Fan-Shaped Cooling Holes, *ASME J. of turbomachinery*, 134 (2012) 061008-1-16
- [8] S.P. Chen, M.K. Chyu, T.I.-P. Shih, Effects of upstream ramp on the performance of film cooling, *International Journal of Thermal Sciences*, 50 (2011) 1085-1094.
- [9] S. Na, T.I.-P. Shih, Increasing adiabatic film cooling effectiveness by using an upstream ramp, *ASME Journal of Heat Transfer*, 129 (2007) 464-471
- [10] F. Jafarian, N. Amanifard, M. Naghashnejad, H. M.Deylami, Numerical investigation of the effect of upstream ramp on the adiabatic film cooling effectiveness, The 22th Annual International Conference of Iranian Mechanical Engineering, Shahid Chamran of University of Ahvaz, (2014). (in persian).
- [11] Gambit User's Manual, Version 2.3.16 (2006).
- [12] B.E. Launder, B.I. Sharma, Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc, *Heat and Mass Transfer*, 1 (1974) 131-138.
- [13] Ansys Fluent User's Manual, Version 15 (2013).

منابع

- [1] A.K. Sinha, D.G. Bogard, M.E. Crawford, Film-cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio, *ASME Journal of Turbomachinery*, 113 (1991) 442-449.
- [2] J.R. Pietrzyk, D.G. Bogard, M.E. Crawford, Hydrodynamic Measurements of Jets in Crossflow for Gas Turbine Film Cooling Applications, *ASME Journal of Turbomachinery*, 111 (1989) 139-145.
- [3] A. Rozati, D.K. Tafti, Effect of coolant-mainstream blowing ratio on leading edge film cooling flow and heat transfer-LES investigation, *Journal of Heat and Fluid Flow*, 29 (2008) 857-873.
- [4] D.K. Walters, J.H. Leylek, A Systematic Computational Methodology Applied to a Three-Dimensional Film-Cooling Flowfield, *ASME J. of Turbomachinery*, 119 (1997) 777-785.
- [5] M. Naghashnejad, N. Amanifard, H. M.Deylami, A Predictive Model Based on a 3-D Computational

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

S. S. mousavi, N. Amanifard, H. Mohaddes Deylami, M. Naghashnejad, Numerical Investigation of Upstream Ramp Effects on the Cooling Performance by Cylindrical and Fan-Shaped Hole, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(4) (2018) 883-892.

DOI: 10.22060/mej.2016.809

