

بررسی اثر نسبت دمش و گام حفره‌ها بر خنک‌کاری لایه‌ای صفحه تخت به وسیله دو ردیف حفره فن -

شکل

امین اردکانی^۱، کریم مظاهری^{۲*}، میلاد دلدار^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی شریف، a.a136992@gmail.com

۲- استاد، دانشگاه صنعتی شریف، (*نویسنده مخاطب) mazaheri@sharif.ir

۳- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، Deldar_Milad@yahoo.com

چکیده

پژوهش حاضر به شبیه‌سازی عددی خنک‌کاری لایه‌ای صفحه تخت با استفاده از دو ردیف حفره‌ی دارای بازشدگی (فن‌شکل) به وسیله مدل آشفتگی انتقال تنش رینولدز اختصاص یافته است. مدل مورد استفاده ابتدا با داده‌های آزمایشگاهی هندسه مربوطه اعتبارسنجی گردید و در ادامه، بررسی دقیقی بر تاثیر پارامتر نسبت دمش هر دو ردیف حفره‌ها بر عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای ارائه شده است. نتایج این مطالعه حاکی از افزایش قابل ملاحظه در عملکرد خنک‌کاری با استفاده از دو ردیف حفره فن‌شکل می‌باشد. همچنین اثر افزایش نسبت دمش حفره‌های ردیف اول بر بهبود عملکرد خنک‌کاری به نسبت اثر افزایش نسبت دمش ردیف دوم موثرتر بدست آمد. در انتها، اثر افزایش گام عرضی حفره‌ها از ۴ برابر قطر حفره به ۶ برابر قطر حفره مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که با کاهش پنجاه درصدی دبی مصرفی جریان خنک، عملکرد خنک‌کاری سطح تنها حدود ۲۰٪ کاهش می‌یابد که این دستاوردی قابل ملاحظه است.

واژه‌های کلیدی: خنک‌کاری لایه‌ای - مطالعه پارامتری - شبیه‌سازی عددی

۱- مقدمه

افزایش راندمان توربین‌های گاز عامل مهمی در کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی ناشی از آن است. با افزایش دمای سیال ورودی به توربین راندمان توربین‌های گاز را می‌توان افزایش داد، اما محدودیت‌های متالورژیکی مواد مورد استفاده در ساخت پره‌های توربین عاملی محدودکننده برای این رویکرد است. از این رو مطالعات متعددی با هدف یافتن راهکارهایی برای محافظت نواحی از توربین که تحت تنش حرارتی بالا هستند صورت پذیرفته است.

استفاده از خنک‌کاری لایه‌ای برای حفاظت حرارتی سطح یکی از روش‌های رایجی می‌باشد که از گذشته متداول بوده است. پیتزیک و همکارانش [۱] نخستین بررسی‌های دقیق هیدرودینامیکی جریان خنک‌کاری لایه‌ای را بر روی هندسه صفحه تخت انجام دادند. در این تحقیق شرایط جریان تا حد ممکن نزدیک به شرایط کاری توربین گاز در نظر گرفته شد تا بتوان از نتایج آن برای توربین‌های گازی استفاده شود.

سینا و همکارانش [۲] یکی از بنیادی‌ترین پژوهش‌های تجربی خنک‌کاری لایه‌ای را انجام دادند، در این مطالعه با تغییرات جزئی در مدل آزمایشگاهی پیتزیک به بررسی کارایی خنک‌کاری لایه‌ای پرداختند و تاثیر پارامترهای جریان مانند: نسبت چگالی، نسبت سرعت، نسبت مومنوم و نسبت دمش بر عملکرد خنک‌کاری لایه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت.

وانگ و همکارانش [۳] اثر نسبت دمش، نسبت چگالی و گام عرضی بر خنک‌کاری لایه‌ای صفحه تخت به وسیله حفره‌های استوانه‌ای با زاویه مرکب را بررسی کردند. لینچ و همکارانش [۴] گام بین حفره‌های یک ردیف ۳ و ۶ برای حفره‌های فن‌شکل مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که گام حفره کمتر پوشش کامل تری و اثربخشی متوسط عرضی بیشتری را ایجاد می‌کند.

افزایش بازدهی خنک‌کاری لایه‌ای همیشه یکی از چالش‌های تحقیقاتی در چند دهه اخیر در این حوزه بوده است. یکی از پارامترهای مورد توجه در این تحقیقات هندسه حفره است. استفاده از حفره‌های شکل یافته به جای حفره‌های کلاسیک دایروی یکی از پیشنهاداتی هست که به جهت افزایش بازدهی خنک‌کاری مطرح گردیده است [۵].

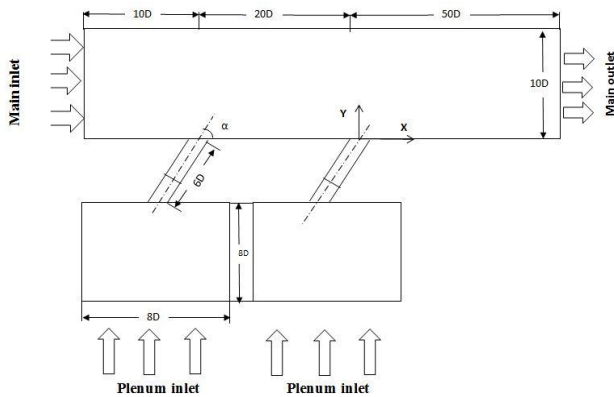
حفره‌های فن‌شکل^۱ یکی از شناخته شده‌ترین و در عین حال عملی‌ترین نوع از حفره‌های شکل یافته است که برای کاهش اثرات نامطلوب جفت گرداب خلفگرد و جدایی جت سرد از سطح^۲ مطرح گردیده است. در این طرح با افزایش سطح خروجی حفره از طریق ایجاد بازشدگی (طولی/عرضی و یا هر دو) در دهانه حفره، مومنوم جت سرد تزریق شده به جریان اصلی کاهش یافته و به تبع آن اثرات نامطلوب جفت گرداب خلفگرد نیز تضعیف می‌گردد. بدین سبب این طرح می‌تواند در نسبت دمش‌های بین ۱۰ الی ۲۰، بطور موثر مانع جدایی جت سرد از سطح و افت اثربخشی خنک‌کاری گردد [۶، ۷].

وی و همکارانش [۸] با بررسی زوایای هندسی حفره فن‌شکل نتیجه گرفتند که زوایای حفره تاثیر عمده‌ای در جدایش درون حفره دارند و زوایایی را نیز برای شیب و بازشدگی حفره پیشنهاد دادند. فو و همکارانش [۹] صفحه تخت با یک حفره فن‌شکل را به روش DNS تاثیر عدد رینولدز جریان گرم را بر ساختار گردابه‌ها بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش عدد رینولدز گردابه‌های سنجاق‌سری کوچک و گردابه‌های نعل اسبی ظاهر می‌شوند.

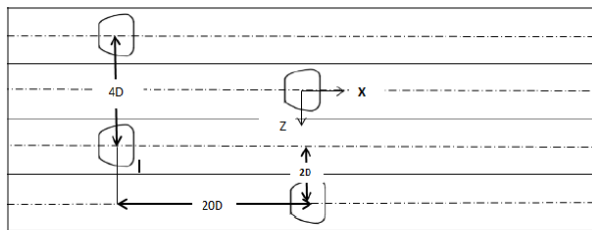
مطالعات عددی و تجربی در زمینه حفره‌های فن‌شکل بسیار زیاد است اما در کلیه این پژوهش‌ها تمرکز بر چند پارامتر مهم جریانی و تغییرات هندسه حفره‌ها معطوف می‌باشد. زاویه و میزان بازشدگی عرضی یا طولی، زاویه تزریق، طول حفره، گام عرضی حفره‌ها، شدت آشفتگی جریان اصلی و نسب دمش از مهمترین پارامترهای مورد مطالعه هستند. علاقه‌مندان می‌توانند از منابع [۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳] برای مطالعه و آشنایی با تاثیر تغییرات زوایای بازشدگی و تزریق و از منابع [۱۲، ۱۳] برای مطالعه و بررسی اثر نسبت طول به قطر حفره فن‌شکل استفاده کنند.

² Jet lift-off

¹ Fan-shaped



شکل ۱ شماتیک هندسه صفحه تخت برای شبیه‌سازی خنک‌کاری لایه‌ای با دو ردیف حفره فن شکل [۱۴]



شکل ۲ آرایش استگرد حفره‌ها برای شبیه‌سازی خنک‌کاری لایه‌ای با دو ردیف حفره فن شکل [۱۴]

در این پژوهش تمامی سطوح تحت خنک‌کاری لایه‌ای آدیباتیک در نظر گرفته شده است. پارامتر اثربخشی آدیباتیک خنک‌کاری لایه‌ای η مهمترین معیار در تحلیل نتایج می‌باشد که در معادله (۱) تعریف گردیده است. در این رابطه $T_{r,m}$ دمای بازیابی سیال گرم، T_{tc} دمای کل (سکون) سیال سرد در لحظه (قبل از) خروج از حفره و T_{aw} دمای آدیباتیک دیواره است. اگر مقدار η برابر ۱ باشد بدین معنی است که دمای آدیباتیک دیواره برابر با دمای سیال سرد می‌باشد و دیواره کاملا توسط سیال سرد محافظت گردیده است.

$$\eta = \frac{T_{r,m} - T_{aw}}{T_{r,m} - T_{tc}} \quad (1)$$

$$T_{r,m} = T_{\infty} \left(1 + r \frac{\gamma - 1}{2} Ma_{\infty}^2 \right) \quad (2)$$

در معادله (۲) γ توان آیزننروپیک، r ثابت بازیابی، T_{∞} دمای جریان اصلی و Ma_{∞} عدد ماخ جریان اصلی است. r به رژیم جریان و خواص حرارتی وابسته است و برای لایه مرزی آشفته روی سطح صفحه‌ی تخت برابر با $\sqrt[3]{Pr}$ است که Pr عدد پرنتل جریان می‌باشد.

کمیت اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در این پژوهش به صورت اثربخشی متوسط سطحی و اثربخشی متوسط عرضی استفاده شده است. که اثربخشی سطحی به صورت معادله (۳) و اثربخشی متوسط عرضی نیز به صورت معادله (۴) تعریف می‌گردند:

$$\bar{\eta}_{spat} = \frac{1}{A} \iint \eta dz dx = \frac{1}{40D \times 4D} \int_0^{40D} \int_{-2D}^{+2D} \eta dz dx \quad (3)$$

ساموبر و شولز [۱۳] در سال ۲۰۰۳ دو ردیف حفره فن شکل پشت سر هم را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در پایین دست محل قرارگیری ردیف دوم به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت دمش ردیف دوم (تا مقدار ۲) به طور پیوسته اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای افزایش می‌یابد. از آنجا که این مقاله یکی از معتبرترین نتایج آزمایشگاهی برای دو ردیف حفره فن شکل را ارائه داده است، در این پژوهش از هندسه حفره مقاله فوق استفاده شده است. پس از انتخاب مدل تنش رینولدز برای مطالعه عددی، این مدل و دو مدل دیگر با نتایج آزمایشگاهی مقاله فوق در نرم‌افزار فلوئنت صحت سنجی گردیدند و برتری مدل تنش رینولدز بر دو مدل دیگر نشان داده شد.

در ادامه با استفاده از مدل تنش رینولدز تاثیر تغییرات نسبت دمش برای هر دو ردیف حفره‌ها بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای بررسی شد و نتایج بهتری نسبت به مدل‌های مورد استفاده دیگر بدست آمد. همچنین فیزیک ساختارهای جریان و گردابی پایین دست نمایش داده و تحلیل شد. در انتها نیز تاثیر تغییر گام عرضی حفره‌های فن شکل بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- تعریف مسئله

بررسی عملکرد دو ردیف حفره فن شکل با هدف ارتقاء کیفیت خنک‌کاری روی سطح به عنوان موضوع پژوهش انتخاب گردید. فضای محاسباتی مطابق با هندسه آزمایش، ساموبر و شولز [۱۳]، شامل دو منبع تامین جت سیال سرد (پلنیوم)، دو حفره خنک‌کاری فن شکل و کانال اصلی مطابق شکل ۱ ایجاد گردید. آرایش حفره‌ها به صورت استگرد است که در شکل ۲ نمایش داده شده است. همچنین برای کاهش هزینه‌های محاسباتی و کاهش تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی از شرط مرزی تقارن استفاده شده است. همچنین برای کاهش زمان محاسبات، استقلال حل عددی از شبکه مورد بررسی قرار گرفت، شبکه‌هایی با تعداد سلول ۱٫۵ میلیون، ۲٫۵ میلیون و ۵ میلیون در نسبت دمش‌های مختلف استفاده شدند و نتایج نشان داد که شبکه‌های ۲٫۵ و ۵ میلیونی با نتایج آزمایشگاهی هم‌خوانی دارند ولی شبکه‌ی ۱٫۵ میلیونی دارای اندکی اختلاف است، در نتیجه شبکه‌ی ۲٫۵ میلیونی از بین این سه شبکه به عنوان شبکه مورد استفاده در پژوهش انتخاب گردید.

در این پژوهش مشابه پژوهش ساموبر و شولز [۱۳] جریان پایای تراکم‌ناپذیر و آشفته فرض گردید و سیال کاری هوا به عنوان گاز ایده‌آل در نظر گرفته شد. با توجه به داده‌های آزمایشگاهی پژوهش مقاله فوق ذکر، برای بررسی اثر نسبت دمش‌های دو ردیف حفره، مقادیر ۰٫۵، ۱٫۰ و ۲٫۰ برای نسبت دمش‌های حفره‌های ردیف اول و دوم، و برای بررسی فاصله بین حفره‌ها، گام‌های عرضی حفره‌ها ۴ و ۶ برابر قطر حفره‌ها و فاصله دو ردیف حفره ۲۰ برابر قطر حفره‌ها انتخاب گردیدند.

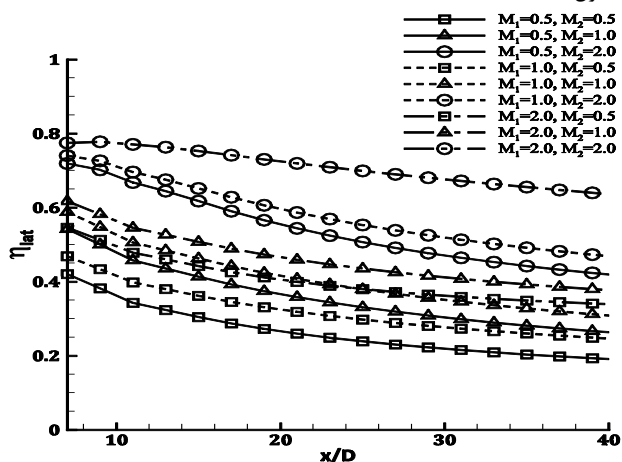
۲۵ از D رینولدز اثربخشی را به طور تقریبی و در بیش تر نواحی (تا حدود فاصله ردیف دوم) با خطای خیلی کم و نزدیک به مقادیر آزمایشگاهی پژوهش ساموبر پیش بینی می کند. در نتیجه مدل تنش رینولدز مناسب تر و اطمینان بخش تر از دو مدل مطالعه شده دیگر می باشد. می توان برای بهتر پیش بینی کردن پدیده اختلاط از مدل های دی ای اس^۴ و ال ای اس^۵ استفاده کرد. با توجه به توضیحات داده شده مدل تنش رینولدز برای مدل سازی پژوهش صورت گرفته انتخاب گردید.

۴- نتایج

۴-۱- اثر نسبت دممش BR

برای مطالعه اثر نسبت دممش ۹ ترکیب مختلف از نسبت دممش های ۰.۵ و ۱ و ۲ برای دو ردیف حفره انتخاب گردید. همان طور که انتظار می رود و در شکل ۵ نمایش داده شده است با افزایش نسبت دممش ردیف های یک و دو، اثربخشی متوسط عرضی خنک کاری لایه ای افزایش می یابد با این تفاوت که میزان اثر افزایش نسبت دممش ردیف دوم از ردیف اول بیشتر است. مشاهده می شود که سه ترکیبی که نسبت دممش ردیف دوم در آن برابر ۲ است از سایر ترکیب ها اثربخشی متوسط عرضی بهتری از خود نشان می دهد. کمترین اثربخشی متوسط عرضی مربوط به ترکیبی است که نسبت دممش ردیف دوم برابر ۰.۵ است.

در جدول ۱ اثربخشی متوسط سطحی برای همه ۹ ترکیب از نسبت دممش ها آورده شده است. مطابق انتظار اثربخشی متوسط سطحی نیز با افزایش نسبت دممش حفره ها افزایش یافته است. در این جدول نیز مشهود است که افزایش نسبت دممش ردیف دوم در بهبود عملکرد خنک کاری لایه ای موثرتر از افزایش نسبت دممش ردیف اول است.



شکل ۵ اثربخشی متوسط عرضی خنک کاری لایه ای برای نسبت دممش های مختلف.

جدول ۱: اثربخشی متوسط سطحی برای نسبت دممش های مختلف از مرکز حفره های ردیف اول تا فاصله ۴۰ برابر قطر از مرکز حفره های ردیف دوم

M_1 / M_2	۰,۵	۱	۲
۰,۵	۰,۳۲	۰,۴۳	۰,۵۳
۱	۰,۴۰	۰,۴۷	۰,۶۰
۲	۰,۵۰	۰,۵۷	۰,۷۰

$$\bar{\eta}_{lat} = \frac{1}{p} \int_{-p/2}^{+p/2} \eta dz = \frac{1}{4D} \int_{-2D}^{+2D} \eta dz \quad (4)$$

معادله (۵) اثربخشی متوسط سطحی واحد جرمی سیال سرد بی بعد و معادله (۶) ضریب حساسیت اثربخشی متوسط سطحی نسبت به تغییرات دبی جرمی سیال سرد بی بعد شده می باشد که برای مقایسه عملکرد حالات مختلف تعریف شده است. حالت مرجع که در مخرج هر دو رابطه قرار دارد، حالت نسبت دممش برابر یک برای هر دو ردیف می باشد. \dot{m}_t نیز مجموع دبی جرمی سیال سرد دو ردیف حفره در حالت مورد بررسی می باشد.

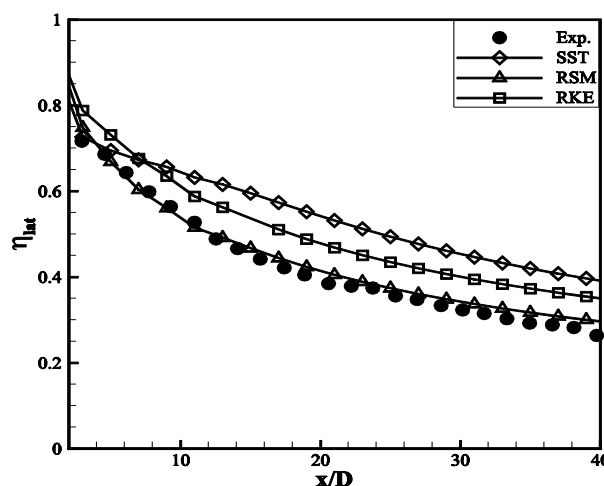
$$\eta'_t = \left(\frac{\bar{\eta}_{spat} / \dot{m}_t}{\bar{\eta}_{11} / \dot{m}_{11}} \right) \quad (5)$$

$$\eta_t^* = \left(\frac{\Delta \bar{\eta}_{spat} / \Delta \dot{m}_t}{\bar{\eta}_{11} / \dot{m}_{11}} \right) \quad (6)$$

۳- اعتبارسنجی مدل

در این بخش اعتبارسنجی مدل تنش رینولدز نسبت به دو مدل دیگر که معرفی شدند، برای خنک کاری لایه ای صفحه تخت با دو ردیف حفره فن شکل مطابق با پژوهش ساموبر [۱۳] صورت گرفته است. سپس به اعتبارسنجی مدل تنش رینولدز نسبت به پژوهش ساموبر پرداخته شد. مدل آشفتگی تنش رینولدز^۱، مدل ریلایزبیل کا-پسیلون^۲ و مدل اس اس تی-کی امگا^۳ با نتایج آزمایشگاهی و داده های پیش بینی پژوهش ساموبر [۱۳] مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که مدل تنش رینولدز قابلیت های بهتری برای استفاده در این پژوهش دارد.

در شکل ۳ اثربخشی متوسط عرضی محاسبه شده برای حالتی که فاصله ی بین دو ردیف حفره ها برابر D ۱۰ می باشد توسط این سه مدل در نسبت دممش ردیف اول و ردیف دوم برابر یک به همراه داده های آزمایشگاهی پژوهش ساموبر رسم گردیده است.



شکل ۳ مقایسه اثربخشی متوسط عرضی خنک کاری لایه ای محاسبه شده توسط مدل های توربولانسی برای دو ردیف حفره ی فن شکل با فاصله ۱۰D و نسبت دممش ردیف اول و ردیف دوم برابر با ۱ با آزمایش مرجع [۱۳]

همان طور که در شکل ۳ قابل مشاهده است مدل آرکی ای و مدل تنش رینولدز اثربخشی را بهتر از مدل اس اس تی-کی امگا پیش بینی می کنند، همچنین مدل آرکی ای اثربخشی را بیش تر از مقادیر تجربی محاسبه می کند ولی مدل تنش

⁴ Detached Eddy Simulation (DES)

⁵ Large Eddy Simulation (LES)

¹ RSM

² RKE

³ SST-K ω

تاثیر زیادی بر افت فشار ندارد اما افزایش نسبت دمش از ۱ به ۲ موجب افزایش ۴ تا ۵ برابری افت فشار می‌گردد.

$$\xi = \frac{(\dot{m}_H P_{0H} + \dot{m}_{C1} P_{0C1} + \dot{m}_{C2} P_{0C2}) - \dot{m}_{exit} P_{0exit}}{\dot{m}_H P_{0H} + \dot{m}_{C1} P_{0C1} + \dot{m}_{C2} P_{0C2}} \times 100 \quad (Y)$$

جدول ۴: درصد افت فشار برای نسبت دمش‌های مختلف

M_1 / M_2	۰,۵	۱	۲
۰,۵	۳,۴۴	۴,۷۰	۲۸,۷۹
۱	۴,۷۵	۶,۰۲	۲۸,۸۹
۲	۲۹,۰۶	۲۹,۰۶	۴۰,۹۸

در پایین دست حفره‌های فن‌شکل دو جفت ساختار گردابی تشکیل می‌شود، یکی جفت گردابه‌هایی که در لبه‌های عرضی حفره ایجاد می‌شوند و رفتاری مشابه با جفت گرداب خلاف‌گرد^۱ دارند و دیگری جفت گردابه‌هایی که در ناحیه میانی ساختار ایجاد می‌شوند و رفتاری متضاد با جفت گرداب خلاف‌گرد دارند.

جفت گردابه در لبه‌های عرضی حفره که جریان داغ را از کناره‌ها به ناحیه زیر جت سرد مجاور سطح وارد می‌کنند باعث کاهش پخش جت سرد می‌شوند و جت سرد را از سطح دور می‌کنند و بدین صورت باعث کاهش اثربخشی می‌شوند و اثر منفی می‌گذارند. جفت گردابه موجود در ناحیه میانی که خلاف جهت جفت گرداب خلاف‌گرد می‌چرخند و جریان جت سرد را به‌طرف سطح هل می‌دهند تمایل دارند جریان داغ را از جریان اصلی وارد این ناحیه کنند و بدین صورت باعث افزایش اختلاط جریان داغ و جت سرد در مجاور سطح شوند و چون جهت چرخش آن‌ها خلاف جهت جفت گرداب خلاف‌گرد می‌باشند باعث تضعیف این گردابه‌ها می‌شوند و بدین صورت جدایش جت سرد از سطح را محدود می‌کنند.

در واقع هر عاملی که باعث کاهش قدرت جفت گردابه موجود در لبه‌های عرضی حفره شود اثر منفی این گردابه‌ها را تضعیف می‌کند و اثربخشی را افزایش می‌دهد و هر عاملی که باعث تقویت قدرت جفت گردابه میانی شود اثر مثبت آن‌ها را افزایش می‌دهد و باعث افزایش اثربخشی می‌شود. همان‌طور که در نمودارهای اثربخشی مشاهده کردیم افزایش نسبت دمش حفره‌های ردیف اول و دوم باعث افزایش اثربخشی می‌شود.

برای درک این پدیده‌ها، اثر افزایش نسبت دمش حفره‌های ردیف اول و دوم را روی قدرت این گردابه‌ها بررسی کردیم. در شکل ۶ توزیع اثربخشی خنک‌کاری لایه-ای به همراه بردارهای سرعت در فاصله‌ی $x/D=3,0$ از حفره‌های ردیف دوم رسم شده است. در شکل الف و ب مشاهده می‌کنید که هنگامی که نسبت دمش ردیف دوم ۰,۵ است، نسبت قدرت جفت گردابه میانی به جفت گردابه کناری کوچک می‌باشد و به همین دلیل گردابه‌های کناری ساختار غالب هستند و گردابه‌های میانی به دلیل قدرت کم، تأثیر مثبتشان اعمال نمی‌شود، ولی وقتی نسبت دمش ردیف دوم به ۲,۰ افزایش پیدا می‌کند قدرت هر دو ساختار افزایش پیدا می‌کند، به‌طوری‌که افزایش قدرت جفت گرداب میانی بیش‌تر است و نسبت قدرت این گردابه‌ها افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند و با اعمال اثرات مثبت این جفت گردابه‌های میانی، اثربخشی افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت دمش ردیف اول به ۲,۰ در شکل د قدرت گردابه‌های میانی ثابت می‌ماند ولی قدرت گردابه‌های کناری کاهش می‌یابد، به همین علت از جدایش انشعاب‌های جت سرد جلوگیری می‌شود و جت سرد به سطح نزدیک‌تر خواهد بود و اثربخشی افزایش می‌یابد.

جدول ۲ اثربخشی متوسط سطحی واحد جرمی سیال سرد بی بعد را نشان می‌دهد که بیانگر عملکرد خنک‌کاری سیال سرد می‌باشد. جدول ۳ ضریب حساسیت اثربخشی متوسط سطحی نسبت به تغییرات دبی جرمی سیال سرد بی‌بعد شده را نشان می‌دهد. سه ردیف اول جدول ۳ برای تغییرات نسبت دمش در ردیف دوم و سه ردیف بعدی جدول برای تغییرات نسبت دمش در ردیف اول حفره‌ها در حالتی که نسبت دمش ردیف دیگر تغییر نکند می‌باشد. هرچه مقدار ضریب حساسیت بالاتر باشد نشانه بازدهی بیشتر تغییر دبی جرمی سیال سرد می‌باشد.

جدول ۲: اثربخشی متوسط سطحی واحد جرمی سیال سرد بی‌بعد برای

نسبت دمش‌های مختلف از مرکز حفره‌های ردیف اول تا فاصله ۴۰ برابر

قطر از مرکز حفره‌های ردیف دوم

M_1 / M_2	۰,۵	۱	۲
۰,۵	۱,۴۴	۱,۲۵	۰,۶۵
۱	۱,۱۴	۱	۰,۶۳
۲	۰,۶۱	۰,۶۱	۰,۵۰

جدول ۳: ضریب حساسیت اثربخشی متوسط سطحی نسبت به تغییرات

دبی جرمی سیال سرد بی‌بعد برای تغییرات نسبت دمش‌های مختلف از

مرکز حفره‌های ردیف اول تا فاصله ۴۰ برابر قطر از مرکز حفره‌های ردیف

دوم

نسبت دمش ردیف اول، تغییرات نسبت دمش ردیف دوم	۰,۵	۱,۰	۲,۰
۰,۵ به ۱	۰,۶۵۱	۰,۳۱۵	۰,۵۶۲
۱ به ۲	۰,۲۱۵	۰,۲۱۵	۰,۲۱۳
نسبت دمش ردیف دوم، تغییرات نسبت دمش ردیف اول	۰,۵	۱,۰	۲,۰
۰,۵ به ۱	۰,۹۱۲	۰,۵۶۲	۰,۵۶۲
۱ به ۲	۰,۲۱۶	۰,۲۸۲	۰,۲۷۶

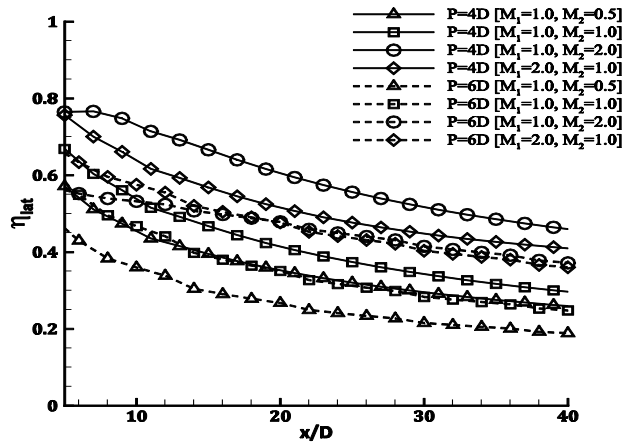
چند مشاهده زیر را می‌توان از جداول نتیجه گرفت:

- مطابق انتظار هرچه نسبت دمش بالاتر باشد اثربخشی بیشتر است (جدول ۱).
- افزایش نسبت دمش در ردیف اول بازدهی بیشتری به حالت مشابه برای افزایش نسبت دمش ردیف دوم دارد (جدول ۱).
- با افزایش نسبت دمش بازدهی به نسبت دبی سیال سرد (جدول ۲) کاهش می‌یابد.
- افزایش تعداد حفره‌ها به نسبت افزایش نسبت دمش تدبیر بهتری از افزایش نسبت دمش است.

درصد افت فشار با معادله (۷) محاسبه می‌گردد، در این معادله زیروند $c1$ و $c2$ به ترتیب مربوط به ردیف حفره‌های خنک‌کاری اول و دوم و H نیز مربوط به ورودی جریان گرم اشاره دارد. نتایج آن برای حالات مورد بررسی در این پژوهش در جدول ۴ آورده شده است. مشهود است که افزایش نسبت دمش از ۰,۵ به ۱

¹ Counter Rotating Vortex Pair (CRVP)

در این مطالعه ۸ حالت ترکیبی از پارامتر هندسی گام عرضی ۴ و ۶ و نسبت دمش حفره‌های ردیف اول ۱ و ۲ و نسبت دمش ردیف دوم ۰.۵، ۱، و ۲ مورد بررسی قرار گرفته شد. در شکل ۷ اثر بخشی متوسط عرضی برای گام‌های ۴D و ۶D در نسبت دمش‌های مختلف حفره‌های ردیف اول و دوم رسم شده است. همان طور که انتظار می‌رود در نسبت دمش‌های ثابت با افزایش گام بین دو حفره اثر بخشی متوسط عرضی، متاثر از کاهش دبی جرمی سیال سرد، کاهش می‌یابد.



شکل ۷: اثر بخشی متوسط عرضی در گام‌های عرضی ۴D و ۶D

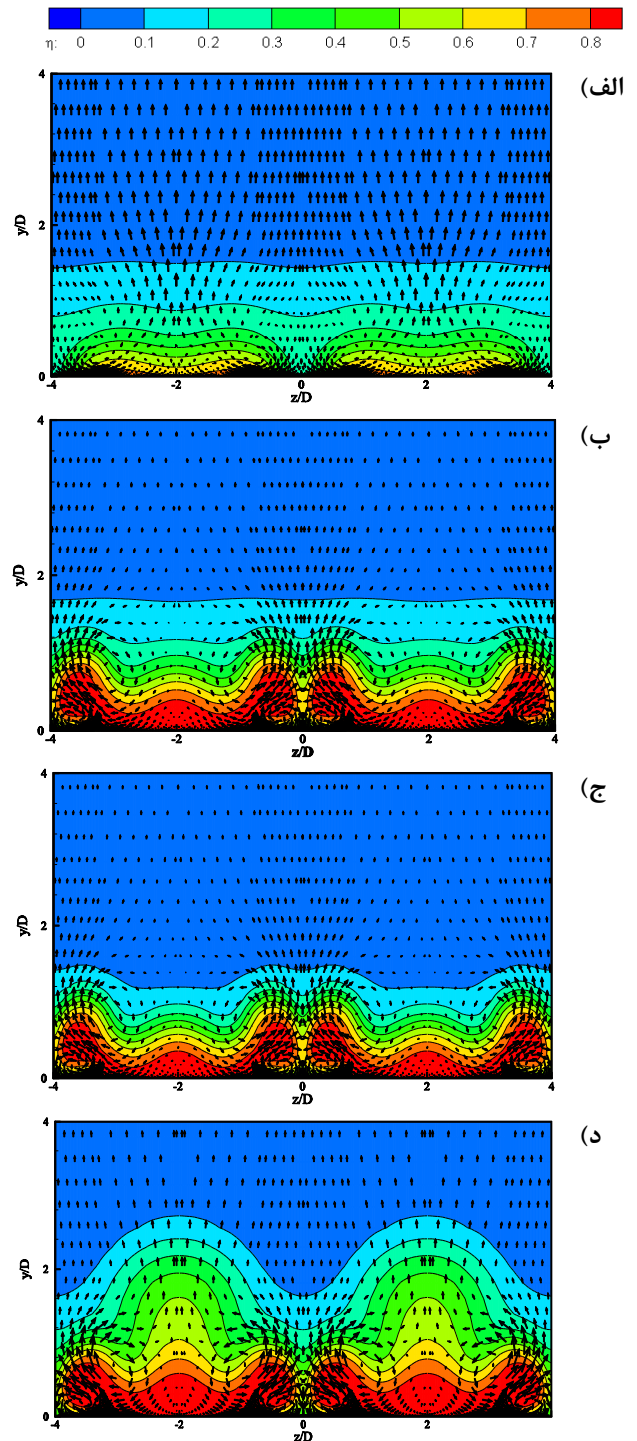
۵- جمع بندی

در این مقاله نتایج مطالعه پارامتری خنک کاری لایه‌ای بر روی صفحه تخت با دو ردیف حفره فن‌شکل با مدل تنش رینولدز توسط نرم افزار تجاری Fluent 2022 بیان گردید. پارامتر جریانی نسبت دمش با مقادیر نسبت دمش ۰.۵، ۱.۰، ۲.۰ و همچنین پارامتر هندسی گام عرضی بین حفره‌ها با دو مقدار ۴ برابر قطر حفره و ۶ برابر قطر حفره مورد بررسی قرار گرفت. می‌توان نتایج را به صورت زیر بیان کرد:

- مطابق انتظار هرچه نسبت دمش بالاتر باشد اثر بخشی بیشتر است (جدول ۱).
- افزایش نسبت دمش در ردیف اول بازدهی بیشتری به حالت مشابه برای افزایش نسبت دمش ردیف دوم دارد (جدول ۱).
- با افزایش نسبت دمش بازدهی به نسبت دبی سیال سرد (جدول ۲) کاهش می‌یابد.
- در حالتی که افزایش نسبت دمش از ۰.۵ به ۱ می‌باشد افت فشار شدیدی دیده نمی‌شود اما در حالتی که نسبت دمش را به ۲ افزایش می‌دهیم افت فشار به میزان قابل توجهی (۴ تا ۵ برابر) افزایش می‌نماید.
- افزایش تعداد حفره‌ها به نسبت افزایش نسبت دمش تدبیر بهتری از افزایش نسبت دمش است.
- در نسبت دمش ثابت با افزایش گام بین حفره‌های یک ردیف اثر بخشی متوسط عرضی، متاثر از کاهش دبی جرمی سیال سرد، کاهش می‌یابد.

۶- منابع

[1] Pietrzyk, J.R., D.G. Bogard, M.E. Crawford "Effects of density ratio on the hydrodynamics of film cooling". ASME 1989 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. 1989. American Society of Mechanical Engineers.
 [2] Sinha, A., D. Bogard, and M. Crawford, "Film-cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio" Journal of Turbomachinery, 1991. 113(3): p. 442-449



شکل ۶: توزیع اثر بخشی خنک کاری لایه‌ای به همراه بردارهای سرعت در فاصله $x/D = 3.0$ از حفره‌های ردیف دوم (الف) $M_2 = 0.5$ و $M_1 = 1$ (ب) $M_2 = 2$ و $M_1 = 1$ (ج) $M_2 = 2$ و $M_1 = 0.5$ (د) $M_2 = 2$ و $M_1 = 2$

۴-۲- نتایج اثر گام عرضی حفره‌های فن‌شکل

بدیهی است که با کاهش گام عرضی میان حفره‌ها، تعداد حفره‌های خنک کاری در هر ردیف بیشتر می‌شود و متعاقباً دبی جرمی سیال سرد در نسبت دمش ثابت افزایش می‌یابد و موجب بهبود اثر بخشی خنک کاری لایه‌ای می‌شود، به همین دلیل در این بخش به بررسی تغییرات اثر بخشی به ازای تغییرات دبی جرمی سیال سرد نیز باید توجه گردد.

- [3] Wang, Nian, et al. "Film cooling effectiveness from two rows of compound angled cylindrical holes using pressure-sensitive paint technique." *Journal of Heat Transfer* 141.4 (2019).
- [4] Haydt, Shane, and Stephen Lynch. "Cooling effectiveness for a shaped film cooling hole at a range of compound angles." *Journal of Turbomachinery* 141, no. 4 (2019): 041005.
- [5] Sumanta Acharya, Yousef Kanani, "Advances in Film Cooling Heat Transfer", advances in heat transfer volume 49, 2017,
- [6] Saumweber, Christian, and Achmed Schulz. "Free-stream effects on the cooling performance of cylindrical and fan-shaped cooling holes." *Journal of Turbomachinery* 134.6 (2012): 061007
- [7] Saumweber, Christian, and Achmed Schulz. "Effect of geometry variations on the cooling performance of fan-shaped cooling holes." *Journal of Turbomachinery* 134.6 (2008): 061008.
- [8] Wei, H., Y. Q. Zu, J. L. Ai, and L. Ding. "Experimental study on the full-coverage film cooling of fan-shaped holes with a constant exit width." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 140 (2019): 379-398.
- [9] W. Fu, W. Chao, M. Tsubokura, C. Li, W. Wang, Direct numerical simulation of film cooling with a fan-shaped hole under low Reynolds number conditions, *Int. J. Heat Mass Transf.* 123 (2018) 544–560.
- [10] Laveau, Benoit, and Reza S. Abhari. "Influence of flow structure on shaped hole film cooling performance." *ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air*. American Society of Mechanical Engineers, 2010
- [11] Heneka, Christian, et al. "Film cooling performance of sharp edged diffuser holes with lateral inclination." *Journal of Turbomachinery* 134.4 (2012): 041015.
- [12] Gritsch, Michael, et al. "Effect of hole geometry on the thermal performance of fan-shaped film cooling holes." *Journal of Turbomachinery* 127.4 (2005): 718-725.
- [13] Saumweber, Christian, and Achmed Schulz. "Interactions of Film Cooling Rows: Effects of Hole Geometry and Row Spacing on the Cooling Performance Downstream of the Second Row of Holes." *ASME Turbo Expo 2003*, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2003
- [14] میلاد دلدار، "شبیه سازی عددی میدان جریان و انتقال حرارت در خنک کاری لایه‌ای با استفاده از حفره‌های فن شکل و حفره‌های سه‌گانه"، ۱۳۹۵، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف