

بهینه سازی لوله‌ی گردابه‌ای برای بازیابی میعانات از گاز ارسال به فلر

الهام چراغی، سعید اویسی*

گروه مهندسی شیمی، دانشکده نفت و پتروشیمی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

چکیده: در این مطالعه، جریان دو فازی سیال گاز و قطره‌های ریز میعانات گازی در لوله‌ی گردابه‌ای با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی شبیه سازی شد. پارامترهای طراحی این تجهیز شامل قطر لوله‌ی گردابه‌ای، طول لوله‌ی گردابه‌ای، قطر دهانه ورودی، قطر شیر مخروطی، زاویه‌ی شیر مخروطی، قطر خروجی سرد، سرعت سیال ورودی، فشار خروجی سرد، و فشار خروجی گرم می‌باشند. این پارامترها، که اندازه‌های هندسی و شرایط عملیاتی این تجهیز را در بر می‌گیرند، با هدف بیشترین جداسازی میعانات گازی از گاز خروجی از تفکیک گرهای فازی با استفاده از روش‌های آماری طراحی آزمایش بهینه‌سازی شدند. داده‌های مورد نیاز برای انجام هفت مرحله طراحی آزمایش با انجام ۱۳۷ شبیه سازی با کمک دینامیک سیالات محاسباتی محاسبه شدند. سپس مقیاس آزمایشگاهی لوله‌ی گردابه‌ای مورد نظر مطابق این اندازه‌های هندسی بهینه، ساخته شد و در شرایط عملیاتی گوناگون مورد آزمایش قرار گرفت. دیده شد که لوله‌ی گردابه‌ای ساخته شده در این پژوهش در شرایط آزمایشگاهی قادر به بازیابی ۹۱٪ از میعانات موجود در جریان گاز می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: لوله‌ی گردابه‌ای، میعانات گازی، بازیابی میعانات گازی، نیروی گریز از مرکز، شبیه سازی، طراحی آزمایش

KEYWORDS: Vortex tube, Gas condensates, Condensates recovery, Centrifuge, Simulation, Design of experiments

مقدمه

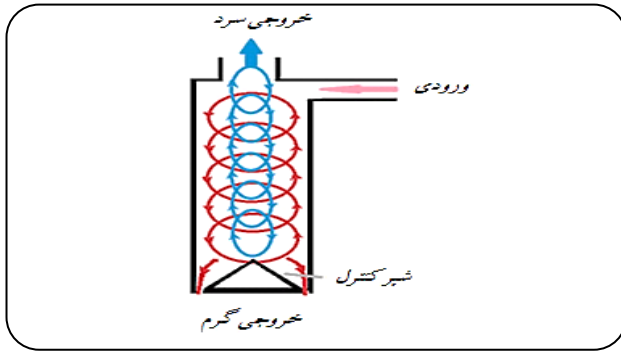
تشکیل دهنده‌ی میعانات گازی به طور عمده هیدروکربن‌هایی مانند بوتان، ایزوبوتان، پنتان، و . . . می‌باشد که در شرایط اتمسفری به صورت مایع قرار دارند. مقدارهای نسبی هر کدام از این ترکیب‌ها در میعانات گازی وابسته به نوع مخزن می‌تواند متفاوت باشد. بازیابی میعانات گازی از گاز طبیعی به چهار روش اساسی جذب^۱، انبساط سرماساز^۲، سرد سازی^۳، و لوله‌ی گردابه‌ای^۴ می‌تواند انجام گیرد که فرایند و تجهیزهای مورد استفاده تا حد زیادی بستگی به ترکیب‌های گاز و نگرانی‌های اقتصادی دارد.

نفت خام استخراج شده از چاه برای جداسازی آب و گاز همراه، در دو یا چند مرحله وارد تفکیک گرهای فازی می‌شود. طی این عملیات که در واحدهای بهره‌برداری انجام می‌شود، مقدارهایی از ترکیب‌های ارزشمند که با عنوان میعانات گازی (NGL)^۵ شناخته می‌شوند، به همراه گاز از فاز نفت جدا می‌شوند. گاز خروجی از این تفکیک گرها پیش‌تر به سمت به فلر ارسال می‌شود که در صورت نبود واحدی برای جداسازی میعانات، این میعانات گازی سوخته می‌شود و باعث آلودگی‌های زیست محیطی و همچنین زیان اقتصادی می‌شود (شکل ۱). اجزای

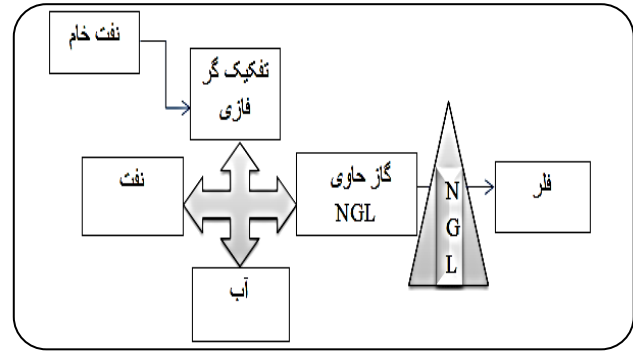
* E-mail: s.ovaysi@razi.ac.ir

* عهده‌دار مکاتبات

- (۱) Separator
- (۲) Natural Gas Liquids
- (۳) Absorption
- (۴) Cryogenic
- (۵) Refrigeration
- (۶) vortex tube



شکل ۲- لوله‌ی گردابه‌ای



شکل ۱- شمای واحد بهره برداری

لنگ^۳ در سال ۱۹۶۴ میلادی جداسازی گاز در لوله‌ی گردابه‌ای را با جزئیات بررسی کرد و دید که این جدایی به پارامترهای خاص مانند نسبت جریان گرم به سرد بستگی دارد و متوجه شد که درصد جریان گرم، پارامترهای ساخت و نسبت قطرها دارای اهمیت است و این‌گونه بیان کرد که توانایی جداسازی تابعی از طول لوله است که به قطر وابسته است و به این نتیجه رسید که جدایی گاز در جریان خروجی وابسته به نیروی گریز از مرکز است [۳]. تاکاهاما^۴ و یوکاساوا^۵ در سال ۱۹۸۱ میلادی از یک لوله‌ی مجزا برای کاهش طول مؤثر لوله و به دست آوردن عملکرد دلخواه استفاده کردند [۴]. در این راستا کلیک^۵ و همکاران^۶ در سال ۲۰۱۶ میلادی، به این قضیه پی بردند که طول لوله‌ی کوتاه نسبت به طول لوله‌ی بلند کارایی و عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد [۵]. همچنین ساردسای^۶ و همکاران^۷ از لوله‌ی گردابه‌ای برای غنی‌سازی غلظت متان از مخلوط گازی متان و نیتروژن برای ایمن‌سازی معادن زغال سنگ بهره بردند. آن‌ها دیدند که جداسازی گاز جزئی منجر به غلظت‌های بالاتر از متان در یک خروجی نسبت به ورودی و غلظت پایین‌تر در خروجی دیگر می‌شود و در فشار ۲۴۸/۲ کPa قدرت جداسازی $5/18 \times 10^7 \text{ kg.mol/min}$ می‌باشد [۶]. افزون بر این، طی پژوهش‌های که توسط اسمیت^۷ و همکاران^۷ [۷-۹] بر روی نسبت L/D (طول لوله به قطر آن) صورت گرفت، دیده شد که برای شرایط عملیاتی گوناگون، این نسبت بسته به درصد جرمی جریان سرد و سایر پارامترهای هندسی می‌تواند متفاوت باشد و نتیجه‌هایی که به دست می‌آید بستگی به پژوهش و کار انجام شده دارد و نمی‌توان یک عدد ثابت برای L/D پیش‌بینی و تعیین کرد. پژوهش‌های انجام شده بر روی تعداد نازل‌ها و رابطه‌ی آن با عملکرد لوله‌ی گردابه‌ای منجر به

لوله‌ی گردابه‌ای به صورت تصادفی توسط رنک^۱ در سال ۱۹۳۳ میلادی اختراع شد. آزمایش‌های انجام شده نشان داد که با وارد شدن خوراک هوا به این دستگاه، هوای گرم از یک خروجی و هوای سرد از خروجی دیگر خارج می‌شود [۱]. پس از آن هیلش^۲ در سال ۱۹۴۷ میلادی اثر قطر لوله را مورد بررسی قرار داد و دید که افزایش قطر لوله‌ی اصلی و استفاده از لوله‌های بزرگ باعث افزایش کارایی و عملکرد لوله‌ی گردابه‌ای می‌شود [۲].

پس از جنگ جهانی دوم، پژوهش‌ها نشان داد که می‌توان از لوله‌ی گردابه‌ای به عنوان دستگاه جداساز ایزوتوپ استفاده کرد [۳]. استفاده از لوله‌ی گردابه‌ای به دلیل دارا بودن برتری‌هایی همچون نبود قطعات متحرک و حجم بسیار فشرده، می‌تواند به عنوان جایگزینی برای سایر روش‌های بازیابی میعانات گازی مطرح شود. مبنای کار لوله‌ی گردابه‌ای نیروی گریز از مرکز می‌باشد که در آن جریان گاز ورودی که به صورت مماسی وارد لوله می‌شود ایجاد یک گردابه می‌نماید که تا انتهای لوله پیش می‌رود، این گردابه پس از برخورد به شیر مخروطی در انتهای لوله (خروجی گرم) تشکیل یک گردابه‌ی مرکزی می‌دهد که در برای خلاف گردابه‌ی اصلی به سمت خروجی سرد در سر دیگر لوله حرکت می‌کند (شکل ۲). نیروی گریز از مرکز ایجاد شده از مجموعه‌ی این گردابه‌ها باعث پرتاب شدن قطره‌های مایع به سمت دیواره می‌شود. این قطره‌های مایع پس از به هم پیوستن بر روی دیواره راهی خروجی گرم می‌شوند و در آنجا قابل بازیابی می‌باشند. افزون بر این، به دلیل سرعت بالای جریان گاز در داخل لوله‌ی گردابه‌ای سیال تا حدودی دچار انبساط سرماساز نیز می‌شود که این امر سبب سرد شدن آن و در نتیجه تشکیل هر چه بیشتر قطره‌های مایع می‌شود.

(۱) Ranque

(۳) C.U.inderstrom-Lang

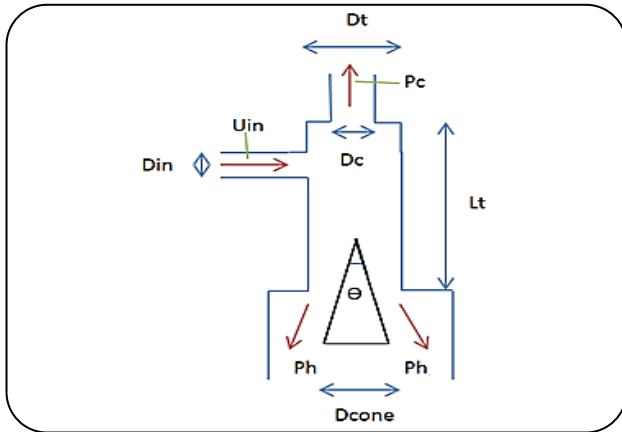
(۵) Celik

(۷) Eiamsa-ard.Smith.

(۲) Hilsch

(۴) Takahama

(۶) Chetan R. Sardesai



شکل ۱- لوله‌ی گردابه‌ای و معرفی متغیرها

جوزانی و همکاران دریافتند که انتخاب مدل آشفتگی مناسب برای در نظر گرفتن اثر اغتشاش بر میدان جریان به ویژه در جریان‌های چرخشی بسیار دارای اهمیت می‌باشد و انتخاب مدل آشفتگی به موردهایی مانند فیزیک جریان، میزان دقت مورد نیاز و قدرت منابع محاسباتی وابسته می‌باشد [۱۲] که طی مطالعه‌های پیشین مدل RSM^۱ می‌تواند یک مدل مناسب برای بررسی آشفتگی در لوله‌های گردابه‌ای در نظر گرفته شود ولی در این پژوهش برای بررسی دقیق‌تر، از مدل‌های آشفتگی k-ε و RSM برای شبیه‌سازی جریان‌ها استفاده شد. مدل RSM به طور چشمگیری نتیجه‌های بهتری نسبت به مدل‌های آشفتگی مبتنی بر گرانیوی چرخان ارائه می‌دهد، همچنین به صورت محاسباتی ارزان‌تر از شبیه‌سازی مستقیم عددی و شبیه‌سازی‌های بزرگ Eddy می‌باشد و در آن مؤلفه‌های فردی تنش رینولتز به طور مستقیم محاسبه می‌شود، همچنین مدل RSM می‌تواند تنش زاویه‌ای را به خوبی مدل کند در حالی که k-ε قادر به این امر نمی‌باشد.

پس از تعریف هندسه و مش‌بندی، در مدل دینامیک سیالات محاسباتی^۲ (CFD) نخست دو فاز مایع و گاز به ترتیب از اجزای میعانات گازی مانند n-heptane-Liquid و n-butane تعریف شدند که پس از به دست آوردن هندسه و شرایط عملیاتی بهینه، گازوئیل^۳ و هوا را جایگزین دو فاز مایع و گاز نموده و شبیه‌سازی با این دو ترکیب پیش برده شد زیرا در شرایط آزمایشگاهی فازهای مایع و گاز را به ترتیب گازوئیل و هوا تشکیل می‌دهند. شایان ذکر است که، به دلیل فشار پایین عملیاتی، فاز گاز ایده‌آل در نظر گرفته شده است. همچنین از مدل Mixture برای شبیه‌سازی جریان دو فازی استفاده شد که به عنوان یک مدل انتقال بین فازها برای محاسبه‌ی جریان غیرفشرده مایع - مایع یا گاز - مایع مناسب می‌باشد. این مدل می‌تواند

این نتیجه شد که افزایش تعداد نازل باعث کاهش عملکرد این دستگاه می‌شود و دلیل آن را می‌توان افزایش در آشفتگی جریان وارد شده بیان کرد [۱۰]، در حالی که سایر پژوهش‌ها بیانگر این موضوع هستند که با افزایش تعداد نازل افزایش جدایی انرژی پیش می‌آید، آن‌ها دلیل این افزایش جدایی را کاهش دمای خروجی سرد مطرح کردند که معتقد بودند در اثر چرخش زیاد به دلیل تعداد زیاد نازل ایجاد شده است [۷]. فرهادی و محمودی در مطالعه‌های پیرامون لوله‌ی گردابه‌ای با استفاده از یک لوله‌ی گردابه‌ای برنجی و تغییر پارامترهای هندسی مانند کاهش فاصله‌ی بین انتهای سرد و نازل ورودی، قطر و همچنین پارامترهای عملیاتی مانند فشار ورودی و ترکیب درصد خروجی سرد، مقادیرهای بهینه‌ای را با استفاده از CFD به صورت دو بعدی برای جداسازی گاز به دست آوردند [۱۱].

در این پژوهش عملکرد لوله‌ی گردابه‌ای برای بازیابی میعانات گازی از گاز خروجی از تفکیک‌گرهای واحدهای بهره‌برداری نفت خام مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه پس از معرفی پارامترهای هندسی لوله‌ی گردابه‌ای و بررسی معادله‌های حاکم بر جریان سیال در آن، به شبیه‌سازی عددی فرایند جداسازی گاز در لوله‌ی گردابه‌ای پرداخته شده است. سپس به کمک نتیجه‌های به‌دست‌آمده از این شبیه‌سازی‌ها و نیز طراحی آماری آزمایش‌ها، پارامترهای هندسی و عملیاتی لوله‌ی گردابه‌ای بهینه‌سازی شده‌اند. پس از آن لوله‌ی گردابه‌ای ساخته شده و نتیجه‌های به‌دست‌آمده از آزمایش بر روی این دستگاه با نتیجه‌های عددی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی مقایسه شده‌اند.

مدل‌سازی

همان‌گونه که در شکل ۲ قابل دیدن است، لوله‌ی گردابه‌ای دارای یک ورودی مماسی و دو خروجی در دو سر می‌باشد و پارامترهایی مانند طول و قطر لوله، قطر ورودی و خروجی‌ها، زاویه‌ی شیر مخروطی و فشارهای نقطه‌های گوناگون می‌تواند در عملکرد لوله‌ی گردابه‌ای اثرگذار باشد که تأثیرگذاری هر کدام از آن‌ها در بخش طراحی آزمایش‌ها مشخص شده است. برای انجام فرایند شبیه‌سازی به معرفی پارامترهای هندسی و عملیاتی مربوطه نیاز می‌باشد (شکل ۳) که مبنای انتخاب آن‌ها ساختار و عملکرد لوله‌ی گردابه‌ای می‌باشد.

جریان سیال پس از ورود به لوله‌ی گردابه‌ای درگیر نیروی گریز از مرکز شده است. از این رو انتخاب یک مدل آشفتگی مناسب برای تحلیل یک مدل عددی به منظور رسیدن به جواب‌هایی دقیق‌تر دارای اهمیت است.

(۱) Reynolds-Stress-Model

(۳) Gasoil-liquid

(۲) Computational fluid dynamics

جدول ۱- بازه‌ی متغیرها

متغیر	X _۱	X _۲	X _۳	X _۴	X _۵	X _۶	X _۷	X _۸
نوع متغیر	Lt/Dt	Dc/Dt	Dcone/Dt	۲Din/(Dt-Dc)	θ/۲	Uin	Ph	Pc
واحد	---	---	---	---	Degree(درجه)	m/s	Pa	Pa
کران پایین	۳	۰/۳	۰/۵	۰/۸	۴۰	۸	۱۵۰۰	۵۰۰
کران بالا	۵	۰/۴	۰/۷	۱/۲	۶۰	۱۲	۲۰۰۰	۱۰۰۰

جدول ۲- تغییرهای بازه‌ی متغیرها بر اساس طراحی آزمایش

شماره آزمایش	X _۱	X _۲	X _۳	X _۴	X _۵	X _۶	X _۷	X _۸
۱	۳-۵	۰/۳۰-۰/۴۰	۰/۵۰-۰/۷۰	۸۰-۱/۲۰۰	۴۰-۶۰	۸-۱۲	۱۵۰۰-۲۰۰۰	۵۰۰-۱۰۰۰
۲	۲/۵۰-۴/۵۰	۰/۳۰-۰/۴۰	۰/۴۰-۰/۶۰	۱/۲۰۰	۴۰	۹-۱۱	۱۵۰۰	۴۰۰-۸۰۰
۳	۳-۵	۰/۴۰-۰/۵۰۷	۰/۳۲۵-۰/۴۰۵	۱/۲۰۰	۴۰	۸-۱۰	۱۵۰۰	۴۰۰-۶۰۰
۴	۲/۵۰-۳/۵۰	۰/۳۰-۰/۳۹۹	۰/۳۲۵	۱/۲۰۰	۴۰	۷-۹	۱۵۰۰	۳۰۰-۵۰۰
۵	۱/۵۰-۲/۱۰۰	۰/۳۰-۰/۳۹۹	۰/۳۲۵	۱/۲۰۰	۴۰	۶-۷/۳۰۰	۱۵۰۰	۳۲۰-۴۲۰
۶	۱/۴۰-۲	۰/۴۴۰-۰/۵۴۰	۰/۳۲۵	۱/۲۰۰	۴۰	۵/۹۰-۷/۱۰۰	۱۵۰۰	۳۲۰-۴۲۰
۷	۱/۳۰-۱/۷۰	۰/۴۹۰-۰/۵۹۰	۰/۳۲۵	۱/۲۰۰	۴۰	۵/۹۰	۱۵۰۰	۲۷۰-۳۷۰

$$\gamma = \frac{\dot{m}_{liquid\ at\ out-hot}}{\dot{m}_{liquid\ at\ inlet}} \times \frac{\dot{m}_{vapor\ at\ out-cold}}{\dot{m}_{vapor\ at\ inlet}} \quad (1)$$

نتیجه‌های به‌دست آمده از شبیه سازی

طراحی آزمایش بر اساس متغیرهای مورد نظر انجام شده و سپس با استفاده از شبیه‌سازی متغیرهایی که تأثیر ناچیزی در روند کار داشته‌اند طی مرحله‌های گوناگون حذف شده‌اند. در برخی از مرحله‌های قابل دیدن است که تعداد متغیرها ثابت بوده و با همان تعداد متغیر مرحله‌ی پیش و بازه‌ی نوین طراحی آزمایش انجام شد تا از درستی فرایند صورت گرفته اطمینان به دست آید.

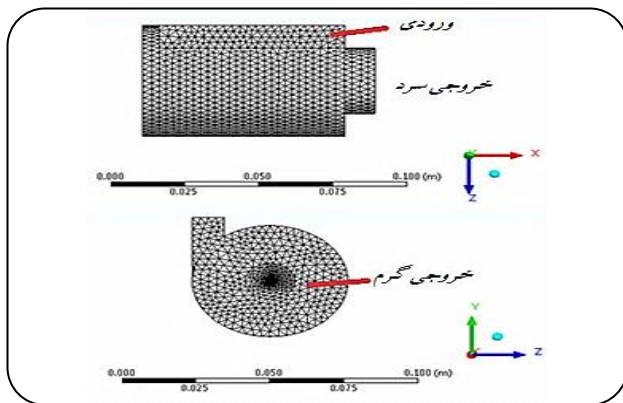
همان‌گونه که در شکل ۴ و جدول ۳ دیده می‌شود بازه لوله‌ی گردابه‌ای متأثر از نوع مدل آشفتگی استفاده شده در محاسبات می‌باشد. ولی روند تغییرهای بازدهی با تغییرهای پارامترهای طراحی برای هر دو مدل آشفتگی مورد استفاده در این پژوهش یکسان می‌باشد. شایان ذکر است که هدف از شبیه‌سازی‌های انجام شده تنها یافتن پارامترهای طراحی برای ساخت لوله‌ی گردابه‌ای با بیش‌ترین بازدهی می‌باشد و مقدار بازدهی در نقطه بیشینه، اهمیت چندانی ندارد. بنابراین، با توجه به آنچه که بحث شد تنها از مدل RSM برای پیشبرد مرحله‌های گوناگون طراحی آزمایش استفاده شده است. هندسه‌ی در نظر گرفته شده برای بیش‌ترین بازدهی که طی مرحله‌های طراحی آزمایش به دست آمد به صورت شکل ۵ می‌باشد که بخش ورودی به صورت مستطیلی شکل و مماس بر لوله‌ی اصلی در نظر گرفته شده است. هر چقدر گردابه‌های ایجاد شده درون دستگاه به صورت

به عنوان یک مدل کامل چند فازی استفاده شود در حالی که از تعداد متغیرهای کم‌تری استفاده کند، همچنین در آن باید از حلگر Pressure-Based استفاده شود و تنها یکی از فازها می‌تواند به صورت کامل تعریف شود. شبیه‌سازی با شرایط دمایی ثابت (دمای محیط ۲۷ درجه سلسیوس) و حالت پایا مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به کند بودن محاسبه در نرم افزار COMSOL از نرم‌افزار AnsysFluent 16.1 استفاده شده و برای به دست آوردن مقادیرهای بهینه‌ی هر پارامتر لوله‌ی گردابه‌ای از روش طراحی آزمایش استفاده شد. برای طراحی آزمایش متغیرهای هندسی به صورت نسبت در نظر گرفته شدند که در جدول ۱ قابل دیدن است. مقداردهی پارامترها در مرحله‌ی اول بر اساس مطالعه‌های پیشین و سعی و خطا صورت گرفت. برای هر متغیر انتخاب شده یک بازه در نظر گرفته شده است که در هر مرحله دچار تغییرهایی می‌شود.

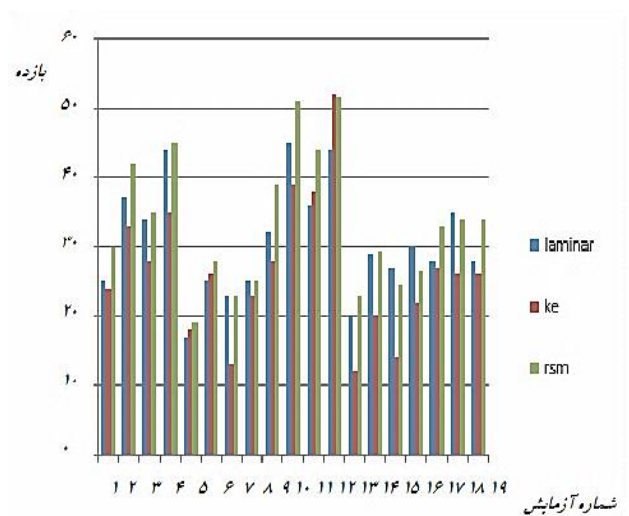
طراحی آزمایش‌ها طی یک مرحله‌ی Random-Balance و ۶ مرحله‌ی Full-Factorial-Design انجام شد. تغییرهای بازه‌ی متغیرها بر اساس طراحی آزمایش و شبیه‌سازی در جدول ۲ قابل دیدن می‌باشد. شایان ذکر است که بازدهی برای این پژوهش به صورت معادله‌ی (۱) تعریف شده است که حاصل ضرب نسبت مایع در خروجی مخروطی شکل (خروجی گرم) به مایع در ورودی و نسبت بخار یا گاز در خروجی استوانه‌ای شکل (خروجی سرد) به بخار یا گاز در ورودی می‌باشد. نزدیک بودن این مقدار به واحد بیانگر عملکرد درخشان لوله‌ی گردابه‌ای خواهد بود.

جدول ۳- بازدهی به ازای مدل‌های گوناگون

شماره آزمایش	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1X_2	X_1X_3	X_1X_4	X_2X_3	X_2X_4	X_3X_4	Laminar	$k-\epsilon$	RSM
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲۵	۲۴	۳۰
۲	۱	۱	۱	-۱	۱	۱	-۱	۱	-۱	-۱	۳۷	۳۳	۴۲
۳	۱	۱	-۱	۱	۱	-۱	۱	-۱	۱	-۱	۳۴	۲۸	۳۵
۴	۱	۱	-۱	-۱	۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۴۴	۳۵	۴۵
۵	۱	-۱	۱	۱	-۱	۱	۱	-۱	-۱	۱	۱۷	۱۸	۱۹
۶	۱	-۱	۱	-۱	-۱	۱	-۱	-۱	۱	-۱	۲۵	۲۶	۲۸
۷	۱	-۱	-۱	۱	-۱	-۱	۱	۱	-۱	-۱	۲۳	۱۳	۲۳
۸	۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	۲۵	۲۳	۲۵
۹	-۱	۱	۱	۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	۳۲	۲۸	۳۹
۱۰	-۱	۱	۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	-۱	-۱	۴۵	۳۹	۵۱
۱۱	-۱	۱	-۱	۱	-۱	۱	-۱	-۱	۱	-۱	۳۶	۳۸	۴۴
۱۲	-۱	۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	-۱	-۱	۱	۴۴	۵۲	۵۱/۴
۱۳	-۱	-۱	۱	۱	۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۲۰	۱۲	۲۳
۱۴	-۱	-۱	۱	-۱	۱	-۱	۱	-۱	۱	-۱	۲۹	۲۰	۲۹/۴
۱۵	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	-۱	۱	-۱	-۱	۲۷	۱۴	۲۴/۵
۱۶	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۳۰	۲۲	۲۶/۴



شکل ۵- مش بندی لوله‌ی گردابه‌ای



شکل ۴- رفتار جریان برای مدل‌های آشفتگی گوناگون

نمودار آنالیز حساسیت نتیجه‌های شبیه سازی به تعداد تقسیم‌ها در مش بندی به صورت شکل ۶ می‌باشد. قابل دیدن است که بازدهی در بازه‌ی خاصی به دست آمده است و در این پژوهش از تعداد مش‌های ۷۷۹۱۳ که در آن بازدهی ۶۸٪ می‌باشد استفاده شد.

برای تحلیل بهتر نتیجه‌های دو صفحه‌ی عمود بر یکدیگر بر روی هندسه‌ی لوله‌ی گردابه‌ای اعمال شده و پروفایل فشار، سرعت و کسر حجمی فاز مایع مورد بررسی قرار گرفته است. از مقایسه‌ی پروفیل فشار در شکل ۷ مشخص است که با بهینه شدن پارامترهای طراحی طی مرحله‌های گوناگون طراحی آزمایش گردابه‌ها متقارن تر می‌شوند. این امر نشان دهنده‌ی این است که همه جریان در طول

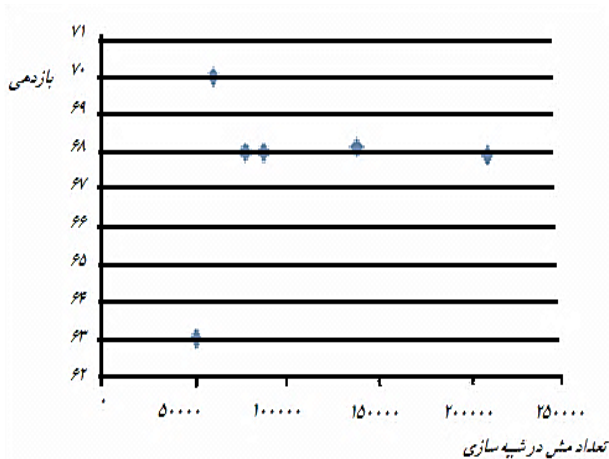
منظم‌تری تشکیل شود جدایی دو فاز از یکدیگر بهتر صورت می‌گیرد و راندمان بالاتری به دست می‌آید. هر چقدر هندسه به نقطه‌های کوچک‌تری جدا شده باشد عملکرد دقیق‌تری از شبیه‌سازی به دست می‌آید و مشخصه‌های جریان به صورت بهتری قابل تحلیل و بررسی می‌باشد. پس از اعمال مدل‌ها و شرایط مرزی برای هندسه‌های گوناگون بازدهی محاسبه شده که بیش‌ترین بازده به دست آمده از هر مرحله‌ی طراحی آزمایش در جدول ۴ گزارش شده است.

جدول ۴- نتیجه‌های شبیه‌سازی

مراحل طراحی آزمایش	تعداد متغیرها	تعداد مراحل شبیه‌سازی	بیشترین بازدهی در هر مرحله (%)	میانگین بازدهی (%)
Random-Balance	۸	۱۶	۳۸	۲۲/۰۶
Full-Factorial-Design(۱)	۵	۳۲	۳۷	۲۲/۰۴
Full-Factorial-Design(۲)	۵	۳۲	۳۵	۲۸/۱۸
Full-Factorial-Design(۳)	۴	۱۶	۳۴	۲۷/۴۰
Full-Factorial-Design(۴)	۴	۱۶	۵۰	۳۷/۰۶
Full-Factorial-Design(۵)	۴	۱۶	۵۲	۲۶/۵۲
Full-Factorial-Design(۶)	۳	۹	۶۸	۴۰/۲۱

جدول ۵- دقت پارامترها در Ansys Fluent

x-velocity	y-velocity	z-velocity	energy	k-epsilon	uu-stress
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
vv-stress	ww-stress	uv-stress	vw-stress	uw-stress	vf-liquid
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱



شکل ۶- نمودار آنالیز حساسیت نتیجه‌های شبیه‌سازی به تعداد تقسیم‌ها در مش بندی

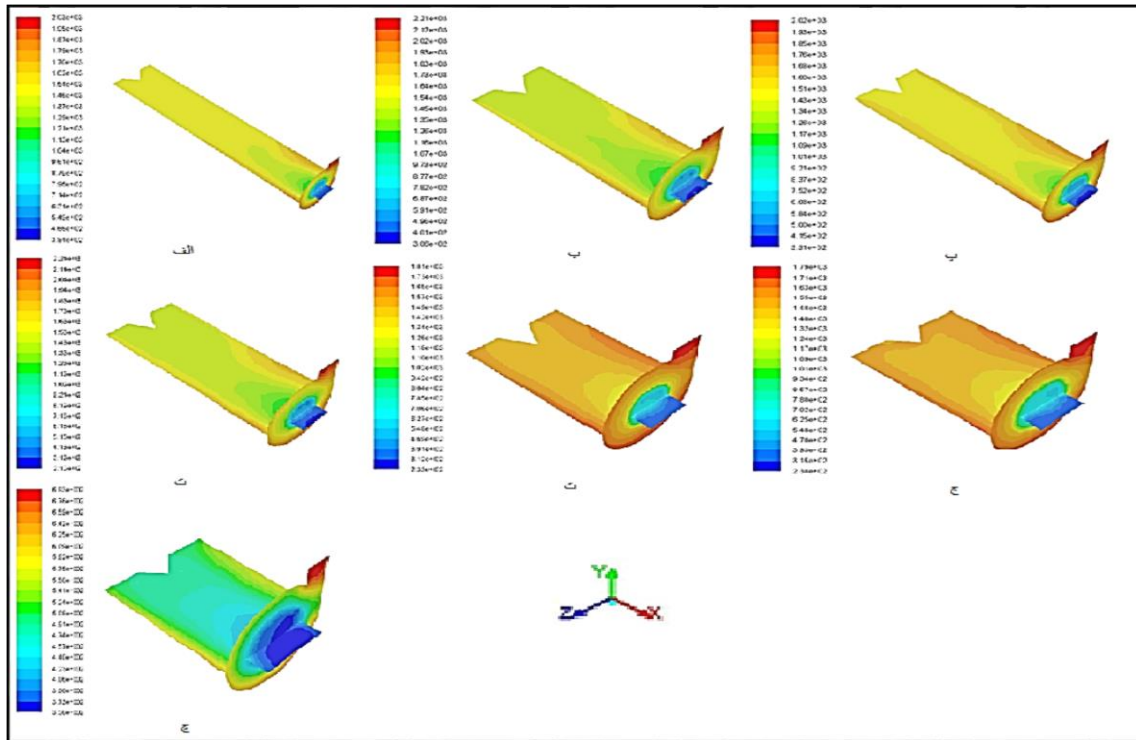
مربوط به زمانی خواهد بود که کل جریان گاز از خروجی سرد و کل جریان مایع از خروجی گرم خارج شوند. دقت پارامترهای حل در برنامه‌ی فلونتت برای این پژوهش به صورت جدول ۵ می‌باشد.

بخش تجربی مدل آزمایشگاهی

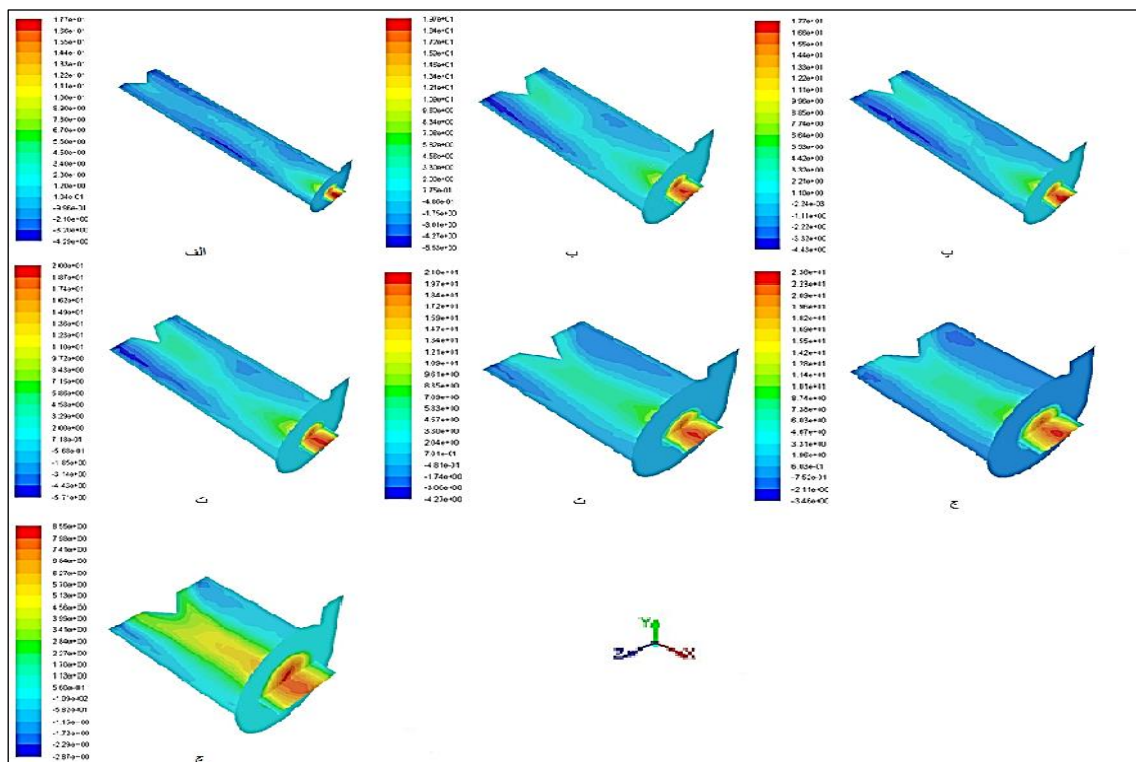
طبق شمای دستگاه در شکل ۱۰، مدل آزمایشگاهی در شکل ۱۱ بر اساس پارامترهای به دست آمده با دقت ۱ میلی‌متر و در آزمایشگاه دانشکده نفت و پتروشیمی رازی با توجه به نتیجه‌های شبیه‌سازی در جدول ۶ ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت.

لوله‌ی گردابه‌ای دچار چرخش شده و تفکیک بهتری صورت گیرد بنابراین تأثیر چشمگیری در افزایش بازدهی دارد. همچنین با توجه به لایه‌های ایجاد شده در کانتور فشار می‌توان دریافت که فشار به صورت پیوسته از بیرون به سمت مرکز کاهش پیدا کرده است، این امر بیانگر این مطلب است که گردابه درونی شکل گرفته است. شایان ذکر است که بازه‌ی فشار در مرحله‌ی اول طراحی آزمایش از ۲۰۳۰ Pa-۳۸۴ Pa به ۳۵۶-۶۹۳ Pa در مرحله‌ی آخر طراحی آزمایش کاهش یافته است. این مطلب با توجه به بردارهای سرعت در شکل ۸ روشنی بیشتری پیدا می‌کند. می‌توان دریافت که در مراحل اولیه‌ی شبیه‌سازی بردارهای سرعت به صورت نامتقارن و درهم ایجاد شده که این بردارها نماد جریان‌های بخار و مایع می‌باشند که درهم بودن آن‌ها نماد آشفتگی جریان‌ها در یک‌دیگر و جدا شدن جریان‌ها می‌باشد و در مرحله‌ی آخر شبیه‌سازی این بردارها متقارن و منظم شده و این تقارن نشان دهنده‌ی بازایی بیشتری جز سنگین و همچنین بهینه شدن پارامترهای هندسی و عملیاتی می‌باشد.

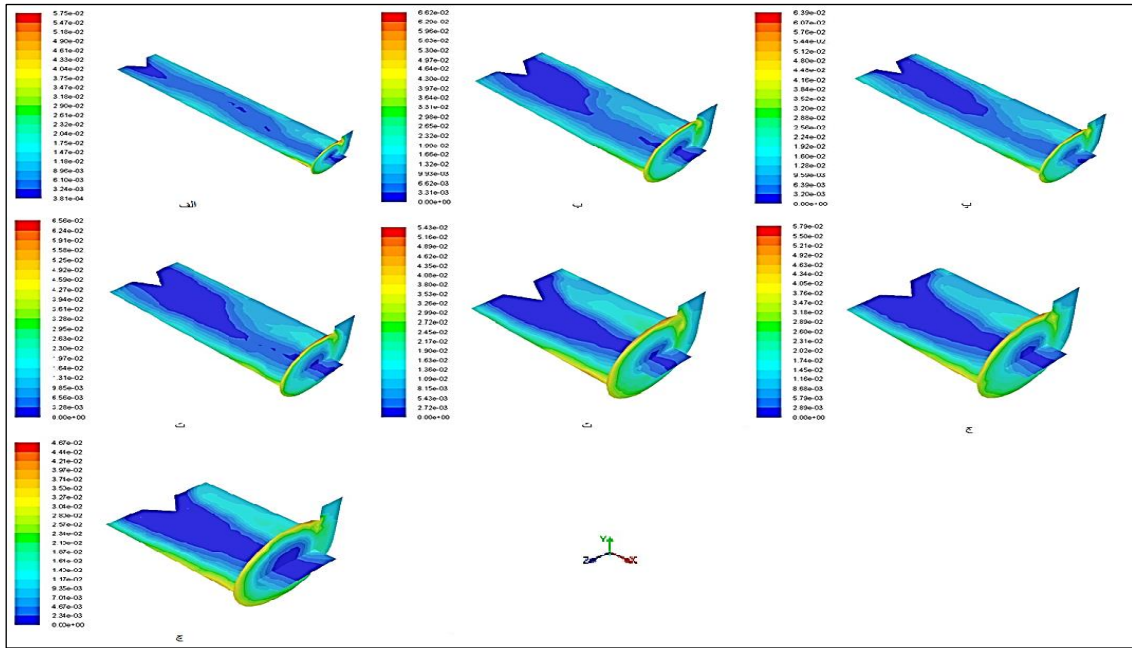
با دیدن شکل ۹ قابل تشخیص است که با بهینه شدن پارامترهای طراحی لوله‌ی گردابه‌ای طی مراحل طراحی آزمایش، فاز مایع ایجاد شده درون لوله‌ی گردابه‌ای در اثر نیروی گریز از مرکز و گردابه‌های ایجاد شده بیشتر تر بوده و حجم بیشتری از مایع از خروجی گرم یا به عبارتی خروجی مخروطی شکل خارج شده است و حجم بیشتر تر فاز بخار نیز از خروجی سرد خارج شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود پروفایل‌های فشار، سرعت و کسر حجمی فاز مایع تأیید کننده تقویت نیروی گریز از مرکز و جداسازی بهتر با پیشرفت آزمایش‌ها (شبیه‌سازی‌ها) می‌باشد. بیشترین بازدهی



شکل ۷- پروفایل فشار (الف: Random-balance - ب: Full-Factorial-Design (۱) - پ: Full-Factorial-Design (۲)) - ت: Full-Factorial-Design (۳) - ث: Full-Factorial-Design (۴) - ج: Full-Factorial-Design (۵) - چ: Full-Factorial-Design (۶)



شکل ۸- پروفیل سرعت محوری (الف: Random-balance - ب: Full-Factorial-Design (۱) - پ: Full-Factorial-Design (۲)) - ت: Full-Factorial-Design (۳) - ث: Full-Factorial-Design (۴) - ج: Full-Factorial-Design (۵) - چ: Full-Factorial-Design (۶)



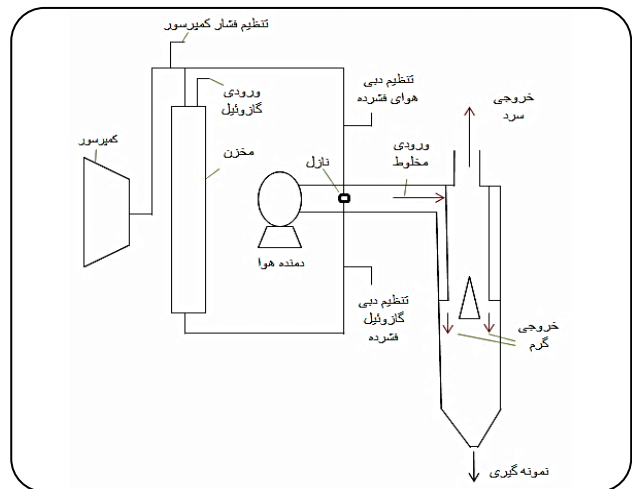
شکل ۹- پروفیل جز حجمی فاز مایع (الف: Random-balance - ب: Full-Factorial-Design (۱) - پ: Full-Factorial-Design (۲) - ت: Full-Factorial-Design (۳) - ث: Full-Factorial-Design (۴) - ج: Full-Factorial-Design (۵) - چ: Full-Factorial-Design (۶))

جدول ۶- طراحی آزمایش بخش آزمایشگاهی

شماره آزمایش	X_1	X_2	X_3	m_1	m_2	بازدهی (%)
۱	شیر خروجی سرد ۱ : حالت باز -۱ : حالت نیمه باز	شیر خروجی گرم ۱ : حالت باز -۱ : حالت نیمه باز	شیر ورودی ۱ : حالت باز -۱ : حالت نیمه باز	مقدار گاز وئیل ورودی به داخل مخزن (mL)	مقدار گاز وئیل خروجی از خروجی مخروطی شکل (mL)	
۱	۱	۱	۱	۱۰۰	۸۰	۸۰
۲	-۱	۱	۱	۱۰۰	۳۵	۳۵
۳	-۱	۱	-۱	۱۰۰	۷۱	۷۱
۴	۱	-۱	۱	۱۰۰	۸۹	۸۹
۵	۱	-۱	-۱	۱۰۰	۹۱	۹۱



شکل ۱۱- تجهیزهای آزمایش



شکل ۱۰- شمای دستگاه

نتیجه‌ها و بحث

بیش‌ترین بازدهی مربوط به زمانی است که در آن شیر ورودی نیمه باز، شیر خروجی سرد به‌طور کامل باز و شیر خروجی گرم نیمه باز باشد. نیمه باز بودن شیر ورودی باعث می‌شود که مخلوط با سرعت متوسطی به سمت لوله‌ی گردابه‌ای حرکت کرده و فرصت چرخش درون لوله را داشته باشد و نیمه باز بودن شیر خروجی گرم باعث می‌شود که مخلوط با مخروط درون لوله برخورد کند و گردابه‌ی میانی به خوبی تشکیل شود. همان‌گونه که دیده می‌شود مقدار بازدهی ۹۱٪ محاسبه شده در آزمایشگاه به مراتب بیش‌تر از بیشینه مقدار ۶۸٪ است که در مرحله‌ی طراحی آزمایش محاسبه شد. این تفاوت از دو منظر قابل تأمل است. نخست آن که روش‌هایی که برای محاسبه‌ی بازده در دو بخش آزمایشگاهی و طراحی مورد استفاده قرار گرفتند متفاوت می‌باشند. با توجه به این‌که فرمول مورد استفاده در بخش طراحی شامل حاصل‌ضرب بازدهی‌های مایع و گاز می‌باشد و فرمول مورد استفاده در بخش آزمایشگاهی تنها شامل بازدهی مایع می‌باشد، روشن است که بازده محاسبه شده در بخش آزمایشگاهی همواره بیش‌تر از مقدار متناظر آن در بخش طراحی باشد. ناگفته نماند که با توجه به در دسترس نبودن جریان‌سنج گازی در آزمایشگاه، بازدهی تنها بر اساس فاز مایع انجام گرفت. لکن محاسبه‌های انجام شده در بخش طراحی بایستی بر اساس بازدهی هر دو فاز مایع و گاز صورت می‌گرفت تا تجهیز ساخته شده شرایط بهینه را داشته باشد. ذکر این نکته نیز لازم است که در شرایط آزمایشگاهی فازهای مایع و گاز از هر دو خروجی سرد و گرم خارج می‌شوند، لکن مقدارهای گاز (مایع) خروجی از خروجی گرم (سرد) ناچیز می‌باشند. دومین دلیل تفاوت در بازدهی در بخش‌های شبیه‌سازی و آزمایشگاهی دقیق نبودن نتیجه‌های به‌دست‌آمده از دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد. البته با توجه به این‌که مدل آشفتنگی و همچنین مش‌بندی مورد استفاده در این پژوهش برگرفته از نتیجه‌های معتبر سایر پژوهش‌ها بوده انتظار خطای چشمگیری از این شبیه‌سازی‌ها نمی‌رود. با این وجود، همان‌گونه که در قسمت‌های پیشین اشاره شد، هدف از این شبیه‌سازی‌ها به دست آوردن مقدارهای دقیق بازده نبوده و تنها چگونگی تغییرهای بازده با تغییرهای پارامترهای طراحی مدنظر بوده تا با کمک آن بتوان مقدارهای بهینه پارامترهای طراحی را انتخاب نمود. همچنین شایان ذکر است که هدف از انجام این پژوهش، نظر به محدود بودن نیروی گریز از مرکز به‌دست‌آمده در لوله گردابه‌ای موجود، جداسازی مولکولی اجزای سبک و سنگین موجود در فاز مایع (گازوئیل) نبوده و تنها جداسازی دو فاز مایع و گاز مدنظر بوده است. بنابراین، هیچ‌گونه تلاشی برای تقسیم فاز مایع گازوئیل به چندین شبه جزء انجام نشده است. چرا که با توجه به این‌که نقطه جوش

جدول ۷- مشخصه‌های لوله‌ی گردابه‌ای مرحله‌ی آزمایشگاهی

پارامترهای مدل آزمایشگاهی	واحد	مقدار
طول لوله‌ی گردابه‌ای	mm	۶۸/۲
قطر لوله‌ی گردابه‌ای	mm	۵۲/۵
قطر خروجی سرد	mm	۳۱
قطر شیر مخروطی	mm	۱۷/۱
طول ورودی	mm	۶۳
زاویه‌ی مخروط شیر مخروطی (θ/۲)	degree	۴۰

در این مدل از کمپرسور استفاده شده و از آن دو جریان، یکی برای ایجاد هوای فشرده و دیگری برای ایجاد فشار روی گازوئیل خارج شده است. مخزن موجود با ۱۰۰ میلی‌لیتر گازوئیل پر شده است. نخست کمپرسور را روشن کرده، این کار باعث می‌شود که فشار روی گازوئیل افزایش یابد و گازوئیل با فشار زیاد و هوای فشرده در نازل به یک‌دیگر برسند و گازوئیل خروجی از نازل به صورت مه بیرون بیاید (نازل در مسیر ورودی لوله‌ی گردابه‌ای قرار گرفته است). سپس دستگاه دمنده‌ی هوا را روشن کرده و جریان هوا با سرعت زیاد پشت مسیر مه قرار می‌گیرد، هوا و مه با فشار وارد لوله‌ی گردابه‌ای می‌شود و این مه، که تا حد قابل قبولی نمایانگر مه موجود در جریان گاز خروجی از تفکیک‌گرهای فازی می‌باشد، توسط نیروی گریز از مرکز ایجاد شده در لوله‌ی گردابه‌ای پس از فشرده شدن و تشکیل فاز مایع به سمت خروجی گرم هدایت می‌شود. برای محاسبه‌ی بازدهی، مقدار مایع خارج شده اندازه‌گیری می‌شود. همچنین در قسمت‌های گوناگون از جمله مسیر ورودی، خروجی استوانه‌ای شکل و خروجی مخروطی شکل فشارسنج‌های U شکل نصب شده است که مبنای کار آن‌ها اختلاف ارتفاع مایع در دو طرف می‌باشد. سیال استفاده شده برای فشارسنج آب می‌باشد و آزمایش در دمای محیط انجام شده است. شایان ذکر است که شیر مخروطی به صورت متحرک در نظر گرفته شده تا بتوان آن را در قسمت‌های گوناگون تنظیم و عملکرد دستگاه را در حالت‌های گوناگون دید. همچنین در ورودی و خروجی سرد نیز شیرهایی برای تنظیم شدت جریان تعبیه شده است و بر اساس آن‌ها طراحی آزمایشی مطابق جدول ۷ صورت گرفته است. شدت جریان هوای خروجی با تعیین منحنی برسنجی کمپرسور صورت پذیرفت. با توجه به ملموس‌تر بودن بازدهی ارایه شده در معادله (۲)، بازدهی به کمک این معادله و با نسبت مقدار گازوئیل در خروجی مخروطی شکل به مقدار گازوئیل اولیه به دست می‌آید.

$$\gamma = \frac{m_{\text{liquid at out-hot}}}{m_{\text{liquid at inlet}}} \quad (2)$$

فهرست نمادها

Lt	طول لوله‌ی گردابه‌ای
Dt	قطر لوله‌ی گردابه‌ای
Dc	قطر خروجی سرد
Dcone	قطر شیر مخروطی
Din	قطر ورودی
θ	زاویه‌ی مخروط شیر مخروطی
Uin	سرعت ورودی
Ph	فشار خروجی گرم
Pc	فشار خروجی سرد

آغازین گازوئیل بسیار بالاتر از دمای انجام آزمایش‌ها می‌باشد، همه اجزای گازوئیل در فاز مایع باقی می‌مانند و به صورت یک‌جا از خروجی‌های سامانه خارج می‌شوند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه جداسازی جریان دو فازی سیال گاز و قطره‌های ریز میعان‌های گازی در لوله‌ی گردابه‌ای مورد بررسی قرار گرفت و ۱۳۷ مرحله‌ی شبیه‌سازی به منظور بهینه‌سازی پارامترهای هندسی و عملیاتی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی انجام شد. هدف از بهینه‌سازی این پارامترها، بیش‌تر جداسازی میعان‌های گازی از گاز خروجی از تفکیک‌گرهای فازی با استفاده از روش‌های آماری طراحی آزمایش‌ها می‌باشد. با استفاده از نتیجه‌های به دست آمده از شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی ساخته شد و در شرایط عملیاتی گوناگون مورد آزمایش قرار گرفت. دیده شد که لوله‌ی گردابه‌ای ساخته شده در این پژوهش در شرایط آزمایشگاهی می‌تواند ۹۱٪ از میعان‌های موجود در جریان گاز را بازیابی کند. بنابراین لوله‌ی گردابه‌ای می‌تواند جایگزین مناسبی برای سایر روش‌های جداسازی میعان‌های گازی از جریان گاز ارسالی به سمت فلر باشد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۰۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۸

مراجع

- [1] Ranque G. J., [Experiences on Expansion in a Vortex with Simultaneous Exhaust of Hot Air and Cold Air](#), *J. Phys.Radium*, **7**: 112-114(1933).
- [2] Hilsch R., [The Use of Expansion of Gases in Centrifugal Field as a Cooling Process](#), *Z.Naturforschung*, **18**: 208-214(1946).
- [3] Linderstrom C.U. Lang., [Gas Separation in the Ranque-Hilsch Vortex Tube](#), *Int. J. Heat Mass Transf*, **7**: 1195-1206(1964).
- [4] Takahama H., Yokosawa H., [Energy Separation in Vortex Tubes with Divergent Section](#), *Transactions of the ASME*, **103**: 196-203(1981).
- [5] Celik A., Yilmaz.M., Kaya M., Karagoz S., [The Experimental Investigation and Thermodynamic Analysis of Vortex Tubes](#), *Heat and Mass Transfer*, **53**: 1-11(2016).
- [6] Sardesai., Manohar R. Kulkarni, Chetan R., [Enrichment of Methane Concentration via Separation of Gases Using Vortex Tubes](#), *Journal of energy engineering*, **128**: 1-12 (2002).
- [7] Eiamsa-ard S., Promvonge P., [Numerical Prediction of Vortex flow and Thermal Separation in a Subsonic Vortex Tube](#), *Journal of Zhejiang University Science A*, **8**: 1406-1415(2006).
- [8] Gulyaev A.I., [Investigation of Conical Vortex Tube](#), *Journal of Engineering Physics*, **3**: 326-331(1966).

- [9] Dyskin L.M., [Characteristics of Vortex Tube with Detwisting of Cold Flow](#), *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, **57**: 38-41(1989).
- [10] Dincer K., Avci A., Baskaya S., Berber A., [Experimental Investigation and Exergy Analysis of the Performance of a Counter Flow Ranque-Hilsch Vortex Tube with Regard to Nozzle Cross-Section Areas](#), *International journal of refrigeration*, **33**: 954-962 (2010).
- [11] Farhadi F., Mahmoodi S., [Experimental Analysis of a Ranque-Hilsch Vortex Tube for Optimizing Nozzle Numbers and Diameter](#), *Applied Thermal Engineering*, **61**: 500-506 (2013).
- [۱۲] محمدی جوزانی، محمدرضا، بهجت، یعقوب، شاه حسینی، شاهرخ، قائمی، احمد. [بررسی هیدرودینامیک سانترفیوژ گازی با استفاده از تحلیل CFD](#). نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۱) ۳۳: ۸۹ تا ۱۰۱ (۱۳۹۳)