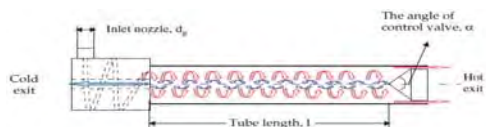


شبیه سازی عددی تأثیر گازهای ورودی مختلف بر عملکرد برودتی دستگاه ورتکس تیوب

فرزاد شیری، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، shiri.farzad64@gmail.com

سید محمود ابوالحسن علوی، استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، m_a_alavi2002@yahoo.com



شکل ۱: اجزای ورتکس تیوب و نحوه عملکرد آن

چکیده

در این مطالعه با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی^۱، به بررسی تأثیر گازهای مختلف بر عملکرد ورتکس تیوب و جدایش انرژی در آن پرداخته شده است. در این راستا با تمرکز بر روی پارامتر جدایش دمایی خروجی سرد به بررسی عملکرد ورتکس تیوب، به عنوان یک دستگاه ساده که بدون داشتن قطعات متحرک، قادر به تولید برودت است، پرداخته شده است. برای این منظور یک مدل خاص ورتکس تیوب به صورت سه بعدی مدل سازی شده، سپس معادلات بنیادی میدان جریان بوسیله کد استاندارد نرم افزار فلوننت و با یک مدل تراکم پذیر و توربولانس با مدل استاندارد $k-\epsilon$ حل گردیده اند. نتایج عددی بدست آمده با نتایج تجربی موجود اعتباردهی اولیه قرار گرفت که تطابق قابل قبولی بین آنها وجود داشت. با توجه به نتایج مشاهده می شود که حداکثر عملکرد سرمایشی در نسبت جرمی سرد ۰/۳ روی می دهد، سپس به بررسی تأثیر نوع گاز بر عملکرد ورتکس تیوب در نسبتهای جرمی سرد مختلف پرداخته شد. در این مطالعه از گازهایی مثل هوا، نیتروژن، اکسیژن، دی اکسید کربن و دی اکسید نیتروژن استفاده شد، مشاهده می شود که در شرایط کاریکساندی اکسید نیتروژن عملکرد سرمایشی بهتری را نسبت به سایر گازها دارد.

کلمات کلیدی: ورتکس تیوب، شبیه سازی عددی، جدایش دمایی، نوع گاز

مقدمه

ور تکس تیوب 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 آنها زمانی که گاز متراکم از نازل های مماسی به داخل ورتکس تیوب تزریق می شود، یک میدان چرخشی قوی ایجاد می گردد. این چرخش در ناحیه 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) نحوه عملکرد یک ورتکس تیوب را همراه با اجزای آن نشان می دهد. پس از آنها السر [۳]، مارتوفسکی و الکسیف [۴]، تاکاهاما [۵]، بران [۶] و فلتنون [۷] توصیفات تحلیلی جدایش انرژی و پروفیل سرعت و دما در ورتکس تیوب را ارائه کردند. در سال ۲۰۰۱، ورتکس تیوب به عنوان سیستم جداساز گاز CO_2 توسط راترمن و همکاران [۸] استفاده شد. اسکای و همکاران [۹] بررسی های آزمایشگاهی مهمی را در رابطه با ورتکس تیوب انجام دادند.

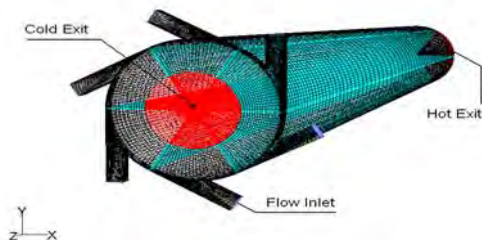
دایسلر [۱۰]، یونگ [۱۱]، آلبرن [۱۲] و استفان [۱۳، ۱۴] جدایش انرژی در ورتکس تیوب را به صورت تحلیلی مطالعه کردند. کرمچی [۱۵]، آخسه و همکاران [۱۶]، برامو و پور محمود [۱۷] نیز تأثیر پارامترهای هندسی را به صورت عددی بررسی کردند. تا کنون تئوری رضایت بخشی برای توضیح این پدیده ارائه نشده است. برخی از محققان جدایش انرژی را به انتقال کار همراه با تراکم و انبساط نسبت می دهند و برخی دیگر تأثیر گردابه های توربولانس را مطرح کرده اند. چرخش ثانویه ب ه عنوان عامل دیگری در جدایش انرژی بیان شد.

در ۲۰۰۲، کولکاری و سردسای [۱۸] برای غلیظ کردن گاز متان از آن استفاده نمودند. در سال ۲۰۰۴، گاز طبیعی توسط پوشرنف و خودرکوف [۱۹] به عنوان سیال عامل استفاده شد و از طریق ورتکس تیوب تبدیل به مایع شد.

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 اثر گازهای مختلفه بررسی موضوع پرداخته شود.

مدل عددی و معادلات حاکم

مدل عددی مورد بررسی از روی مدل آزمایشگاهی اسکای [۹] ساخته شده است. این مدل مجهز به ۶ نازل مستقیم ورودی هوا، یک خروجی گرم و یک خروجی سرد می باشد. در شکل (۲)، شبکه بندی مساله برای مدل بررسی شده، نشان داده شده است. همچنین ابعاد هندسی دقیق مربوط به ورتکس تیوب مدل شده در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۲: ورتکس تیوب با ۶ نازل مستقیم

^۱CFD

توربولانس به ترتیب برای k و ϵ می باشند. $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ و C_μ نیز ثابت می باشند که برابرند با:

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

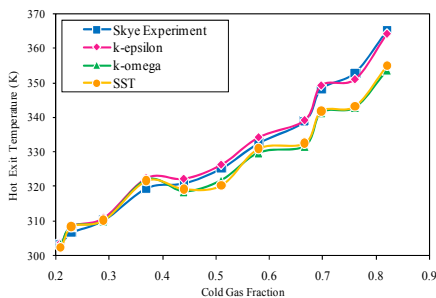
ویسکوزیته توربولانس (μ_t) نیز با توجه به مقادیر k و ϵ به ترتیب زیر محاسبه می گردد:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

شرایط مرزی مسأله بر اساس مدل تجربی اعمال می شود. بنابراین ورودی را به صورت دبی جرمی ورودی (\dot{m}_{in}) ثابت با مقدار 8.34 gr/s و دمای سکون ۲۹۴،۲ کلوین، خروجی سرد را شرط مرزی فشار ثابت خروجی مطابق مدل تجربی برابر 0.15 bar در نظر می گیریم. خروجی گرم را هم به صورت شرط مرزی فشار خروجی در نظر می گیریم و مقدار آن را تغییر می دهیم تا نسبت دبی خروجی مورد نظر از قسمت های سرد و گرم به دست آید. همچنین به دلیل پیرویدیک بودن شکل ورتکس تیوب، جهت کاهش حجم محاسبات و زمان اجرای برنامه، در مدل با ۶ نازل مستقیم، $\frac{1}{6}$ کل شکل را مدل می کنیم .

بررسی مدل های توربولانس

مدل در نظر گرفته شده یک مدل سه بعدی چرخشی با تقارن محوری است که مدل های توربولانس $k-\epsilon$ و $k-\omega$ و SST برای شبیه سازی آشفتگی جریان به کار گرفته شده است تا تأثیر انواع مدل های توربولانس در مدل سازی پدیده جدایش انرژی در جریان چرخشی و تراکم پذیر در ورتکس تیوب قابل بررسی باشد. سعی بر مدل سازی مساله با مدل های دیگر توربولانس نظیر $k-\epsilon$ و RSM^۲ و RNG نیز شد که برای هندسه در نظر گرفته شده بکارگیری این مدل های توربولانس با عدم همگرایی در میدان حل همراه بود. مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی عددی حاضر تطابق خوب مدل توربولانس $k-\epsilon$ را با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد. در اشکال (۳-۴) جدایش دمایی به دست آمده با مدل های مختلف توربولانس با نتایج آزمایشگاهی اسکای [۹] مقایسه شده است. به طوری که تمامی مقایسات بین مدل و داده های تجربی بر اساس مقدار نسبت جرمی در خروجی سرد^۴ گزارش شده است.



شکل ۳: دمای خروجی گرم برای مدل های مختلف توربولانس

مدل عددی ورتکس تیوب مدل شده، با استفاده از بسته نرم افزاری فلوئنت^۱ شبیه سازی شده است و معادلات بنیادی با استفاده از کد این برنامه در یک میدان سه بعدی تراکم پذیر و توربولانس حل گردیده اند.

جدول (۱) ابعاد هندسی ورتکس تیوب مدل شده	
پارامتر	مقدار
طول لوله	۱۰۶ mm
قطر لوله	۱۱،۴ mm
عمق نازل	۰،۹۷mm
پهنای نازل	۱،۴۱ mm
سطح مقطع کلی ورودی نازل	۸،۲mm ²
قطر خروجی سرد	۶،۲ mm
قطر خروجی گرم	۱۱mm

با توجه به اینکه جریان در ورتکس تیوب به شدت مغشوش می باشد، برای مدل سازی عددی جریان تراکم پذیر در ورتکس تیوب، علاوه بر معادلات بقای جرم، مومنتم، انرژی و معادله حالت گاز بایستی یک مدل توربولانس نیز برای ایجاد اثر اغتشاش به کار رود. معادلات سه بعدی میدان جریان برای بقای جرم، بقای مومنتم، معادله انرژی و معادله حالت به صورت زیر هستند:

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

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u_i' u_j'}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_i \rho \left(h + \frac{1}{2} u_j u_j \right) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (3)$$

$$k_{eff} = K + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \quad (4)$$

$$P = \rho RT$$

علاوه بر معادلات فوق، باید معادلات مربوط به مدل توربولانس $k-\epsilon$ نیز همزمان حل شوند. این معادلات عبارتند از:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

که در این معادلات G_k نشان دهنده تولید انرژی جنبشی توربولانس به علت گرادیان سرعت میانگین، G_b نشان دهنده تولید انرژی جنبشی توربولانس در اثر نیروی شناوری و Y_M نشان دهنده سهم نوسانات سرعت در جریان آشفتگی تراکم پذیر می باشد. σ_k و σ_ϵ نمایانگر عدد پرانتل

²Renormalization group $k - \epsilon$ Model

³Reynolds Stress Model Model

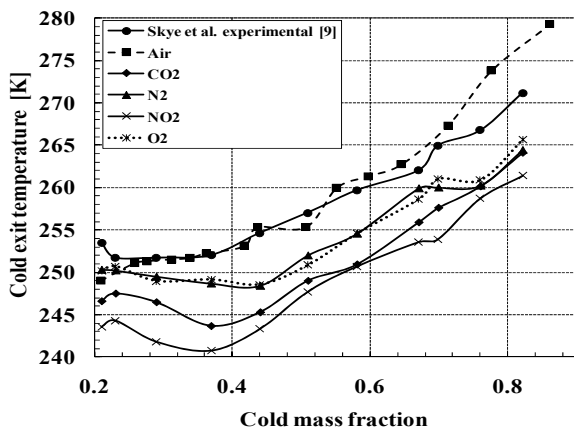
⁴Cold mass fraction

¹Fluent

در نتیجه با توجه به پایداری و ثابت شدن تقریبی نتایج که استقلال نتایج تحلیل را از تأثیرات مش بندی نشان می‌دهد، برای کاهش زمان محاسبات از همان تعداد المان استفاده شده است.

بررسی عملکرد دستگاه ورتکس تیوب با بکارگیری گازهای مختلف
در این بخش به بررسی عملکرد سیستم تحت بکارگیری گازهای مختلف می‌پردازیم. یکی از راه‌ها برای بدست آوردن دمای پایین‌تر در خروجی سرد استفاده از گازهای مختلف است چراکه خواص مختلف ترموفیزیکی گازها باعث بوجود آمدن شرایط متفاوتی در عملکرد ورتکس تیوب می‌شود. بدین منظور در این بخش پنج گاز مختلف به صورت گسترده در تمامی نسبت‌های هوای سرد بکار برده شده و نتایج خروجی به منظور تحلیل شرایط بهینه مورد بررسی قرار گرفته است. گازهای بکار گرفته شده عبارتند از: Air یا هوا، O₂ یا اکسیژن، N₂ یا نیتروژن، NO₂ یا دی‌اکسیدنیتروژن و CO₂ یا دی‌اکسیدکربن.

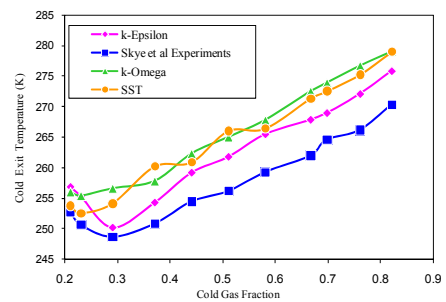
تطابق خوب کار عددی ارائه شده در بخش بررسی مدل‌های توربولانس نشان داده شد. شکل ۶ بیانگر پیشبینی ارائه شده از بکارگیری گازهای مختلف است. با توجه به این نمودار، دی‌اکسید نیتروژن با تولید دمای ۲۴۰٫۳۷K در نسبت جرمی خروجی سرد 0.37 بهترین شرایط را عرضه می‌کند.



شکل ۶: توزیع دمای خروجی سرد بر حسب نسبت خروجی هوای سرد برای گازهای مختلف ورودی

با توجه به اینکه بکارگیری هوا در این نسبت جرمی منجر به تولید هوای سرد با دمای ۲۵۲ کلوین می‌شود لذا بکارگیری دی‌اکسید نیتروژن حدود ۱۲ کلوین باعث بهبود دمای سرد خروجی می‌شود. اگر اختلاف دمای گاز ورودی و گاز خروجی سرد را مبنای عملکرد قرار دهیم بکارگیری دی‌اکسید نیتروژن ۲۸٪ عملکرد سیستم را نسبت به هوا بهبود می‌بخشد.

شکل ۷ بیانگر توزیع دمای گرم خروجی از ورتکس تیوب است بر حسب نسبت‌های جرمی مختلف. همانطوری که این شکل نشان می‌دهد تفاوت دمایی زیادی بین گازهای مختلف وجود ندارد. لذا بکاربردن ورتکس تیوب به عنوان یک دستگاه گرم‌کننده با گازی که به لحاظ اقتصادی به صرفه تر باشد توصیه می‌شود.

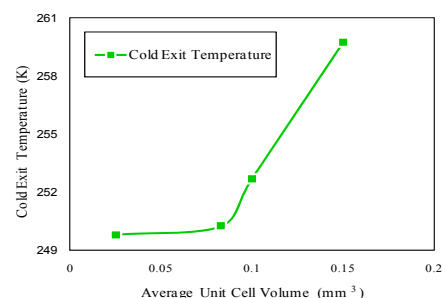


شکل ۴: دمای خروجی سرد برای مدل‌های مختلف توربولانس

همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده، دمای محاسبه شده برای گاز خروجی گرم در اکثر مدل‌های توربولانس تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد در حالیکه نتایج به دست آمده برای دمای گاز خروجی سرد (شکل (۴)) با مدل k-ε بهترین تطابق را با داده‌های تجربی نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل توربولانس k-ε از دقت و توانایی بیشتری نسبت به سایر مدل‌های توربولانس در شبیه‌سازی جریان چرخشی در ورتکس تیوب برخوردار است و می‌توان از این مدل برای طراحی و بهینه‌سازی عددی ورتکس تیوب با دقت بسیار خوب استفاده کرد. در نسبت جرمی ۰٫۲، کمترین جدایش دمایی در خروجی گرم مشاهده می‌شود. 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 کلوین افزایش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود دمای حاصل از مدل عددی در خروجی سرد در کمترین کسر جرمی سرد در حدود ۲۵۷ کلوین می‌باشد که با افزایش در میزان نسبت جرمی در خروجی سرد تا ۰٫۳، دما در خروجی سرد تا ۲۵۰ کلوین کاهش می‌یابد از این نقطه به بعد افزایش نسبت جرمی در خروجی سرد، با افزایش دما در این ناحیه همراه است.

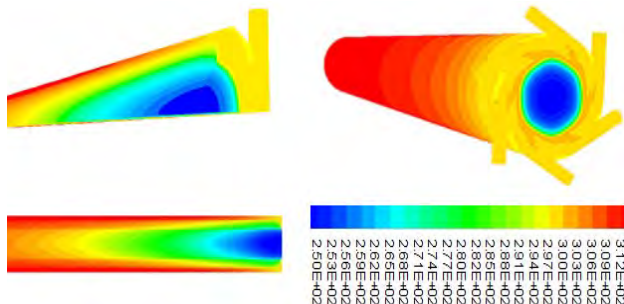
بررسی استقلال نتایج عددی از مش بندی

برای زدودن و کاهش هر گونه خطا به علت درشتی یا ابعاد نامناسب مش بندی میدان سیال و استقلال نتایج تحلیل از تأثیرات مش بندی مدل عددی، مدل‌سازی با تعداد مش بندی متفاوت برای بررسی تأثیر تعداد مشها انجام گرفت. برای این کار، مدل ورتکس تیوب با هوا در نسبت جرمی سرد برابر ۰٫۳ در نظر گرفته شد و یک پارامتر کلیدی مانند دما در خروجی سرد، معیار مقایسه قرار گرفت که با توجه به بررسی انجام شده، برای تعداد المان بیش از ۱۶۰۰۰ تغییر در نتایج بسیار اندک بوده و تأثیری نخواهد داشت. این نتایج در شکل (۵) نمایش داده شده است.



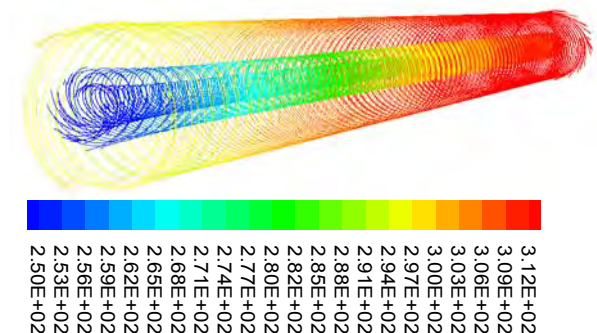
شکل ۵: مطالعه استقلال از مش بندی بر مبنای حداقل دمای خروجی سرد

شکل ۸ نحوه توزیع دمای کل در سرتاسر لوله برای مدل با هوا می‌باشد. ماکزیمم مقادیر برای دمای کل، در نزدیکی دیواره ورتکس تیوب ملاحظه می‌گردد و در دیواره به علت اعمال شرط عدم لغزش، دمای کل با کاهش مواجه است. در هسته مرکزی لوله دما نسبت به دیواره پایین تر می‌باشد و با حرکت جریان سیال از خروجی گرم به سمت سرد، کاهش تدریجی دما را داریم. همچنین در این شکل افزایش دما در جهت شعاعی و به طرف دیواره ورتکس تیوب دیده می‌شود.

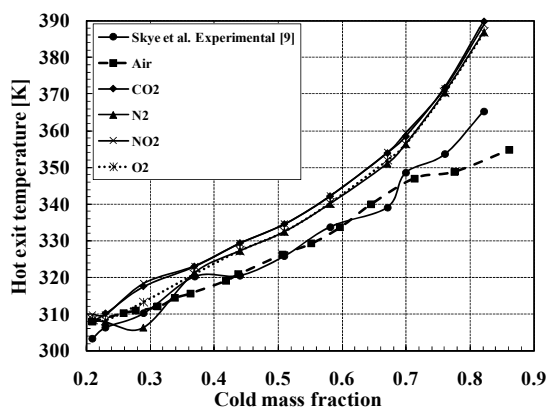


شکل ۸: توزیع دمای کل در سرتاسر ورتکس تیوب

کانتور دمای کل برای ورتکس تیوب در نسبت جرمی سرد ۰,۳ نشان - دهنده حداکثر دمای خروجی گاز گرم برابر با ۳۱۱,۵ کلوین و حداقل دمای گاز سرد برابر ۲۵۰,۲۴ کلوین می‌باشد. تغییرات دمای کل نشان می‌دهد کاهش گرادیان دمای کل در نواحی نزدیک به خروجی گرم می‌باشد. از طریق میدان سرعت محاسبه شده، خطوط مسیر برای المان هایی از سیال در کسر جرمی سرد ۰,۳ در مختصات سه بعدی در شکل ۹ نشان داده شده است. المان هایی از سیال که از خروجی سرد تخلیه می‌شوند با یک حرکت چرخشی به سمت انتهای ورتکس تیوب پیشروی می‌کند. بخشی از المان های سیال در طول اولیه ورتکس تیوب به سمت خروجی سرد حرکت می‌کنند و المان های دیگر سیال تا انتهای گرم ورتکس تیوب حرکت می‌کنند و در نزدیکی انتهای لوله جهت مسیر خود را تغییر داده و حرکت خود را به سمت خروجی سرد آغاز می‌کنند که در طی این مسیر با کاهش حرکت چرخشی همراه هستند. قسمتی دیگر از المان های سیال نیز پس از ورود به لوله ورتکس تیوب در ناحیه محیطی با یک حرکت چرخشی به سمت خروجی گرم جریان می‌یابند. مشاهده می‌شود که بر هم کنش بین جریان در خروجی گرم و خروجی سرد در فاصله ای قبل از خروجی گرم اتفاق می‌افتد. بنابراین عمده جدایش انرژی قبل از این نقطه ایجاد می‌شود. با توجه به خطوط مسیر به دست آمده به وضوح مشاهده می‌شود که در نسبت های جرمی پایین در خروجی سرد، برگشت جریان به انتهای سرد در نزدیکی انتهای گرم لوله صورت می‌پذیرد.



شکل ۱۰: خطوط مسیر برای سیال در ورتکس تیوب بر حسب دمای



شکل ۷: توزیع دمای خروجی گرم بر حسب نسبت خروجی هوای سرد برای گازهای مختلف ورودی

جدول ۲ نشان دهنده توزیع دمایی گازهای مختلف است. با توجه به اطلاعات این جدول هم در زمینه گرمایش و هم در زمینه سرمایش گاز دی اکسید نیتروژن بهترین عملکرد را دارد باداشتن بالاترین اختلاف دمایی سرد و گرم (۵۳,۱۲ کلوین و ۲۴,۱۳ کلوین). جدول ۳ برتری گازها را در تولید هوای سرد و گرم نشان می‌دهد. آنچه که به نظر می‌رسد در عملکرد گازهای مختلف جرم مولکولی اثر بسزایی دارد. بطوری که با افزایش این پارامتر عملکرد دمایی گاز بهتر می‌شود.

جدول ۲: توزیع دمایی گازهای مختلف در نسبت جرمی هوای سرد ۰,۳

نوع گاز	دمای خروجی سرد (K)	دمای خروجی گرم (K)	ΔT_c (K)	ΔT_h (K)	ΔT_t (K)
Air	250.24	311.5	43.96	17.3	61.26
CO ₂	246.48	317.5	47.72	23.3	71.02
N ₂	249.48	306.42	44.72	12.22	56.94
NO ₂	241.08	318.33	53.12	24.13	77.25
O ₂	248.95	313.28	45.25	19.08	64.33

جدول ۳: برتری گازها در تولید هوای سرد و گرم

ترتیب پیشنهادی استفاده از گازها جهت سرمایش	ترتیب پیشنهادی استفاده از گازها جهت گرمایش
NO ₂	NO ₂
CO ₂	CO ₂
O ₂	O ₂
N ₂	Air
Air	N ₂

سیال گازی کاری جهت کاهش دمای خروجی سرد (افزایش میزان سرمایش) انجام شد. برای ورتکس تیوب بررسی شده در این مقاله، جهت مقاصد سرمایشی و گرمایشی استفاده از گاز NO₂ توصیه می گردد. نسبت جرمی جریان سرد کلیدی ترین پارامتر در کنترل دمای جریانهای خروجی سرد و گرم می باشد. برای مقاصد سرمایشی استفاده از نسبت های 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.

فهرست علائم

K	انرژی جنبشی اغتشاش، m ² /s ²
\dot{m}_{in}	دبی جرمی ورودی، gr/s
L	طول ورتکس تیوب، mm
Z	فاصله محوری از خروجی سرد، mm
ϵ	نرخ پخش اغتشاش، m ² /s ³
ρ	چگالی، kg/m ³
σ	تنش، N/m ²
μ	لزجت دینامیکی، kg/(m.s)
μ_t	لزجت اغتشاشی، kg/(m.s)
τ	تنش برشی، N/m ²
τ_{ij}	مؤلفه های تانسور تنش

مراجع

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

[2] Hilsch, R., "Die Expansion Von Gasen im Zentrifugalfeld als Kälteproze", *Z. Naturforschung*, Vol. 1, 1946, pp. 208-214.

[3] Elser, K., Hoch, M., "Das Verhalten Verschiedener Gase und die Trennung von Gasgemischen in einem Wirbelrohr", *Z. Naturf.*, Vol. 6a, 1951, pp. 25-31.

[4] Martynovskii, V.S., Alekseev, V.P., "Investigation of The Vortex Thermal Separation Effect For Gasses and Vapors", *Soviet Physics*, 1957, pp. 2233-2243.

[5] Takahama, H., "Studies on Vortex Tube", *Bull. JSME*, Vol. 8, 1965, pp. 433-440.

[6] Bruun, H.H., "Experimental Investigation of The Energy Separation in Vortex Tubes", *Journal of Mechanic Engineering Science*, Vol. 11, 1969, pp. 567-582.

[7] Fulton, C.D., "Ranque's Tube", *J Refrig Eng.* 5, 1950, pp. 473-479.

[8] Raterman, K.T. Mckellar, M.A. Podgomey, Stacey, D. and Turner, T. "A vortex contactor for carbon dioxide separations". In: First National Conference on Carbon Sequestration, May, 2001 U.S.A. National Energy Technology Laboratory.

[9] 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, 2006, pp. 71-80

[10] Deissler, R.G., Perlmutter, M., "Analysis of The Flow and Energy Separation in a Vortex Tube", *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 1, 1960, pp. 173-191.

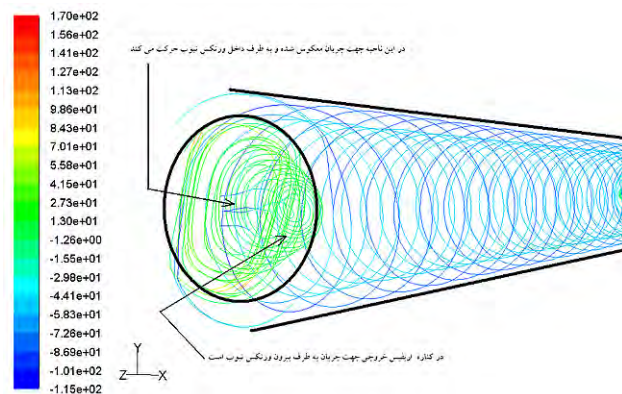
[11] Young, J., Mc Cutcheon, A.R.S., "The Performance of Ranque-Hilsch Vortex Tube", *The Chemical Engineering*, 1973, pp. 522-528.

[12] Ahlborn, B., Keller, J.U., Staudt, R., Treitz, G., Rebhan, E., "Limits of Temperature Separation in a

بحث پیرامون جریان برگشتی^۱

در خروجی سرد امکان بوجود آمدن جریان برگشتی به خصوص در نسبت های جرمی سرد پایین بسیار محتمل است. جریان برگشتی با ایجاد تغییر و دگرگون کردن الگوی جریان در نزدیکی خروجی سرد و به دلیل ایجاد اختلاط باعث افزایش دمای جریان خروجی و در نتیجه کاهش جدایش دمایی در خروجی سرد خواهد شد. لذا برای احتراز و یا به حداقل رساندن این پدیده در طراحی پارامترهای هندسی بایستی دقت لازم مبذول گردد. تاثیر جریان برگشتی بر جریان خروجی از انتهای سرد خروجی ورتکس تیوب بسیار پر اهمیت می باشد، زیرا باعث اختلاط جریان خروجی شده و در نتیجه موجب بالا رفتن دمای خروجی سرد خواهد شد. در حالی که عملکرد مطلوب در ورتکس تیوب بدست آوردن دمای پایین تر در خروجی سرد می باشد. در ادامه به بررسی این مساله و علت آن با استناد به نتایج آنالیز و شبیه سازی عددی می پردازیم.

در شکل ۱۱ جریان برگشتی در خروجی سرد بدست آمده از نتایج تحلیل عددی مشاهده می شود. در این شکل خطوط جریان بر اساس بردارهای سرعت محوری مشاهده می شوند. رنگ آبی بردارها نشان دهنده جهت معکوس و در خلاف جهت محوری می باشد، مشاهده می شود که در ناحیه میانی اریفیس خروجی سرد، جهت جریان به طرف داخل بوده در حالی که در کناره ها جهت جریان به طرف خارج می باشد. این مساله باعث رانده شدن جریان جدا شده سرد به طرف داخل ورتکس تیوب و اختلاط جریان گرم با سرد شده و نتیجه بصورت افزایش دما در خروجی سرد خود را نشان خواهد داد.



شکل ۱۱: نمایش ناحیه جریان معکوس در خروجی سرد

نتیجه گیری

در این مطالعه با استفاده از نرم افزار فلوئنت و روش حجم محدود به مدل سازی پدیده جدایش انرژی در ورتکس تیوب پرداخته شد. باید اشاره کرد که پارامترهای زیادی در عملکرد سیستم ورتکس تیوب 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، نسبت طول به قطر ورتکس تیوب از این قبیل پارامترها به حساب می آیند که نقش به سزایی در پدیده جدایش انرژی در ورتکس تیوب ایفا می کنند. هدف این مقاله بررسی و مطالعه یکی از این پارامترها یعنی جنس گاز ورودی بود. حل عددی با نتایج آزمایشگاهی اعتبار دهی اولیه شد. بررسی ها برای یافتن بهترین

¹ Reversed Flow

- Vortex Tube”, *Journal of Physics D: Appl. Phys.*, 27,1994,pp. 480-488. [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*,6,1984, pp. 911-920.
- [14] Stephan, K., Lin, S., Drust, M., Seher, D., “A Similarity Relation For Energy Separation in a Vortex Tub”, *Int. J. of Heat Mass Transfer*,6,1984,pp. 911.
- [15] Kirmaci V.,”Optimization of Counter Flow Ranque-Hilsch Vortex Tube Performance Using Taguchi Method”,*International Journal of Refrigeration*,32,2009,pp. 1487-1494.
- [16] 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*,3,2008,pp. 181-187.
- [17] 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.*,4,2010pp. 4943-4957.
- [18] Kulkarni, M.R., and Sardesai, C.R., “Enrichment of Methane concentration via separation of gases using vortex tubes”. *J. Energy Engrg*, 128(1), pp. 1–12.*Counter Flow Vortex Tube, Journal of Heat Transfer*, 131,2002,pp. 603-609.
- [19] Poshernev, N.V., and Khodorkov, I.L., “Natural-gas tests on a conical vortex tube (CVT) with external cooling”. *Chemical and Petroleum Engineering*, 40(3-4), 2004,pp. 212–217.