

## محاسبه تجربی عدد ناسلت جریان هوا بین رotor شیاردار و استاتور یک ژنراتور

علی نوری<sup>\*</sup> و مهدی نیلی احمدآبادی<sup>\*\*</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۱۱/۷/۸۵ - دریافت نسخه نهایی: ۱۸/۱/۸۴)

**چکیده** - در این مقاله انتقال گرمای جریان مغشوش در فاصله هوا بین رotor و استاتور یک ژنراتور نیروگاهی تحت شارگرمایی غیریکنواخت به طور تجربی بررسی شده است. رotor دارای چهار شیار مثلثی متقاضن در طول محور است. نسبت گرمای تولیدی در رotor به استاتور ۱ به ۳ است. تغییرات عدد رینولدز محوری و سرعت دورانی رotor به ترتیب در محدوده  $30000 < Rez < 40000$  و  $1500 \text{ rpm} < \omega < 3000 \text{ rpm}$  قرار دارند. دما و شار گرمایی دو استوانه در سه موقعیت طولی و در دو موقعیت زاویه ای اندازه گیری شده اند. افت فشار جریان هوا نیز در عبور از فاصله هوا بی اندازه گیری شده است. نتایج تحقیق نشان می دهد که افزایش سرعت دورانی رotor ضمن افزایش ضریب انتقال گرمای سطح رotor نسبت به سطح استاتور باعث تسريع در توسعه یافتن جریان هوا می شود.

**واژگان کلیدی:** انتقال گرمای جریان مغشوش، جابه جایی اجباری، رotor شیاردار، استاتور

## Nusselt Number Measurement of Air Flow between Grooved Rotor and Stator of a Generator

A. Nouri, and M. Nili-Ahmabadabi

School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology

**Abstract:** In this article, turbulent flow heat transfer in the air gap between rotor and stator of a generator under nonhomogenous heat flux is studied experimentally. The rotor consists of four symmetrical triangular grooves. The stator surface is smooth and does not include any grooves. The relative heat flux between the rotor and the stator is 1 to 3. Temperature and heat flux are measured locally at three axial and two angular positions of inner and outer surface. The pressure drop of air flow through the air gap is also measured. In this work, the axial Reynolds number and rotational velocity of the rotor ranges are

\*\* - دانشجوی دکترا

\* - استاد

.  $4000 < Re_z < 30000$  and  $300 \text{ rpm} < \omega < 1500 \text{ rpm}$ , respectively. The results indicate that increasing the rotational velocity causes the rotor and stator heat transfer coefficient to increase considerably and the respective value to the rotor is higher than that to the stator. In addition, the rotational velocity causes the air flow to be developed sooner.

**Keywords:** Heat transfer, Turbulent flow, Forced convection, Grooved rotor, Stator.

## فهرست علائم

حرروف یونانی	مساحت	A
اختلاف	$\Delta$	$c_p$
دما بی بعد	$\theta$	$h$
ویسکوزیته سینماتیکی	$\nu$	D
چگالی	$\rho$	$k$
جهت محیطی	$\phi$	L
سرعت دورانی	$\omega$	$\dot{m}$
زیرنویسها		Nu
هوای	a	p
بحرانی	cr	$q''$
مؤثر	eff	$\dot{Q}$
هیدرولیکی	h	Re
داخلی	i	r
خارجی، خروجی	o	T
روشور	r	Ta
استاتور	s	U
محوری	z	V
بالا نویسها		$z$
متوسط	-	
گرمای ویژه در فشار ثابت		
ضریب انتقال، گرما		
قطر		
ضریب هدایت گرمایی		
طول		
دبی جرمی		
$hD_h/k$		
عدد ناسلت،		
فشار		
نرخ شار گرمایی		
نرخ انتقال گرمایی کلی		
عدد رینولدز، $UD_h/\nu$		
جهت شعاعی		
دما		
عدد تیلور، $V(D_0 - D_i)(D_h/D_m)^{0.5}/\nu$		
سرعت متوسط محوری		
سرعت محیطی		
جهت محوری		

ورتکس دریک مجرای حلقوی با دو انتهای بسته برابر است با:

$$Ta = \frac{V(D_o - D_i)}{2\nu} \sqrt{\frac{D_h}{D_m}} > 41.2 \quad (1)$$

نتایج تیلور نشان می‌دهند که مغشوش شدن جریان به نسبت شعاع استوانه داخلی به عرض فاصله هوانی بستگی دارد. عدد رینولدز دورانی بحرانی از رژیم جریان آرام به مغشوش برابر است با:

$$Re_{cr} = 41.1(D_o/D_i - 1)^{-\frac{1}{3}} \quad (2)$$

## ۱- مقدمه

تیلور [۱] پایداری یک سیال ساکن بین دو استوانه هم محور را با دوران استوانه داخلی مورد بررسی قرار داد. تیلور ورتكس‌های تیلور را در سرعتهایی بیش از سرعت دوران بحرانی مشاهده کرد. این ورتكسها در اثر ناپایداری جریان آرام ایجاد می‌شوند. ناپایداری آنها در اثر افزایش نیروی گریز از مرکز و افزایش شعاع است. عدد تیلور بحرانی برای تشکیل

مشخصه سرعت در عدد رینولدز به صورت

$$V_{\text{eff}} = \sqrt{U^2 + 0.25V^2}$$

تعريف می شود.

لی [۷] به طور تجربی انتقال گرما و افت فشار بین دو استوانه هم محور با شiar مستطیلی و بدون شiar را که یکی از آنها در حال دوران است مورد مطالعه قرار داد. در این مطالعه اعداد رینولدز دورانی و رینولدز محوری به ترتیب در محدوده  $Re_z < 2 \times 10^7$  و  $Re_z < 1000$  قرار دارند. نتایج این تحقیق نشان می دهند که با شiar دار شدن استوانه داخلی افزایش عدد تیلور بیشترین تأثیر را روی افزایش عدد ناسلت استوانه خارجی دارد.

کوازای [۸] به طور تجربی انتقال گرمای جریان حلقوی مغشوش بین دو استوانه هم محور با دوران استوانه داخلی را بررسی کرد. سطح استوانه داخلی کاملاً عایق و استوانه خارجی ساکن و تحت شار گرمایی یکنواخت قرار داشت. رینولدز محوری و نسبت سرعت دورانی به سرعت محوری به ترتیب در محدوده  $Re_z < 65000$  و  $Re_z < 15000$  و  $U/V < 2/8$  قرار داشتند. نتایج این تحقیق نشان می دهد که با دوران استوانه داخلی دمای سطوح استوانه های داخلی و خارجی به ترتیب افزایش و کاهش یافته و باعث یکنواختی محسوسی در پروفیل دمای شعاعی می شود. از این رو با افزایش سرعت دورانی استوانه داخلی عدد ناسلت جریان ترکیبی افزایش می یابد.

در یک جریان حلقوی بین دو استوانه هم محور اثر دوران گرمای استوانه خارجی توسط بیر [۹] بررسی شده است. در این گزارش با استفاده از مدل طول مخلوط اصلاح شده پرانتل، نظریه جریان مغشوش توسعه یافته برای جریان حلقوی به کار گرفته شده است. قطر استوانه خارجی  $mm = 180$ ، نسبت قطر داخلی به خارجی  $D_0/D_i = 0.8575$  و نسبت طول به قطر هیدرولیکی فاصله هوایی  $L/D_h = 60/94 = 0.63$  هستند. استوانه داخلی عایق و استوانه خارجی تحت شار گرمایی یکنواخت قرار دارد. عدد رینولدز محوری و نسبت سرعت دورانی هر یک از استوانه ها به سرعت محوری به ترتیب در محدوده

پای [۲] جریانهای حلقوی آرام و مغشوش بین دو استوانه هم محور را مورد آزمایش قرار داد. نتایج آزمایش نشان می دهند که با دوران استوانه داخلی ورتكسها در هر دو جریان آرام و مغشوش القا می شوند به طوری که در جریان مغشوش این دو ورتكسها عمود بر محور دورانی و در جریان مغشوش این دو محور غیر متعامدند. چاندراسخار [۳] گزارش داد که با اضافه شدن جریان محوری به جریان دورانی پایداری جریان حلقوی افزایش می یابد. در این حالت عدد تیلور بحرانی هنگامی که عدد رینولدز محوری کوچک باشد طبق معادله زیر افزایش می یابد.

$$Ta_{cr} = Ta_{cr}|_{Re_z=0} + 26.5 Re_z^2 \quad (3)$$

که در آن  $Re_z = U(D_0 - D_i)/v$  است.

کای و الگار [۴] به صورت تجربی ترکیب جریان محوری و دورانی را در یک فاصله هوایی با دوران استوانه داخلی مطالعه کردند. مشاهدات آنها نشان می دهند که برای  $Re_z < 2000$  چهار رژیم جریان آشکار می شود، (الف) جریان آرام، (ب) جریان آرام همراه با ورتكسها تیلور، (ج) جریان مغشوش و (د) جریان مغشوش همراه با ورتكسها تیلور.

مشاهدات گو و فهیدی [۵] نشان می دهند که در جریان محوری با سرعت کم هسته های تیلور به صورت گرد تولید شده و با افزایش سرعت محوری ساختار هسته ورتكسها به طور تصاعدی از بین رفته و با افزایش بیشتر آنها هسته ورتكسها به سختی قابل رویتند.

گزلی [۶] آزمایشها خود را روی انتقال گرمای جریان حلقوی با فواصل هوایی  $0/43$  و  $0/1$  میلیمتر و شعاع روتور  $63/5$  میلیمتر در دو حالت با روتور شیاردار و بدون شiar نجام داد. شیارها از نوع مستطیلی و دارای با ابعاد کوچکی بودند. سرعت دورانی روتور و سرعت محوری هوا به ترتیب در محدوده  $4700 \text{ rpm}$  و  $0 < U < 90 \text{ m/s}$  قرار دارند. نتایج این آزمایشها معادله زیر را برای عدد ناسلت پیشنهاد می کند.

$$Nu \approx Re_{\text{eff}}^{0.8} \quad (4)$$

نتایج کارهای قبلی انطباق خوبی را نشان می‌دهد. دبوچی [۱۴] به طور تجربی انتقال گرمای جریان هوای مغشوش بین روتور و استاتور با شیارهای شعاعی داخلی را بررسی کرد.

در کار حاضر سطح استوانه داخلی دارای شیارهای مثلثی بوده و همچنین هر دو استوانه داخلی و خارجی تحت شار گرمایی بوده است.

## ۲- شرح دستگاه آزمایش

شکل (۱) شماتیک دستگاه آزمایش شامل روتور، ژنراتور، واریاک برای تنظیم دور روتور، پولی، سیستم جمع آوری داده‌ها، فن، فلومتر و تعداد زیادی ترموموپل برای اندازه‌گیری دما را نشان می‌دهد. شکل (۲-الف) نیز شماتیک ژنراتور شامل روتور و استاتور را نشان می‌دهد. روتور و استاتور هر کدام دارای تعدادی شیارهای طولی است که سیم پیچهای مربوط به ایجاد میدان مغناطیسی در آنها جای می‌گیرند. روتور یا استوانه داخلی از جنس آلومینیم به طول  $340\text{ mm}$ ، قطر  $198/2\text{ mm}$  و دارای چهار شیار مثلثی به طول  $6\text{ mm}$  در اطراف محیط آن به طور متقابل ساخته شده است، شکل (۲). استاتور یا استوانه خارجی نیز از جنس آلومینیم با همان طول روتور، قطر داخلی  $214\text{ mm}$  و قطر خارجی  $300\text{ mm}$  ساخته شده است. فاصله هواخی بین دو استوانه  $8\text{ mm}$  است. برای شبیه سازی عملکرد ژنراتور از المتهای گرمایی جای گذاری شده داخل سوراخهایی که به طور طولی و متقابل در روتور و استاتور تعییه شده اند و به طور الکتریکی گرم می‌شوند استفاده شده است. انتقال جریان الکتریستیک به المنتهای گرمایی توسط اسلیپرینگ<sup>۱</sup> صورت می‌گیرد. گرمایی تولیدی در روتور و استاتور توسط دو دستگاه واریاک (دستگاه تنظیم ولتاژ) به ترتیب با ظرفیتهای  $2\text{kW}$  و  $6\text{kW}$  قابل کنترل است. برای جلوگیری از اتلاف گرما، قاعده استوانه‌ها و همچنین سطح خارجی استاتور با پشم شبیه عایقکاری شده است. توزیع محوری دما و شار گرمایی سطح استوانه‌ها به کمک ترموموپلهای نوع  $k$  و با دقت  $\pm 1^\circ\text{C}$  که در دو

$\text{Re}_z < 30000$  و  $U/V < 4$  قرار دارند. در این گزارش ادعا شده است که طول ناحیه توسعه یافته در حالت استوانه بیرونی ساکن  $10^\circ$  برابر قطر هیدرولیکی است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش نسبت دوران استوانه داخلی به خارجی افزایش بیشتری روی عدد ناسلت سطح استوانه خارجی مشاهده می‌شود.

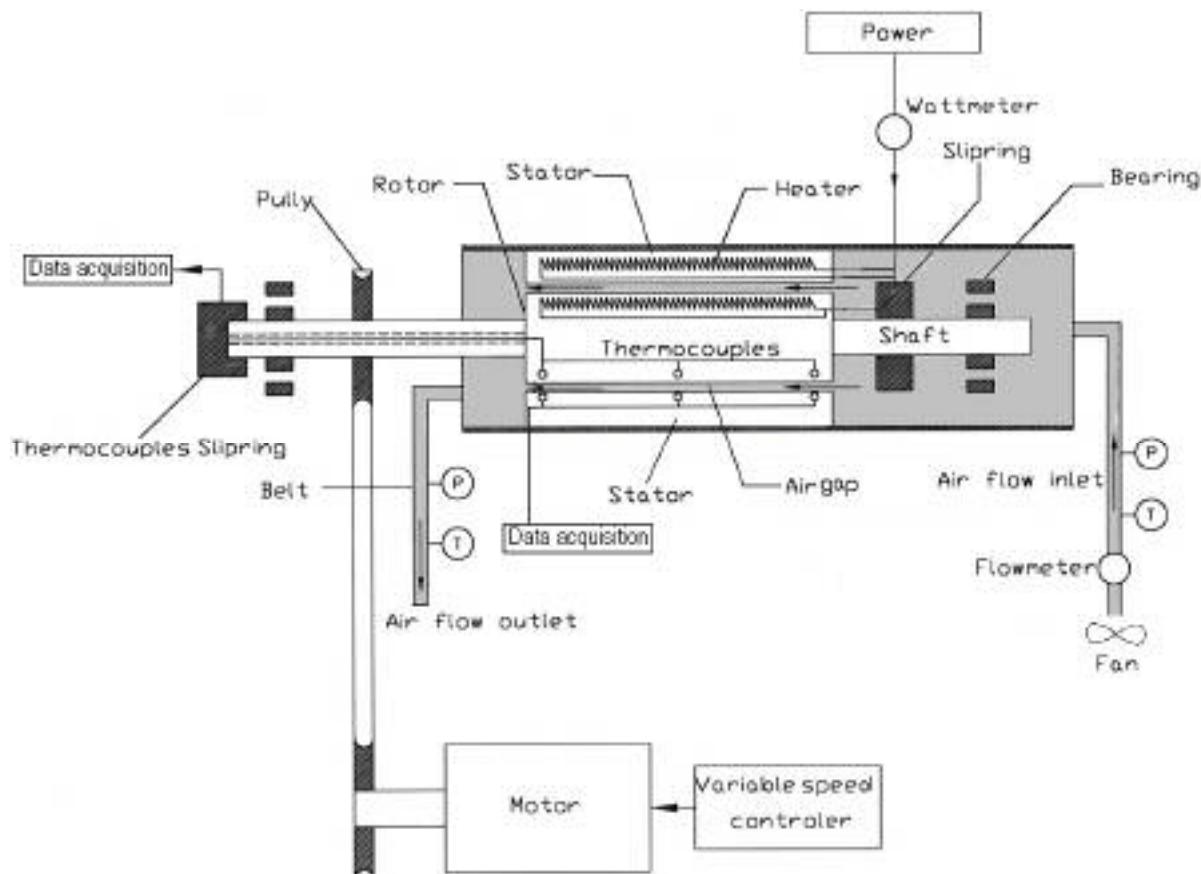
اسمیت و زوریتا [۱۰] به طور عددی انتقال گرمای اجباری جریان محوری یک استوانه دوار را تحلیل کردند. این تحلیل دو بعدی و با شرط تقارن محوری انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که عدد ناسلت با  $8/8$  عدد رینولدز بستگی دارد. نتایج این تحقیق با نتایج جریان عرضی روی یک استوانه دوار مقایسه شده است.

کندس [۱۱] یک حل تقریبی برای محاسبه نرخ انتقال گرمایی یک استوانه دوار را با استفاده از لایه مرزی آرام ارائه کرد. در این تحقیق با به کار گیری یک سرعت مناسب در معادله انرژی عدد ناسلت متوسط را به صورت زیر پیشنهاد کردند.

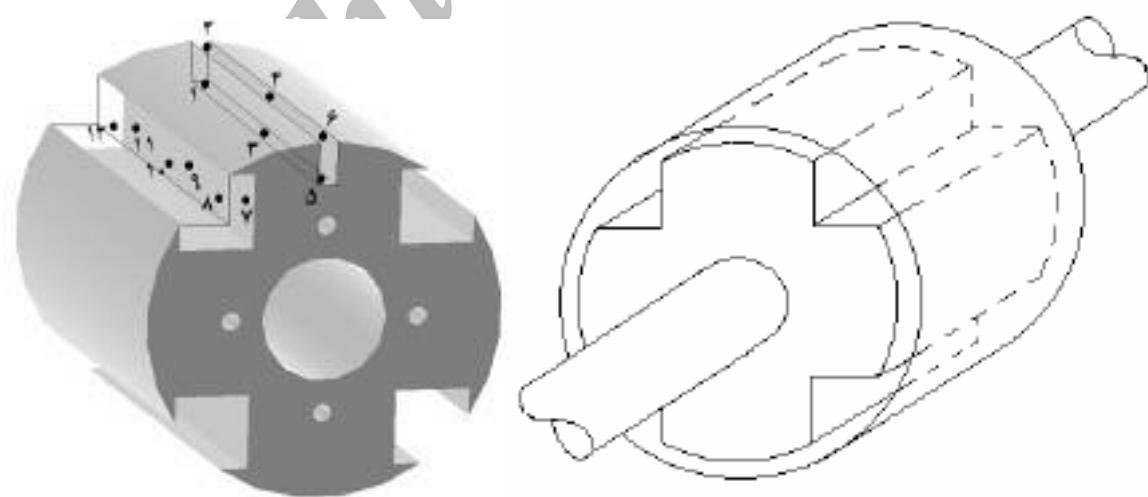
$$(5) \quad \text{Nu} = 0.6366(\text{RePr})^{0.5}$$

بوتارفا و هارمند [۱۲] ساختار جریان هوای و ضریب انتقال گرمایی موضعی در فاصله هواخی بین روتور و استاتور را به طور تجربی مطالعه کردند. دمای سطح روتور توسط ترموگرافی اشعه مادون قرمز و تحلیل ساختار جریان بین روتور و استاتور نیز توسط تصویر ذرات (PIV) اندازه گیری شد. در این تحقیق همچنین حل عددی معادله انرژی جریان دائم برای تعیین ضریب انتقال گرمایی موضعی انجام گرفته است. عدد رینولدز دورانی و نسبت عرض فاصله هواخی به شعاع روتور به ترتیب در محدوده  $176000 < \text{Re}_{\varphi} < 58700$  و  $0/085 < D_h/D_i < 0/050$  قرار دارند.

ازردم [۱۳] انتقال گرمای جابه جایی اجباری از یک استوانه دوار در هواخی ساکن را به طور تجربی بررسی کرد. ضریب انتقال گرمایی متوجه توسط پیرومتر تشушعی اندازه گیری شد و معادله  $\text{Nu} = 0.318(\text{Re}_{\varphi})^{0.571}$  در محدوده  $2000 < \text{Re}_{\varphi} < 4000$  برای آن پیشنهاد شد. مقایسه این نتایج با



شکل ۱ - شماتیک دستگاه آزمایش همراه موتور الکتریکی و تجهیزات جانبی آن



شکل ۲ - (الف) شماتیک روتور و استاتور یک ژنراتور با شیارهای محوری در اطراف آن  
ب) شماتیک روتور و محل نصب ترموموپلهای آن

متوسط محوری در خروج، دبی جرمی و عدد رینولدز به ترتیب به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$\dot{m} = (\rho A U)_0 \quad (6)$$

$$Re_z = \frac{\dot{m} D_h}{\rho_a A_{gap} v_a} \quad (7)$$

که در آن  $D_h = D_o - D_i$  است.

نرخ شارگرمایی موضعی در سطح روتور و استاتور با استفاده از گرادیان دما در سطح هر یک از آنها به دست می‌آید.

$$q''_j = -k \left. \frac{\partial T_j}{\partial r} \right|_R \cong k \left. \frac{\Delta T_j}{\Delta r} \right|_R, \quad j = r, s \quad (8)$$

که در آن  $j = r, s$  به ترتیب معرف روتور و استاتور و  $R$ شعاع محل اندازه‌گیری است. همچنین  $\Delta r$  فاصله بین ترموموپلهای سطحی و داخلی است. به عنوان مثال در شکل (۲-ب) فاصله بین ترموموپلهای ۵ و ۶ یا ۷ و ۸ برابر  $\Delta r$  است.

برای محاسبه دقت اندازه‌گیری، دبی جریان هوا این بار توسط نرخ انتقال گرمای کلی به هوا و اندازه‌گیری اختلاف دمای ورودی و خروجی هوا به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\dot{m} = \frac{\int_0^L q'' dA}{C_p (T_{ao} - T_{ai})} \quad (9)$$

که در آن  $A = A_r + A_s$  و  $A_r = A_s$  به ترتیب سطح روتور و استاتور است. اختلاف بین مقادیر جرمی توسط معادلات (۶) و (۹) در حدود ۵ درصد است.

با محاسبه نرخ انتقال گرمای سطوح روتور و استاتور بین ورود و مقطعی دخلواه از روتور یا استاتور، دمای متوسط هوا در هر مقطع فاصله هوایی برابر است با:

$$T_a = T_{ai} + \frac{\int_0^z q'' dA}{\dot{mc}_p} \quad (10)$$

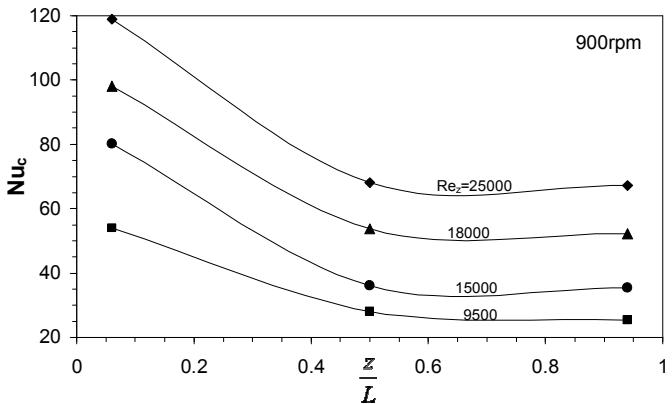
با جایگذاری  $\dot{mc}_p$  از معادله (۹) در معادله (۱۰) خلاصه عملیات عبارت است از:

$$T_a = T_{ai} + (T_{ao} - T_{ai}) \frac{\int_0^z q'' dA}{\int_0^L q'' dA} \quad (11)$$

ردیف سه تایی با دو موقعیت زاویه‌ای مختلف در طول استوانه نصب شده بودند اندازه‌گیری می‌شدند. در شکل (۲-ب) محل نصب ترموموپلهای روتور نشان داده شده است. برای جلوگیری از اتلاف گرما بین ترموموپلهای سطحی با هوا و بالا بردن دقیق اندازه‌گیری، ترموموپلهای سطحی روتور و استاتور عایق کاری شده است. ولتاژ تولیدی در ترموموپلهای استوانه داخلی توسط اسلیپرینگ دما به دستگاه نمایشگر متصل می‌شوند. مجموعه استوانه‌ها داخل یک کانال با مقطع مربعی به ضلع ۱۵cm و طول ۳m قرار گرفته بود. جریان هوا در فاصله هوایی بین دو استوانه توسط یک فن سانتریفیوژ که در ابتدای کانال نصب شده بود تأمین می‌شود. دبی هوا توسط یک دیمیر<sup>۲</sup> که تغییر دور فن را به عهده داشت کنترل می‌شود. دمای هوای ورودی و خروجی و همچنین سرعت متوسط هوا در خروجی کانال به ترتیب توسط ترموموپل و لوله پیتوت اندازه‌گیری شدند. افت فشار هوای عبوری نیز توسط فشارسنج تفاضلی که لوله‌های آن به ابتدای وانتها کانال هوا متصل اندازه‌گیری می‌شدند. استوانه داخلی از طریق تسممه و پولی به یک موتور الکتریکی با دور متغیر متصل شده بود و تغییر دور آن توسط دستگاه واریک کنترل می‌شود. دور ۵۰rpm موتور به طور پیوسته در محدوده  $150 \text{ rpm} < \omega < 400 \text{ rpm}$  قابل تغییر بود. عدد رینولدز جریان محوری هوا بین دو استوانه بر اساس قطر هیدرولیکی فاصله هوایی در محدوده  $3000 < Re_z < 4000$  قرار داشت.

### ۳- خطای داده‌های اندازه‌گیری

وسایل اندازه‌گیری در این آزمایش شامل لوله پیتوت دیجیتالی با خطای  $0/1 \text{ m/s}$ ، واتمتر برای اندازه‌گیری توان مصرفی المتنهای گرمایی و توان روتور و استاتور، ۲۸ عدد ترموموپل با خطای  $C^\pm$  و نمایشگر دماس است. آزمایشها در سه دور مختلف rpm  $1500$  و  $1800$  و  $2200$ ،  $2500$  و  $3000$  و  $3500$  و  $4000$  و  $4500$  و  $5000$  و  $5500$  و  $6000$  و  $6500$  و  $7000$  و  $7500$  و  $8000$  و  $8500$  و  $9000$  و  $9500$  و  $10000$  و  $10500$  و  $11000$  و  $11500$  و  $12000$  و  $12500$  و  $13000$  و  $13500$  و  $14000$  و  $14500$  و  $15000$  و  $15500$  و  $16000$  و  $16500$  و  $17000$  و  $17500$  و  $18000$  و  $18500$  و  $19000$  و  $19500$  و  $20000$  و  $20500$  و  $21000$  و  $21500$  و  $22000$  و  $22500$  و  $23000$  و  $23500$  و  $24000$  و  $24500$  و  $25000$  و  $25500$  و  $26000$  و  $26500$  و  $27000$  و  $27500$  و  $28000$  و  $28500$  و  $29000$  و  $29500$  و  $30000$  و  $30500$  و  $31000$  و  $31500$  و  $32000$  و  $32500$  و  $33000$  و  $33500$  و  $34000$  و  $34500$  و  $35000$  و  $35500$  و  $36000$  و  $36500$  و  $37000$  و  $37500$  و  $38000$  و  $38500$  و  $39000$  و  $39500$  و  $40000$  و  $40500$  و  $41000$  و  $41500$  و  $42000$  و  $42500$  و  $43000$  و  $43500$  و  $44000$  و  $44500$  و  $45000$  و  $45500$  و  $46000$  و  $46500$  و  $47000$  و  $47500$  و  $48000$  و  $48500$  و  $49000$  و  $49500$  و  $50000$  و  $50500$  و  $51000$  و  $51500$  و  $52000$  و  $52500$  و  $53000$  و  $53500$  و  $54000$  و  $54500$  و  $55000$  و  $55500$  و  $56000$  و  $56500$  و  $57000$  و  $57500$  و  $58000$  و  $58500$  و  $59000$  و  $59500$  و  $60000$  و  $60500$  و  $61000$  و  $61500$  و  $62000$  و  $62500$  و  $63000$  و  $63500$  و  $64000$  و  $64500$  و  $65000$  و  $65500$  و  $66000$  و  $66500$  و  $67000$  و  $67500$  و  $68000$  و  $68500$  و  $69000$  و  $69500$  و  $70000$  و  $70500$  و  $71000$  و  $71500$  و  $72000$  و  $72500$  و  $73000$  و  $73500$  و  $74000$  و  $74500$  و  $75000$  و  $75500$  و  $76000$  و  $76500$  و  $77000$  و  $77500$  و  $78000$  و  $78500$  و  $79000$  و  $79500$  و  $80000$  و  $80500$  و  $81000$  و  $81500$  و  $82000$  و  $82500$  و  $83000$  و  $83500$  و  $84000$  و  $84500$  و  $85000$  و  $85500$  و  $86000$  و  $86500$  و  $87000$  و  $87500$  و  $88000$  و  $88500$  و  $89000$  و  $89500$  و  $90000$  و  $90500$  و  $91000$  و  $91500$  و  $92000$  و  $92500$  و  $93000$  و  $93500$  و  $94000$  و  $94500$  و  $95000$  و  $95500$  و  $96000$  و  $96500$  و  $97000$  و  $97500$  و  $98000$  و  $98500$  و  $99000$  و  $99500$  و  $100000$  و  $100500$  و  $101000$  و  $101500$  و  $102000$  و  $102500$  و  $103000$  و  $103500$  و  $104000$  و  $104500$  و  $105000$  و  $105500$  و  $106000$  و  $106500$  و  $107000$  و  $107500$  و  $108000$  و  $108500$  و  $109000$  و  $109500$  و  $110000$  و  $110500$  و  $111000$  و  $111500$  و  $112000$  و  $112500$  و  $113000$  و  $113500$  و  $114000$  و  $114500$  و  $115000$  و  $115500$  و  $116000$  و  $116500$  و  $117000$  و  $117500$  و  $118000$  و  $118500$  و  $119000$  و  $119500$  و  $120000$  و  $120500$  و  $121000$  و  $121500$  و  $122000$  و  $122500$  و  $123000$  و  $123500$  و  $124000$  و  $124500$  و  $125000$  و  $125500$  و  $126000$  و  $126500$  و  $127000$  و  $127500$  و  $128000$  و  $128500$  و  $129000$  و  $129500$  و  $130000$  و  $130500$  و  $131000$  و  $131500$  و  $132000$  و  $132500$  و  $133000$  و  $133500$  و  $134000$  و  $134500$  و  $135000$  و  $135500$  و  $136000$  و  $136500$  و  $137000$  و  $137500$  و  $138000$  و  $138500$  و  $139000$  و  $139500$  و  $140000$  و  $140500$  و  $141000$  و  $141500$  و  $142000$  و  $142500$  و  $143000$  و  $143500$  و  $144000$  و  $144500$  و  $145000$  و  $145500$  و  $146000$  و  $146500$  و  $147000$  و  $147500$  و  $148000$  و  $148500$  و  $149000$  و  $149500$  و  $150000$  و  $150500$  و  $151000$  و  $151500$  و  $152000$  و  $152500$  و  $153000$  و  $153500$  و  $154000$  و  $154500$  و  $155000$  و  $155500$  و  $156000$  و  $156500$  و  $157000$  و  $157500$  و  $158000$  و  $158500$  و  $159000$  و  $159500$  و  $160000$  و  $160500$  و  $161000$  و  $161500$  و  $162000$  و  $162500$  و  $163000$  و  $163500$  و  $164000$  و  $164500$  و  $165000$  و  $165500$  و  $166000$  و  $166500$  و  $167000$  و  $167500$  و  $168000$  و  $168500$  و  $169000$  و  $169500$  و  $170000$  و  $170500$  و  $171000$  و  $171500$  و  $172000$  و  $172500$  و  $173000$  و  $173500$  و  $174000$  و  $174500$  و  $175000$  و  $175500$  و  $176000$  و  $176500$  و  $177000$  و  $177500$  و  $178000$  و  $178500$  و  $179000$  و  $179500$  و  $180000$  و  $180500$  و  $181000$  و  $181500$  و  $182000$  و  $182500$  و  $183000$  و  $183500$  و  $184000$  و  $184500$  و  $185000$  و  $185500$  و  $186000$  و  $186500$  و  $187000$  و  $187500$  و  $188000$  و  $188500$  و  $189000$  و  $189500$  و  $190000$  و  $190500$  و  $191000$  و  $191500$  و  $192000$  و  $192500$  و  $193000$  و  $193500$  و  $194000$  و  $194500$  و  $195000$  و  $195500$  و  $196000$  و  $196500$  و  $197000$  و  $197500$  و  $198000$  و  $198500$  و  $199000$  و  $199500$  و  $200000$  و  $200500$  و  $201000$  و  $201500$  و  $202000$  و  $202500$  و  $203000$  و  $203500$  و  $204000$  و  $204500$  و  $205000$  و  $205500$  و  $206000$  و  $206500$  و  $207000$  و  $207500$  و  $208000$  و  $208500$  و  $209000$  و  $209500$  و  $210000$  و  $210500$  و  $211000$  و  $211500$  و  $212000$  و  $212500$  و  $213000$  و  $213500$  و  $214000$  و  $214500$  و  $215000$  و  $215500$  و  $216000$  و  $216500$  و  $217000$  و  $217500$  و  $218000$  و  $218500$  و  $219000$  و  $219500$  و  $220000$  و  $220500$  و  $221000$  و  $221500$  و  $222000$  و  $222500$  و  $223000$  و  $223500$  و  $224000$  و  $224500$  و  $225000$  و  $225500$  و  $226000$  و  $226500$  و  $227000$  و  $227500$  و  $228000$  و  $228500$  و  $229000$  و  $229500$  و  $230000$  و  $230500$  و  $231000$  و  $231500$  و  $232000$  و  $232500$  و  $233000$  و  $233500$  و  $234000$  و  $234500$  و  $235000$  و  $235500$  و  $236000$  و  $236500$  و  $237000$  و  $237500$  و  $238000$  و  $238500$  و  $239000$  و  $239500$  و  $240000$  و  $240500$  و  $241000$  و  $241500$  و  $242000$  و  $242500$  و  $243000$  و  $243500$  و  $244000$  و  $244500$  و  $245000$  و  $245500$  و  $246000$  و  $246500$  و  $247000$  و  $247500$  و  $248000$  و  $248500$  و  $249000$  و  $249500$  و  $250000$  و  $250500$  و  $251000$  و  $251500$  و  $252000$  و  $252500$  و  $253000$  و  $253500$  و  $254000$  و  $254500$  و  $255000$  و  $255500$  و  $256000$  و  $256500$  و  $257000$  و  $257500$  و  $258000$  و  $258500$  و  $259000$  و  $259500$  و  $260000$  و  $260500$  و  $261000$  و  $261500$  و  $262000$  و  $262500$  و  $263000$  و  $263500$  و  $264000$  و  $264500$  و  $265000$  و  $265500$  و  $266000$  و  $266500$  و  $267000$  و  $267500$  و  $268000$  و  $268500$  و  $269000$  و  $269500$  و  $270000$  و  $270500$  و  $271000$  و  $271500$  و  $272000$  و  $272500$  و  $273000$  و  $273500$  و  $274000$  و  $274500$  و  $275000$  و  $275500$  و  $276000$  و  $276500$  و  $277000$  و  $277500$  و  $278000$  و  $278500$  و  $279000$  و  $279500$  و  $280000$  و  $280500$  و  $281000$  و  $281500$  و  $282000$  و  $282500$  و  $283000$  و  $283500$  و  $284000$  و  $284500$  و  $285000$  و  $285500$  و  $286000$  و  $286500$  و  $287000$  و  $287500$  و  $288000$  و  $288500$  و  $289000$  و  $289500$  و  $290000$  و  $290500$  و  $291000$  و  $291500$  و  $292000$  و  $292500$  و  $293000$  و  $293500$  و  $294000$  و  $294500$  و  $295000$  و  $295500$  و  $296000$  و  $296500$  و  $297000$  و  $297500$  و  $298000$  و  $298500$  و  $299000$  و  $299500$  و  $300000$  و  $300500$  و  $301000$  و  $301500$  و  $302000$  و  $302500$  و  $303000$  و  $303500$  و  $304000$  و  $304500$  و  $305000$  و  $305500$  و  $306000$  و  $306500$  و  $307000$  و  $307500$  و  $308000$  و  $308500$  و  $309000$  و  $309500$  و  $310000$  و  $310500$  و  $311000$  و  $311500$  و  $312000$  و  $312500$  و  $313000$  و  $313500$  و  $314000$  و  $314500$  و  $315000$  و  $315500$  و  $316000$  و  $316500$  و  $317000$  و  $317500$  و  $318000$  و  $318500$  و  $319000$  و  $319500$  و  $320000$  و  $320500$  و  $321000$  و  $321500$  و  $322000$  و  $322500$  و  $323000$  و  $323500$  و  $324000$  و  $324500$  و  $325000$  و  $325500$  و  $326000$  و  $326500$  و  $327000$  و  $327500$  و  $328000$  و  $328500$  و  $329000$  و  $329500$  و  $330000$  و  $330500$  و  $331000$  و  $331500$  و  $332000$  و  $332500$  و  $333000$  و  $333500$  و  $334000$  و  $334500$  و  $335000$  و  $335500$  و  $336000$  و  $336500$  و  $337000$  و  $337500$  و  $338000$  و  $338500$  و  $339000$  و  $339500$  و  $340000$  و  $340500$  و  $341000$  و  $341500$  و  $342000$  و  $342500$  و  $343000$  و  $343500$  و  $344000$  و  $344500$  و  $345000$  و  $345500$  و  $346000$  و  $346500$  و  $347000$  و  $347500$  و  $348000$  و  $348500$  و  $349000$  و  $349500$  و  $350000$  و  $350500$  و  $351000$  و  $351500$  و  $352000$  و  $352500$  و  $353000$  و  $35350$



شکل ۳ - تغییرات محوری عدد ناسلت در بخش کمانی روتور در رینولذزهای مختلف با دور ۹۰۰ rpm

که در آن

$$I = \int_0^1 \frac{d\left(\frac{Z}{L}\right)}{T_r - T_{ai} - (T_{ao} - T_{ai}) \frac{Z}{L}}$$

با توجه به دقت کمیتهای اندازه‌گیری، طبق معادله فوق، خطای  $\bar{h}$  حدود ۱۸ درصد است.

ضرایب انتقال حرارت موضعی و متوسط سطح روتور به ترتیب برابر است با:

$$h_r = \frac{q''_r}{T_r - T_{ai}} \quad (12)$$

$$\bar{h}_r = \frac{1}{L} \int_0^L h_r dz \quad (13)$$

برای تعیین دقت ضریب انتقال حرارت متوسط سطح روتور، ابتدا با معرفی معادله (۱۱) در معادله (۱۲) و نتیجه آن در معادله (۱۳) خواهیم داشت.

$$\bar{h}_r = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{q'' dz}{T_r - T_{ai} - (T_{ao} - T_{ai}) \frac{\int_0^z q'' dA}{\int_0^L q'' dA}} \quad (14)$$

با فرض ثابت بودن نرخ شارگرمایی در سطح روتور و استاتور، معادله (۱۴) به شکل زیر ساده می‌شود.

$$\bar{h}_r = q''_r \int_0^1 \frac{d\left(\frac{Z}{L}\right)}{T_r - T_{ai} - (T_{ao} - T_{ai}) \frac{Z}{L}} \quad (15)$$

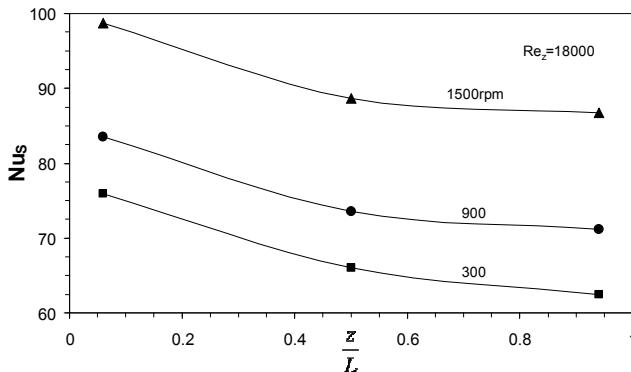
با استفاده از نتایج تجربی کلاین [۱۵]، دقت ضریب انتقال گرمایی متوسط سطح روتور بر حسب خطای کمیتهای اندازه‌گیری شده برابر است با:

$$\left( \frac{\Delta \bar{h}_r}{\bar{h}_r} \right)^2 = \left( \frac{\Delta q''_r}{q''_r} \right)^2 + \left[ \frac{\partial \ln I}{\partial (T_r - T_{ai})} d(T_r - T_{ai}) \right]^2 + \left[ \frac{\partial \ln I}{\partial (T_{ao} - T_{ai})} d(T_{ao} - T_{ai}) \right]^2 \quad (16)$$

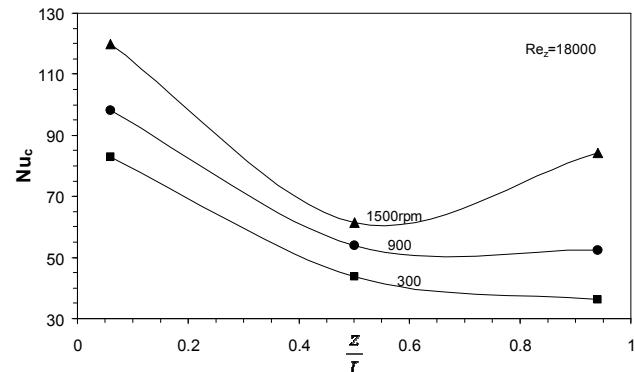
#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- عدد ناسلت محوری موضعی

شکل (۳) عدد ناسلت سطح روتور را در دور ۹۰۰ rpm برای چهار عدد رینولذز محوری مختلف نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که تغییرات عدد ناسلت در ناحیه ورودی جریان، یک روند کاهشی دارد و با توسعه یافتن جریان به مقدار ثابتی میل می‌کند. مقدار عدد ناسلت به عدد رینولذز محوری بستگی دارد. به دلیل معکوس بودن رابطه بین عدد ناسلت و ضخامت لایه مرزی، عدد ناسلت در ابتدای فاصله هوایی حداقل است. مشاهده می‌شود که با کوچک شدن عدد در اعداد رینولذز محوری، عدد ناسلت سریعتر یکنواخت می‌شود. به عبارت دیگر جریان زودتر توسعه می‌یابد. در واقع کاهش عدد رینولذز محوری سبب تضعیف مومنتوم محوری در برابر مومنتوم شعاعی شده و در نتیجه لایه مرزی در عرض فاصله هوایی زودتر رشد کرده و جریان زودتر توسعه می‌یابد.



شکل ۵ - تغییرات محوری عدد ناسلت استاتور در رینولذز ۱۸۰۰۰ با دورهای مختلف



شکل ۶ - تغییرات محوری ضریب انتقال گرمای بر روی بخش کمانی روتور در رینولذز ۱۸۰۰۰ با دورهای مختلف

#### ۲-۴- توزیع محوری دما

شکلهای (۶) و (۷) توزیع محوری دمای سطح روتور و استاتور را نشان می‌دهد. این تغییرات تقریباً خطی است که خود مؤید یکنواخت بودن تقریبی شار گرمایی سطوح مربوطه است. همچنین افزایش دور سبب کاهش دما می‌شود. محور قائم هر دو شکل بر اساس معادله زیر بدون بعد شده است.

$$\theta_j = \frac{T_j - T_{ai}}{\bar{q}_j'' D_h}, \quad j = r, s \quad (17)$$

#### ۳-۴- عدد ناسلت متوسط

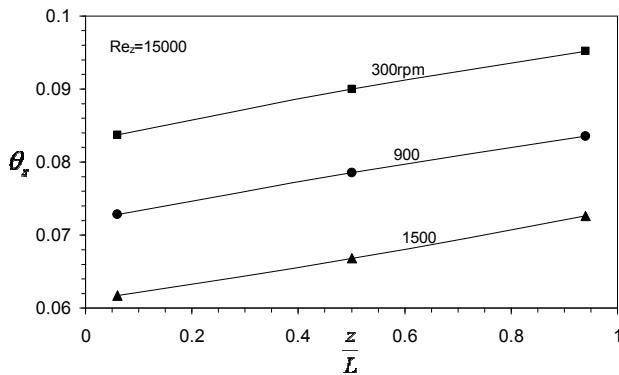
در شکل (۸) تغییرات عدد ناسلت متوسط سطح روتور بر اساس معادله (۱۳) بر حسب عدد رینولذز در دورهای مختلف ارائه شده است.

$$\bar{N}u_r = \frac{\bar{h}_r D_h}{k} \quad (18)$$

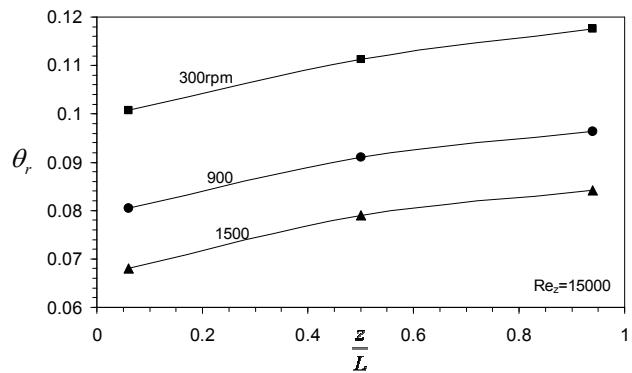
که در آن  $D_i = D_o - D_h$  است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود با افزایش عدد رینولذز محوری و همچنین با افزایش دور، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. درصد این افزایش برای عدد رینولذز بزرگتر، بیشتر از عدد رینولذز کوچکتر است. چون با افزایش دور سرعت سیال نسبت به روتور افزایش می‌یابد و این افزایش به ازای اعداد رینولذز محوری کوچکتر بیشتر است، لذا با افزایش دور درصد افزایش عدد ناسلت

شکل (۴) توزیع محوری عدد ناسلت سطح روتور را در سه دور مختلف و به ازای عدد رینولذز ۱۸۰۰۰ نشان می‌دهد. در دورهای ۳۰۰ و ۹۰۰ عدد ناسلت در مسیر جریان ابتدا کاهش یافته و سپس یکنواخت می‌شود که خود بیانگر توسعه یافتن جریان است. افزایش ناگهانی عدد ناسلت در انتهای سطح روتور و در دور ۱۵۰۰ rpm به این علت است که با افزایش دور فشار جریان خروجی و در نزدیک سطح روتور کاهش می‌یابد و سبب جریان برگشتی در انتهای فاصله هوایی می‌شود. چون اختلاف بین دمای سطح روتور و هوای محیط نسبت به محلهای دیگر کanal بیشتر است، لذا نرخ انتقال گرمای در انتهای سطح روتور افزایش می‌یابد. بررسی پدیده جریان برگشتی به دلیل جدا شدن ترموموکوپلهای در اثر نیروی گریز از مرکز در دورهای بیش از ۱۵۰۰ rpm امکان‌پذیر نبود ولی تحقیقات ملکی [۱۶] صحت این پدیده را تایید می‌کند.

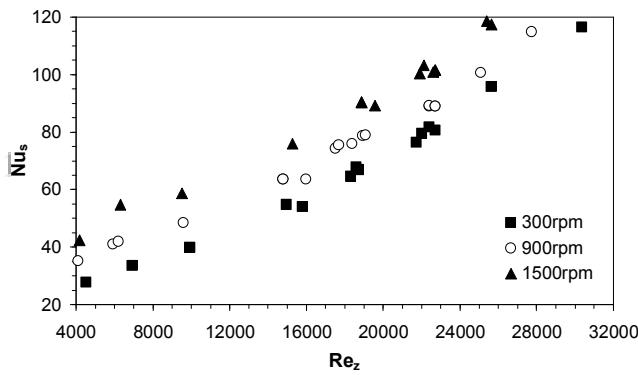
شکل (۵) توزیع محوری عدد ناسلت سطح استاتور را در سه دور مختلف به ازای عدد رینولذز ۱۸۰۰۰ گزارش می‌کند. مشاهده می‌شود که روند تغییرات آن شبیه روند تغییرات عدد ناسلت روتور در شکل قبلی است با این تفاوت که تغییرات عدد ناسلت استاتور در ناحیه ورودی دارای شبکه‌ای نسبت به عدد ناسلت روتور است. همچنین عدم افزایش ناگهانی عدد ناسلت استاتور در انتهای آن و در دور ۱۵۰۰ rpm بیانگر برگشت جریان در نزدیک سطح روتور است.



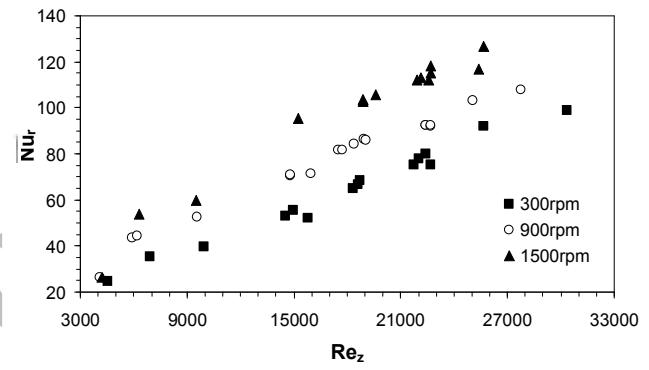
شکل ۷ - تغییرات محوری دمای سطح استاتور در رینولدز ۱۵۰۰۰ با دورهای مختلف



شکل ۸ - تغییرات محوری دمای سطح روتور در رینولدز ۱۵۰۰۰ با دورهای مختلف



شکل ۹ - تغییرات عدد ناسلت متوسط استاتور بر حسب عدد رینولدز محوری با دورهای مختلف

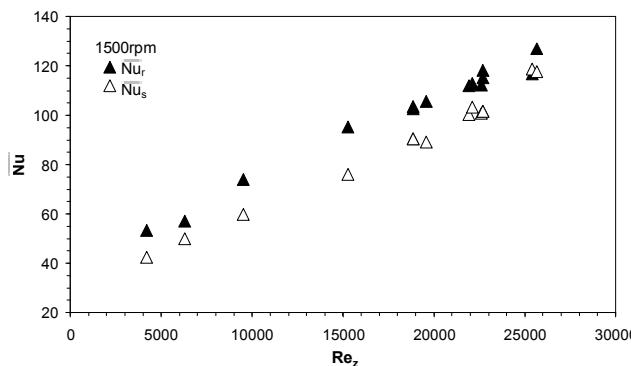


شکل ۱۰ - تغییرات عدد ناسلت متوسط روتور بر حسب عدد رینولدز محوری با دورهای مختلف

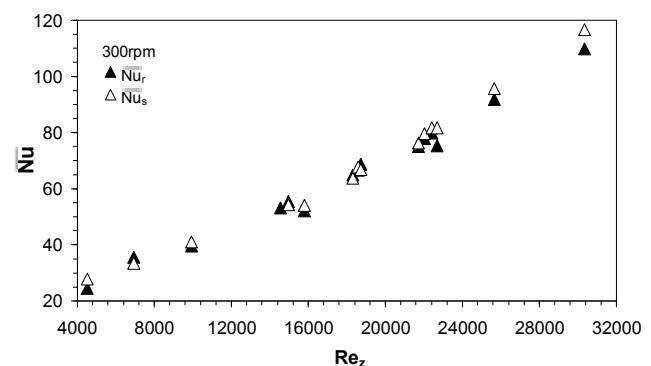
برای درک بهتر از چنین اختلافی مقایسه‌ای بین آنها در دورهای ۳۰۰ rpm و ۹۰۰ rpm انجام شده که به ترتیب در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) ارائه شده است. مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد که عدد ناسلت سطح روتور با افزایش دور بیشتر از استاتور است چرا که با افزایش دور سرعت نسبی بین سطح روتور و هوا بیشتر از سرعت نسبی بین استاتور و هوا افزایش می‌یابد. این افزایش نسبی سرعت برای روتور به این علت است که تمام لایه هوا با افزایش سرعت روتور قرار دارد افزایش می‌یابد، ضمن اینکه تجمع در مجاور سطح روتور شدن ذرات هوا در کنار سطح استاتور در اثر نیروی گریز و فشرده شدن ذرات هوا در کنار سطح استاتور را کاهش داده، یعنی افزایش از مرکز سرعت نسبی هوا و استاتور را کاهش داده، یعنی افزایش سرعت نسبی روتور در مقایسه با استاتور بیشتر است.

با اعداد رینولدز محوری کوچکتر بیشتر می‌شود. از طرف دیگر چون با افزایش نیروی گریز از مرکز در اثر افزایش دور، ضخامت لایه مرزی روی سطح کمانی روتور افزایش می‌یابد، لذا ضریب انتقال گرما کاهش می‌یابد. البته این تأثیر در مقابل افزایش سرعت محیطی ناچیز است

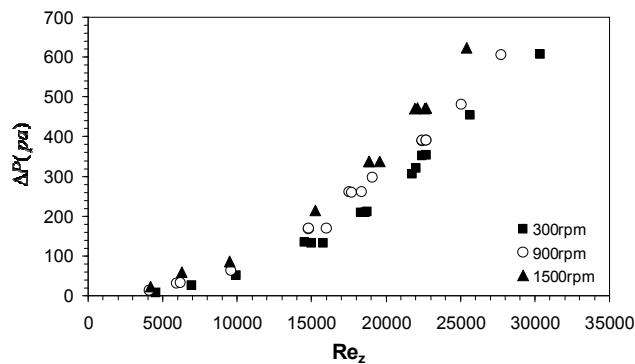
شکل (۹) تغییرات عدد ناسلت متوسط سطح استاتور را بر حسب عدد رینولدز محوری در دورهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود روند تغییرات عدد ناسلت سطح استاتور شبیه روند تغییرات سطح روتور نسبت به عدد رینولدز محوری است با این تفاوت که تأثیر دور روی ضریب انتقال گرمایی روتور بیشتر از تأثیر آن روی ضریب انتقال گرمایی استاتور به ازای اعداد رینولدز محوری یکسان است.



شکل ۱۱ - مقایسه تغییرات عدد ناسلت متوسط روتور و استاتور بر حسب عدد رینولدز محوری با دور ۱۵۰۰ rpm



شکل ۱۰ - مقایسه تغییرات عدد ناسلت متوسط روتور و استاتور بر حسب عدد رینولدز محوری با دور ۳۰۰ rpm



شکل ۱۲ - تغییرات افت فشار جریان هوا در عبور از فاصله هوایی بر حسب عدد رینولدز

- ۱- انتقال گرمای روتور و استاتور به ترتیب حدود ۴۵ و ۳۰ درصد افزایش می یابد که این افزایش در رینولدزهای کمتر بیشتر است.
- ۲- با افزایش نسبت سرعت  $U/V$  جریان هوا زودتر توسعه می یابد.
- ۳- با افزایش دور روتور افت فشار جریان هوا در فاصله هوایی افزایش می یابد.
- ۴- توزیع محوری ضریب انتقال گرمای سطح استاتور نسبت به مقدار آن برای سطح روتور یکنواخت تر است.
- ۵- افزایش دمای محوری سطح استاتور تقریباً خطی و برای روتور سهمی شکل است.
- ۶- با افزایش نسبت سرعت  $U/V$  ایجاد جریان برگشتی در انتهای کanal بیشتر می شود.

#### ۴-۴- افت فشار

در شکل (۱۲) تغییرات افت فشار جریان هوا در عبور از فاصله هوایی بر حسب عدد رینولدز در دورهای مختلف ارائه شده است. افت فشار با افزایش عدد رینولدز تقریباً به طور سهموی افزایش می یابد چرا که افت فشار با توان دوم سرعت محوری متناسب است. همچنین افزایش دور باعث افزایش بیشتر افت فشار می شود. این افزایش به علت وجود مومتم شعاعی است که مقاومت در برابر جریان محوری را افزایش می دهد. از طرف دیگر شیب افت فشار با افزایش دور افزایش می یابد.

#### ۵- نتیجه گیری

- نتایج این تحقیق عبارت اند از:
- ۱- با افزایش دور روتور از ۳۰۰ rpm تا ۱۵۰۰ rpm ضرایب

1. Slipring

2. Dimer

مراجع

1. Taylor, G.I., "Stability of a Viscous Liquid Contained Between two Rotating Cylinders", *Phil. Trans. R.Soc. London*, A223, pp. 289-343, 1923.
2. Pia, S.I., "Turbulent Flow Between Rotating Cylinders", NACATN 892, March 1943.
3. Chandrasekhar, S., "The Stability of Spiral Flow Between Rotating Cylinders", *Proc. R. Soc. London*, A265, pp188-196, 1961.
4. Kaye, J., and Elgar, E.C., "Modes of Adiabatic and Diabatic Fluid flow in an Annulus with an Inner Rotating Cylinder", *J. Heat Transfer* 80, PP. 753-765, 1958.
5. Gu, Z. H., and Fahidy, "Visualization of Flow Patterns in Axial Flow Between Horizontal Coaxial Rotating Cylinder," *Can. J. Chem. Engng*, Vol. 63, pp. 14-21, 1985.
6. Gazley,C., "Heat Transfer Characteristic of Rotational and Axial Between Concentric Cylinders," *Trans. ASME*, Vol 80.
7. Lee, Y. N., "Heat Transfer Characteristics of the Annulus of Two Coaxial Cylinders One Cylinder Rotating," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 32, No.4, pp. 711-722, 1989.
8. M, Kuzay, T. M., "Turbulent Heat and Momentum Transfer Studies," Ph.D. Thesis, University of Minnesota, 1973.
9. Pfitzer, H., and Beer,H., "Heat Transfer in an Annulus Between Independently Rotating Tubes with Turbulent Axial Flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, No. 3, pp. 623-633,1992.
10. Smyth, R. and Zurita,P., "Heat Transfer at the Outer Surface of a Rotating Cylinder in the Prese of Axial Flow," *Transaction on Engineering Sciences*, Vol. 5, WIT Press, www-witness.com, ISSN 1743-3533, 1994.,
11. Kendous, A. A., "An Approximate Solution of the Convective Heat Transfer from an Isothermal Rotating Cylinder," Department of Chem. Eng. University of Technology, Baghdad, Iraq, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Aug 1996.
12. Boutarfa, R. and Harmand, S. "Local Convective Heat Exchanges and Flow Structure in a Rotor-Stator System," *Int. J. of Thermal Science*, Vol. 42, No. 12, pp. 1129-1143, Dec 2003.,
13. Ozerdem, B., "Measurment of Convective Heat Transfer Coefficient for a Horizontal Cylinder Rotating in Quiescent Air," *International Comrunications in Heat and Mass Transfer*, Izmir Turkey, Vol. 27, pp.389-395, NO. 3, April 2000.
14. Djaoui, M., and Debuchy, R., "Heat Transfer in a Rotor-Stator System with a Radial Inflow," *Mechanics Physics Chemistry Astronomy*, Vol. 32, No. 5, pp. 309-314, May 1998.
15. Kline, S. J. and McLintock, F. A., "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments", *Mechanical Engineering*, p. 3, January 1953.
16. Molki, M., and Astill, K. N., "Convective Heat-Mass Transfer in the Entrance Region of a Concentric Annulus Having a Rotating Inner Cylinder," *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 11, No. 2, pp. 120- 128, June 1990.