# بررسی عددی اثر ساختار نازلهای تزریق کننده گاز جهت افزایش راندمان جدایش انرژی در لوله گردابهای

سید احسان رفیعی دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران محمد باقر محمد صادقی آزاد\* استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ایران

#### چکیدہ

در مقاله حاضر با استفاده از شبیه سازی و تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی، به بررسی تأثیر شکل هندسی نازلهای مارپیچ بر روی عملکرد دستگاه لوله گردابهای پرداخته شده است. جهت حل معادلات میدان جریان از مدل تلاطمی ٤-k استفاده شده است و هندسه مدل نیز ثابت در نظر گرفته شده است. هدف اصلی دست یابی به مینیمم دمای خروجی سرد و بیشینه سرعت چرخشی در لوله گردابهای می،اشد. در این مقاله، دستگاه با سه مجموعه نازل شامل ۳ نازل مستقیم، ۶ نازل مستقیم و ۳ نازل مارپیچ تجهیز شده است. نتایج حاکی از ایجاد دمای سرد پایین تر برای لوله گردابهای با ۳ نازل مار ۳ نازل می،اشد. همچنین این نوع نازل باعث ایجاد سرعت چرخشی بالاتری در داخل دستگاه خصوصاً در محفظه چرخش می شود. **واژه های کلیدی:** لوله گردابهای؛ نازل مارپیچ، جدایش انرژی؛ شبیه سازی عددی.

## Numerical Investigation on the Effect of Injector Nozzles Morphology for Improving Energy Separation in Vortex Tube

#### S. E. Rafiee M. B. M. Sadeghiazad

Department of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran Department of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

#### Abstract

In this paper, the effect of helical nozzles morphology on the vortex tube performance is analyzed using simulations and computational fluid dynamics method. The k-epsilon turbulence model is used to solve the flow field equations, also, the model geometry is considered as a fixed structure. The main goal is to achieve the minimum cold outlet temperature and maximum rotational speed in the vortex tube. In this paper, the machine is equipped with three sets of nozzles including 3 straight nozzles, 6 straight nozzles and 3 helical nozzles. The results indicate a lower cold temperature for a vortex tube with 3 helical nozzles than the other two models. Also, this type of nozzle generates a higher rotational speed inside the vortex tube, especially in the vortex chamber.

Keywords: Vortex tube; Helical nozzle; Energy separation; Numerical simulation.

ای را به صورت تحلیلی مطالعه کردند. کرماچی[۱۴]، آخسمه [۱۵]،

برامو و یورمحمود [۱۶] نیز تأثیر پارامترهای هندسی را به صورت

عددی بررسی کردند. تا کنون تئوری رضایت بخشی برای توضیح این پدیده ارائه نشده است. برخی از محققان جدایش انرژی را به انتقال کار

### ۱– مقدمه

لوله گردابهای دستگاهی است با هندسه ساده، بدون هیچ قسمت متحرکی که قادر است جریان فشار بالا را به دو جریان گرم و سرد تفکیک کند. این پدیده اولین بار توسط رانکیو[۱] گزارش شد. بعداً هیلش [۲] این اثر را با جزئیات بیشتری توصیف کرد. طبق مطالعه آن-ها زمانی که گاز متراکم از نازلهای مماسی به داخل لوله گردابهای تزریق می شود، یک میدان چرخشی قوی ایجاد می گردد. این چرخش در ناحیهی ورودی باعث توزیع فشار در جهت شعاعی جریان می شود که در نتیجه یک گردابه آزاد در ناحیه جریان گرم محیطی و یک گردابه اجباری در ناحیه جریان سرد داخلی تولید می شود. شکل (۱) نوه عملکرد یک لوله گردابهای را همراه با اجزای آن نشان می دهد. [۶]و اسکای [۷] بررسیهای آزمایشگاهی مهمی را در رابطه با لوله پردابهای انجام دادند. فلتون [۸] توصیفات تحلیلی جدایش انرژی و پروفیل سرعت و دما در لوله گردابهای را ارائه کرد. دایسلر[۹]، یونگ

همراه با تراکم و انبساط نسبت میدهند و برخی دیگر تأثیر گردابههای تلاطمی را مطرح کردهاند. چرخش ثانویه به عنوان عامل دیگری در جدایش انرژی بیان شد. در بررسیهای قبلی که در مورد تأثیر شکل و تعداد نازل تزریق گاز بر روی عملکرد دستگاه انجام شده است، به صورت تخصصی شکل نازل بررسی نشده است و تکیه اصلی روی تعداد نازل ورودی بوده است. از جمله می توان به کرماچی و اولیور [۱۷]، شمس الدینی و حسین نژاد [۱۸] و بهارا [۱۹] اشاره نمود. موارد اشاره شده تنها دمای خروجی های سرد و گرم را به عنوان پارامتر در نظر می گرفتند. ولی در این مقاله سعی بر این است با مطالعه پارامترهای اضافی از جمله اندازه سرعت چرخشی به بررسی موضوع پرداخته شود.

<sup>®</sup> نويسنده مكاتبه كننده، آدرس پست الكترونيكى: m.sadeghiazad@uut.ac.ir تاريخ دريافت: ۹۶/۰ ۲/۲۹ تاريخ پذيرش: ۷۲/۱ ۲/۲۷



## ۲- مدل عددی و معادلات حاکم

مدل عددی مورد بررسی از روی مدل آزمایشگاهی اسکای [۷] ساخته شده است. این مدل مجهز به ۶ نازل مستقیم ورودی هوا، یک خروجی گرم و یک خروجی سرد می باشد. در این مقاله علاوه بر مدل اسکای [۷]، دو مدل دیگر نیز که با ۳ نازل مستقیم و سه نازل مارپیچ تجهیز شدهاند، بررسی میشود. در شکل ۲، شبکه بندی مساله برای هر سه مدل بررسی شده، نشان داده شده است. همچنین ابعاد هندسی دقیق مربوط به لوله گردابهای مدل شده در جدول ۱ ارائه شده است. این ابعاد برای هر سه مدل ثابت در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- ساختارهای مورد استفاده در تحقیق (الف) ۶ نازل مستقیم (ب) سه نازل مستقیم (ج) سه نازل مارپیچ

مدل عددی لوله گردابهای مدل شده، با استفاده از بسته نرمافزاری Fluent شبیه سازی شده است و معادلات بنیادی با استفاده از کد این برنامه در یک میدان سه بعدی تراکم پذیر و تلاطمی حل گردیدهاند. با توجه به اینکه جریان در لوله گردابهای به شدت مغشوش میباشد، برای مدل سازی عددی جریان تراکم پذیر در لوله گردابهای، علاوه بر معادلات بقای جرم، مومنتم، انرژی و معادله حالت گاز بایستی یک مدل تلاطمی نیز برای ایجاد اثر اغتشاش به کار رود.

جدول۱- ابعاد هندسی لوله گردابهای مدل شده

مقدار	پارامتر		
۱۰۶ mm	طول لوله		
۱۱/۴ mm	قطر لوله		
۰/۹۷mm	عمق نازل		
۱/۴۱ mm	پهنای نازل		
۸/۲ mm²	سطح مقطح کلی ورودی نازل		
۶/۲mm	قطر خروجی سرد		
۱۱ mm	قطر خروجی گرم		

معادلات سه بعدی میدان جریان برای بقای جرم، بقای ممنتم، معادله انرژی و معادله حالت به صورت زیر هستند:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_{u_j}) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_{j}}(\rho \boldsymbol{\mu}_{i}\boldsymbol{\mu}_{j}) = -\frac{\partial p}{\partial \mathbf{x}_{i}} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_{j}} \left[ \boldsymbol{\mu} \left( \frac{\partial \boldsymbol{\mu}_{i}}{\partial \mathbf{x}_{j}} + \frac{\partial \boldsymbol{\mu}_{j}}{\partial \mathbf{x}_{i}} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \boldsymbol{\mu}_{k}}{\partial \mathbf{x}_{k}} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_{i}} \left( -\frac{\partial \boldsymbol{\mu}_{i} \boldsymbol{\mu}_{i}}{\partial \mathbf{x}_{i}} \right)$$
(Y)

$$\partial \chi_{j} \left( Y + Y \right)^{p} = K + \frac{c_{p} \mu_{t}}{\Pr_{t}} \frac{\partial}{\partial \chi_{i}} \left[ u_{i} \rho \left( h + \frac{1}{2} u_{j} u_{j} \right) \right] = \frac{\partial}{\partial \chi_{i}} \left[ k_{eff} \frac{\partial T}{\partial \chi_{i}} + u_{i}(\tau_{ij})_{eff} \right]$$

$$P = \rho R T$$
 (\*

(٣)

علاوه بر معادلات فوق، باید معادلات مربوط به مدل تلاطمی k-ε نیز همزمان حل شوند. این معادلات عبار تند از:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M$$
( $\Delta$ )

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial \chi_{i}}(\rho k \mu_{i}) = \frac{\partial}{\partial \chi_{j}}[(\mu + \frac{\mu_{i}}{\sigma_{\varepsilon}})\frac{\partial \varepsilon}{\partial \chi_{j}}] + C_{i\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_{k} + C_{3\varepsilon}G_{b}) - C_{i\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^{2}}{k}$$
(§)

که در این معادلات  $G_k$  نشان دهنده تولید انرژی جنبشی تلاطمی به علت گرادیان سرعت میانگین،  $G_b$  نشان دهنده تولید انرژی جنبشی تلاطمی در اثر نیروی شناوری و  $Y_M$  نشان دهنده سهم نوسانات سرعت در جریان آشفتهی تراکم پذیر میباشد.  $\sigma_k$  و  $\sigma_a$  نمایانگر عدد پرانتل تلاطمی به ترتیب برای A و  $\sigma$  می باشند.  $C_{16}$ ,  $C_{26}$   $C_1$  نیز ثابت می باشند که برابرند با:

 $C_{1\epsilon} = 1/44, C_{2\epsilon} = 1/92, C_{\mu} = 0/09, \sigma_k = 1/0, \sigma_{\epsilon} = 1/3$ لزجت تلاطمی ( $\mu_t$ ) نیز با توجه به مقادیر k و ع به ترتیب زیر محاسبه می گردد :

$$\mu_{i} = \rho C_{\mu} \frac{k^{2}}{\varepsilon} \tag{Y}$$

شرایط مرزی مساله بر اساس مدل تجربی اعمال می شود. بنابراین ورودی به صورت دبی جرمی ورودی ( $m_m$ ) ثابت با مقدار gr/s gr/s و دمای سکون  $\Lambda$  ۲۹۴/۲ K خروجی سرد با شرط مرزی فشار ثابت خروجی مطابق مدل تجربی برابر Tab ۸۲/۰در نظر گرفته شده است و خروجی گرم هم به صورت شرط مرزی فشار خروجی در نظر گرفته شده است و مقدار آن را تغییر می دهیم تا نسبت دبی خروجی مورد نظر از قسمت های سرد و گرم بدست آید. باید ذکر شود که جهت مقایسه درست، شرایط مرزی برای هر سه مدل یکسان در نظر گرفته میشود. همچنین به دلیل پریودیک بودن شکل لوله گردابهای، جهت کاهش حجم محاسبات و زمان اجرای برنامه، در مدل با ۶ نازل مستقیم،  $\gamma$  و در دو مدل دیگر  $\gamma$  از کل شکل را مدل می شود.

## ۳– بررسی مدلهای تلاطمی

مدل در نظر گرفته شده یک مدل سه بعدی چرخشی با تقارن محوری است که مدلهای تلاطمی ٤-k و k-æ و SST برای شبیه سازی آشفتگی جریان به کار گرفته شده است تا تأثیر انواع مدلهای تلاطمی در مدل سازی پدیده جدایش انرژی در جریان چرخشی و تراکم پذیر در لوله گردابهای قابل بررسی باشد. سعی بر مدل سازی مساله با مدلهای دیگر تلاطمی نظیر RNG k-٤ و RSM نیز شد که برای هندسه در نظر گرفته شده بکارگیری این مدلهای تلاطمی با

عدم همگرایی در میدان حل همراه بود. مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی عددی حاضر تطابق خوب مدل تلاطمی k-٤ را با نتایج آزمایشگاهی نشان میدهد. در اشکال۳و۴ جدایش دمایی به دست آمده با مدلهای مختلف تلاطمی با نتایج آزمایشگاهی اسکای [۷] مقایسه شده است. به طوری که تمامی مقایسات بین مدل و داده های تجربی بر اساس مقدار نسبت جرمی در خروجی سرد گزارش شده است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده، دمای محاسبه شده برای گاز خروجی گرم در اکثر مدل های تلاطمی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد در حالیکه نتایج به دست آمده برای دمای گاز خروجی سرد (شکل۴) با مدل k-E بهترین تطابق را با داده های تجربی نشان میدهد. بنابراین میتوان نتیجه گرفت که مدل تلاطمی k-٤ از دقت و توانایی بیشتری نسبت به سایر مدلهای تلاطمی در شبیه سازی جریان چرخشی در لوله گردابهای برخوردار است و می توان از این مدل برای طراحی و بهینه سازی عددی لوله گردابهای با دقت بسیار خوب استفاده کرد. در نسبت جرمی ۰/۳، کمترین جدایش دمایی در خروجی گرم مشاهده می شود. با افزایش نسبت جرمی در خروجی سرد، جدایش دمایی در ناحیه خروجی گرم با یک سیر صعودی افزایش مییابد به طوری که در نسبت جرمی ۰/۸۱ در خروجی سرد، دما در خروجی گرم تا ۳۶۵ لفزایش مییابد.



همانطور که مشاهده میشود دمای حاصل از مدل عددی در خروجی سرد در کمترین کسر جرمی سرد در حدود ۲۵۷<sup>°</sup>۲۵ میباشد که با افزایش در میزان نسبت جرمی در خروجی سرد تا ۲۰۱۳، دما در خروجی سرد تا ۲۵۰/۲ کاهش مییابد از این نقطه به بعد افزایش نسبت جرمی در خروجی سرد، با افزایش دما در این ناحیه همراه است.



شکل ۴- دمای خروجی سرد برای مدلهای مختلف تلاطمی

#### ۴- بررسی استقلال نتایج عددی از شبکه بندی

برای زدودن و کاهش هر گونه خطا به علت درشتی یا ابعاد نامناسب شبکه بندی میدان سیال و استقلال نتایج تحلیل از تأثیرات شبکه بندی مدل عددی، مدل سازی با تعداد شبکه بندی متفاوت برای بررسی تاثیر تعداد شبکه انجام گرفت. برای این کار، مدل لوله گردابهای با ۶ نازل مستقیم در نسبت جرمی سرد برابر ۲/۲ در نظر گرفته شد و یک پارامتر کلیدی مانند دما در خرجی سرد، معیار مقایسه قرار گرفت که با توجه به بررسی انجام شده، برای تعداد المان بیش از ۱۶۰۰۰۰ تغییر در نتایج بسیار اندک بوده و تأثیری نخواهد داشت. این نتایج در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵- استقلال از شبکه بندی بر مبنای حداقل دمای خروجی سرد

در نتیجه با توجه به پایداری و ثابت شدن تقریبی نتایج که استقلال نتایج تحلیل را از تأثیرات شبکه بندی نشان می دهد،برای کاهش زمان محاسبات از همان تعداد المان استفاده شده است. همچنین برای بررسی مدلهای دیگر که با تغییر در تعداد و نوع نازل مواجه هستند، سعی بر استفاده از المانهایی با حجم متوسط برای بررسی استقلال از شبکه بندی شده است.

## ۵- تأثير شكل نازل

بررسیهای انجام شده در زمینه شکل نازلها بیان میکنند که شکل نازل باید به گونهای باشد که هوا به صورت مماسی وارد لوله و محفظه چرخش شود تا بتواند سرعت چرخشی بالاتر و متعاقب آن انتقال ممنتوم به داخل لوله و میدان سیال بیشتر شود. بنابراین پیش بینی میشود که نازلهای مارپیچ این خواسته را برآورده کند. در اشکال (۶-الف)، (۶-ب) و (۶-ج) الگوی سرعت در محفظه چرخش که نازلها به آن متصل هستند و نزدیک خروجی سرد قرار دارد، نشان داده شده است. همانطور که پیداست مقدار بیشینه سرعت در داخل محفظه چرخش برای لوله گردابهای با ۳ نازل مارپیچ بیشتر از دو مدل دیگر است و از طرفی تقارن شعاعی این الگو نیز واضح تر میباشد. پس انتظار دمای سرد پایینتری از این مدل می رود.



شکل ۶- الگوی سرعت در محفظه چرخش (الف) برای ۶ نازل مستقیم (ب) برای سه نازل مستقیم (ج) برای ۳ نازل مارپیچ

در اشکال ۷-الف، ۷-ب و ۷-ج پروفیلهای شعاعی سرعت محوری برای مدلهای بررسی شده لوله گردابهای در مقاطع طولی مختلف مشاهده میگردد. این سرعتها در نسبت جرمی سرد ۰/۳ (حداکثر عملکرد سرمایشی) و در مقاطع طولی 7/0, 0/4, 0/7 عملکرد سرمایشی) و در مقاطع طولی محاسبه شدهاند.



لحل ۲ - پروفیل سفاعی سرعت محوری (آف) در ۵۰۱−۲ (ب) د Z/L=0.7 (ج) در Z/L=0.4

مشاهده می شود جهت سرعت محوری در ناحیه کنار دیواره لوله لوله گردابهای به سمت خروجی گرم و در ناحیه مرکزی در جهت خروجی سرد باشد. بیشینه سرعت محوری با پیشروی در طول لوله گردابهای به طرف خروجی گرم با افت زیاد بویژه در ناحیه محیطی مواجه می شود. همچنین محلی که در آن جریان تغییر جهت می دهد به سمت هسته مرکزی جریان نزدیک تر و از دیواره لوله دورتر می شود. برای لوله گردابهای با ۳ نازل مارپیچ مقادیر حداکثر سرعت محوری در مقاطع طولی ۲۰/۱، ۲/۱۰ و ۲/۱ به ترتیب برابر ۸۴/۲۶ ، ۲/۱۴ و ۱۸/۱۳ متر بر ثانیه بدست آمده است. پروفیلهای سرعت چرخشی یا مماسی

برای مدلهای بررسی شده در مقاطع طولی = V/۲, ۰/۴, ۰/۱Z/L و در نسبت جرمی سرد ۰/۳ در اشکال ۸-الف، ۸-ب و ۸-ج ارائه شدهاند.



شکل ۸- پروفیل شعاعی سرعت چرخشی (الف) برای ۶ نازل مستقیم (ب) برای سه نازل مستقیم (ج) برای ۳ نازل مارپیچ

با مقایسه اندازه سرعت های محوری و چرخشی، مشاهده می گردد که مقدار سرعت چرخشی بسیار بزگتر از سرعت محوری میباشد و بیشینه مقدار آن در نزدیکی دیواره لوله گردابهای ایجاد می شود که مقدار آن در جهت خروجی گرم کاهش مییابد. تغییرات سرعت چرخشی درجهت شعاعی وجود گردابههای آزاد را نشان می دهد. باید متذکر شد ضخامت نواحی که با رژیم گردابههای آزاد هدایت می شوند در میدان جریان بسیار کم است. بنابراین بیشتر جریان موجود در لوله گردابهای با رژیم گردابههای اجباری هدایت می شود که در این نواحی مقدار سرعت با شعاع رابطه مستقيم دارد. با مقايسه نمودارها ملاحظه می گردد که بیشترین سرعت چرخشی توسط مدل با سه نازل مارپیچ ایجاد می شود. جدول ۲ مقدار دمای خروجی های سرد و گرم را برای سه مدل بررسی شده نمایش میدهد. همانطور که مشخص است لوله گردابهای دارای ۳ نازل مارپیچ دمای سرد پایینتری دارد و از این رو سرمایش بیشتری ایجاد میکند. پس از آن مدل دارای ۶ نازل مستقیم قرار دارد. ولی در مورد خروجی گرم، ۶ نازل مستقیم دمای گرم بالاتری نسبت به دو مدل دیگر دارد. منتها از آنجا که لوله گردابهای عمدتاً جهت سرمایش استفاده می شود، ۳ نازل مارپیچ برتری نسبت به دو مدل دیگر دارد، بویژه اینکه تعداد نازلهای آن نیز کمتر میباشد. در نهایت مدل با ۶ نازل مستقیم اختلاف دمای کلی بیشتری بین خروجیهای سرد و گرم ایجاد کرده است.

جدول۲- تأثیر شکل و تعداد نازلها بر دمای خروجی

	دمای خروجی	دمای	اختلاف دمای
نوع نازل مدل	سرد (K)	خروجی گرم	کلی سرد و گرم
		(K)	(K)
۶ نازل مستقیم	70./14	311/2	۶١/۲۶
۳ نازل مستقیم	200/124	۳۰۴/۸۳۷	49/118
۳ نازل مارپیچ	749/084	۳ • ۹/۳ • ۲	۶۰/۲۶۸

شکل ۹ مربوط به کانتور توزیع دمای کل در سرتاسر لوله برای مدل ۳ مارپیچی میباشد. بیشینه مقادیر برای دمای کل، در نزدیکی دیواره لوله گردابهای ملاحظه میگردد و در دیواره بعلت اعمال شرط عدم لغزش، دمای کل با کاهش مواجه است. از روی پروفیل سرعت چرخشی نیز میتوان دید که در هسته مرکزی لوله گردابهای سرعت پرخشی بسیار کم و قابل صرف نظر کردن است، لذا با مقایسه همزمان نمودارهای سرعت چرخشی و پروفیل دمای کل میتوان دید که ناحیه با دمای پایین یا سرد منطبق بر ناحیه با سرعت چرخشی بسیار پایین یا همان هسته مرکزی لوله گردابهای میباشد. همچنین در این شکل افزایش دما در جهت شعاعی و به طرف دیواره لوله گردابهای دیده می-شود.



کانتور دمای کل برای لوله گردابهای با ۳ نازل مارپیچ در نسبت جرمی سرد ۲/۳ نشان دهنده حداکثر دمای خروجی گاز گرم برابر با ۳۰۹ کلوین و حداقل دمای گاز سرد برابر ۲۴۹ کلوین می باشد. تغییرات دمای کل نشان می دهد کاهش گرادیان دمای کل در نواحی نزدیک به خروجی گرم می باشد. در شکل ۲۰ خطوط مسیر المان هایی از سیال در نسبت جرمی سرد ۲/۳ بر حسب دمای کل المان ها مشاهده می شود. این شکل شماتیک کلی از حرکت المان های سیال در داخل لوله گردابه ای با ۳ نازل مارپیچ را در تراکم کمتری ارائه می دهد.



شکل ۱۰- خطوط مسیر برای المانهایی از سیال بر حسب دمای کل برای لوله گردابهای با ۳ نازل مارپیچ

در این شکل المانهای پیرامونی(محیطی) با حرکت به انتهای گرم با دریافت انرژی از المانهای مرکزی، به دمای بالاتری میرسند. در-حالیکه المانهای سیال در ناحیه مرکزی انرژی خود را از دست داده و به المانهای پیرامونی انتقال میدهند. این مساله در اثر تبدیل انرژی جنبشی ذرات سیال به انرژی گرمایی به خاطر وجود تنش برشی اصطکاکی که ناشی از اثر لزجت سیال است، رخ میدهد.

## ۶- نتیجه گیری

در این مطالعه با استفاده از نرم افزار Fluent و روش حجم محدود به مدل سازی پدیده جدایش انرژی در لوله گردابهای پرداخته شد. باید اشاره کرد که پارامترهای زیادی در عملکرد سیستم لوله گردابهای تأثیر گذار هستند که ایجاد تغییر در هر کدام می تواند منجر به تغییر در میزان جدایش انرژی و الگوی جریان در این وسیله شود. نسبت جرمی در خروجی سرد، شکل و تعداد نازل ورودی، قطر خروجی سرد و نسبت طول به قطر لوله گردابهای از این قبیل پارامترها به حساب میآیند که نقش بهسزایی در پدیدهی جدایش انرژی در لوله گردابهای ایفا می-کنند. هدف این مقاله بررسی و مطالعه یکی از این پارامترها یعنی مقایسه عملکرد نازلهای تزریق گاز مارپیچی و مستقیم بود. حل عددی با تطابق با نتایج آزمایشگاهی اعتبار دهی اولیه شد. بررسی ها برای طراحی شکل نازل جهت افزایش تولید چرخش و کاهش دمای خروجی سرد (افزایش میزان سرمایش) انجام شد. نتیجه حاکی از این است که نازلهای مارپیچ به خاطر شکل هندسی مخصوصشان، مؤلفه چرخشی سرعت را افزایش میدهد. این امر سبب افزایش میزان آهنگ انتقال ممنتوم در داخل لوله گردابهای و در نتیجه افزایش آهنگ سرمایش می شود. همچنین این نوع نازل باعث افزایش تقارن شعاعی جریان در داخل محفظه چرخش می شود. در مطالعات انجام شده، نشان داده شد که مدل تلاطمی k-ɛ بهتر از سایر مدلها می تواند اغتشاش در جریان را مدل کند و نتایج حاصل از آن تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. نسبت جرمی جریان سرد کلیدیترین پارامتر در کنترل دمای جریانهای خروجی سرد و گرم میباشد. برای مقاصد سرمایشی استفاده از نسبتهای جرمی سرد حدود ۰/۳ باعث جدایش بالاتری در خروجی سرد خواهد شد و برای مقاصد گرمایشی توصیه می گردد از نسبت جرمی سرد حدود ۰/۸ استفاده گردد. طبق نتایج حاصله از این مقاله، نازلهای تزریق مارپیچ باعث کاهش دمای خروجی سرد یا همان افزایش آهنگ سرمایش می گردد حتی زمانی که از تعداد کمتری از این نازل ها استفاده شود.

#### ۷– نمادها

نرژی جنبشی اغتشاش، m²/s²
دبی جرمی ورودی، gr/s
طول لوله گردابهای ، mm
ناصله محوری از خروجی سرد، mm
${ m m}^2/{ m s}^3$ هنگ پخش اغتشاش، ${ m m}^2/{ m s}^3$
چگالی، kg/m <sup>3</sup>
نىش، N/m <sup>2</sup>
زجت دینامیکی، (kg/(m.s
زجت اغتشاشی، (kg/(m.s
$ m N/m^2$ نىش برشى، $ m N/m^2$
بؤلفه های تانسور تنش

## ۸- مراجع

 Ranque, G.J., Experiences Sur la Détente Giratoire Avec Simultanes d'un Echappement d'air Chaud et d'un Enchappement d'air Froid, *J. Phys.Radium*, Vol 4, pp. 112-114, 1933.

- [2] Hilsch, R., Die Expansion Von Gasen im Zentrifugalfeld als Kälteproze, Z. Naturforschung, Vol 1, pp. 208-214, 1946.
- [3] Elser, K., Hoch, M., 1951, Das Verhalten Verschiedener Gase und die Trennung von Gasgemischen in einem Wirbelrohr, Z. Naturf, 6a, pp. 25-31, 1951.
- [4] Martynovskii, V.S., Alekseev, V.P., Investigation of The Vortex Thermal Separation Effect For Gasses and Vapors, *Soviet Physics*, pp. 2233-2243, 1957.
- [5] Takahama, H., 1965, *Studies on Vortex Tube*, Bull. JSME, Vol. 8, pp. 433-440.
- [6] Bruun, H.H., Experimental Investigation of The Energy Separation in Vortex Tubes, *Journal of Mechanic Engineering Science*, Vol. 11, pp. 567-582, 1969.
- [7] Skye, H.M., Nellis, G.F., Klein, S.A., Comparison of CFD Analysis to Empirical Data in a Commercial Vortex Tube. *Int. J. Refrig.*, Vol. 29, pp. 71-80, 2006.
- [8] Fulton, C.D., Ranque's Tube, *J Refrig Eng.*, Vol. 5, pp. 473-479, 1950.
- [9] Deissler, R.G., Perlmutter, M., Analysis of The Flow and Energy Separation in a Vortex Tube, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 1, pp. 173-191, 1960.
- [10] Young, J., Mc Cutcheon, A.R.S, The Performance of Ranque-Hilsch Vortex Tube, *The Chemical Engineering*, pp. 522-528, 1973.
- [11] Ahlborn, B., Keller, J.U., Staudt, R., Treitz, G., Rebhan, E., Limits of Temperature Separation in a Vortex Tube, *Journal* of *Physics D: Appl. Phys.*, Vol. 27, pp. 480-488, 1994.
- [12] Stephan, K., Lin, S., Drust, M., An Investigation of Energy Separation in a Vortex Tube, *International Journal of Heat Transfer*, Vol. 3, pp. 341-348, 1993.
- [13] Stephan, K., Lin, S., Drust, M., Seher, D., A Similarity Relation For Energy Separation in a Vortex Tub, *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 6, pp. 911-920, 1984.
- [14] Kirmaci V., Optimization of Counter Flow Ranque-Hilsch Vortex Tube Performance Using Taguchi Method, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 32, pp. 1487-1494, 2009.
- [15] Akhesmeh, S., Pourmahmoud, N., Sedgi, H., Numerical Study of The Temperature Separation in The Ranque-Hilsch Vortex Tube, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 3, pp. 181-187, 2008.
- [16] Bramo, A.R., Pourmahmoud, N., A Numerical Study on The Effect of Length to Diameter Ratio and Stagnation Point on The Performance of Counter Flow Vortex Tube, *Aust. J. Basic & Appl. Sci.*, Vol. 4, pp. 4943-4957, 2010.
- [17] Kirmaci, V., Uluer, O., An Experimental Investigation of The Cold Mass Fraction, Nozzle Number, and Inlet Pressure Effects on Performance of Counter Flow Vortex Tube, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 131, pp. 603-609, 2009.
- [18] Shamsoddini, R., Hossein Nezhad, A., Numerical Analysis of The Effects of Nozzles Number on The Flow and Power of Cooling of a Vortex Tube, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 33, pp. 774-782, 2010.
- [19] Behera, U., et al., CFD Analysis and Experimental Investigations Towards Optimizing The Parameters of Ranque-Hilsch Vortex Tube, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp. 1961-1973, 2005.