

## تحلیل عددی تاثیر زاویه قرارگیری سوراخ‌های مهارکننده بر عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای

در مطالعه حاضر به تحلیل عددی سه بعدی میدان‌های جریان و دما، برای مدل‌های مختلف هندسه سوراخ تزریق خنک‌کاری لایه‌ای بر روی صفحه تخت پرداخته شده است. شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از یک شبکه سازمان یافته، غیریکنواخت و شش وجهی شامل کانال جریان اصلی، مجرای تزریق و محفظه تزریق، انجام گرفته که جهت گسسته‌سازی ترم فشار و سایر ترم‌های معادلات به ترتیب از روش استاندارد و تقریب مرتبه دوم و همچنین برای حل توأم میدان فشار و سرعت، از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. همچنین دو سوراخ تزریق مهارکننده در مجاور سوراخ تزریق اصلی استوانه‌ای و لایه‌گستر تحت زوایای ۱۵ و ۰ و ۱۵- درجه به منظور کاهش قدرت جفت گردابه‌های خلاف‌گرد قرار گرفته و کارایی آدیاباتیک خنک‌کاری لایه‌ای در دو نسبت دمش ۰/۵ و ۱ و نسبت چگالی ۱/۶ بررسی شده است. نتایج حاکی از آن است که به ازای نسبت دمش ۱، استفاده از سوراخ‌های مهارکننده با زاویه ۱۵ درجه به همراه سوراخ تزریق لایه‌گستر دارای بهترین کارایی خنک‌کاری لایه‌ای است و کارایی خنک‌کاری لایه‌ای را به میزان ۳۷/۴۴ درصد نسبت به حالت پایه که از سوراخ‌های مهارکننده با زاویه ۰ درجه به همراه سوراخ تزریق استوانه‌ای استفاده شده است افزایش می‌دهد.

محمدجواد کاظمی طاسکوه<sup>۱</sup>

دانشجوی کارشناسی ارشد

نیما امانی فرد<sup>۲</sup>

دانشیار

حامد محدث دیلمی<sup>۳</sup>

استادیار

واژه های راهنما: تحلیل عددی، خنک‌کاری لایه‌ای، صفحه تخت، نسبت چگالی، نسبت دمش

### ۱- مقدمه

یکی از روش‌های مهم در بالابردن راندمان و بهبود عملکرد توربین‌های گازی، افزایش دمای گازهای خروجی از محفظه احتراق و ورودی به بخش توربین می‌باشد. اما این امر منجر به آسیب پره‌های توربین و در نتیجه کاهش کارایی و طول عمر پره‌های توربین می‌شود. برای رفع این مشکل، فرآیند خنک‌کاری روی پره‌های توربین صورت می‌گیرد. خنک‌کاری لایه‌ای رایج‌ترین روش به منظور حفاظت حرارتی پره‌ها در برابر گازهای داغ است. یافتن هندسه سوراخ خنک‌کاری با بالاترین راندمان یکی از مهمترین نکاتی است که در خنک‌کاری لایه‌ای بررسی می‌شود. در این روش سیال خنک‌کننده از هوای پرفشار کمپرسور استخراج شده و با عبور از کانال‌های درونی پره، از سوراخ‌های تعبیه شده روی سطح پره خارج شده و یک لایه‌ای از سیال خنک‌کننده

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه گیلان mjkazemi93@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه گیلان namanif@guilan.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده فنی و مهندسی شرق گیلان، دانشگاه گیلان hmohaddesd@guilan.ac.ir

بین سطح پره و سیال داغ ایجاد می‌کند و در نتیجه موجب کاهش انتقال حرارت و دمای سطح پره می‌شود. از طرفی تزریق هوای سرد به جریان اصلی به دلیل اختلاط دو جریان با سرعت و دمای متفاوت سبب تلفات حرارتی و آیرودینامیکی می‌شود. در سال‌های اخیر تحقیقات تجربی و عددی بسیاری روی خنک‌کاری لایه‌ای به منظور بهبود کارایی آن انجام شده است. کارایی خنک‌کاری لایه‌ای (۱) به عوامل مختلفی مانند پارامترهای جریانی از قبیل نسبت دمش<sup>۱</sup> (M)، نسبت چگالی<sup>۲</sup> (DR) و پارامترهای هندسی مانند زاویه تزریق، قطر و شکل سوراخ تزریق بستگی دارد. رمزی و گلداشتاین [۱] و سینها و همکاران [۲] به صورت تجربی نشان دادند که با عبور هوا به عنوان سیال خنک‌کننده و افزایش نسبت دمش در محدوده ۰/۲۵ تا ۱/۵ می‌توان کارایی خنک‌کاری را افزایش داد. همچنین نشان دادند که اگر از این محدوده بیشتر افزایش یابد، سیال خنک‌کننده تمایل دارد از سطح پره جدا شود و در نتیجه اختلاط جت خنک‌کننده و جریان اصلی، افت کارایی شدیدی را به همراه دارد و این کاهش کارایی به سمت پایین دست جریان ادامه می‌یابد.

عواملی دیگری نیز همچون شکل سوراخ، تغییر قطر و زاویه سوراخ تزریق، کارایی خنک‌کاری لایه‌ای را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تغییر این عوامل سبب تغییر الگوی ناشی از تزریق جت خنک‌کننده به جریان اصلی می‌شود. آن و همکاران [۳] اثرات هندسی سوراخ تزریق را در نسبت دمش بهینه مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها حاکی از آن است که سوراخ تزریق لایه‌گستر<sup>۳</sup> به دلیل افزایش سطح مقطع خروجی، مومنتم جریان خنک‌کننده در خروجی را کاهش داده و در نتیجه نفوذ سیال سرد به جریان اصلی کمتر می‌شود. قرآب و همکاران [۴] در یک مطالعه تجربی هندسه جدیدی را معرفی نمودند. نتایج آنها نشان داد که هندسه نوین کارایی بالاتری نسبت به سایر هندسه‌های مقایسه شده در تحقیق دارد. از آنجایی که اختلاط بین جت و جریان اصلی سبب کاهش کارایی خنک‌کاری لایه‌ای می‌شود، در نتیجه محققان شیب بالادست<sup>۴</sup> جریان را به عنوان یک روش موثر برای کاهش اختلاط مطرح کردند. چن و همکاران [۵] به صورت تجربی نشان دادند که شیب بالادست به طور قابل توجهی سبب افزایش کارایی متوسط خنک‌کاری لایه‌ای (Nave) می‌گردد. در حالی که تاثیر آن بر روی کارایی خنک‌کاری لایه‌ای در خط مرکزی محسوس نمی‌باشد.

امروزه محققان در تلاش هستند که به منظور افزایش بازده خنک‌کاری لایه‌ای از هوای خنک‌کننده کمتری استفاده کنند. زیرا هوای خنک‌کننده از طریق کمپرسور تأمین شده و کاهش مصرف این هوای فشرده باعث بهبود کارایی توربین می‌شود. هیدمن و ایکاد [۶] در مطالعه خود هندسه جدیدی به نام پادگردابه<sup>۵</sup> را معرفی کردند، که این هندسه دارای یک ورودی و سه خروجی می‌باشد. در ادامه تیموتی و همکاران [۷] محل قرارگیری دو سوراخ تزریق فرعی که به منظور کاهش قدرت جفت گردابه‌های خلاف‌گرد سوراخ تزریق اصلی قرار داده شده را بررسی نموده‌اند. نتایج آنها نشان داد که با استفاده از این هندسه گردابه‌های خلاف‌گرد سوراخ‌های تزریق فرعی، قدرت گردابه‌های خلاف‌گرد سوراخ تزریق اصلی را کاهش می‌دهند و مانع از جدا شدن سیال خنک‌کننده از سطح خنک‌شونده شده و در نتیجه سبب افزایش کارایی خنک‌کاری لایه‌ای در نسبت دمش‌های بالا می‌شود. همچنین در این هندسه مقدار استفاده از هوای خنک‌کننده کاهش یافته است.

<sup>1</sup> Blowing ratio

<sup>2</sup> Density ratio

<sup>3</sup> Fan-shaped

<sup>4</sup> Upstream ramp

<sup>5</sup> Antivortex

رامش و همکاران [۸] با تغییر پارامترهای هندسه خروجی سوراخ‌های تزریق اصلی و فرعی، کارایی خنک‌کاری را افزایش دادند. شایان ذکر است که در خنک‌کاری لایه‌ای پخش سیال در راستای عرضی صفحه نیز از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. پخش مناسب سیال در راستای عرضی می‌تواند باعث بهبود کارایی خنک‌کاری لایه‌ای گردد. اشمیت و همکاران [۹] نشان دادند که استفاده از سوراخ تزریق استوانه‌ای با زاویه ترکیبی سبب افزایش پوشش سیال خنک‌کننده روی سطح خنک‌شونده می‌شود.

بازدید و پزشک‌پور [۱۰] به طور عددی با استفاده از دو ردیف سوراخ تزریق لایه‌گستر با زاویه ترکیبی، کارایی خنک‌کاری را در راستای عرضی پایین‌دست جریان افزایش دادند. وو و همکاران [۱۱] به صورت تجربی و خواجه‌حسینی و جبران [۱۲] به صورت عددی، به بررسی تاثیر به‌کارگیری سوراخ‌های تزریق مهارکننده در بالادست<sup>۱</sup> و پایین‌دست<sup>۲</sup> سوراخ تزریق اصلی پرداختند. در این روش قدرت جفت گردابه‌های خلاف‌گرد سوراخ تزریق اصلی کاهش یافته و مانع از جدا شدن سیال خنک‌کننده از سطح شده و همچنین فاصله بین سوراخ‌های تزریق را به خوبی پوشش می‌دهد.

در مطالعه حاضر تاثیر زاویه قرارگیری سوراخ‌های تزریق مهارکننده نسبت به سوراخ تزریق اصلی در ۱۸ هندسه بر روی صفحه تخت مورد بررسی قرار گرفته است. دو سوراخ تزریق مهارکننده در مجاور سوراخ تزریق اصلی استوانه‌ای و لایه‌گستر تحت زوایای ۱۵- و ۰ و ۱۵ درجه به منظور کاهش قدرت جفت گردابه‌های خلاف‌گرد سوراخ تزریق اصلی قرار می‌گیرد و به دلیل استفاده کمتر از هوای خنک‌کننده و کاهش جدایش آن از سطح خنک‌شونده، کارایی آدیاباتیک خنک‌کاری لایه‌ای در دو نسبت دمش ۰/۵ و ۱ برای تمامی هندسه‌ها بررسی و حالت بهینه معرفی شده است.

## ۲- هندسه مسئله و شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

مطابق شکل (۱)، هندسه سه‌بعدی مورد مطالعه شامل کانال جریان اصلی، محفظه تزریق<sup>۳</sup> و مجرای تزریق<sup>۴</sup> سیال خنک‌کننده می‌باشد. دامنه محاسباتی مطالعه حاضر متناظر با نمونه تجربی سینها و همکاران [۲] است. قطر سوراخ تزریق استوانه‌ای  $D=12/7\text{mm}$  و گام سوراخ‌های خنک‌کاری در یک ردیف سوراخ تزریق برابر  $6D$  است. ابعاد کانال جریان اصلی برابر  $49D \times 10D \times 6D$  و فاصله ابتدای کانال تا لبه حمله سوراخ تزریق  $19D$  می‌باشد. طول لوله تزریق  $1/75D$  و ابعاد محفظه تزریق نیز برابر  $8D \times 4D \times 6D$  است. همچنین زاویه مجرای تزریق نسبت به جریان اصلی  $35^\circ$  است.

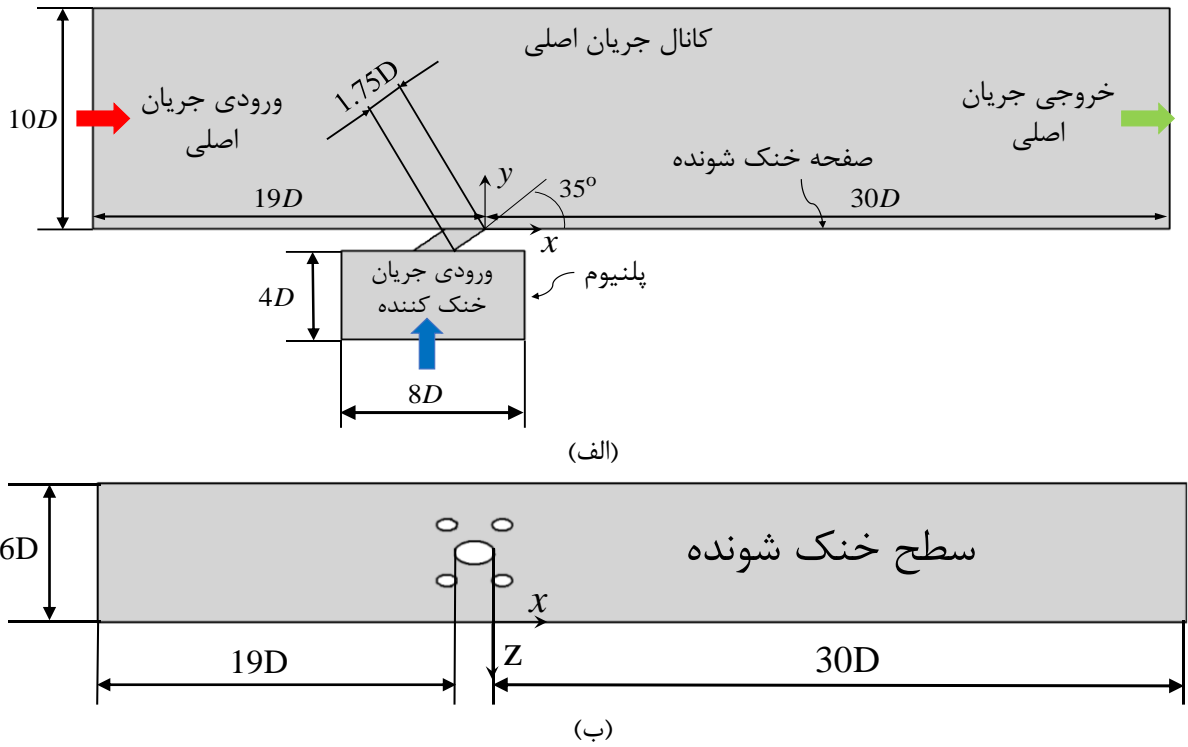
در شکل (۲) هندسه سوراخ تزریق لایه‌گستر نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تا فاصله  $0/75D$  از طول لوله تزریق به صورت استوانه‌ای و مابقی طول لوله تزریق در راستای عرضی با زاویه برابر  $\beta=14^\circ$ ، گسترش می‌یابد.

<sup>1</sup> Upstream

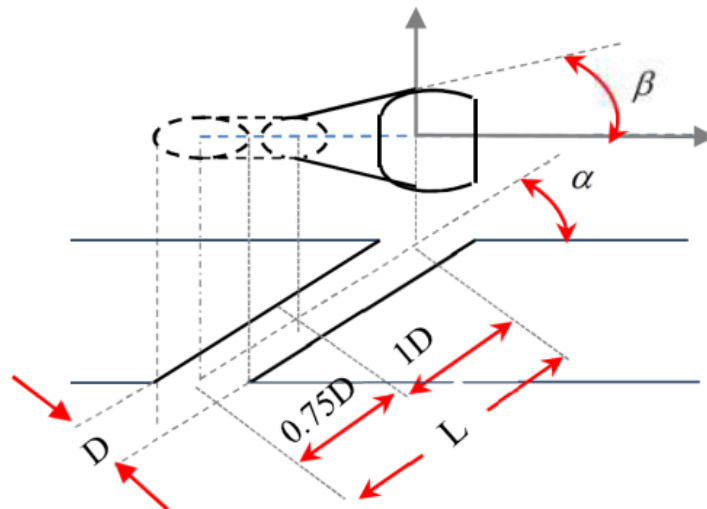
<sup>2</sup> Downstream

<sup>3</sup> Plenum

<sup>4</sup> Hole injection

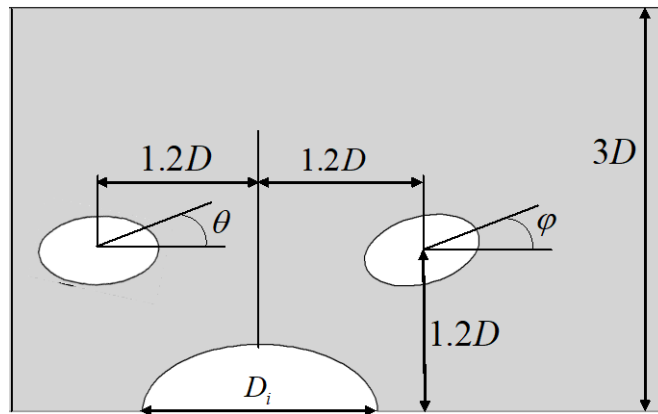


شکل ۱- هندسه مسئله: (الف) نمای روبرو؛ (ب) نمای بالا

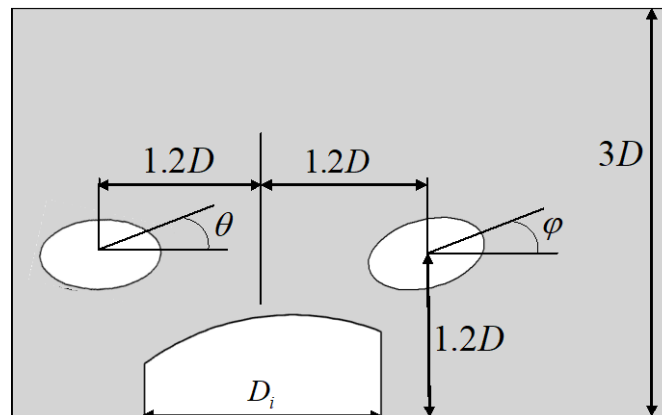


شکل ۲- هندسه سوراخ تزریق لایه گستر X-y

مطابق شکل (۳) سوراخ تزریق مهارکننده در موقعیت پایین دست و موقعیت بالادست تحت زوایای ۱۵ و ۰ و ۱۵- درجه کنار سوراخ تزریق اصلی استوانه‌ای و لایه گستر قرار گرفته است. مبدا 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. 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 اصلی تا وسط فاصله از مرکز سوراخ تزریق اصلی مجاور انتخاب شده است.  $D_i$  قطر سوراخ تصویر شده در صفحه  $x-z$  می‌باشد.



(الف)



(ب)

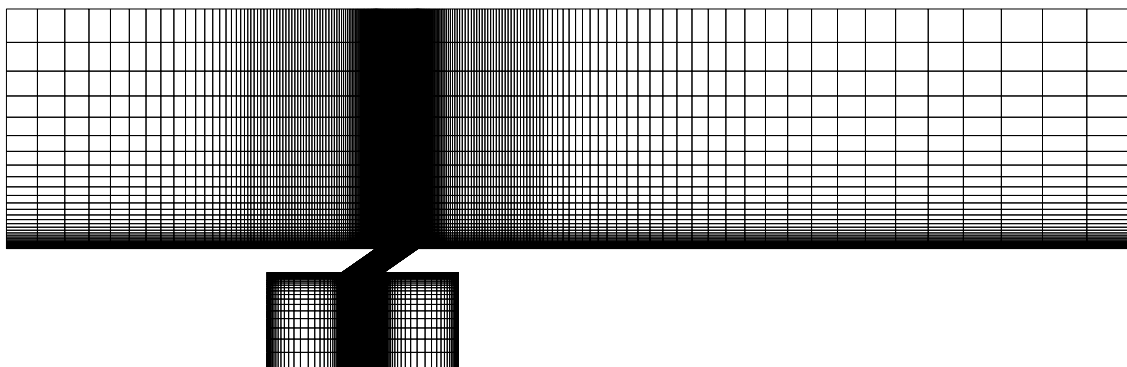
شکل ۳- سوراخ تزریق اصلی لایه گستر به همراه سوراخ‌های مهارکننده در صفحه X-Z: (الف) استوانه‌ای؛ (ب) لایه گستر

سوراخ‌های تزریق مهارکننده در جهت طولی و عرضی در فاصله  $1/2D$  از مرکز سوراخ تزریق اصلی تحت زوایای ۱۵ و ۰ و ۱۵- قرار گرفته‌اند که در مجموع ۱۸ هندسه مختلف مطابق جدول (۱) در نظر گرفته شده است. تولید هندسه و شبکه‌بندی دامنه محاسباتی به طور سازمان‌یافته، غیریکنواخت و شش وجهی به کمک نرم‌افزار آی-سی-ای-ام انجام شده است. برای افزایش دقت محاسبات در لایه مرزی، تراکم شبکه‌بندی در نزدیکی دیواره‌ها بیشتر است به گونه‌ای که  $y^+$  در نزدیکی تمامی دیواره‌ها کمتر از ۱ می‌باشد. در شکل (۴) شبکه محاسباتی نمایش داده شده است.

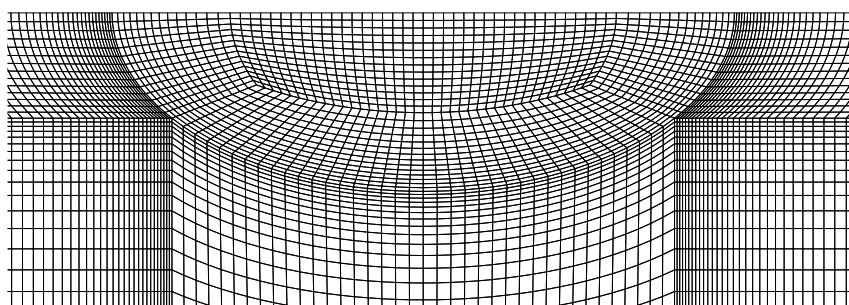
به منظور بررسی عدم وابستگی نتایج حل عددی به شبکه محاسباتی، کارایی آدیاباتیک خنک‌کاری لایه‌ای به عنوان پارامتر استقلال از شبکه انتخاب شده است. همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، برای مطالعه استقلال از شبکه از پنج شبکه‌بندی مختلف در نسبت دمش  $0/5$  استفاده شده است. با توجه به شکل (۷) واضح است که با تغییر تعداد شبکه از ۶۲۱۱۱۲ به ۸۳۱۵۶۵ تفاوت اندکی در جواب‌ها مشاهده می‌شود، بنابراین شبکه با تعداد ۶۲۱۱۱۲ به لحاظ داشتن دقت و زمان محاسباتی مناسب، به عنوان شبکه مناسب انتخاب شده است. لازم به ذکر است که استقلال از شبکه برای دیگر شرایط نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱- هندسه‌های مورد بررسی

سوراخ تزریق اصلی استوانه‌ای								
حالت	$\varphi$	$\theta$	حالت	$\varphi$	$\theta$	حالت	$\varphi$	$\theta$
۱	-۱۵	-۱۵	۷	-۱۵	-۱۵	۱۳	-۱۵	-۱۵
۲	-۱۵	۰	۸	-۱۵	۰	۱۴	-۱۵	۰
۳	-۱۵	۱۵	۹	-۱۵	۱۵	۱۵	-۱۵	۱۵
سوراخ تزریق اصلی لایه‌گستر								
حالت	$\varphi$	$\theta$	حالت	$\varphi$	$\theta$	حالت	$\varphi$	$\theta$
۴	-۱۵	-۱۵	۱۰	-۱۵	-۱۵	۱۶	-۱۵	-۱۵
۵	-۱۵	۰	۱۱	-۱۵	۰	۱۷	-۱۵	۰
۶	-۱۵	۱۵	۱۲	-۱۵	۱۵	۱۸	-۱۵	۱۵

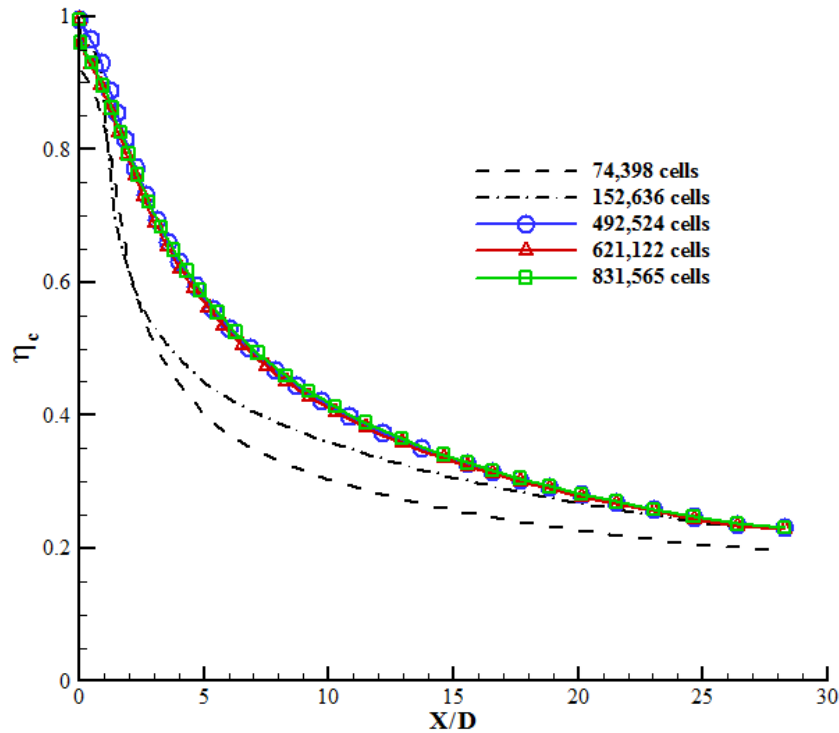


(الف)



(ب)

شکل ۴- شبکه محاسباتی الف) نمای روبرو ب) نمای بالا



شکل ۵- توزیع  $\eta_c$  بر روی خط مرکزی ( $y, z=0$ ) برای شبکه‌بندی‌های مختلف در  $M=0.5$

### ۳- معادلات حاکم و روش حل عددی

معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی تحت شرایط سه‌بعدی، تراکم‌ناپذیر، پایا، لزج، تک‌فاز با صرف‌نظر از نیروهای حجمی عبارت‌اند از [۱۳]:

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

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

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

که در آن مؤلفه تانسور تنش متقارن است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

جهت مدل‌سازی آشفتگی جریان، مدل دو معادله‌ای کی-اِپسیلون رینولدز پایین بر پایه معادلات ناویر استوکس متوسط‌گیری شده (RANS) به کار گرفته شده است [۱۴].  $\rho$  چگالی سیال و  $\mu$  لزجت دینامیکی می‌باشند. با توجه به سرعت بالای جریان ورودی، جریان سیال کاملاً آشفته در نظر گرفته شده است. معادلات انرژی جنبشی آشفتگی (K) و نرخ اضمحلال انرژی آشفتگی ( $\varepsilon$ ) به صورت زیر است:

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

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

لزجت آشفتگی  $\mu_t$  به صورت تابعی از  $K$  و  $\varepsilon$  به صورت زیر محاسبه می شود.

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

$\overline{\rho u_i v_j}$  نمایانگر تنش های رینولدز است که برای جریان آشفتنه باید به درستی مدل شوند. این تنش ها با استفاده از رابطه بوزینسک<sup>۱</sup> به گرادیان میدان سرعت متوسط مرتبط می شوند [۱۳]:

$$\overline{\rho u_i v_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (8)$$

در معادلات بالا  $C_{1\varepsilon}$ ،  $C_{2\varepsilon}$ ،  $C_\mu$ ،  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  ثابت های مدل آشفتگی هستند. توابع استهلاک  $f_1$  و  $f_\mu$  و جملات چشمه اضافی  $E$  و  $D$  نیز در نزدیکی دیوارهای جامد فعال می شوند و امکان حل  $K$  و  $\varepsilon$  را در زیر لایه لزج فراهم می آورند. مقادیر ثابت های مدل، توابع استهلاک و شرایط مرزی مطابق مدل ارائه شده توسط لاندرو و شارما<sup>۲</sup> [۱۵] می باشد. حل معادلات با استفاده از نرم افزار آنسیس-فلونت<sup>۳</sup> بر اساس روش حجم محدود<sup>۴</sup> و توسط حل کننده بر پایه فشار<sup>۵</sup> صورت گرفته و جهت گسسته سازی ترم های معادلات از تقریب مرتبه دوم و همچنین برای ارتباط میدان فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل<sup>۶</sup> [۱۶] استفاده شده است. همگرایی حل محاسبات برای معادلات پیوستگی و مومنتم از مرتبه  $10^{-6}$  و برای معادلات انرژی و آشفتگی به ترتیب  $10^{-9}$  و  $10^{-5}$  می باشد. کلیه محاسبات توسط پردازشگر ۸ هسته ای اینتل و ۲/۴ گیگاهرتز<sup>۷</sup> و به صورت پردازش موازی انجام شده و زمان محاسبات در حدود ۶ الی ۸ ساعت می باشد، که با توجه به نوع هندسه متغیر است.

#### ۴- شرایط مرزی

در ورودی کانال جریان اصلی، شرط مرزی ورودی سرعت<sup>۸</sup> یکنواخت  $20 \text{ m/s}$  و دمای  $302 \text{ K}$ ، همچنین شدت آشفتگی<sup>۹</sup> ۲٪ و مقیاس طول آشفتگی<sup>۱۰</sup> یک دهم اندازه بعد عمودی کانال در نظر گرفته شده است. در ورودی محفظه تزریق نیز شرط ورودی سرعت لحاظ شده است که متناسب با نسبت دمش در هر حالت متغیر است.

<sup>1</sup> Bosinesque

<sup>2</sup> Launder-Sharma

<sup>3</sup> Ansys-Fluent

<sup>4</sup> Finite volume

<sup>5</sup> Pressure based

<sup>6</sup> SIMPLE

<sup>7</sup> Intel Core i8 2.4 GHz

<sup>8</sup> Velocity Inlet

<sup>9</sup> Turbulence Intensity

<sup>10</sup> Length Scale



## جدول ۳- سرعت در ورودی محفظه تزریق

هندسه سوراخ	سرعت ورودی پلنوم (m/s)	
	M=0/5	M=1
تک سوراخ	0/10225	0/2045
سوراخ ترکیبی	0/2045	0/409

در جدول (۳) مقادیر سرعت در ورودی محفظه تزریق در نسبت دمش‌های 0/5 و 1 محاسبه شده است. عدد ماخ در ورودی کانال جریان اصلی و ورودی محفظه تزریق کوچکتر از 0/3 شده، بنابراین جریان را می‌توان تراکم‌ناپذیر در نظر گرفت. در مطالعه حاضر هوا به عنوان سیال عامل در نظر گرفته شده که به صورت گاز ایده‌آل تراکم‌ناپذیر می‌باشد. دمای ورودی محفظه تزریق 188/75 k، شدت آشفستگی برابر 2٪ و نیز مقیاس طول آشفستگی 0/0127 m [17]. مرز خروجی کانال جریان اصلی دارای شرط مرزی فشار خروجی<sup>۱</sup> می‌باشد. در مورد صفحات جانبی کانال جریان اصلی و خنک‌کننده و مجرای تزریق از شرط مرزی تقارن<sup>۲</sup> استفاده شده است. 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، استفاده از شرط مرزی تقارن برای این سطح نیز قابل استفاده است. دیواره‌های پایین کانال جریان اصلی، دیواره بالای محفظه تزریق و همچنین مجرای تزریق به صورت عایق، ساکن و بدون لغزش می‌باشند.

## ۵- اعتبارسنجی نتایج

به منظور بررسی تاثیر هندسه‌های مختلف، کارایی آدیاباتیک خنک‌کاری لایه‌ای و همچنین کارایی متوسط جانبی به عنوان پارامترهای اصلی مورد مقایسه قرار می‌گیرند. نسبت دمش (M)، کارایی خنک‌کاری لایه‌ای ( $\eta$ ) و کارایی متوسط جانبی ( $\eta_{ave}$ ) در یک گام سوراخ تزریق به صورت زیر تعریف می‌شوند:

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

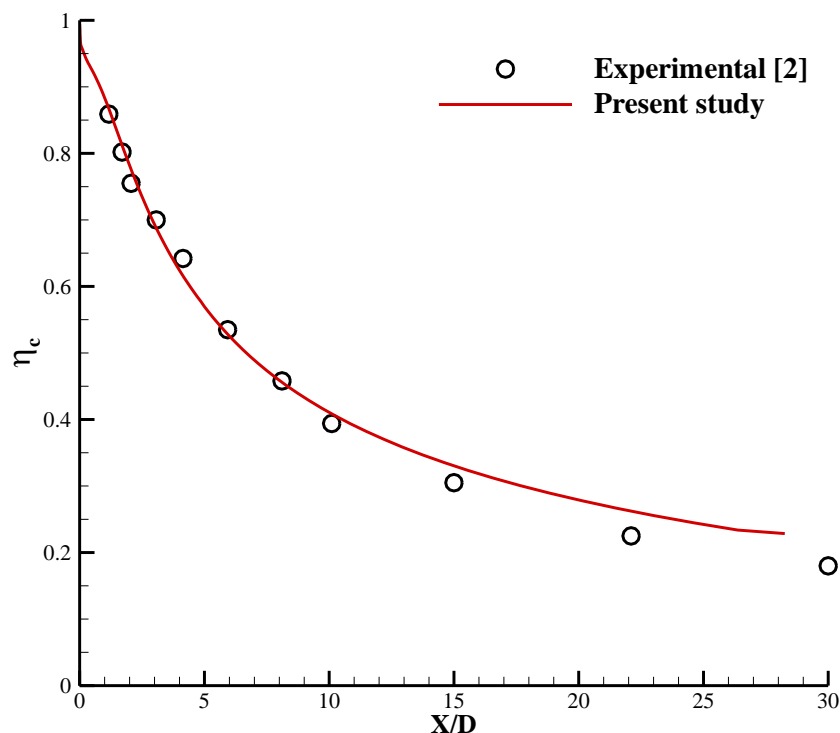
$$\eta = \frac{T_{aw} - T_\infty}{T_c - T_\infty} \quad (11)$$

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

که در این روابط  $T_\infty$  دمای جریان سیال داغ در بالادست و  $T_c$  دمای سیال خنک‌کننده می‌باشند. جهت حصول اطمینان از صحت جواب‌ها، نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر با نتایج تجربی سینها و همکاران [2] در شکل (۶) مقایسه شده است. همان‌گونه که در شکل (۶) نمایان است، تطابق مطلوبی بین نتایج عددی و تجربی با خطای 1/5 درصد برای کارایی آدیاباتیک خنک‌کاری مشاهده می‌شود.

<sup>1</sup> Pressure Outlet

<sup>2</sup> Symmetry



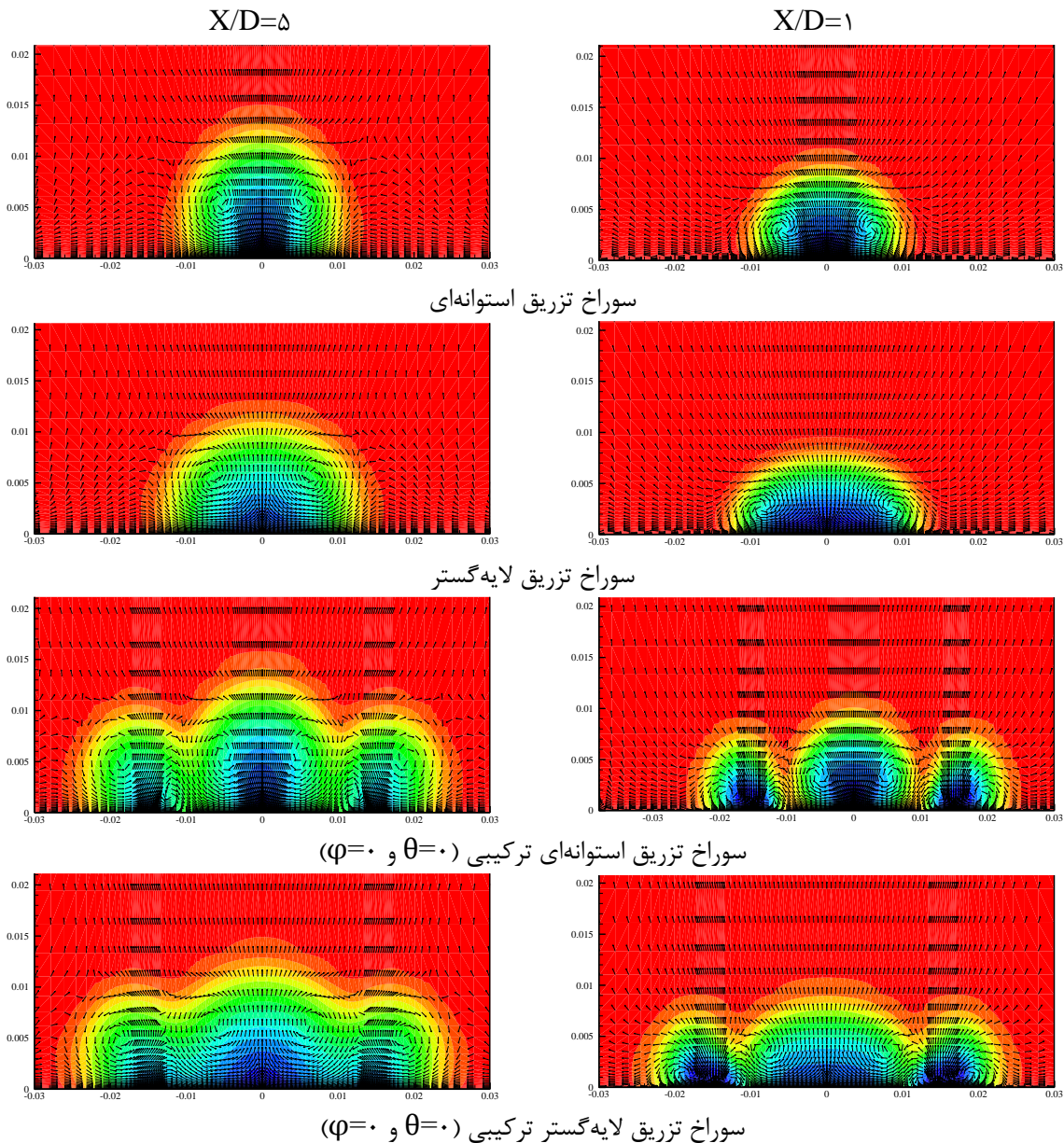
شکل ۶- مقایسه نتایج عددی و تجربی برای صفحه تخت در  $M=0.5$ ،  $L/D=1/75$  و  $\rho/\rho_0 = 1/6$

## ۶- نتایج و بحث

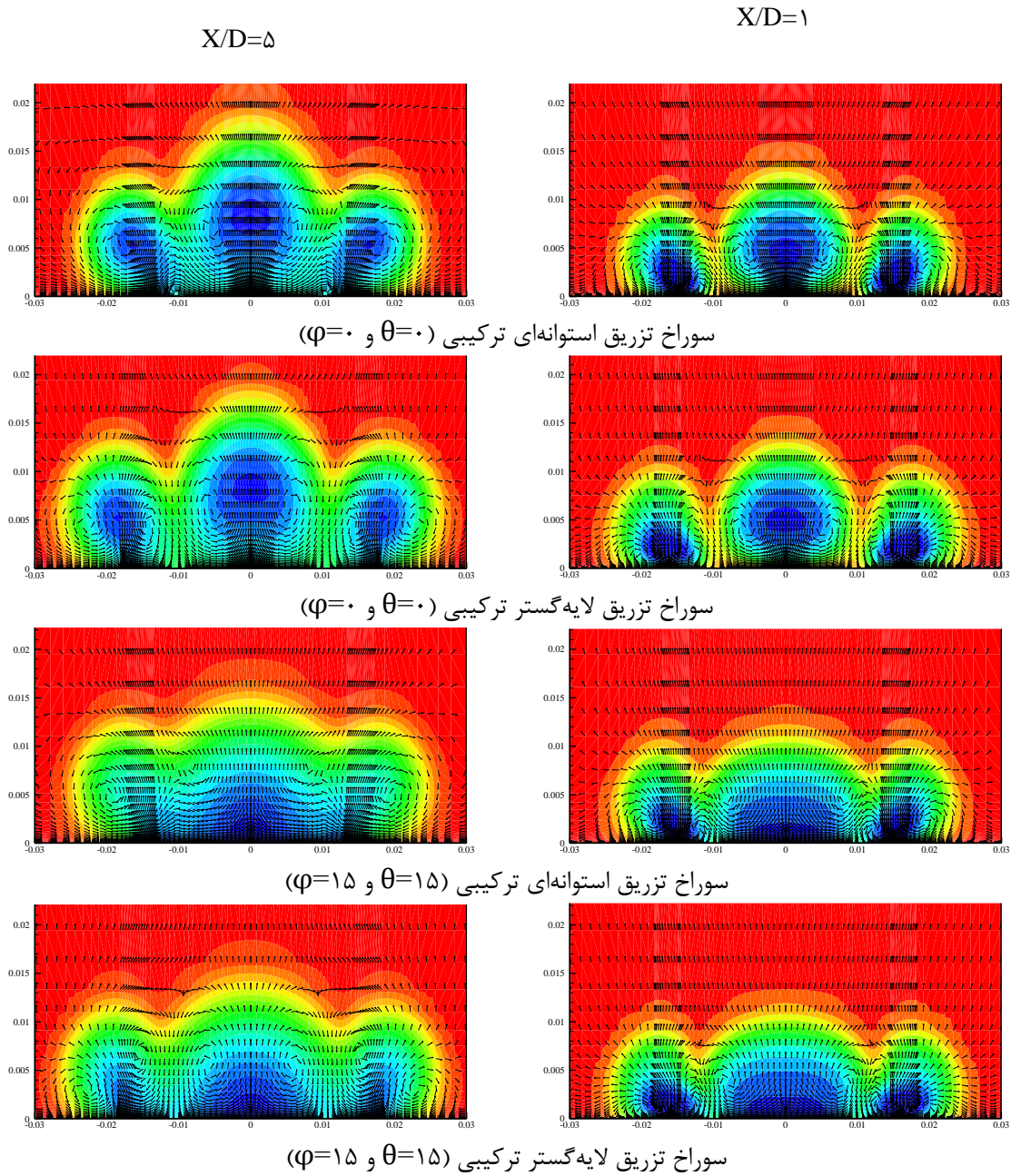
نمودار توزیع دما همراه با بردارهای سرعت روی صفحه (X-Y) در موقعیت  $X/D=1$  و  $X/D=5$  از لبه فرار سوراخ تزریق، در نسبت دمش  $0.5$  در شکل (۷) نشان داده شده است. تداخل جت خنک‌کننده خروجی از سوراخ تزریق و جریان اصلی داغ منجر به تشکیل جفت گردابه‌های خلاف‌گرد می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، از تقابل دو جریان خنک‌کننده و جریان اصلی جفت گردابه خلاف‌گرد ایجاد می‌شود. در حالتی که از سوراخ تزریق لایه‌گستر استفاده شده نسبت به سوراخ تزریق استوانه‌ای هسته مرکزی جفت گردابه‌های خلاف‌گرد در فاصله بیشتری از هم قرار می‌گیرند. این امر موجب می‌شود تا اثر متقابل گردابه‌ها بر هم کاهش یافته و سطح بیشتری را تحت تاثیر قرار دهند. با قرار دادن سوراخ‌های تزریق مهارکننده در اطراف سوراخ تزریق اصلی، جفت گردابه‌هایی ایجاد می‌شود که قدرت جفت گردابه اصلی را کاهش داده و مانع از حرکت آنها به سمت بالا می‌شود (در حالت  $\theta=0$  و  $\varphi=0$ ).

یکی از پارامترهای مهم در خنک‌کاری لایه‌ای با استفاده از سوراخ‌های مهارکننده، زاویه قرارگیری این سوراخ‌ها نسبت به خط مرکزی می‌باشد. با کاهش زاویه قرارگیری سوراخ‌های مهارکننده به دلیل اینکه گردابه‌های خلاف‌گرد ناشی از سوراخ‌های مهارکننده با گردابه‌های اصلی برخورد کرده و کارایی آدیاباتیک خنک‌کاری لایه‌ای کاهش می‌یابد. به این منظور توزیع دما و بردارهای سرعت برای حالت ( $\theta=0$  و  $\varphi=0$ ) برای نسبت دمش ۱ در شکل (۸) ارائه شده است. در حالت ( $\theta=15$  و  $\varphi=15$ ) برای سوراخ تزریق استوانه‌ای ترکیبی،

گردابه‌های خلاف‌گرد ایجاد شده فاصله بیشتری خواهند داشت. این موضوع موجب می‌شود که گردابه‌های ایجاد شده در ابتدا بدون آنکه با هم تماس داشته باشند رشد کرده و از سطح فاصله بگیرند. در فاصله کمی از سوراخ تزریق این گردابه‌ها به هم رسیده و اختلاط پیدا می‌کنند. به همین دلیل کارایی آدیاباتیک خنک‌کاری لایه‌ای به شدت کاهش می‌یابد. ولی با استفاده از سوراخ تزریق لایه‌گستر به دلیل نزدیک شدن گردابه‌های خلاف‌گرد ایجاد شده، مانع از بلند شدن سیال خنک‌کننده از سطح می‌شوند که این امر سبب افزایش کارایی آدیاباتیک خنک‌کاری لایه‌ای می‌گردد.



شکل ۷- توزیع دما و بردارهای سرعت روی صفحه  $(x-y)$  در فاصله  $\frac{X}{D}=1$  و  $\frac{X}{D}=5$  از لبه فرار سوراخ تزریق در نسبت دمخ  $0/5$

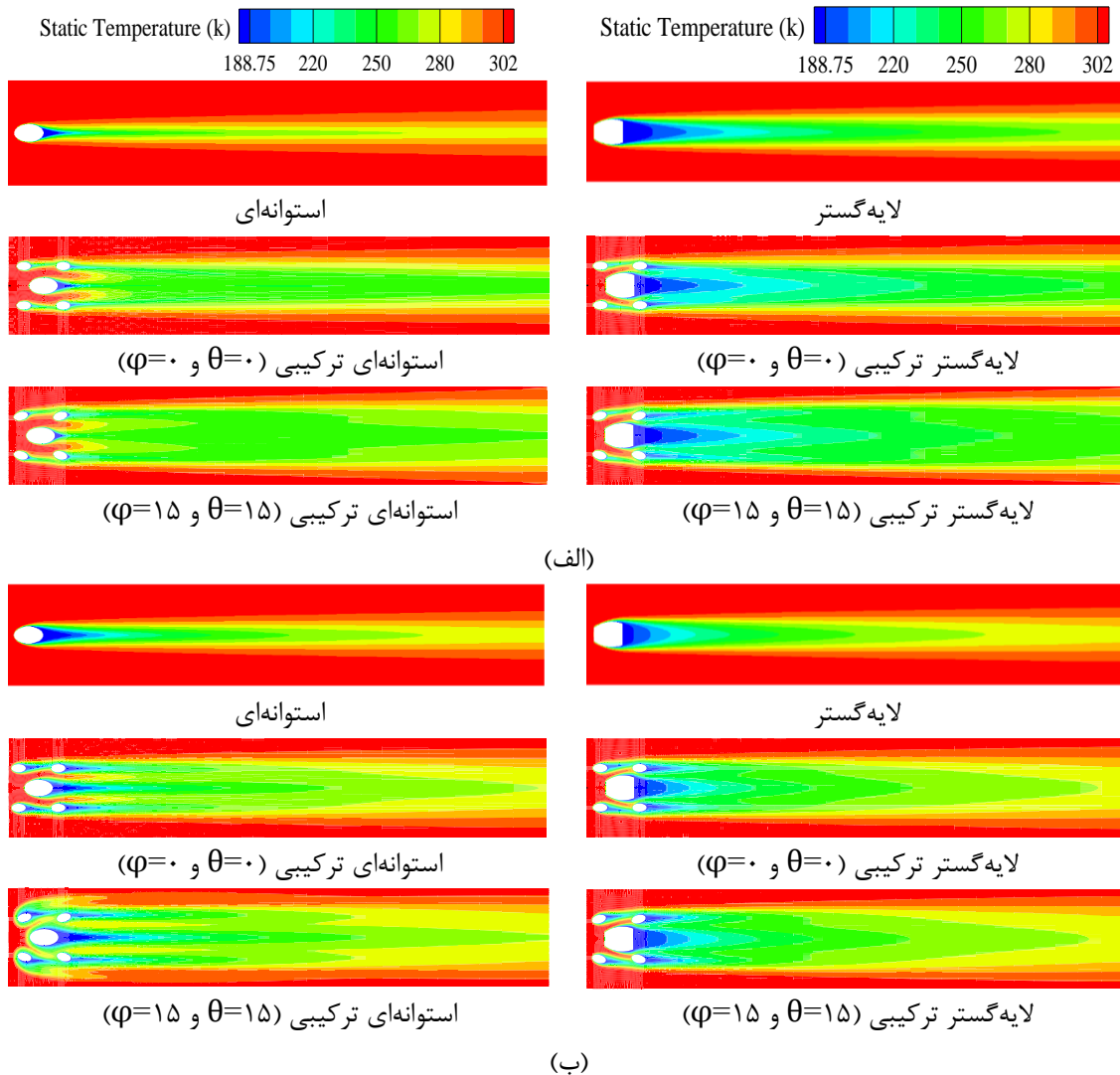


شکل ۸- توزیع دما و بردارهای سرعت روی صفحه (x-y) در فاصله  $\frac{X}{D}=1$  و  $\frac{X}{D}=5$  از لبه فرار سوراخ تزریق در نسبت دمش ۱

به دلیل مومنتم پایین سیال خنک کننده در نسبت دمش ۰/۵ مطابق شکل (۷) جریان خنک کننده مغلوب جریان داغ اصلی می شود و تاثیر تغییر زاویه سوراخ تزریق مهارکننده محسوس نمی باشد، ولی در نسبت دمش ۱ مطابق شکل (۸) با افزایش مومنتم سیال خنک کننده در حالت سوراخ تزریق لایه گستر به دلیل افزایش مساحت خروجی سوراخ تزریق، سرعت خروجی سیال خنک کننده پایین بوده و قدرت خیزش گردابه رو به بالا کاهش می یابد. این موضوع موجب افزایش کارایی خنک کاری لایه ای در حالت سوراخ لایه گستر نسبت به سوراخ استوانه ای می شود. (در حالت های سوراخ تزریق استوانه ای و لایه گستر با سوراخ های مهارکننده با زاویه قرارگیری  $(\theta=15$  و  $\phi=15)$ ).

### ۶-۱- توزیع دمای استاتیک روی صفحه خنک‌شونده

توزیع دمای صفحه خنک‌شونده در نسبت دمش‌های ۰/۵ و ۱ در هندسه‌های سوراخ تزریق استوانه‌ای و لایه‌گستر در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در نسبت دمش ۰/۵ به دلیل مومنتم پایین، سیال خنک‌کننده چسبیده به سطح حرکت می‌کند. در این حالت تک سوراخ تزریق لایه‌گستر چندان مزیتی نسبت به تک سوراخ تزریق استوانه‌ای ندارد. اما در این نسبت دمش استفاده از سوراخ‌های تزریق مهارکننده در کنار سوراخ تزریق اصلی کارایی آدیاباتیک خنک‌کاری در راستای جانبی در هر دو حالت سوراخ تزریق را بهبود بخشیده است. شایان ذکر است که بهبود کارایی خنک‌کاری در حالت سوراخ تزریق اصلی لایه‌گستر به دلیل کاهش فاصله گردابه‌های ایجاد شده محسوس می‌باشد. به دلیل کاهش فاصله سوراخ‌های تزریق مهارکننده از سوراخ تزریق اصلی، سطح خنک‌شونده افزایش یافته است. همچنین با تغییر زاویه تزریق سوراخ تزریق مهارکننده از ۰ درجه به ۱۵ درجه، جفت گردابه‌های خلاف‌گرد ایجاد شده ناشی از وجود این سوراخ به سمت جانبی گسترش یافته و باعث خنک‌شدن بیشتر صفحه می‌شود.

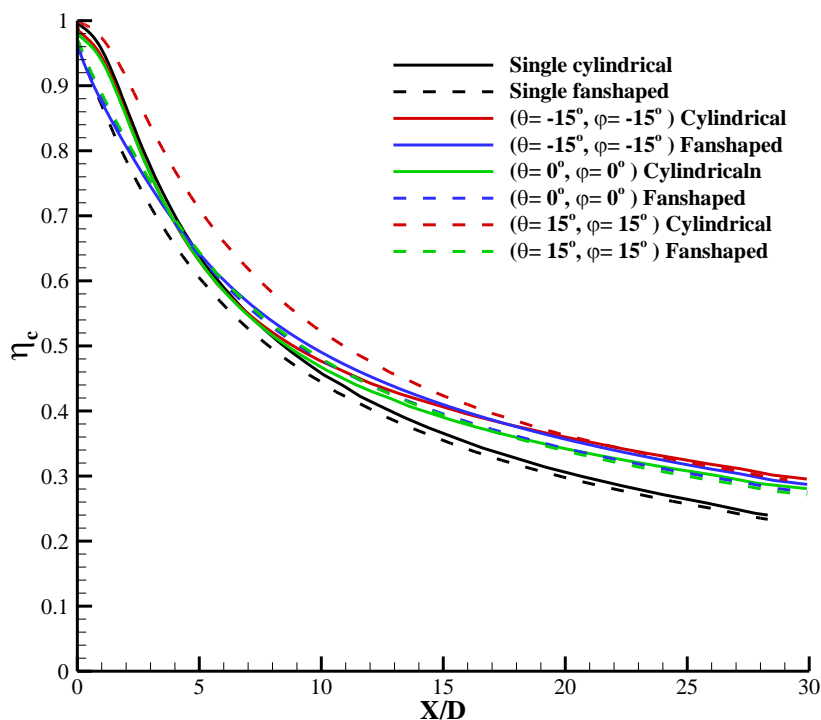


شکل ۹- توزیع دمای استاتیک در صفحه خنک‌شونده: (الف) نسبت دمش ۰/۵؛ (ب) نسبت دمش ۱

## ۶-۲- کارایی آدیاباتیک خنک کاری لایه‌ای بر روی خط مرکزی

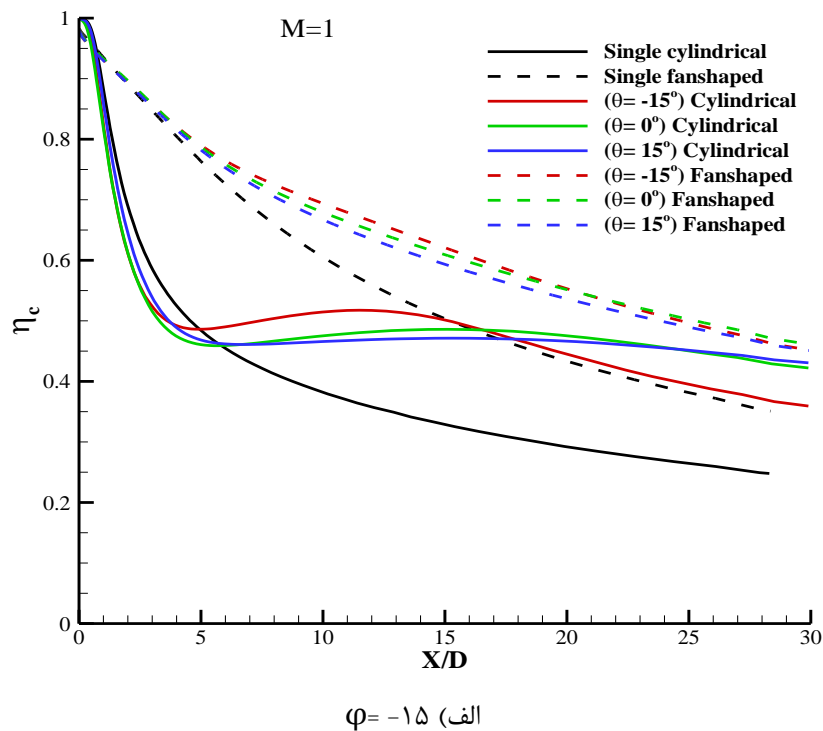
در شکل (۱۰) تأثیر زاویه‌های سوراخ‌های مهارکننده بر کارایی آدیاباتیک خنک کاری لایه‌ای روی خط مرکزی صفحه خنک‌شونده نشان داده شده است. نتایج حاضر نشان می‌دهد که در نسبت دمش  $0/5$  تک سوراخ تزریق لایه‌گستر به دلیل پخش سیال در راستای جانبی سبب کاهش کارایی آدیاباتیک خنک کاری لایه‌ای بر روی خط مرکزی نسبت به تک سوراخ تزریق استوانه‌ای می‌شود. همچنین استفاده از سوراخ‌های ترکیبی استوانه‌ای در ابتدای خنک کاری، کارایی برابر با تک سوراخ تزریق استوانه‌ای دارد ولی در پایین دست با ایجاد جفت گردابه‌های خلاف‌گرد، جفت گردابه‌های خلاف‌گرد سوراخ تزریق اصلی را تضعیف نموده و از برخاستگی سیال خنک‌کننده از سطح جلوگیری می‌کند. ذکر این نکته ضروری است که تغییر در زاویه‌های سوراخ‌های مهارکننده هم در حالت سوراخ تزریق اصلی استوانه‌ای و هم لایه‌گستر تغییر محسوس در کارایی آدیاباتیک خنک کاری در راستای خط مرکزی به همراه ندارد.

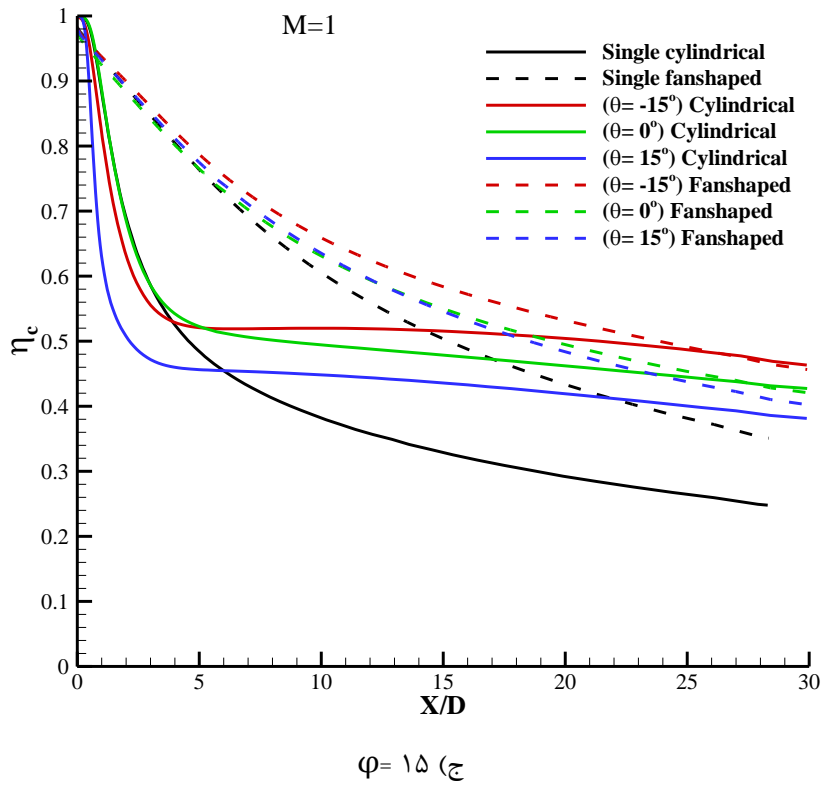
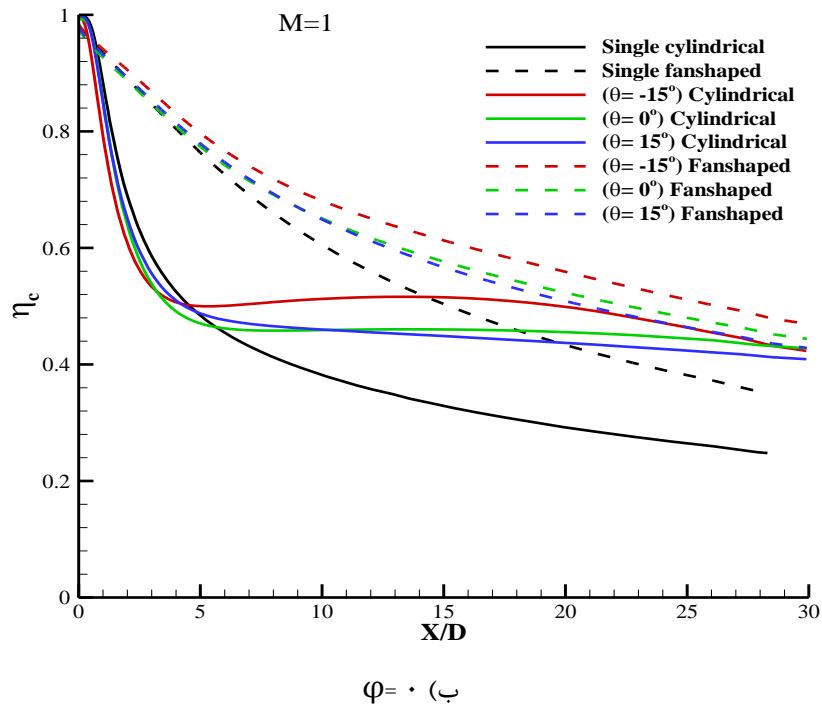
در شکل (۱۱) کارایی آدیاباتیک خنک کاری لایه‌ای در خط مرکزی در زاویه‌های مختلف قرارگیری سوراخ‌های مهارکننده نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کارایی آدیاباتیک خنک کاری در نسبت دمش ۱ در ابتدای سوراخ تزریق در تک سوراخ تزریق استوانه‌ای و سوراخ‌های ترکیبی استوانه‌ای عملکرد یکسانی دارند. این موضوع به این دلیل است که جفت گردابه‌های خلاف‌گرد سوراخ‌های مهارکننده در ابتدا بسیار قوی ولی کوچک می‌باشند و روی جفت گردابه‌های خلاف‌گرد سوراخ تزریق اصلی اثر محسوس نداشته و مانند سوراخ تزریق تنها عمل می‌کنند. ولی در پایین دست لبه حمله، این گردابه‌ها به هم برخورد کرده و قدرت جفت گردابه‌های خلاف‌گرد اصلی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰- کارایی آدیاباتیک خنک کاری لایه‌ای بر روی خط مرکزی در  $M=0/5$

همچنین در این نسبت دمش، سیال خنک‌کننده به دلیل مومنتم بالا در خروجی سوراخ تزریق از سطح فاصله گرفته و سیال داغ به واسطه گردابه‌های نعل اسبی، لایه‌ای بین سیال خنک‌کننده و سطح خنک‌شونده ایجاد می‌کند. بنابراین سوراخ تزریق لایه‌گستر با خنثی نمودن این گردابه‌ها سبب اتصال مجدد سیال خنک‌کننده به سطح شده و در نتیجه سبب بهبود کارایی خنک‌کاری لایه‌ای می‌شوند. همچنین در حالتی که سوراخ تزریق مهارکننده پایین‌دست تحت زاویه ۰ درجه و سوراخ تزریق مهارکننده در بالادست جریان در زاویه‌های ۰ و ۱۵ قرار گرفته، نتایج نشان می‌دهد که در هر دو حالت سوراخ لایه‌گستر یا استوانه‌ای استفاده از سوراخ مهارکننده بالادست با زاویه ۱۵- سبب تضعیف گردابه‌های نعل اسبی در ابتدای سوراخ تزریق اصلی و مانع از اختلاط زود هنگام سیال خنک‌کننده با سیال داغ شده و این امر سبب افزایش راندمان آدیاباتیک خنک‌کاری در خط مرکزی می‌شود. همچنین در حالتی که سوراخ تزریق مهارکننده پایین‌دست تحت زاویه ۱۵ درجه قرار گرفته، قراردادن سوراخ مهارکننده بالادست در زاویه ۱۵- درجه سبب افزایش کارایی در خط مرکزی می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، در حالتی که سوراخ تزریق مهارکننده پایین‌دست تحت زاویه ۱۵- درجه قرار داشته باشد سوراخ مهارکننده بالادست ۱۵- درجه در ابتدا عملکرد خوبی داشته، ولی در پایین‌دست جریان کارایی آدیاباتیک خنک‌کاری کاهش می‌یابد. در تمامی حالات استفاده از سوراخ تزریق مهارکننده بالادست با زاویه تزریق ۱۵ درجه کمترین کارایی خنک‌کاری در خط مرکزی را به همراه دارد. تاثیر زاویه قرارگیری سوراخ‌های تزریق مهارکننده در کارایی خنک‌کاری، در کنار سوراخ تزریق لایه‌گستر چشمگیرتر از سوراخ تزریق استوانه‌ای است.





شکل ۱۱- کارایی آدیاباتیک خنک کاری لایه‌ای بر روی خط مرکزی در  $M=1$

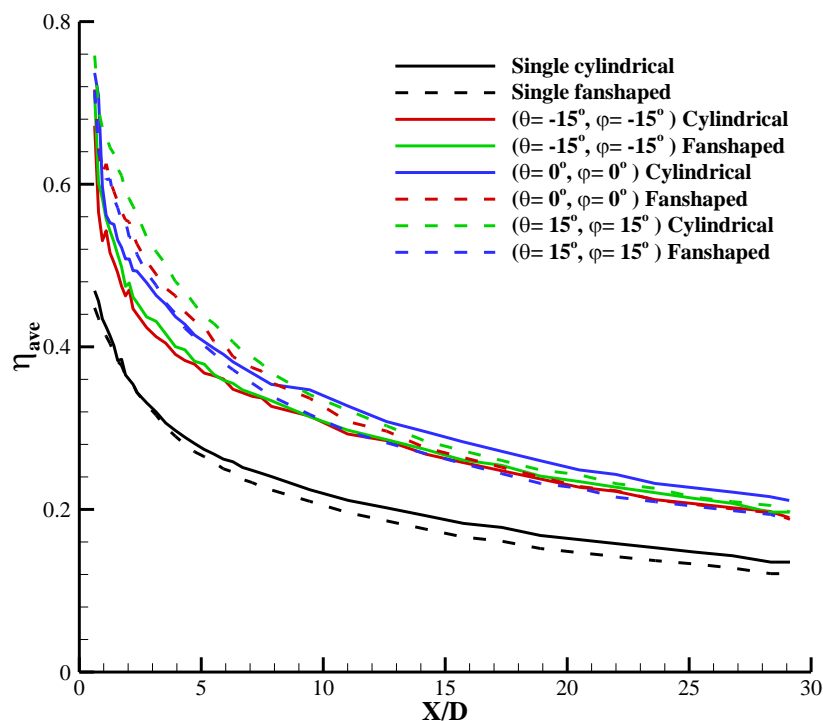


### ۶-۳- کارایی متوسط جانبی

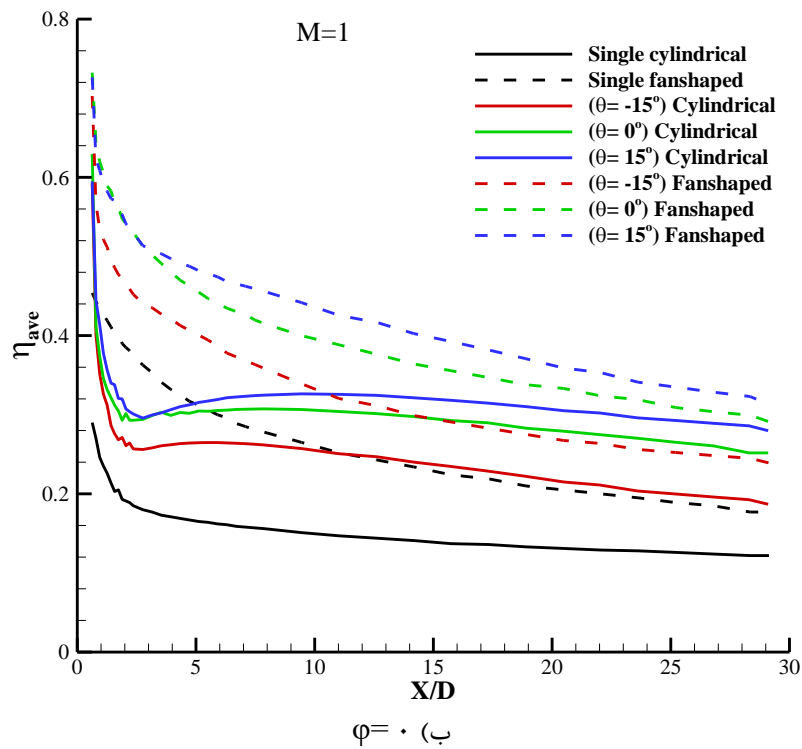
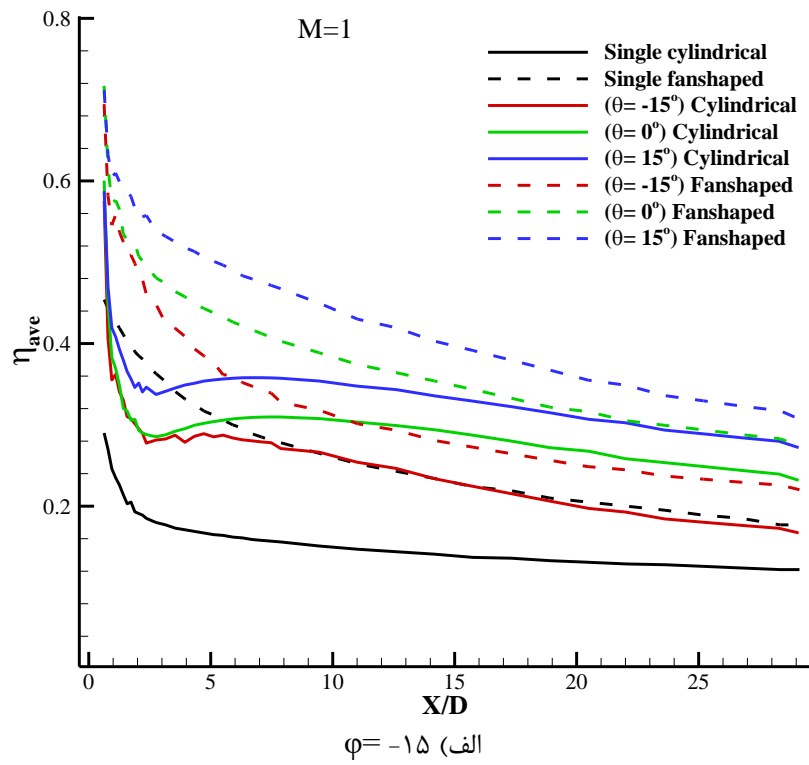
در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) توزیع کارایی متوسط جانبی در صفحه خنک‌شونده برای هندسه‌های مختلف در نسبت دمش‌های ۰/۵ و ۱ و نسبت چگالی ۱/۶ نشان داده شده است.

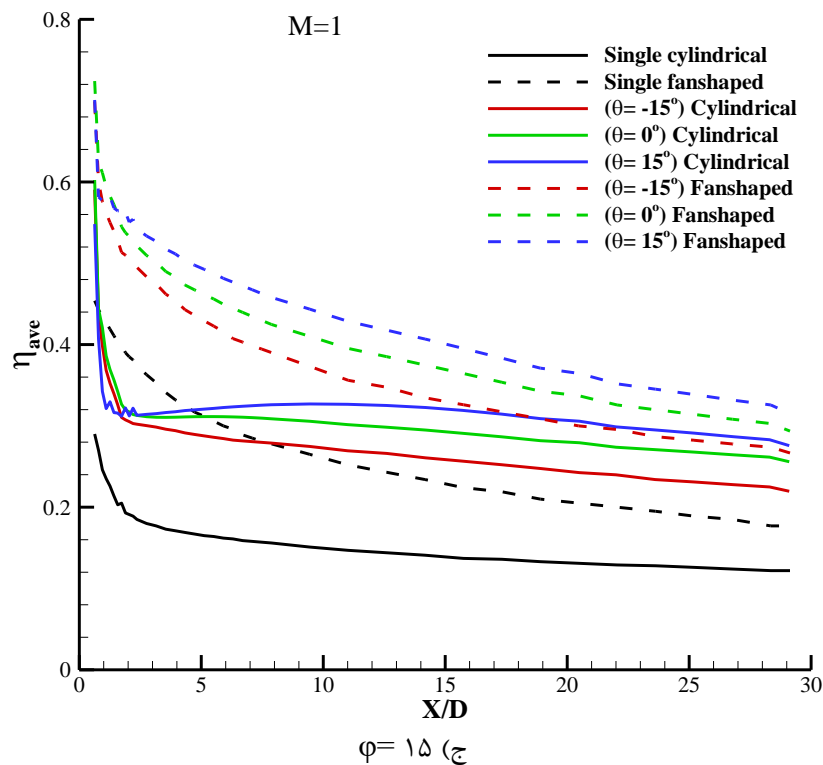
شکل (۱۲) نشان می‌دهد که در نسبت دمش ۰/۵ به دلیل مومنتم پایین، سیال خنک‌کننده چسبیده به سطح حرکت می‌کند. در این حالت تک سوراخ تزریق لایه‌گستر داری مزیت خاصی نسبت به تک سوراخ تزریق استوانه‌ای ندارد. ولی در مواردی که از سوراخ‌های تزریق مهارکننده استفاده شده، کارایی آدیاباتیک خنک‌کاری در راستای جانبی برای مواردی که از سوراخ تزریق اصلی لایه‌گستر استفاده شده، به دلیل کم شدن فاصله تا سوراخ‌های تزریق مهارکننده و پوشش سطح خنک‌شونده با سیال خنک‌کننده افزایش یافته است.

به ازای نسبت دمش ۱، همان‌گونه که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، با افزایش شار مومنتم در حالت سوراخ تزریق استوانه‌ای، کارایی متوسط جانبی کاهش چشمگیری می‌یابد. ولی در حالت سوراخ لایه‌گستر به دلیل خنثی نمودن گردابه‌های نعل اسبی مانع از فاصله گرفتن سیال خنک‌کننده از سطح و همچنین مانع از کشیده شدن سیال داغ به سطح خنک‌شونده شده و کارایی متوسط جانبی را افزایش می‌دهد. استفاده از سوراخ تزریق اصلی لایه‌گستر سبب نزدیکی جفت گردابه‌های خلاف‌گرد اصلی به جفت گردابه‌های خلاف‌گرد سوراخ‌های مهارکننده شده، که این امر سبب ضعیف شدن سریع گردابه‌های خلاف‌گرد سوراخ تزریق اصلی می‌شود ولی این امر در حالتی که از سوراخ تزریق اصلی استوانه‌ای استفاده شده است دیرتر رخ می‌دهد.



شکل ۱۲- توزیع کارایی متوسط جانبی در صفحه خنک‌شونده در  $M=0.5$





شکل ۱۳- توزیع کارایی خنک‌کاری متوسط جانبی در صفحه خنک‌شونده در  $M=1$

مطابق شکل (۱۳) استفاده از سوراخ بالادست با زاویه  $15^\circ$  درجه برای سوراخ مهارکننده پایین‌دست با زاویه  $0^\circ$  و  $15^\circ$  و  $-15^\circ$  در هر دو حالت سوراخ تزریق اصلی به دلیل ضعیف نمودن اثر گردابه‌ی نعل اسبی سوراخ تزریق مهارکننده پایین‌دست سبب بهبود قابل ملاحظه‌ای در کارایی متوسط جانبی می‌شود. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، استفاده از زاویه  $-15^\circ$  درجه سوراخ تزریق بالادست فقط سبب افزایش کارایی آدیاباتیک خنک‌کاری روی خط مرکزی شده، ولی در کارایی متوسط جانبی تاثیر منفی دارد.

#### ۶-۴- کارایی متوسط سطحی خنک‌کاری لایه‌ای

کارایی متوسط سطحی خنک‌کاری لایه‌ای بر روی سطح خنک‌شونده از لبه فرار سوراخ تزریق تا انتهای سطح خنک‌شونده برای تمامی هندسه‌های به کار گرفته در تحقیق حاضر برحسب نسبت دمش‌های  $0/5$  و  $1$  در جدول (۴) ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، استفاده از سوراخ‌های تزریق مهارکننده سبب افزایش کارایی خنک‌کاری شده است. همچنین به کارگیری سوراخ تزریق لایه‌گستر به عنوان سوراخ تزریق اصلی به همراه سوراخ‌های تزریق مهارکننده سبب بهبود فرآیند خنک‌کاری در هر دو نسبت دمش نسبت به حالتی است که از سوراخ تزریق استوانه‌ای استفاده شده است.

علاوه بر این قرار دادن سوراخ‌های مهارکننده در زاویه  $15^\circ$  درجه مطلوب‌ترین عملکرد خنک‌کاری را به نسبت دیگر هندسه‌های مورد مطالعه در هر دو نسبت دمش  $0/5$  و  $1$  دارا می‌باشد.

## جدول ۴- کارایی متوسط سطحی خنک کاری لایه‌ای بر روی سطح خنک‌شونده

$\bar{\eta}$	شماره	$\bar{\eta}$	شماره	$\bar{\eta}$	شماره	M			
		لایه گستر		استوانه‌ای			سوراخ تزریق تنها		
-	-	۰/۰۸۴	۱۵	۰/۰۸۴	۱	۰/۵			
-	-	۰/۰۵۵	۱۶	۰/۰۵۵	۲	۱			
$\varphi=15$		$\varphi=0$		$\varphi=-15$					
۰/۲۰۲	۲۹	۰/۱۹۳	۱۷	۰/۱۸۷	۳	۰/۵	$\theta = -15$	سوراخ تزریق اصلی استوانه‌ای	سوراخ تزریق اصلی همراه با سوراخ‌های مهارکننده
۰/۲۳۵	۳۰	۰/۱۸۸	۱۸	۰/۱۴۵	۴	۱			
۰/۲۰۵	۳۱	۰/۱۹۵	۱۹	۰/۱۹	۵	۰/۵			
۰/۲۴	۳۲	۰/۱۹۵	۲۰	۰/۱۶	۶	۱	$\theta = 0$		
۰/۲۳	۳۳	۰/۱۹۸	۲۱	۰/۱۹۵	۷	۰/۵	$\theta = 15$		
۰/۲۴۳	۳۴	۰/۲۱۴	۲۲	۰/۱۸۸	۸	۱	$\theta = 15$		
۰/۲۲۶	۳۵	۰/۲۱۷	۲۳	۰/۲۱	۹	۰/۵	$\theta = -15$	سوراخ تزریق اصلی لایه گستر	
۰/۳۰۴	۳۶	۰/۲۶	۲۴	۰/۲۱	۱۰	۱	$\theta = -15$		
۰/۲۳	۳۷	۰/۲۲	۲۵	۰/۲۱۸	۱۱	۰/۵	$\theta = 0$		
۰/۳۲۱	۳۸	۰/۲۷	۲۶	۰/۲۳۲	۱۲	۱	$\theta = 0$		
۰/۲۳۴	۳۹	۰/۲۲۷	۲۷	۰/۲۲	۱۳	۰/۵	$\theta = 15$		
۰/۳۳۴	۴۰	۰/۲۹	۲۸	۰/۲۶	۱۴	۱	$\theta = 15$		

## ۷- جمع بندی

در تحقیق حاضر تاثیر زاویه سوراخ‌های تزریق مهارکننده نسبت به سوراخ تزریق اصلی در ۱۸ هندسه مختلف بر روی صفحه تخت مورد مطالعه قرار گرفته است. دو سوراخ تزریق مهارکننده در مجاور سوراخ تزریق اصلی استوانه‌ای و لایه گستر تحت زوایای ۱۵-، ۰ و ۱۵ درجه قرار می‌گیرد و کارایی آدیباتیک خنک کاری لایه‌ای در هر دو نسبت دمش ۰/۵ و ۱ برای تمامی هندسه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد:

- سوراخ تزریق لایه گستر عملکرد خنک کاری لایه‌ای بهتری در مقایسه با سوراخ تزریق استوانه‌ای در شرایط یکسان دارد.
- در نسبت دمش ۰/۵ تغییر زاویه سوراخ‌های تزریق مهارکننده تاثیر محسوسی در خنک کاری لایه‌ای ندارد.
- در نسبت دمش ۱ به کارگیری از سوراخ‌های تزریق مهارکننده با ایجاد گردابه‌های خلاف گرد سبب تضعیف گردابه‌های خلاف گرد سوراخ تزریق اصلی شده، در نتیجه سیال چسبیده به سطح به سمت پایین دست سطح خنک‌شونده پیش می‌رود.
- استفاده از سوراخ تزریق لایه گستر به عنوان سوراخ اصلی در کنار سوراخ‌های تزریق مهارکننده سبب افزایش فاصله بین مرکز جفت گردابه‌ها می‌گردد و مانع از بلند شدن سیال از سطح شده، بنابراین این اتفاق منجر به تضعیف اثر گردابه‌های نعل اسبی می‌شود و مانع از نفوذ سیال داغ بین سطح خنک شونده و سیال خنک کننده می‌شود.

- استفاده از سوراخ‌های مهارکننده با زاویه ۱۵ درجه به همراه سوراخ تزریق اصلی لایه گستر سبب القای مناسب بین جفت گردابه‌ها خلاف گرد اصلی و جفت گردابه‌های خلاف گرد سوراخ‌های تزریق مهارکننده شده و این امکان را فراهم می‌سازد که جت خنک‌کننده گسترش جانبی بیشتری در عرض جریان داشته باشد. بنابراین حالت ۱۸ دارای بهترین کارایی خنک‌کاری لایه‌ای در مقایسه با حالت‌های دیگر می‌باشد.

## مراجع

- [1] Ramsey, J.W., and Goldstein, R.J., "Interaction of a Heated Jet with a Deflecting Stream", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 93, No. 4, pp. 365-372, (1971).
- [2] Sinha, A.K., Bogard, D.G., and Crawford, M.E., "Film-cooling Effectiveness Downstream of a Single Row of Holes with Variable Density Ratio", *Journal of Turbomachinery*, Vol. 113, No. 3, pp. 442-449, (1991).
- [3] An, B.T., Liu, J.J., Zhang, X.D., Zhou, S.J., and Zhang, C., "Film Cooling Effectiveness Measurements of a Near Surface Streamwise Diffusion Hole", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 103, pp. 1-13, (2016).
- [4] Ghorab, M.G., Hassan, I.G., and Lucas, T., "An Experimental Investigation of Film Cooling Performance of Louver Scheme", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 7-8, pp. 1387-1399, (2011).
- [5] Chen, S.P., Chyu, M.K., and Shih, T.I.P., "Effects of Upstream Ramp on the Performance of Film Cooling", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, No. 6, pp. 1085-1094, (2011).
- [6] Heidmann, J.D., and Ekkad, S., "A Novel Antivortex Turbine Film-cooling Hole Concept", *Journal of Turbomachinery*, Vol. 130, No. 3, pp. 031020, (2008).
- [7] Repko, T.W., Nix, A.C., Uysal, S.C., and Sisler, A.T., "Flow Visualization of Multi-hole Film Cooling Flow under Varying Freestream Turbulence Levels", *J. Flow Control Meas. Visualization*, Vol. 4, pp. 13-29, (2016).
- [8] Ramesh, S., Ramirez, D.G., Ekkad, S.V., and Alvin, M.A., "Analysis of Film Cooling Performance of Advanced Tripod Hole Geometries with and without Manufacturing Features", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 94, pp. 9-19, (2016).
- [9] Schmidt, D.L., Sen, B., and Bogard, D.G., "Film Cooling with Compound Angle Holes: Adiabatic Effectiveness", *Journal of Turbomachinery*, Vol. 118, No. 4, pp. 807-813, (1996).
- [10] Bazdidi-Tehrani, F., and Pezeshkpour, P., "Film Cooling Flow by Double Rows of Compound Angle and Compound Angle Shaped Holes", In *ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition* (pp. V03BT13A048-V03BT13A048). American Society of Mechanical Engineers, San Antonio, Texas, USA, (2013).

- [11] Wu, H., Cheng, H., Li, Y., Rong, C., and Ding, S., "Effects of Side Hole Position and Blowing Ratio on Sister Hole Film Cooling Performance in a Flat Plate", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 93, pp. 718-730, (2016).
- [12] Khajehhasani, S., and Jubran, B.A., "A Numerical Evaluation of the Performance of Film Cooling from a Circular Exit Shaped Hole with Sister Holes Influence", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 37, No. 2, pp. 183-197, (2016).
- [13] White, F.M., and Corfield, I., "*Viscous Fluid Flow*", Vol. 3, New York, McGraw-Hill, (2006).
- [14] Naghashnejad, M., Amanifard, N., and Deylami, H.M., "A Predictive Model Based on a 3-D Computational Approach for Film Cooling Effectiveness Over a Flat Plate using GMDH-type Neural Networks", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 1, pp. 139-149, (2014).
- [15] Launder, B.E., and Sharma, B.I., "Application of the Energy-dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc", *Letters in Heat and Mass Transfer*, Vol. 1, No. 2, pp. 131-137, (1974).
- [16] Ansys Fluent User's Manual, Version 15, (2013).
- [17] Walters, D.K., and Leylek, J.H., "A Systematic Computational Methodology Applied to a Three-dimensional Film-cooling Flowfield", In ASME (1996) International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition (pp. V004T09A040-V004T09A040), American Society of Mechanical Engineers, Birmingham, UK, 10-13 June, (1996).

### فهرست نمادهای انگلیسی

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

### نمادهای یونانی

$\alpha$	زاویه مجرای تزریق نسبت به جریان اصلی، deg
$\beta$	زاویه گسترش مجرای تزریق در راستای عرضی، deg
$\varepsilon$	نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی، $m^2/s^3$
$\eta$	کارایی خنک کاری لایه‌ای

$\eta_{ave}$	کارایی متوسط جانبی
$\eta_{cl}$	کارایی خنک‌کاری لایه‌ای بر روی خط مرکزی
$\theta$	زاویه سوراخ تزریق مهارکننده، deg
$\mu$	لزجت دینامیکی، Pa.s
$\nu$	لزجت سینماتیکی، $m^2/s$
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
$\varphi$	زاویه سوراخ تزریق مهارکننده، deg

#### زیرنویس

aw	دیواره آدیاباتیک
c	سیال خنک‌کننده
$\infty$	جریان اصلی

**Abstract**

In current study, three dimensional numerical analysis has been employed to investigate the flow and thermal fields, for different geometry of the hole injection of the film cooling over a flat plate. The computational methodology includes the use of a structured, non-uniform hexahedral grid consisting of the main flow channel, the coolant delivery tube and the feeding plenum, applying the SIMPLE algorithm for pressure-velocity coupling. The two sister holes injection located in the vicinity of to the main injection the cylindrical and the fan-shaped hole by angles of 15, 0 and -15 degree to decrease the strength of counter rotating vortex pairs of the main injection hole and the film cooling performance investigated for two blowing ratios of 0.5 and 1 and density ratio of 1.6. The results show that for blowing ratio of 1, the using of sister holes with the angle of 15 degree with fan-shaped hole injection has the best film cooling performance and increases the performance of film cooling about 37.44% more than the base case which is used from sister holes with the angle of 0 degree with cylindrical hole injection.