ISSN: 2821-157X		htpps://w	ww.jasd.khadu.ir	
Territoria	Journal of Aerospace Defense Volume 3, Issue 3 Autumn P.P. 116-134			
	Research P	'aper; 😎		
Effect of Blowing Ratio, Density, and Percent Turbulence on				
Laminar Cooling of Turbine Blades for Compound Angle Cavities				
on Flat Plate in jet engine				
	Gholamreza Faghani <sup>1</sup> , Sama	ad AghaMohammadi <sup>2</sup>		
<ol> <li>Corresponding Author, Fac</li> <li>Assistant Prof., khatam al-a</li> </ol>	ulty of Mechanical Engineering, Noshirvani U nbia (pbuh) University, Tehran, Iran, E-mail:	Jniversity of Technology, Babol, Iran SamadAghamohammadi1354@vahoo.co	om	
Article Information		Abstract		
Accepted: 2024/08/22	Laminar cooling is one parts of gas turbine and j	of the most important et engine blades. In this	and effective paper, laminar	
Recceived: 2024/12/19 three dimensions, by fini		te volume method and u	sing the real k-	
Keywords:	ε turbulence model, whi	ch is an improvement of	of the standard	
Cooling efficiency, Density ratio, Blowing ratio, Compound angle, Percent turbulence.	model. In this study, in order to find the best cooling mode, the effects of the blowing ratio, the density ratio with the injection of two fluids, air and carbon dioxide as the cold fluid (DR), the effect of changing the angle of injection of the cooling fluid (compound angle) and the effect of changing the percentage of main flow turbulence on the cooling efficiency are investigated To validate the data, the laminar cooling efficiency of the numerical data was compared with the experimental data, and the results showed a very good agreement of the numerica			
Corresponding Author: Email: gfaghani@yahoo.com	method used. The resu blowing ratio and the pe cooling efficiency decrea injection of the cooling increases. As a result, by cooling fluid at low percentages, the cool significantly.	Its showed that with rcentage of main flow ses. Also, with increasi fluid, the layered coo increasing the angle of blowing ratios and le ing efficiency can	increasing the turbulence, the ng the angle of ling efficiency injection of the ow turbulence be increased	

Gholamreza Faghani, The effect of blowing ratio, density and turbulence percentage on laminar cooling of turbine blades for compound angle holes on a flat surface, Journal of Aerospace Defense, Vol 3 (Issue 3), Pages.120-137.

ISSN: 2821-157X	htpps	s://www.jasd.khadu.ir		
<b>اع هوافضایی</b> مارهٔ ۳ -۱۱۶	<b>فصلنامه علمی دف</b> دورهٔ ۳، شه پاییز مص ۱۳۴			
مقاله پژوهشی 😎				
تأثیر نسبت دمش، دانسیته و درصد اغتشاشات در خنککاری لایهای پرههای توربین				
درام. حفره هام. ذاه به م. مرکب روم. صفحه م. تخت در موتور حت ها				
۱. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران				
رمی ۲-استادیار دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)،تهران،ایران. رایانامه: SamadAghamohammadi1354@yahoo.com				
چکیدہ		اطلاعات مقاله		
یترین و تأثیرگذارترین بخش های پره های توربین	خنک کاری لایه ای یکی از مهم	تاريخ دريافت:		
َید. در این مقاله، خنککاری لایهای پرههای توربین	های گاز و موتورجت به شمار میآ	12+1/+1		
ِت سهبعدی، با روش حجم محدود و با استفاده از	گاز، روی صفحه ی تخت به صور	تاريخ پذيرش:		
که بهبود یافته ی مدل استاندارد میباشد، بررسی	مدل اغتشاشي k-٤ واقعي شده	12+3/+9/29		
یافتن بهترین حالت خنک کاری، تأثیرات نسبت	شده است. در این بررسی برای			
و سیال هوا و دیاکسیدکربن به عنوان سیال سرد	دمش، نسبت دانسیته با تزریق د			
سیال خنککننده (زاویه ی مرکب) و تأثیر تغییر	(DR)، اثر تغییر زاویه ی تزریق			
وی راندمان خنک کاری مورد بررسی قرار گرفته	درصد اغتشاشات جریان اصلی ر	كليدواژهها:		
، راندمان خنککاری لایهای دادههای عددی با	است. برای اعتبارسنجی دادهها			
بتايج نمايانگر انطباق بسيار خوب روش عددي بکار	دادههای تجربی مقایسه شد که ن	راندمان خنک کاری،		
داد که با افزایش نسبت دمش و درصد اغتشاشات	رفته بود. نتایج بدست آمده نشان	نسبت دانسیته،		
کاهش می باید. همچنین یا افزایش زاویه ی تزریق	جربان اصلي، راندمان خنگکاري	نسبت دمش،		
کاری لابه ای افزایش می باید. در نتیجه با افزایش	سیال خنککننده، راندمان خنک	زاویه ی مرکب،		
، در نسبت دمشهای کم و درصد اغتشاشات کم،	زاویه ی تزریق سیال خنککننده	درصد اعتشاسات.		
ندازه ی قابل ملاحظهای افزایش داد.	مي توان راندمان خنگ کاري را به ا			
		نویسنده مسئول:		
		غلامرضا فغاني		
		ايميل: gfaghani@vahoo.com		
		aragenan e janooroom		
ا استناد: غلامرضا فغانی، تأثیر انسبت دمش، دانسیته و درصد اغتشاشات در خنک کاری لایهای پرههای توربین برای حفره-				
های زاویهی مرکب روی صفحهی تخت، فصل نامه <i>دفاع هوافضایی</i> ، دوره ۳ (شماره ۳)، صفحات ۱۳۷–۱۲۰.				

#### 1-مقدمه

در سال های اخیر مطالعات و بررسی های متعددی برای افزایش راندمان توربین های گاز و موتورهای جت صورت پذیرفته است. برای افزایش راندمان این توربین هـا، باید دمای گاز داغ ورودی به توربین را افزایش داد. ولے همین امر سبب آسیب رساندن به یره های توربین و در نتیجه کاهش کارایی و طول عمر توربین و در نهایت افزایش هزینه ی تعمیر و نگهداری آن می شود. برای رفع این مشـکل، فراینـد خنککاری لایهای روی پرههای توربین صورت می گیرد تا از پرهها در برابر محصولات احتراق بسیار داغ محافظت شود. به همین دلیل نیاز به یافتن بهترین شرایط خنک کاری با بالاترین راندمان به شدت احساس می شود. در سال های اخیار محققین، مطالعات زیادی را در رابطه با خنک کاری لایه ای انجام داده اند تا به حالتی بهینه در خنک کاری دست یابند. عوامل مختلفی در خنک کاری مؤثرند. اولین عامل نسبت دمش است که برابر حاصلضرب نسبت چگالی در سرعت سیال خنک کننده به جریان اصلی (جریان گرم) می باشد. عامل دوم، نسبت چگالی یا دانسیته است که برابر نسبت چگالی سیال خنک کنندہ به چگالی جریان اصلی می باشد. عامل مهم سوم که می تواند در خنک کاری بسیار مؤثر باشد، زاویه ی تزریق سیال خنک کننده روی سطح و به طور کل هندسه ی حفره می باشد. می توان با تغییر زاویـه ی تزریق سیال خنک کننده روی سطح و همچنین تغییر در هندسه ی حفره ها، تغییرات محسوسی را به وجود آورد. درصد اغتشاشات جریان اصلی نیز عامل اثرگذار دیگری است که می تواند راندمان خنک کاری را تحت تأثیر خود قرار دهد.

افزایش نسبت دمش باعث افزایش دبی جریان خنک کنده روی سطح می شود و این عامل می تواند تأثیربسیاری روی راندمان خنک کاری داشته باشد. بررسی جریان سیال روی پره های توربین پرهزینه و زمانبر است، به همین دلیل برای انجام مطالعات در زمینه ی خنک کاری، آزمایشات روی صفحه ی تخت صورت می پذیرد. در سال ۱۹۷۰ یکی از نخستین بررسی ها در زمینه ی خنک کاری لایه ای توسط اکرت [۱] انجام شده است. در این پژوهش خنک کاری لایه ای به صورت تجربی و با عبور هوا به عنوان سیال خنک کننده از حفره های خنک کاری مورد بررسی قرار گرفت و تأثیرات نسبت دمش را مورد بررسی قرار دادند. زمانی که نسبت دمش افزایش می یابد، سیال خنک کننده تمایل پیدا می کند تا از سطح دیواره بلند شود و این به خاطر افزایش مومنتوم سیال است. در نتیجه سیال خنک تماس بیشتری با سیال داغ داشته و در نهایت راندمان خنک کاری لایه ای برای نسبت دمش های کمتر، مقدار بیشتری را دارا خواهد بود [۲].

بیشتر بررسی هایی که در زمینه ی خنک کاری لایه ای انجام شده اند به صورت تجربی بودند. در برخی از این بررسی ها، محققان نوع سیال خنک کننده را از هوا به سیالاتی مانند دی اکسیدکربن تغییر داده اند تا بتوانند اثر افزایش نسبت چگالی سیال خنک کننده را روی راندمان خنک کاری بررسی کنند [۳]. با افزایش نسبت چگالی ، چگالی سیال خنک کننده افزایش یافته و در نتیجه باعث سنگینتر شدن سیال خنک کننده می شود. در نهایت سیال خنک کننده دارای سرعت کمتری (نسبت به حالت تزریق هوا) شده و کمتر در جریان اصلی نفوذ کرده و کمتر در معرض هوای گرم (جریان اصلی) قرار می گیرد. این فرایند باعث می شود که سیال خنک کننده، چسبیده به سطح حرکت کرده و دمای آن کمتر افزایش یابد و در نتیجه راندمان نسبت چگالی روی خنک کاری لایه ای حفرههای استوانهای پرداختند [۸]. در این نسبت چگالی روی خنک کاری لایه ای حفرههای استوانهای پرداختند [۸]. در این نتایج ایشان نشان داد که افزایش نسبت دمش باعث می شود که سیال با نسبت چگالی کمتر، تمایل بیشتری به عنوان سیال خنک کننده می شود که سیال با بخیان

عامل مهم دیگری که در خنک کاری بسیار می تواند مؤثر باشد، تغییر در زاویه ی تزریق سیال خنک کننده و همچنین تغییر در هندسه ی حفره های خنک کاری است. این عمل می<sup>—</sup>تواند باعث تغییر در مقدار جریان سیال خنک کننده، عمق نفوذ سیال خنک کننده در جریان اصلی و در نتیجه تغییر بسیار زیاد در راندمان خنک کاری شود[۱۰–۹]. گلد اشتاین و همکارانش [۱۱] شکل حفره های خنک کاری لایه ای را بررسی کرده و آنها را با هم مقایسه کردند. کنعانی و همکارانش [۱۲] دو هندسه ی مختلف را برای حفره های خنک کاری لایه ای مورد بررسی قرار دادند و اثرات تغییر هندسه را بر راندمان خنک کاری مورد مطالعه قرار دادند. دیتمار و همکارانش [۱۳] آزمایشات تجربی روی شکل جدیدی از حفره های خنک کاری 18.1

لایه¬ای و روی سطح پره ی توربین انجام دادند. ایشان بیان کردند که حفره های با شکل های طراحی شده ی ایشان، راندمان بهتری را نسبت به حفره های معمولی دارند. قراب و همکارانش [۱۴] هندسه ی جدیدی را معرفی کردند. ایشان با انجام بررسی تجربی روی این هندسه، آن را با سایر هندسه ها مورد مقایسه قرار دادند و نشان دادند که هندسه ی ابداعی آنها (هندسه ی لور) راندمان بالاتری را نسبت به سایر هندسه ها دارد. یکی دیگر از تغییرات هندسی جدید برشدار بودن لبه ی خارجی حفره است. زمانی که حفره ها در یک شیار قرار می گیرند، راندمان خنک کاری بالاتری را به وجود می آورند [۱۷–۱۵]. کان لیانـگ لو و همکارانش [۱۸]، به بررسی خنک کاری لایه ای روی سطح تخت به صورت تجربی پرداختند. ایشان نیز دو هندسه ی جدید را مورد بررسی قرار دادند و راندمان خنک کاری ایـن بهترا این دو حفره ی استوانه ای مورد مقایسه قرار دادند. نتایج ایشان عملکرد بهتر این دو حفره ی جدید را نشان می دهد.

پیشرفت روز افزون توربین های گازی و افزایش راندمان کلی این توربین ها نیازمند بالا بردن راندمان خنک کاری این توربین ها می باشد. در نتیجه این صنعت نیاز به بهبود فرایند خنک کاری لایه ای با راندمانی بالاتر را به طور قابل ملاحظه ای احساس می کند. در مطالعات اخیر که عموماً به طور تجربی صورت گرفته اند، محققین توانستند راندمان خنک کاری را تا حدودی افزایش دهند. اما مطالعات گذشته به اندازه ی کافی نتوانستند در این امر مؤثر باشند. در نتیجه نیاز به آزمایشات بیشتری در این زمینه احساس می شود. ولی آزمایشات تجربی بسیار پرهزینه و زمان برند. برای حل این مشکل نیاز به انجام شبیه سازی ها به صورت خنک کاری لایه ای روی صفحه ی تخت پرداخته شده است تا تأثیر پارامترهای اساسی در خنک کاری شامل: نسبت دمش، نسبت چگالی، تغییر درصد اغتشاشات جریان اصلی و زاویه ی تزریق سیال خنک کننده در خنک کاری بررسی و بهترین حالت ممکن تعیین شود.

برای بررسی اعتبارسنجی دادهها، راندمان جانبی خنککاری لایهای روی صفحه ی تخت با حفره ی استوانه ای با دادههای تجربی انجام شده توسط سین ها [۱۹] مورد مقایسه قرار گرفته و انطباق مناسبی حاصل شده است. راندمان خنککاری لایه ای و اثرات نسبت چگالی (تزریق هوا و دی کسید کربن به عنوان سیال خنک کننده)، تأثیر تغییر زاویه ی تزریق سیال خنک کننده روی سطح که فرایند جدیدی در خنک کاری بشمار می آید و تأثیر تغییر نسبت دمش برای همه ی حالت ها بررسی شد تا بهترین وضعیت خنک کاری با بالاترین راندمان مشخص گردد. نوآوری جدیدی که در این پژوهش انجام شده است، بررسی تأثیر تغییر شدت اغتشاشات جریان اصلی (از ۲٪ به ۱۰٪) و همچنین تأثیر نسبت چگالی روی راندمان خنک کاری در حالت زاویه ی مرکب است. فرایند جدید دیگری که در مطالعه ی حاضر صورت گرفته، استفاده از مدل توربولانسی واقعی شده است. این مدل، بهبود یافته ی مدل استاندارد است و این امر دقت محاسبات را بالاتر برده و داده ها را به واقعیت نزدیک<sup>-</sup> تر می کند. در بررسی های گذشته اکثراً از مدل توربولانسی استاندارد استفاده شده دام مدل واقعی شده برای حل مسائلی همچون استاندارد استفاده شد که نسبت به مدل واقعی شده برای حل مسائلی همچون

## ۲. معادلات جریان اصلی و مدل توربولانسی

در این بررسی، معادلات، میدانهای دمایی و جریان توربولانسی به صورت سهبعدی، غیرقابل تراکم (ماخ کمتر از ۲۰۰ در ورودی) و در حالت پایا، با استفاده از معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی مدل شدهاند. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به صورت عددی و با روش حجم محدود حل شدهاند. شکل این روابط به صورت تانسوری و در حالت کارتزین مطابق مطالعهی لکهال و همکارانش [۲۰] به شکل روابط ۱ تا ۳ میباشند.

$$U_i = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho U_i U_j - \Gamma_u \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] = -\frac{\partial P}{\partial x_i} \tag{(Y)}$$

∂ ∂x;

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho U_j h - \Gamma_h(\frac{\partial h}{\partial x_j}) \right] = 0 \tag{(7)}$$

در این رابطهها، P و U , h , p و U , h , p و U , h , p و U , h , p و U , h , p و U , u ,

(۴)  

$$\Gamma_{u} = (\mu + \mu_{t}), \quad \Gamma_{h} = (\mu/Pr + \mu_{t}/\sigma_{h})$$
(۴)  
در این پارامترها،  $\Psi$  و  $\mathbf{H}$  ویسکوزیتههای مولکولی و توربولانسی، Pr و  $\mathbf{h}^{\sigma}$  نیز به  
ترتیب اعداد پرانتل ملکولی وتوربولانسی هستند. تنشهای توربولانسی  $\mathbf{J}^{\mathbf{u}_{1}\mathbf{u}_{2}}$  و  
پخش حرارتی  $\mathbf{u}_{1}\mathbf{h}$  در معادلات مومنتوم و آنتالپی (روابط ۱ و ۲) به ترتیب با  
پخش حرایان اصلی و دمایی در قانون گردابه-ویسکوزیته/ پخشی<sup>۱</sup> [۲۰ و ۲۱]  
جایگزین شدهاند. توزیع ویسکوزیته گردابی  $\mathbf{H}$  با مدل توربولانسی ۶-۸، که  
پارامترهای  $k$  و <sup>3</sup> به ترتیب انرژی جنبشی و نرخ اتلافات هستند، به شکل رابطهی ۵  
محاسبه شدهاست.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$
 (۵)  
روابط انتقالی نیز به صورت روابط ۶ و ۲هستند.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho U_i k - \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \tag{(2)}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_{i}} \left[ \rho U_{i} \varepsilon - \Gamma_{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_{j}} \right] = \rho C_{1} S \varepsilon - \rho C_{2} \frac{\varepsilon^{2}}{k + \sqrt{\varepsilon \upsilon}}$$
(Y)

که در این روابط:

$$C_1 = max \left[ 0.43, \frac{\xi}{\xi+5} \right], \quad C_2 = 1.9 \quad , \quad \xi = S \frac{k}{\varepsilon} \tag{A}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) , \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \tag{9}$$

### ۳. روابط مورد استفاده در خنککاری

ر اندمان خنککاری لایهای به صورت ر ابطهی ۱۰ تعریف می شود. (۱۰) در این رابطه  $T_g - T_{aw} / (T_g - T_c)$  دمای جریان اصلی (جریان داغ)، دمای سیال خنککننده و دمای دیوارهی آدیاباتیک هستند. تغییرات دانسیته و سرعت جریان سیال خنککننده می تواند روی راندمان تأثیر گذار باشد که این پارامترها را

1 Eddy-viscosity/diffusivity

### ۴. فرایند حل

محاسبات عددی و حل روابط به صورت سهبعدی و با استفاده از یک کد سه معدی فرترن که بر مبنای روش حجم محدود است، انجام شده است [۲۲]. دلیل استفاده از روش حجم محدود این است که این روش اجازه می دهد تـا بتـوان بـا اسـتفاده از شبکههای دلخواه غیرعمود، از آرایش شبکهی سلول مرکزی استفاده کرد. جزئیات روش حجم محدود توسط مجومدار و همکارانش [۲۲] نیز توضیح داده شدہ است. برای سادهسازی معادلات خنککاری، از روش چند بلوکه که توسط لکهال و همکارانش [۲۰] ارائهشده، اسـتفاده مـیشـود. ایـن روش آزادی بیشـتری در تولیـد شبکه به وجود می آورد و باعث می شود که از حافظه ی کمتری برای حل استفاده شود. با این روش می توان برای بخش های مختلف جریان، شبکه های مختلف و مناسبی تولید کرد و در نتیجه حل سریعتر انجام می شود. روش درون یابی مومنتوم توسط ٫اهے ٫ و چو [۲۳] معرفے ، شد که مانع از نوسانات میـدان فشـار مــیشـود و در آرایش شبکهبندی سلول مرکزی ظاہر مےشود. برای به دستآوردن کویلینگ سرعت- فشار از الگوریتم سیمپل سی<sup>۳</sup> که توسط ون دورمال و رایتبی [۲۴] بیان شده، استفاده شده است. همچنین از مدل توربولانسی k-٤ واقعی<sup>†</sup> شده برای انجام محاسبات استفادہ شدہ است. بے منظور تشخیص ہمگرایے حل، معیار کاهش باقیماندههای تراز شده <sup>۶</sup>-۱۰مے اشد.

- <sup>2</sup> Multi block technique
- <sup>3</sup> SIMPLEC
- <sup>4</sup> Realizable

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Cell-centered grid

# **۵- محدودهی محاسباتی، هندسه، شرایط مرزی و شبکهبندی حل** 1.**۵- محدودهی محاسباتی، هندسه و شرایط مرزی**

در این پژوهش، برای بررسی خنک کاری، محدوده ی محاسباتی شامل: قطر حفره ی خنک کاری ۱۲.۷میلی متر [۱۹]، طول صفحه ی مورد بررسی Δ۵۸ (D قطر حفره ی خنک کاری است)، طول حفره ی Δ۵، ارتفاع محدوده ی محاسباتی ۲۵D، زاویه ی ۳۰ درجه حفره نسبت به صفحه و زاویه ی صفر درجه و ۴۵ درجه مرکب <sup>۱</sup> میباشد. محدوده ی مورد بررسی در شکل ۱ (الف) و هندسه ی زاویه ی مرکب در ۱ (ب) نشان داده شده است. جریان اصلی و جریان سیال خنک کننده به صورت جریان گاز ایده آل غیرقابل تراکم در نظر گرفته شد. سیال جریان اصلی (جریان گرم)، هوا میباشد، ولی هوا و دی اکسید کربن به عنوان سیال جریان خنک کننده بکار رفت. سرعت و دمای جریان اصلی به ترتیب برابر ۲۵ متر بر ثانیه و ۳۵۳ درجه ی کلوین میباشد [۲۵]. حالت توربولانسی <sup>3</sup>-۸ واقعی شده و با شدت ۲٪ و ۱۰٪ برای جریان اصلی به کار گرفته شد.



<sup>1</sup>Compound angle

شکل ۱- (الف) هندسهی مورد نظر و (ب) هندسهی مورد بررسی. ۲.۵- شبکهبندی حل در این شبکهبندی، از شبکهی چند بلوکی(که در اینجا شامل دو بلوک میباشد) استفاده شد. ناحیهی ۱، ناحیهی تزریق سیال خنک یا همان حفره است و ناحیهی ۲، ناحیهی جریان اصلی که محل عبور سیال داغ میباشد. برای نمایش بهتر شبکهی محاسباتی، تصویر سه بعدی از شبکه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نمونهای از شبکههای بررسی شده.

## 3.5- بررسی استقلال از شبکه

برای بررسی استقلال از شبکه، راندمان خنککاری لایهای چهار نوع شبکهی مختلف با ابعاد ۱۰×۵۰×۲۳۰، ۱۰×۶۰×۶۰۶، ۱۵×۶۰×۶۰۰۶ و ۳۵×۱۰۰×۴۵۵ بررسی شد. راندمان خنککاری لایهای بدستآمده در شبکهی ۱ اختلاف زیادی با سه شبکهی دیگر دارد. با افزایش تعداد گرهها (شبکههای ۲، ۳ و ۴)، دادهها بسیار به هم نزدیک شده و دارای اختلاف بسیار کمی هستند. به طوری که شبکهی ۴ دارای اختلاف بسیار ناچیزی با شبکهی ۲ است. در نتیجه شبکهی ۲ (با تعداد شبکهی کمتر) به عنوان شبکهی اصلی در نظر گرفته شده است.

#### 6- نتایج و بحث

## 1.6- اعتبارسنجي

برای اعتبارسنجی دادهها، راندمان خنک کاری لایهای با دادههای تجربی سینها [۱۹] مقایسه قرار شد. طبق شکل ۳، دادهی عددی به دست آمده در تحقیق، اختلاف بسیار کمی نسبت به داده های تجربی را نشان داده و این امر دقت بالای محاسبات انجام شدهی کنونی را نشان میدهد.



شکل ۳- مقایسهی راندمان آدیاباتیک دادهی تجربی سینها [۱۹] با دادههای مطالعهی حاضر در راستای طول سطح تقسیم بر قطر حفره.

### ۲.۶- نتایج راندمان خنککاری لایهای

برای بررسی تأثیر تزریق هوا به عنوان سیال خنک کننده و همچنین تأثیر تغییر نسبت دمش، نمودار راندمان خنک کاری لایهای در نسبت دمش های ۵.۵، ۵.۹، ۱.۵ و نسبت چگالی ۱ (تزریق هوا به عنوان سیال خنک کننده)، زاویهی مرکب صفر درجه و درصد اغتشاشات ۲٪ در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می شود، در حالت تزریق هوا به عنوان سیال خنک کننده، با افزایش نسبت دمش راندمان خنک کاری لایهای کاهش مییابد. این امر بدین دلیل می باشد که با افزایش نسبت دمش، دبی سیال خنک کننده افزایش یافته و پس از خروج از حفره، مقدار بیشتری در سیال داغ (هوای گرم) نفوذ کرده و از روی سطح فاصله می گیرد. این امر باعث گرمشدن سیال خنک کننده و کاهش راندمان خنک کاری لایهای می شود.





شکل ۴- راندمان خنککاری لایهای در نسبت دمشهای الف) ۰.۵، ب) ۰.۹۵، ج) ۱.۵ و نسبت چگالی ۱، زاویهی مرکب صفر درجه و درصد اغتشاشات ۲٪

همانطور که در نمودار شکل ۵ مشاهده میشود، راندمان خنککاری لایـهای در خط مرکزی صفحهی خنککاری شده، با افزایش نسبتدمش، کاهش یافته است.



شکل ۵- راندمان خنککاری لایهای در نسبت دمشهای الف) ۵.۰، ب) ۱.۹۵، ج) ۱.۵ و نسبت چگالی ۱، زاویهی مرکب صفر درجه و درصد اغتشاشات ۲٪

برای بررسی تأثیر تزریق سیالی با دانسیته ی متف اوت نسبت به هوا روی راندمان خنک کاری، دی اکسید کربن نیز به عنوان سیال خنک کننده مورد استفاده قرار گرفته و نمودار راندمان خنک کاری لایه ای در نسبت دمش های ۵.۰، ۵۹.۰، ۱.۵ و نسبت چگالی ۱.۵۳ (تزریق دی اکسید کربن به عنوان سیال خنک کننده)، زاویه ی مرکب صفر درجه در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود، در این حالت نیز با افزایش نسبت دمش راندمان خنک کاری لایه ای کاهش می یابد. اما نکته ی مهمی که در این حالت قابل مشاهده است، افزایش راندمان خنک کاری لایه ای نسبت به حالت تزریق هوا می باشد. با افزایش نسبت چگالی یا دانسیته ی سیال خنک کننده از ۱ به ۱.۵۳، سیال خنک کننده سنگین تر شده و کمتر در سیال داغ نفوذ می کند. این امر سبب می شود تا سیال تبادل حرارتی کمتری با سیال داغ داشته و کمتر در معرض تغییر دما قرار گیرد. در این حالت سیال خنک با مومنتوم بیشتر و توان خنک کنندگی بیشتر روی سطح صفحه حرکت و بیشتر آن را خنک نگه می دارد. این فرایند باعث افزایش راندمان خنک کاری لایه ای می شود.



شکل ۶- راندمان خنککاری لایهای در نسبت دمشهای الف) ۰.۵، ب) ۰.۹۵، ج) ۱.۵ و نسبت چگالی ۱.۵۳ زاویهی مرکب صفر درجه و درصد اغتشاشات ۲٪.

برای نمایش مقایسهی راندمان خنک کاری در حالتهای تزریق هوا و دی اکسید کربن، نمودارهای راندمانی در نسبت دمش ۵.۰ در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود، راندمان خنک کاری حالت تزریق دی اکسید کربن بیشتر از حالت تزریق هواست.



شکل ۷- راندمان خنککاری لایهای در نسبت دمش ۰.۵، نسبت چگالی ۱ و ۱.۵۳، زاویهی مرکب صفر درجه و درصد اغتشاشات ۲٪.

یکی دیگر از عواملی که می تواند در راندمان خنک کاری لایه ای مؤثر باشد، زاویه ی تزریق سیال خنک کننده روی سطح است. این عمل باعث می شود که سیال خنک کننده با زاویه ی متفاوتی نسبت به حالت ساده (زاویه ی مرکب صفر درجه) با سیال جریان اصلی یا هوای گرم برخورد کند و باعث تغییر در راندمان خنک کاری شود. نمودار راندمان خنک کاری لایه ای در نسبت دمش های ۰۵، ۵۹، ۱۹۵۰ و نسبت چگالی ۱ (تزریق هوا به عنوان سیال خنک کننده)، زاویه ی مرکب ۵۹ درجه و درصد اغتشاشات ۲٪ در شکل ۸ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، این تغییر زاویه باعث شده است که سیال خنک کننده بیشتر در جهت عرضی روی سطح پخش شود و سطح بیشتری را نسبت به حالت ساده پوشش دهد. در نتیجه راندمان خنک کاری لایه ای افزایش می یابد. در این حالت نیز با افزایش نسبت دمش، راندمان خنک کاری لایه ای کاهش یافته است.





شکل ۸- راندمان خنککاری لایهای در نسبت دمشهای الف) ۵.۰، ب) ۰.۹۵، ج) ۱.۵ و نسبت چگالی ۱، زاویهی مرکب ۴۵ درجه و درصد اغتشاشات ۲٪

برای بررسی تأثیر تزریق دی اکسید کربن به عنوان سیال خنک کننده در راندمان خنک کاری لایه ای حفره های زاویه ی مرکب، نمودار راندمان خنک کاری لایه ای در نسبت دمش های ۵.۰۰ ۵.۰۰ ۹.۱ و نسبت چگالی ۱.۵۳ زاویه ی مرکب ۴۵ درجه در شکل ۹ نشان داده شده است. براساس شکل ۹، در این حالت نیز، با افزایش نسبت دمش راندمان خنک کاری لایه ای کاهش می یابد. اما نکته ی مهمی که در این حالت قابل مشاهده است، کاهش تقریباً محسوس راندمان خنک کاری لایه ای نسبت به حالت تزریق هوا می باشد. با افزایش نسبت چگالی یا دانسیته ی سیال خنک کننده از نسبت به محور جریان اصلی (هوای داغ) می باشد، سیال بیشتر در جانب عرضی حرکت کرده و موجب تداخل بیشتر با جریان اصلی و در نتیجه کاهش راندمان خنک کاری شده است. در نتیجه با افزایش زاویه ی مرکب، راندمان سیال با دانسیته-ی کمتر بیشتر از راندمان خنک کاری لایه ای دانسیته می ای با دانسیته-مرکت کرده و موجب تداخل بیشتر با جریان اصلی و در نتیجه کاهش راندمان منی کاری شده است. در نتیجه با افزایش زاویه ی مرکب، راندمان سیال با دانسیته-ی کمتر بیشتر از راندمان خنک کاری لایه ای برای حالت با تزریق دی اکسید کربن است.





شکل ۹- راندمان خنککاری لایهای در نسبت دمشهای الف) ۰.۵، ب) ۰.۹۸ ج) ۱.۵ و نسبت چگالی ۱.۵۳، زاویهی مرکب ۴۵ درجه و درصد اغتشاشات ۲٪.

همانطور که در نمودار شکل ۱۰ نیز دیده می شود، با افـزایش زاویـه از صـفر بـه ۴۵ درجه، راندمان خنک کاری لایه ای افزایش یافته است. در نتیجه می توان با تغییر زاویه از حالت ساده (صفر درجه) به مرکب، راندمان خنک کاری را افزایش داد.



شکل ۱۰- مقایسه راندمان خنککاری لایهای برای نسبت دمش ۰.۵، نسبت چگالی ۱، زاویهی مرکب صفر و ۴۵درجه.

تغییر اغتشاشات جریان سیال اصلی (هوای داغ) یکی از عواملی است که در انتقال حرارت میتواند بسیار مؤثر باشد. افزایش اغتشاشات میتواند باعث افزایش انتقال حرارت سیال شود. برای بررسی تأثیر تغییر اغتشاشات روی راندمان خنککاری، درصد اغتشاشات جریان اصلی از ۲٪ به ۱۰٪ افزایش یافته و نمودار راندمان خنک-کاری لایهای در نسبت دمش ۵۰، درصد اغتشاشات ۲٪ و ۱۰٪، نسبت چگالی ۱ (تزریق هوا به عنوان سیال خنککننده) و زاویه ی مرکب ۴۵ درجه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با افزایش درصد اغتشاشات جریان اصلی، انتقال حرارت از سیال داغ جریان اصلی به سیال خنککننده و سطح بیشتر شده و در نتیجه باعث کاهش راندمان خنککاری لایهای شده است.



شکل ۱۱- مقایسهی راندمان خنککاری لایهای برای نسبت دمش ۰.۵، درصد اغتشاشات ۲٪ و ۱۰٪ درصد و زاویهی مرکب ۴۵ درجه.

## **۵–تشکر و قدردانی** در این قسمت نویسندگان می توانند در صورت لزوم مراتب تشکر و قدردانی خود را از حامیان

در این قسمت تویستد می توانند در عفورت تروم مراتب تشکر و قدردانی خود را از عامیان تحقیق که به صورت غیرمستقیم در پیشبرد آن نقش داشتهاند، بیان کنند.

#### 6-تعارض منافع

نویسنده(گان) اعلام میدارند که در مورد انتشار این مقاله تضاد منافع وجود ندارد. علاوه بر این، موضوعات اخلاقی شامل سرقت ادبی، رضایت آگاهانه، سوء رفتار، جعل دادهها، انتشار و ارسال مجدد و مکرر توسط نویسندگان رعایت شده است.

#### ۷-دسترسی آزاد

این نشریه دارای دسترسی باز است و اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هـر شـکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی بر اساس محتوا) را میدهد.

- [<sup>1</sup>]Eckert E 1970 Journal of Engineering Physics and Thermophysics 19(3) 1091
- [<sup>Y</sup>] Ahn J, Jung I and Lee J 2003 International Journal of Heat and Fluid Flow 24(1) 91
- [<sup>v</sup>] Yao J, Zhang K, Wu J, Lei J, Fang Y 1985 AGARD Heat Transfer and Cooling in Gas Turbines 12 p (SEE N86-29823 21-07)
- [<sup>\*</sup>]Lin L, Zhipeng X, Hui R, Fan Z and Cunliang L 2022 Physics of Fluids 34(12) 125128
- [<sup>4</sup>]Wright L, McClain S and Clemenson M 2011 Journal of Turbomachinery 133(4) 41011
- [<sup>7</sup>] Abdelmohimen M and Mohiuddin A 2019 International Journal of Heat and Mass Transfer 144 118678
- [V]Park S, Kang Y, Seo H, Kwak J and Kang Y 2019 Internatioanl Journal of Heat and Mass Transfer 144 118652
- [<sup>A</sup>] Johnson B, Tian W, Zhang K and Hu H 2014 International Journal of Heat and Mass Transfer 76 337
- [9] Hou R, Wen F and Tang X 2019 Applied Thermal Engineering 163 115
- [``]Bashir M, Shiau C and Han J 2017 International Journal of Heat and Mass Transfer 115 918
- [13]Goldstein R, E. Eckert R and Burggraf F 1974 International Journal of Heat and Mass Transfer 17(5) 595
- [1<sup>Y</sup>]Kanani H, Shams M, Ebrahimi R and Ahmadian T 2008 International Journal of Numerical methods in fluids 56(8) 1329
- [\"]Dittmar J, Schulz A and Wittig S 2003 Journal of Turbomachinery 125(1) 57
- [1<sup>6</sup>]Ghorab M, Hassan I and Lucas T 2011 International Journal of Heat and Mass Transfer 54 (7-8) 1387
- [14] Seokmin K, DongEun L, Young K and Dong-Ho R 2023 Energies 16(23) 7752
- [1<sup>9</sup>]Wang T, Chintalapati S Bunker, R and Lee C 2000 Experimental Thermal Fluid Science 22(1-2) 1
- [17] Kim J and Kim K 2019 International Journal of Thermal Science 142 295

8-منابع

- [1<sup>A</sup>]Liu C, Liu J, Zhu H, Wu A, He Y and Zhou Z 2015 International Journal of Heat and Mass Transfer 89 1141
- [19] Sinha A, Bogard D and Crawford M 1991 Journal of Turbomachinery 113(3) 442
- [<sup>Y</sup>•]Lakehal D, Theodoridis G and Rodi W 2001 International Journal of Heat and Fluid Flow 22(2) 113
- [<sup>Y</sup>]Silieti M, Divo E and Kassab A 2010 Numerical Heat Transfer Part B Fundam 56(5) 335
- [<sup>YY</sup>] Kelishami M and Lakzian E 2017 International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow 27(1) 104
- [<sup>٢</sup><sup>m</sup>]Rhie C and Chow W 1983 AIAA Journal 21(11) 1525
- [<sup>ү</sup><sup>¢</sup>] Van Doormaal J and Raithby G 1984 Numerical heat Transfer 7(2) 147
- [Y<sup>Δ</sup>]Yao Y and Zhang J 2011 Science China Technological Sciences 54(7) 1793
- [<sup>Y7</sup>] Yazdan Panah, M. R., Hosseini Moradi, S. A., Hatami, M., & Jouladeh Roodbar, H. (2021). Designing and Manufacturing Recyclable Metal Based Nanocomposites for Purification of Chemically Contaminated Waters. Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran, 40(2), 51-59.