



مدل سازی سیکلون جداکننده گاز - مایع و بهینه سازی پارامترهای هندسی تاثیر گذار

امیرحسین قاسمی¹، مهرزاد شمس^{2*}، محمد مهدی هیهات³

1- کاشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 46167-54789 shams@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 04 دی 1393

پذیرش: 08 بهمن 1393

ارائه در سایت: 28 بهمن 1393

کلید واژگان:

جداکننده استوانه‌ای گاز مایع

بهینه‌سازی چند هدفه

حمل مایع از زیر

حمل گاز از بالا

چکیده

در این مطالعه به بررسی عملکرد جداکننده‌ی گاز مایع استوانه‌ای و تأثیر تغییر پارامترهای هندسی ورودی سیکلون و شبیه‌سازی آن‌ها به روش دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته شده است. پس از انتخاب شبکه‌بندی مناسب برای هندسه‌ی سیکلون، تأثیر تغییر پارامترهای هندسی ورودی بر مقدار حمل مایع از بالا و مقدار حمل گاز از پایین مطالعه گردید. پارامترهای هندسی به خصوص هندسه‌ی ورودی تأثیر به‌سزایی در بهبود عملکرد سیکلون دارند. در این طراحی، سطح مقطع ورودی، زاویه‌ی ورودی و ارتفاع ورودی از کف سیکلون به‌طور همزمان بهینه شدند. از مدل آر-اس-ام برای شبیه‌سازی جریان آشفته استفاده شده و جریان دوفازی نیز با استفاده از روش اویلر-اویلر مدل سازی شده است. مطابق این شبیه‌سازی‌ها مقدار حمل گاز از زیر با کاهش زاویه‌ی ورودی کاهش می‌یابد و یک نقطه‌ی بهینه برای حمل گاز از زیر با تغییر ارتفاع ورودی و تغییر سطح مقطع ورودی سیکلون وجود دارد. همچنین یک نقطه‌ی بهینه برای حمل مایع از بالا با تغییر پارامترهای هندسی ورودی و تغییر سطح مقطع ورودی و ارتفاع ورودی از کف سیکلون به دست می‌آید. افزایش زاویه‌ی ورودی باعث کاهش حمل مایع از بالا می‌گردد. در مدل بهینه مقدار حمل گاز از پایین کاهش یافته و حمل مایع از بالا به صفر می‌رسد.

Modeling Gas Liquid Cylindrical Cyclone Separator and Optimizing Effective Geometry Parameters

Amirhosein Ghasemi¹, Mehrzad Shams^{2*}, Mohammad Mahdi Heyhat²

1- Department of Mechanical Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 46167-54789 Tehran, Iran, shams@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 25 December 2014

Accepted 28 January 2015

Available Online 17 February 2015

Keywords:

Gas liquid cylindrical cyclone

Multi objective optimization

Gas carry under (GCU)

Liquid carry over (LCO)

ABSTRACT

In this study, performance of gas liquid cylindrical cyclone separators and the effect of changing geometrical parameters of cyclone separators entrance are investigated. The cyclone is simulated with computational fluid dynamic methods. After choosing a suitable mesh grid for the cyclone and checking grid independency, the effect of changing entrance geometry on gas carry under and liquid carry over is investigated. Geometrical parameters, especially inlet geometrical parameters, have considerable effect on optimizing cyclone separators performance. RSM model is used for turbulence simulation of the flow and two phase flow is simulated using Eulerian- Eulerian approach. In this simulation, inlet cross section, inlet angle and inlet height relative to the cyclone bottom part are optimized. Results show that GCU decreases with decreasing nozzle's inlet angle. An optimum point for GCU was given with changing inlet altitude relative to the bottom of the cyclone and inlet nozzle's width. An optimum point for LCO was obtained with changing inlet altitude and inlet nozzle width. Increasing inlet angle causes a decrease in LCO. In optimum model, gas carry under decreases significantly and liquid carry over is eliminated.

1- مقدمه

هم بود، در حالی که در جداکننده‌های جدید گاز مایع، نیروی گریز از مرکز در کنار نیروی جاذبه به جدایش فازها از هم کمک می‌کند. شرایط مختلف نظیر هزینه و فشار کاری، صنایع نفت و گاز را وادار به گرایش به سمت جداکننده‌های ارزان‌تر، کوچک‌تر و با بازدهی جدایش بهتر کرد. جداکننده‌هایی که فشرده بوده و مناسب کاربردهای کنار ساحلی و زیر دریا باشد [2]. در جداسازی فازهای مختلف در جداکننده‌ی استوانه‌ای گاز مایع، ممکن است مشکلاتی به وجود آید که باعث کاهش بازدهی این جداکننده‌ها می‌

روزه جداکننده‌های استوانه‌ای گاز مایع¹، از آنجا که برتری زیادی نسبت به جداکننده‌های قدیمی دارند، بیش از پیش مورد توجه صنایع نفت و گاز قرار می‌گیرند. استفاده از سیکلون جداکننده‌ی گاز مایع در کاربردهای میدانی، نیازمند فهمیدن کامل هیدرودینامیک جریان در داخل این جداکننده‌ها است [1]. در جداکننده‌های قدیمی، نیروی جاذبه تنها عامل جداکننده‌ی فازها از

1- Gas liquid cylindrical cyclone (GLCC)

در طول این سال‌ها و افزایش استفاده از این نوع جداکننده‌ها، بررسی‌های مختلفی برای ارتقای دانش درباری ساختار جریان در سیکلون‌ها و بهینه کردن عملکرد آن‌ها صورت گرفت. عدم وجود درک کامل و صحیح از هیدرودینامیک پیچیده جریان چندفازی در داخل جداکننده‌ها، اعتماد به نفس کافی برای طراحی این جداکننده‌ها را کم کرده و نیاز به تحقیق بیش از پیش را در این زمینه نشان می‌دهد. همچنین ارتقای دانش در مورد هیدرودینامیک جریان، استفاده کنندگان از جداکننده‌های سیکلونی را قادر می‌سازد تا عملکرد آن‌ها را پیش‌بینی کرده و جداکننده‌ی مناسبی را برای کاربردهای مختلف طراحی کنند [7]. اینتا آرپندی و همکاران مطالعه‌ای تجربی بر روی جداکننده‌ی استوانه‌ای گاز مایع و چندین پارامتر رفتار جریان و ساختار این جداکننده‌ها، درحالی‌که جداکننده شرایطی را دنبال می‌کند که حمل مایع از بالا و حمل گاز از پایین اتفاق نمی‌افتد، انجام دادند [8]. با استفاده از بررسی آن‌ها پیش‌بینی رفتار جریان در جداکننده‌ی استوانه‌ای گاز مایع ممکن خواهد بود. رینر هریرز و همکاران جریان چرخشی را در جداکننده‌های استوانه‌ای گاز مایع بررسی کردند و نتایج حاصل از شبیه سازی عددی جریان تک‌فاز در سیکلون با استفاده از مدل‌های مختلف جریان آشفته ارائه دادند [9]. آن‌ها در مطالعه‌ی خود، مدل تجربی اردال (2001) را شبیه سازی کردند و ساختار و ویژگی‌های جریان را در جداکننده‌ی استوانه‌ای گاز مایع نشان دادند. رینر هریرز و همکاران در سال 2013، هیدرودینامیک و سرعت سیال را در جریان‌های چرخشی گاز مایع در جداکننده‌های استوانه‌ای به صورت تجربی بررسی کردند و نتایج جالبی از هیدرودینامیک جریان و هسته‌ی گازی در جداکننده‌های سیکلونی ارائه دادند [10].

در طول سال‌های گذشته تلاش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی عملکرد جداکننده‌ها و دسترسی به نتایج بهتر برای جداسازی انجام شد. خیری و کریس اثرات ابعاد ورودی سیکلون را بر روی الگوی جریان و عملکرد سیکلون بررسی کردند و نتایج خوبی ارائه دادند، اما مطالعه‌ی آن‌ها محدود به جداکننده‌های گاز جامد بود [11]. گوانک کای و همکاران تاثیر زاویه‌ی پره را بر الگوی جریان و عملکرد جداکننده‌های محوری بررسی کردند. اما بررسی آن‌ها نیز تنها محدود به جداکننده‌های گاز جامد بوده است [12]. ونگ و همکاران یک مدل پویا⁴ برای کنترل سطح مایع و فشار در جداکننده‌ی استوانه‌ای گاز مایع با استفاده از تکنیک‌های کنترلی کلاسیک توسعه دادند [13]. آن‌ها یک طرح کنترلی براساس مدل سیستم کنترل خطی ارائه دادند و پاسخ گذرای سیستم را با یک نرم‌افزار مناسب شبیه‌سازی کردند. در نهایت یک چارچوب طراحی برای اجرای سیستم کنترلی در جداکننده‌های استوانه‌ای گاز مایع با استفاده از یک شبیه ساز اختصاصی، توسط آن‌ها ارائه شد.

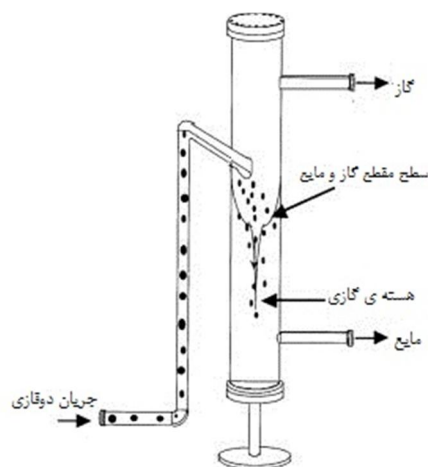
در این مقاله سه پارامتر از هندسه‌ی ورودی سیکلون بهینه‌سازی شده‌اند. برای این منظور، یک جداکننده‌ی استوانه‌ای به صورت عددی شبیه‌سازی شد. مدل شبیه‌سازی شده با مدل تجربی هریرز و همکاران [10] ارزشیابی شد و نتایج قابل قبولی بدست آمد. بنابراین از همین مدل برای بهینه‌سازی استفاده شد و تاثیر تغییر پارامترهای هندسی ورودی سیکلون مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای بهینه‌شده، ارتفاع ورودی، سطح مقطع ورودی و شیب ورودی سیکلون می‌باشند.

2- معادلات حاکم

از روش اویلر اویلر برای مدل سازی جریان دوفاز در سیکلون استفاده شده است و برای این نوع جریان، معادله‌ی پیوستگی و مومنتوم به ترتیب به شکل

شود. یکی از این مشکلات این است که مایع هنگام خروج از خروجی مایع مقداری گاز را با خود حمل می‌کند که به آن حمل گاز از پایین¹ گفته می‌شود. مشکل دیگری که وجود دارد حمل مایع توسط گاز از خروجی گاز می‌باشد که حمل مایع از بالا² نامیده می‌شود. منتیلا و همکاران یک مدل خط سیر حساب برای تعیین زمان شروع حمل گاز از پایین در جداکننده‌های استوانه‌ای گاز مایع، برای طراحی این جداکننده‌ها برای کاربردهای میدانی توسعه دادند [3]. آن‌ها مثال‌هایی را برای نمایش این‌که خط سیر حساب چگونه می‌تواند در طراحی جداکننده‌های سیکلونی کمک کند، فراهم کردند. فرهاد اردال و همکاران شبیه سازی‌های عددی از جریان تک‌فاز و دوفاز در سیکلون‌های مختلف برای بررسی میدان پیچیده‌ی جریان در جداکننده‌ی گاز مایع و پیش‌بینی پدیده‌های مرتبط با این جداکننده‌ها نظیر حمل گاز از پایین ارائه دادند [4]. آن‌ها کار خود را با داده‌های تجربی که شامل نمودار سرعت مماسی و کاهش سرعت مماسی بود مقایسه کردند و توافق خوبی نیز حاصل شد. آن‌ها همچنین یک مدل متقارن محوری را توسعه دادند که از نظر محاسباتی مفید می‌باشد. کیرینوس یک مدل مکانیسمی برای پیش‌بینی درصد حمل مایع از بالا در داخل سیکلون استوانه‌ای توسعه داد [5]. همچنین یک مدل موجود برای پیش‌بینی حمل مایع از بالا در شرایط فشار بالا شامل مدل‌های پیشرفته برای جریان خالص صفر مایع³ در ناحیه‌ی قطره و سرعت بحرانی توسط آن‌ها توسعه داده شده است. هدف کار آن‌ها بررسی داده‌های بدست آمده برای حمل مایع از بالا و گسترش مدل مکانیسمی برای شرایط فشار بالا و پیش‌بینی درصد مایع از بالا حمل شده بود. گومز به طور تئوری و تجربی، هیدرودینامیک جریان دوفازی پخش شده‌ی چرخشی را برای پیش‌بینی حمل گاز از بالا و سنجش عملکرد جداکننده‌های سیکلونی، مطالعه کرد [6]. هدف مطالعه‌ی او دو چیز بود، مطالعه‌ی تجربی هیدرودینامیک جریان دوفازی پخش شده‌ی چرخشی در قسمت پایینی سیکلون و توسعه‌ی مدل مکانیسمی برای مشخص کردن رفتار پیچیده‌ی این نوع جریان که پیش‌بینی حمل گاز از پایین را در جداکننده‌ی سیکلونی گاز مایع ممکن می‌کند.

یک جداکننده‌ی سیکلونی گاز مایع شامل یک لوله‌ی عمودی استوانه‌ای با یک ورودی مماسی شیب‌دار رو به پایین که در قسمت میانی سیکلون قرار گرفته است و دو خروجی، یکی برای مایع و دیگری برای گاز است. شکل 1 شمای کلی یک جداکننده‌ی استوانه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل 1 نمایی از یک سیکلون استوانه‌ای

- 1- Gas carry under (GCU)
- 2- Liquid carry over (LCO)
- 3- Zero net flow holdup

روابط (1) و (2) می باشد:

$$\frac{\partial \alpha_k \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \bar{v}_k) = S_m \quad (1)$$

معادله (1) فرم کلی معادله بقای جرم بوده و برای جریان های تراکم پذیر و تراکم ناپذیر صادق است. ترم منبع S_m جرم اضافه شده به فاز پیوسته از فاز پخش شده (فاز دوم) یا هر اثر دیگری از طرف دوفاز بر هم است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla P + \rho \bar{g} + F \quad (2)$$

که در معادله (2)، P فشار استاتیکی، ρ چگالی، v سرعت، F و ρg به ترتیب نیروی گرانش و نیروی خارجی (نیروهایی که در اثر ارتباط دوفاز باهم به وجود می آیند) هستند.

طبق مطالعات انجام شده مدل آر-اس-ام برای جریان آشفته ایزوتروپ مناسب بوده که معادله انتقال را برای هر مولفه تنش رینولدز حل می کند و در واقع کاربردی ترین مدل برای جریان داخل سیکلون است [12]. بنابراین برای مدل سازی جریان آشفته در سیکلون، از مدل آر-اس-ام¹ استفاده شده است که نتایج خوبی نیز از آن حاصل شد. مدل های تنش رینولدزی²، همچنین به عنوان مدل های انتقال تنش های رینولدزی³، شناخته شده هستند که یک مدل آشفته سطح بالا و پرکاربرد محسوب می شود. در روش آر-اس-ام، ویسکوزیته گردابی کنار گذاشته شده و تنش رینولدزی به طور مستقیم محاسبه می شود. معادله دقیق تنش های رینولدزی به طور مستقیم بر پایه میدان تنش های رینولدزی استوار است. مدل تنش های رینولدزی شامل محاسبه مجزای مولفه تنش رینولدزی با استفاده از معادله دیفرانسیلی انتقال است. مولفه های تنش رینولدز محاسبه شده برای بدست آوردن معادله مومنوم رینولدز متوسط استفاده می شود. در حالت دوفازی، باید مدل تنش های رینولدزی با الگوریتم دوفازی ترکیب شده تا هم مدل آر-اس-ام و هم مدل اولر اولر لحاظ شوند. معادله انتقال تنش های رینولدزی چندفازی به شکل رابطه (3) نوشته می شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\alpha}_k \rho_k \bar{V}_k) + \nabla \cdot (\bar{\alpha}_k \rho_k \bar{V}_k \otimes \bar{V}_k) = -\bar{\alpha}_k \nabla P + \bar{\alpha}_k \nabla \cdot \bar{\tau}_k + \bar{\alpha}_k \rho_k \bar{g}_k + S_k \quad (3)$$

علامت مد در بالای پارامترهای مختلف نشان دهنده مقدار متوسط این پارامترها در هر فاز است که به صورت رابطه (4) محاسبه می شود. (با فرض \emptyset به عنوان متوسط فازی)

$$\bar{\phi} = \frac{\alpha_c \phi_c}{\alpha_c} \quad (4)$$

α کسر جرمی هر فاز، ρ چگالی هر فاز، V و P به ترتیب سرعت و فشار، g گرانش و S ترم منبع می باشند. ترم تنش آشفته که در معادله انتقال آمده است باید برای هر فاز به صورت جداگانه محاسبه شود. این ترم از رابطه (5) محاسبه می شود:

$$\bar{\tau}_k = -\bar{\alpha}_k \rho_k \bar{R}_{k,ij} \quad (5)$$

که اندیس k با c (برای فاز پیوسته) و d (برای فاز دوم) جایگزین می شود. همان طور که در معادله مشاهده می شود، مدل حاضر تنش های رینولدزی چندفازی، معادله انتقال را برای تنش های رینولدزی (R_{ij}) حل می کند.

3- مدل سازی جریان دوفازی

در این شبیه سازی، از آن جا که در سیکلون هسته ی گازی تشکیل می شود، از مدل اولر اولر استفاده شده است [14]. در این مدل هر دو فاز به صورت فاز پیوسته فرض شده و معادله ی نویر استوکس به صورت مجزا برای هر کدام از فازها حل می شود.

4- بررسی استقلال از شبکه

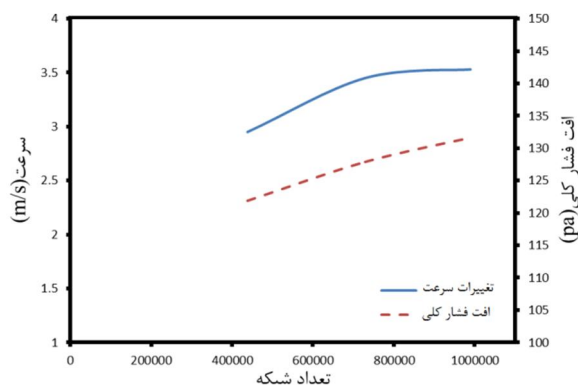
برای دستیابی به استقلال از شبکه در نتایج، تعداد مختلفی از شبکه ها مورد آزمایش قرار رفت. در جدول 1 نتایج محاسباتی شبکه ی مستقل براساس تغییرات افت فشار نشان داده شده است که شکل 2 چگونگی این تغییرات را به صورت نمودار به تصویر می کشد. 437940، 729013، 989554 شبکه در جدول نشان داده شده اند. بیشینه اختلاف بین نتایج کمتر از 5 درصد است که اختلاف قابل قبولی است. البته طبق محاسبات انجام شده مشاهده شد که حتی 437940 شبکه، استقلال خوبی از شبکه را نتیجه می دهد اما برای پرهیز از عدم قطعیت و شک در نتایج، محاسبات با استفاده از 729013 سلول انجام گرفته است. شکل 3 شمایی از شبکه بندی مثلثی در بخش های مختلف سیکلون را نشان می دهد. برای حصول اطمینان از این که شبکه ها در نزدیکی دیواره به اندازه ی کافی ریز شده اند، پارامتر y^+ اندازه گیری شد. که مقدار آن از 3/75 تا 102/9 تغییر کرده و مقدار متوسط آن 18/7 در این شبیه سازی می باشد و با توجه به استفاده از تابع دیواره ی مقیاس پذیر 4، این مقدار نشان دهنده ی معقول بودن شبکه بندی در نزدیکی دیواره است.

5- شرایط مرزی

یک شرط سرعت ورودی⁵ برای ورودی سیکلون که جریان در آن عمود بر مرز است، در نظر گرفته شده است و شرط مرزی فشار استاتیکی در خروجی برای هر دو خروجی سیکلون (گاز و مایع) در نظر گرفته شده است. سایر مرزهای سیکلون نیز دارای شرط عدم لغزش می باشند. سرعت قطرات آب نیز برابر سرعت ورودی فاز پیوسته است. قطر قطرات آب 50 میکرون در نظر گرفته

جدول 1 بررسی استقلال از شبکه

تعداد شبکه	تغییرات سرعت	افت فشار کلی
437940	2/95	121/881
729013	3/45	127/883
989554	3/53	131/622
اختلاف %	2/2	2/84



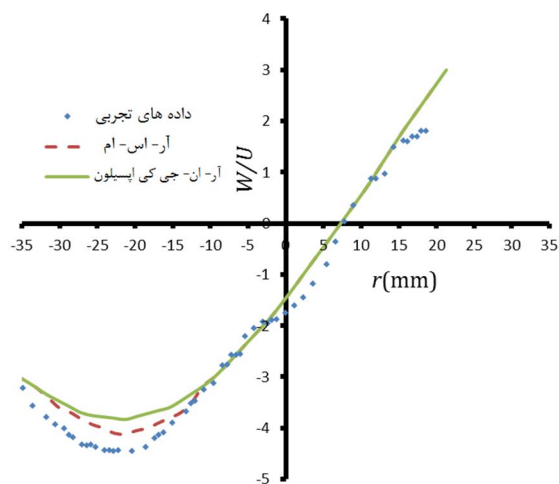
شکل 2 بررسی استقلال از شبکه

4- scalable
5- Velocity inlet

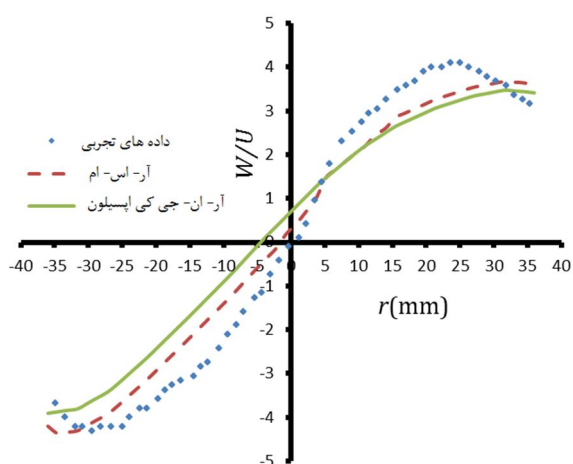
1- RSM
2- Reynolds Stress Model
3- Reynolds Stress Transport

6- اعتبارسنجی مدل عددی¹

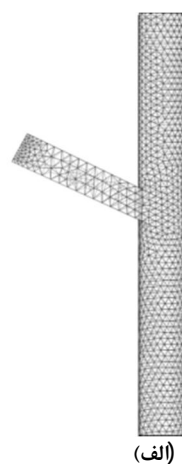
برای کسب اطمینان از نتایج شبیه‌سازی سیکلون، شبیه‌سازی در نرم‌افزار CFX با یک مورد تجربی از هریز و همکاران [10] مقایسه شده است. برای بررسی درستی مدل ساخته شده، پروفیل سرعت مماسی به دست آمده از نرم‌افزار در فاصله‌ی 500 میلی‌متر و 600 میلی‌متر در زیر ورودی با نتایج حاصل از مدل تجربی مقایسه شده است. این شکل‌ها نشان دهنده‌ی نمودار سرعت براساس تغییرات شعاع است. شکل 5 پروفیل‌های مربوط به مدل‌سازی جریان آشفته با روش آر-ان-جی کی اپسیلون² و آر-اس-ام و مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج تجربی در فاصله‌ی 500 میلی‌متر زیر ورودی و شکل 6 همین پروفیل‌ها را در فاصله‌ی 600 میلی‌متر زیر ورودی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در شکل 5، از شعاع 10- و بیشتر، نتایج حاصل از روش آر-ان-جی کی اپسیلون و آر-اس-ام روی هم افتاده‌اند اما در شعاع‌های کمتر، روش آر-اس-ام نزدیکی بیشتری با نتایج تجربی دارد. در شکل 6 نیز مشاهده می‌شود که روش آر-اس-ام نزدیکی بیشتری با نتایج تجربی دارد.



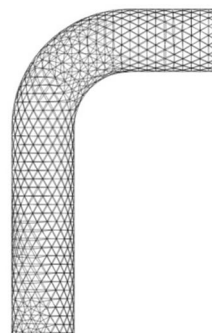
شکل 5 پیش‌بینی سرعت مماسی متوسط در 500 mm زیر ورودی روش آر-ان-جی کی اپسیلون و آر-اس-ام



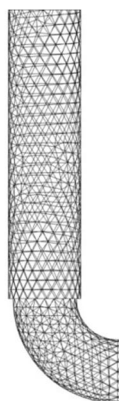
شکل 6 پیش‌بینی سرعت مماسی متوسط در 600 mm زیر ورودی روش آر-ان-جی کی اپسیلون و آر-اس-ام



(الف)



(ب)

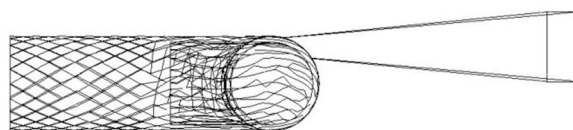


(ج)

شکل 3 نمایش شبکه بندی مثلثی در سیکلون (الف) قسمت میانی سیکلون (ب)

قسمت بالایی سیکلون (ج) قسمت پایینی سیکلون

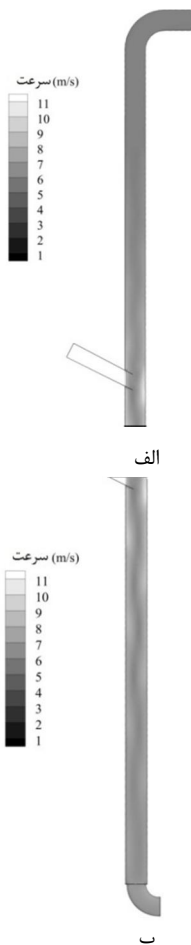
شد. نرخ حجمی جریان هوا $35 \text{ m}^3/\text{h}$ ، چگالی هوا $1/185 \text{ kg/m}^3$ و ویسکوزیته‌ی دینامیکی آن برابر $1/831 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ است. و نرخ حجمی جریان آب برابر با $7/05 \text{ m}^3/\text{h}$ با چگالی 997 kg/m^3 و ویسکوزیته‌ی دینامیکی $8/899 \times 10^{-4} \text{ kg/m.s}$ است. شکل 4 سیکلون شبیه‌سازی شده را از بالا نشان می‌دهد.



شکل 4 نمایش سیکلون از بالا

1- Validation
2- RNG k - ε

در تحلیل کانتورها و پارامترهای مختلف سیکلون، سیکلون را به دو بخش بالایی و پایینی تقسیم می‌کنیم که به ترتیب معرف ناحیه‌ی زیر ورودی و بالای ورودی سیکلون است. شکل 10 کانتور سرعت جریان را در یک صفحه در قسمت میانی سیکلون نشان می‌دهد و همان‌طور که در تصویر قابل مشاهده است، یک نوار در وسط کانتور دیده می‌شود که هسته‌ی گازی³ بوده و گازی که به سمت بالا و خروجی گاز می‌رود را نشان می‌دهد. در سیکلون-های مخروطی به دلیل کم شدن ناگهانی سطح مقطع در قسمت پایین سیکلون، به گاز که به علت کم بودن وزن آن و کمتر بودن نیروی گریز از مرکز اعمال شده به آن، در وسط سیکلون قرار دارد، نیرویی به سمت بالا وارد می‌شود و باعث حرکت هسته‌ی گازی ایجاد شده به سمت بالا و خروجی گاز می‌شود. اما در سیکلون‌های استوانه‌ای تغییر ناگهانی سطح مقطع وجود ندارد و زیاد شدن مایع جمع شده در نزدیکی دیواره و افزایش حجم این مایع حول دیواره در حرکت به سمت پایین سیکلون و جدا شدن بیش از پیش دوفاز از هم، باعث اعمال نیرو به هسته‌ی گازی و حرکت آن به سمت بالا می‌شود. همان‌طور که در شکل 10 مشهود است در قسمت پایینی سیکلون در نزدیکی دیواره، سرعت‌های بالاتری مشاهده می‌شود که به خاطر سرعت بالای مایع در ورودی سیکلون، هنگام ورود به سیکلون و حرکت مماسی به سمت پایین است اما در قسمت بالایی مقادیر کمتری از سرعت مشاهده می‌شود که به خاطر افت سرعت پس از جداسازی و در زمان برگشت سیال از پایین به سمت بالا، برای خارج شدن از خروجی گاز است.

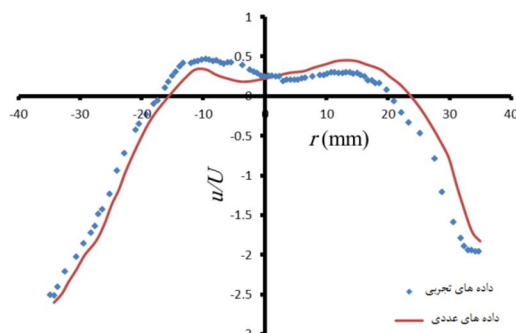


شکل 10 کانتور سرعت (الف) کانتور سرعت در قسمت بالایی سیکلون (ب) کانتور سرعت در قسمت پایینی سیکلون

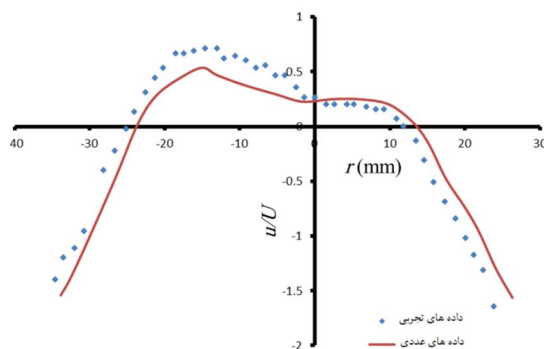
با توجه به بهتر بودن جواب حاصل از مدل آر-اس-ام و انتخاب این روش برای محاسبات بعدی، مقایسه‌ی حاصل از نتایج روش آر-اس-ام با نتایج تجربی برای سرعت محوری نیز در شکل‌های 7 و 8 به ترتیب برای 500 میلی‌متر و 600 میلی‌متر زیر ورودی آورده شد.

7- شبیه‌سازی مدل عددی و نتایج:

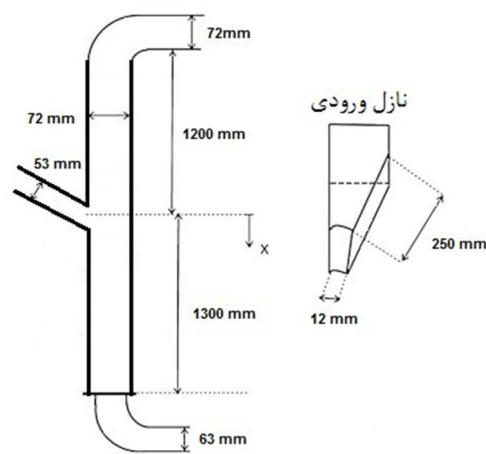
برای شبیه‌سازی عددی سیکلون، از نرم‌افزار آنسیس¹ CFX استفاده شده است. ابعاد و هندسه‌ی سیکلون در شکل 9 نشان داده شده است. 729013 شبکه‌ی مثلثی برای شبکه بندی این هندسه استفاده شده است. این هندسه شامل یک ورودی شیب‌دار مماسی با شکل نازل مستطیلی، و دو خروجی، یکی در بالا برای خروج گاز و دیگری در پایین برای خروج مایع است. جریان در سیکلون، پایدار² فرض شده و فشار مرجع در تمام سیکلون 0/8 است.



شکل 7 پیش‌بینی سرعت محوری متوسط در 500 mm زیر ورودی روش آر-اس-ام



شکل 8 پیش‌بینی سرعت محوری متوسط در 600 mm زیر ورودی روش آر-اس-ام



شکل 9 ابعاد سیکلون

1- Ansys
2- Steady state

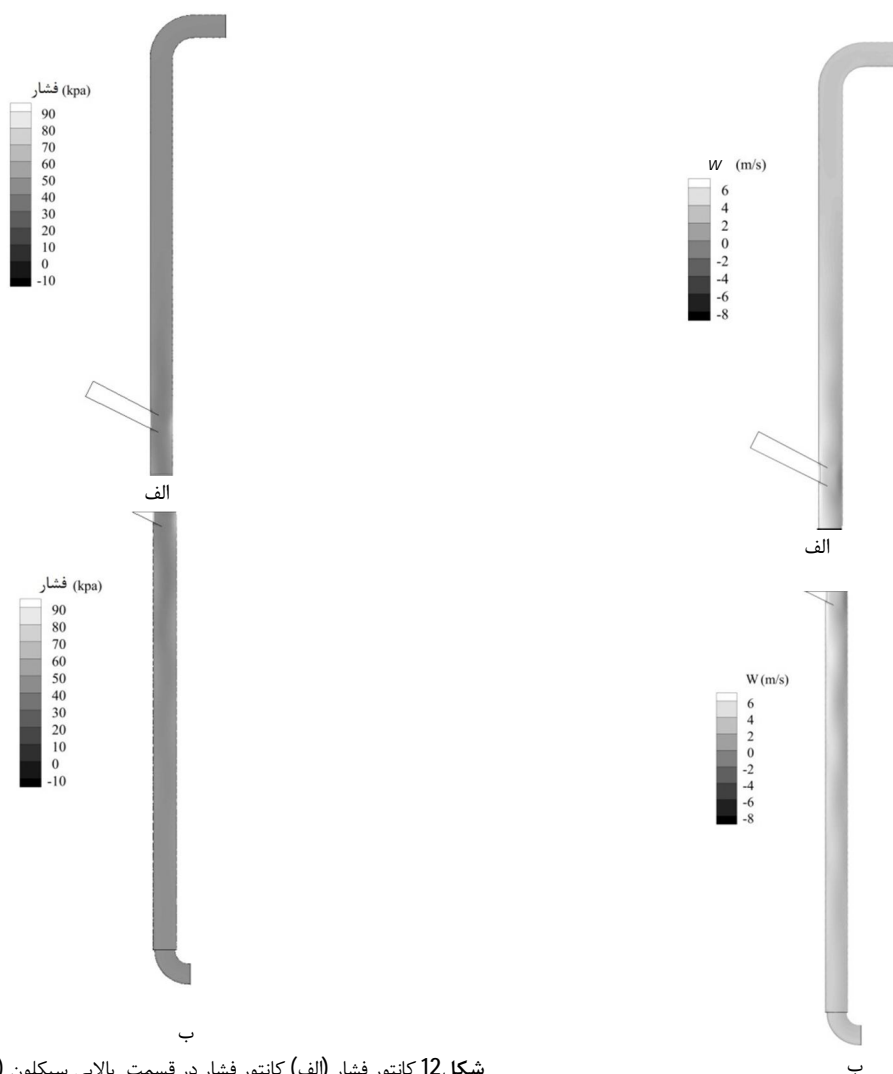
که در شکل پیداست، قسمت بالایی سیکلون فشار کمتری دارد، چون گاز بعد از پایین رفتن به همراه سیال و متحمل شدن افت فشار، در حالی که فشار کمی دارد به قسمت بالایی بر می‌گردد تا از خروجی گاز خارج شود. در قسمت نزدیکی ورودی به علت بالا بودن سرعت، ناحیه‌ای با فشار کمتر از فشار خروجی مشهود است.

8- بهینه‌سازی

8-1- روش بهینه‌سازی

در این مطالعه، پارامترهای مختلفی از ورودی سیکلون برای بهینه‌سازی انتخاب شده‌اند. در واقع سه پارامتر در نظر گرفته شده‌اند تا تأثیر تغییر آن‌ها بر سیال داخل سیکلون بررسی شود. برای بررسی تأثیر تغییر پارامترها، دو پارامتر به عنوان پارامترهای هدف برای بهینه‌سازی انتخاب شده‌اند که این پارامترها حمل گاز از پایین و حمل مایع از بالا می‌باشند. برای این منظور از بهینه‌سازی تابع هدف¹ در نرم‌افزار انسیس CFX استفاده شده است که از روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی پارامترها استفاده می‌کند. در واقع بهینه

شکل 11 پروفایل سرعت مماسی را نشان می‌دهد که مؤلفه‌ی W سرعت است و زمانی که به سمت پایین باشد مثبت در نظر گرفته شده است. روند تغییرات سرعت مماسی در سیکلون تقریباً مشابه روند تغییرات سرعت کلی است که در شکل 10 نشان داده شد، که در قسمت پایینی جداکننده‌ی استوانه‌ای گاز مایع مقدار سرعت مماسی بیشتر از مقدار آن در بخش بالایی سیکلون است. مقدار سرعت مماسی در نزدیکی دیواره و ورودی بیشتر از سایر نقاط است که به دلیل سرعت بالای سیال در ورودی سیکلون است. همان‌طور که از مقدار سرعت مماسی پیداست، این سرعت قسمت اعظم مقدار کلی سرعت (نسبت به سایر مولفه‌های سرعت) را به خودش اختصاص می‌دهد. کانتور مربوط به فشار به شکل 12 نشان داده شده است. با حرکت جریان به سمت پایین و وجود اصطکاک، فشار افت می‌کند. از آن‌جا که جریان به صورت مماسی وارد سیکلون شده و به صورت چرخشی در نزدیکی دیواره به سمت پایین حرکت می‌کند، نوعی خلأ نسبی در وسط جریان اتفاق می‌افتد، که در واقع همان ناحیه‌ی هسته‌ی گازی است و دارای فشار کمتری است. یک نقطه‌ی با فشار بالا در قسمت جلوی ورودی سیکلون مشاهده می‌شود که به خاطر برخورد جریان با سرعت بالا به آن نقطه است. و همان‌طور



شکل 12 کانتور فشار (الف) کانتور فشار در قسمت بالایی سیکلون (ب) کانتور فشار در قسمت پایینی سیکلون

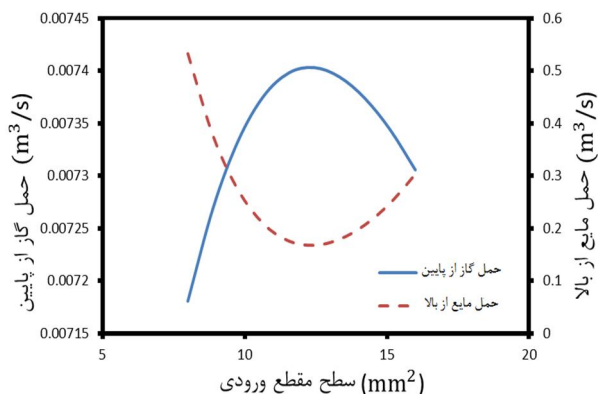
شکل 11 کانتور سرعت مماسی (الف) کانتور سرعت مماسی در قسمت بالایی سیکلون (ب) کانتور سرعت مماسی در قسمت پایینی سیکلون

1- Goal Driven Optimization (GDO)

به صورت جداگانه بر میزان حمل مایع از بالا و حمل گاز از پایین بررسی شده و مقدار بقیه‌ی پارامترهای هندسی برابر مقدار اولیه‌ی ذکر شده در بخش هندسه (بخش 7) می‌باشد. در شکل 13 مشاهده می‌شود که افزایش پهنا‌ی مقطع ورودی باعث افزایش حمل گاز از پایین تا رسیدن به یک نقطه‌ی ماکزیمم می‌شود. در واقع افزایش پهنا‌ی مقطع ورودی باعث کاهش سرعت شده و در نتیجه مومنتوم سیال کم شده و با کاهش نیروی گریز از مرکز دو فاز به خوبی از هم جدا نشده و گاز زیادی به همراه مایع از خروجی مایع خارج می‌شود. اما با کاهش بیشتر سرعت به خاطر افزایش سطح مقطع ورودی، سیال زمان ماند بیشتری در سیکلون داشته که حتی با نیروی گریز از مرکز کمتر نیز جدایش در طول زمان حضور سیال در سیکلون انجام می‌گیرد. از این شکل همچنین نتیجه گرفته می‌شود که یک نقطه‌ی بهینه برای حمل مایع از بالا با تغییر پهنا‌ی مقطع ورودی وجود دارد. در ابتدا که حمل گاز از پایین کم است، حجم گاز خروجی از خروجی گاز بیشتر بوده و مایع بیشتری به همراه آن از خروجی گاز خارج می‌شود. اما با افزایش پهنا‌ی ورودی جدایش به خوبی صورت نگرفته و گاز کمی از بالا خارج شده در نتیجه مایع کمتری نیز به سمت خروجی گاز می‌رود. با رسیدن سطح مقطع به اندازه‌ای که زمان ماند کافی به سیال برای جداسازی را بدهد، گاز و مایع زمان کافی برای جدایش در اختیار داشته و با زیاد شدن گاز خروجی از بالا، مایع بیشتری نیز به همراه آن از بالا از سیکلون خارج می‌شود. اما باید دقت داشت که با افزایش بیش از اندازه‌ی پهنا‌ی ورودی، سرعت بیش از اندازه کاهش یافته و منجر به اختلاط دوباره گاز و مایع و حمل مایع به بالا توسط گاز می‌شود.

شکل 14 رابطه‌ی بین زاویه‌ی ورودی و تغییرات حمل گاز از پایین و حمل مایع از بالا را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشهود است در زوایای کم ورودی حمل گاز از پایین کمتری اتفاق می‌افتد که به خاطر زمان ماند بیشتری است که در سیکلون دارد. هرچه سیال بیشتر در سیکلون بماند (البته نه به مقدار زیاد که باعث اختلاط مجدد شود) جدایش بهتر رخ می‌دهد و دو فاز بهتر از هم جدا شده و گاز کمتری به همراه مایع از خروجی مایع خارج می‌شود. با افزایش زاویه‌ی ورودی جهت حرکت سیال به سمت پایین بیشتر شده و مایع راحت‌تر به سمت خروجی مایع حرکت کرده و خارج می‌شود.

شکل 15 نشان می‌دهد که در ابتدا به علت کم بودن ارتفاع ورودی و نزدیک بودن ورودی به خروجی مایع، مقدار حمل گاز از پایین بیشتری



شکل 13 تاثیر تغییر سطح مقطع ورودی بر حمل گاز از پایین و حمل مایع از بالا

سازی تابع هدف دسته‌ای از قیود، تکنیک‌های بهینه‌سازی چند مؤلفه‌ای چند هدفه الگوریتم ژنتیک است که در آن بهترین طرح ممکن از میان دسته‌ای از پارامترهای داده شده به عنوان هدف، به دست می‌آید. سه روش بهینه‌سازی در این روش در دسترس است: الگوریتم ژنتیک با چند تابع هدفه¹ و روش غربال‌گری²، برنامه‌ی غیرخطی با روش لاگرانژی مرتبه‌ی چهار³، روش‌های الگوریتم ژنتیک با چند تابع هدفه و NLPQL زمانی قابل استفاده‌اند که تمام پارامترهای ورودی پیوسته باشند. فرایند بهینه‌سازی تابع هدف به شما این امکان را می‌دهد تا تأثیر تغییرات پارامترهای ورودی را با استفاده از یک سری قیود که بر روی پارامترهای خروجی اعمال شده‌اند را بررسی کنید. در این مطالعه از روش الگوریتم ژنتیک با چند تابع هدفه برای بهینه‌سازی استفاده شده است. و سه پارامتر که برای بهینه‌سازی انتخاب شده‌اند شامل سطح مقطع نازل ورودی، ارتفاع ورودی نسبت به پایه‌ی جداکننده‌ی استوانه‌ای گاز مایع و زاویه‌ی ورودی می‌باشند، و هدف از بهینه‌سازی نیز کمینه کردن مقدار حمل مایع از بالا و حمل گاز از پایین است.

مسائل بهینه‌سازی از نظر تعداد توابع هدف و معیارهای بهینه‌سازی، به دو نوع تقسیم‌پذیر هستند: مسائل بهینه‌سازی تک هدفه و مسائل بهینه‌سازی چند هدفه. در مسائل بهینه‌سازی تک هدفه، هدف از حل مسأله بهبود یک شاخص عملکرد یگانه است که مقدار کمینه یا بیشینه‌ی آن، کیفیت پاسخ به دست آمده را به طور کامل منعکس می‌کند. اما در برخی موارد، نمی‌توان صرفاً با اتکا به یک شاخص، یک پاسخ فرضی برای مسأله بهینه‌سازی را امتیازدهی نمود. در این نوع مسائل، ناگزیریم که چندین تابع هدف یا شاخص عملکرد را تعریف نماییم و به طور همزمان، مقدار همه آن‌ها را بهینه کنیم.

بهینه‌سازی چند هدفه، یکی از زمینه‌های بسیار فعال و پرکاربرد تحقیقاتی در میان مباحث بهینه‌سازی است. غالباً بهینه‌سازی چند هدفه به نام‌های بهینه‌سازی چند معیاره⁴ و بهینه‌سازی برداری⁵ نیز شناخته می‌شود. روش‌های فراوانی تاکنون برای حل این مسائل ارائه شده‌اند که در حالت کلی می‌توان آن‌ها را به دو دسته تقسیم نمود: روش‌های کلاسیک، که اغلب مسأله چند هدفه را به یک مسأله یک هدفه تقلیل می‌دهند، و روش‌های تکاملی، که اغلب مسأله بهینه‌سازی چند هدفه را واقعا به صورت چند هدفه حل می‌نمایند.

الگوریتم ژنتیک چند پارامتری این امکان را می‌دهد که دسته‌ی جدیدی از نمونه‌ها را تولید کرده یا از داده‌های موجود برای رسیدن به روشی بهتر از روش اسکریپینگ استفاده کنیم. الگوریتم ژنتیک با چند تابع هدفه فقط برای داده‌های پیوسته قابل استفاده بوده و قادر به بررسی کردن چند پارامتر و بهینه‌سازی آن است. الگوریتم ژنتیک با چند تابع هدفه یک متغیر از الگوریتم ژنتیک مرتب شده‌ی غیر غالب⁶ براساس مفاهیم کنترل شده‌ی برتر است. در این الگوریتم روش مرتبه بندی پارتو⁷ به صورت سریع و غیر غالب با سرعت یک مرتبه بیشتر از روش پارتو سابق انجام می‌گیرد.

8-2- نتایج بهینه سازی

به عنوان نتایج بهینه‌سازی، تأثیر تغییر پارامترها بر توابع هدف، بر روی نمودارهای مختلف نشان داده شده است. در این شکل‌ها اثر تغییر هر پارامتر

1- Multi Objective Genetic Algorithm(MOGA)

2- Screening

3- Nonlinear Programming by Quadratic Lagrangian(NLPQL)

4- Multi-criteria Optimization

5- Vector Optimization

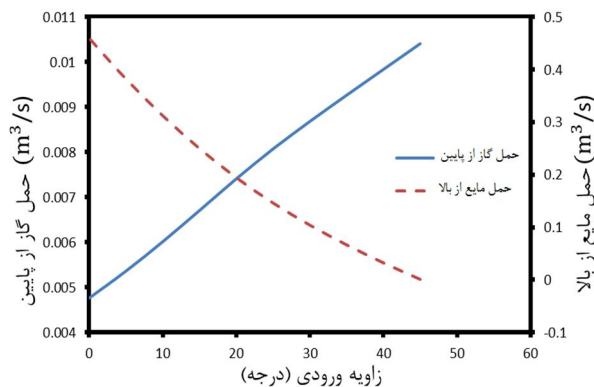
6- Non-Dominated Sorted Genetic Algorithm

7- Pareto

جدول 2 تاثیر تغییر تمام پارامترهای ورودی بر حمل مایع از بالا و حمل گاز از

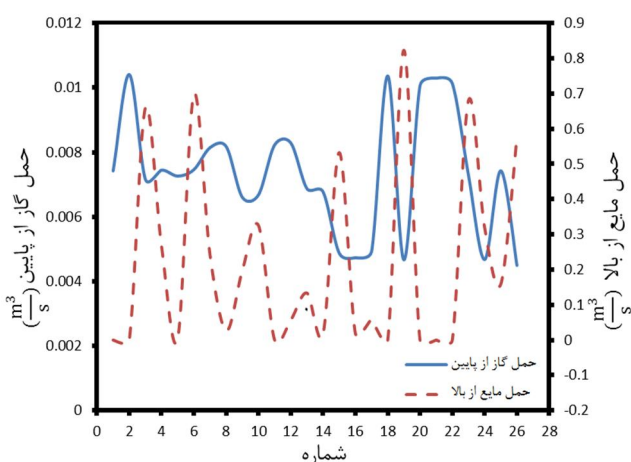
پایین

نام	ارتفاع ورودی (mm)	پهنای نازل ورودی (mm)	زاویه ورودی (درجه)	حمل گاز از پایین (m ³ /s)	حمل مایع از بالا (m ³ /s)
1	1400	12	-22/5	0/00742	0
2	500	12	-22/5	0/0104	0
3	1400	8	-22/5	0/00716	0/659
4	1400	16	-22/5	0/00744	0/266
5	1400	12	-45	0/00726	0/0039
6	1400	12	0	0/00746	0/6977
7	1115	11	-16	0/00814	0/2416
8	1115	11	-29	0/00817	0/0266
9	1655	11	-29	0/0066	0/1974
10	1655	11	-16	0/00667	0/3252
11	1115	13/13	-29	0/00822	0
12	1115	13/13	-16	0/00829	0/0568
13	1655	13/13	-16	0/00687	0/1333
14	1655	13/13	-29	0/00677	0/0178
15	2286/6	15/975	0	0/00487	0/532
16	2281/6	8/1943	-44/1	0/00473	0/0186
17	2289/7	15/8	-44/5	0/00492	0/579
18	504/88	8/076	-2	0/01036	0
19	2268/5	8/39	-1	0/004666	0/823
20	556/93	15/87	-45	0/01007	0
21	506/03	15/86	-3	0/01029	0
22	572/95	8/24	-43/5	0/01013	0
23	1373/4	15/844	-0/5	0/0073	0/680
24	2263/5	15/6	-22/5	0/00467	0/319
25	1416/5	15/93	-44	0/0074	0/1588
26	2260/6	8/34	-22/5	0/00449	0/5759



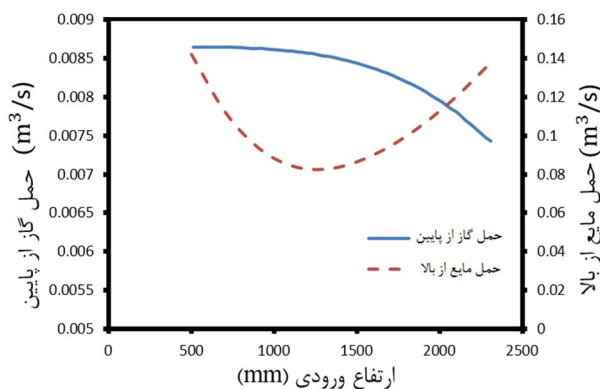
شکل 14 تاثیر تغییر زاویه ی ورودی بر حمل گاز از پایین و حمل مایع از بالا

مقدار را دارد و با زیاد شدن ارتفاع ورودی و نزدیک شدن ورودی به خروجی گاز، مقدار حمل گاز از پایین کاهش می یابد. همچنین همان طور که از نمودار پیداست، در ابتدا به علت کم بودن ارتفاع ورودی، جدایش به خوبی صورت نگرفته و مایع زیادی به همراه گاز از خروجی گاز خارج می شود اما با زیاد شدن ارتفاع جدایش بهتر اتفاق افتاده و مقدار حمل مایع از بالا کاهش می یابد. در ارتفاع های زیاد ورودی نیز به علت نزدیک شدن ورودی به خروجی گاز، مقدار حمل مایع از بالا مجددا افزایش می یابد. زمان حضور سیال در سیکلون به طور مستقیم به طول سیکلون و مربع قطر سیکلون وابسته است. درحالی که نیروهای مرکزگرا و گریز از مرکز با قطر سیکلون نسبت عکس دارند. همان طور که از نمودارهای تغییر پارامترها و تأثیر آن ها بر حمل گاز از پایین و حمل مایع از بالا مشهود است، پارامترها باید به گونه ای طراحی شوند تا یک زمان ماند بهینه برای حضور سیال در سیکلون حاصل شده و پارامترهای نامطلوب در آن به حداقل برسد. طبق بررسی های انجام شده و نشان داده شده، تغییر بعضی پارامترها باعث کاهش حمل گاز از پایین اما افزایش حمل مایع از بالا می شود. بنابراین یک مقدار بهینه برای پارامترهای متغیر وجود دارد تا همزمان به یک مقدار حمل مایع از بالا و حمل گاز از پایین مناسب و کم دست یافت. برای این منظور تأثیر تغییر تمام پارامترهای هندسی ورودی به طور همزمان بر حمل گاز از پایین و حمل مایع از بالا بررسی شد و نتایج آن در جدول 2 آمده است. برای درک بهتر جدول 2 نتایج حاصل از آن در شکل 16 به صورت نمودار نشان داده شده است که نشان دهنده ی تغییرات مقدار حمل گاز از پایین و حمل مایع از بالا براساس شماره ی آن مقدار در جدول است. در این شکل مقدار بهینه شده ی حمل گاز از پایین و حمل مایع از بالا نشان داده شد.



شکل 16 تغییرات حمل گاز از پایین و مایع از بالا بر اساس تغییر پارامترهای

هندسی ورودی



شکل 15 تاثیر تغییر ارتفاع ورودی بر حمل گاز از پایین و حمل مایع از بالا

8-3- مقایسه بین مدل اولیه و مدل بهینه شده

بهینه برای حمل مایع از بالا به دست آمده است. تمام پارامترهای در نظر گرفته شده برای بررسی تغییرات حمل گاز از پایین و حمل مایع از بالا در نهایت با استفاده از الگوریتم ژنتیک با چند تابع هدفه بهینه شدند و مشاهده شد که در مدل بهینه مقدار حمل مایع از بالا به صفر رسیده و مقدار حمل گاز از پایین نیز به میزان قابل توجهی کاهش یافته است.

10- مراجع

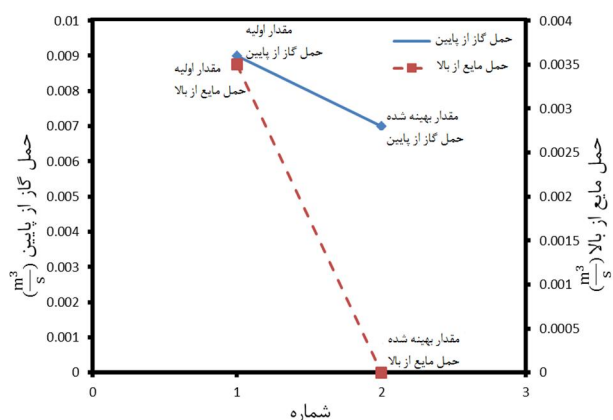
- [1] S. K. Marti, F. M. Erdal, O. Shoham, S. A. Shirazi, G. E. Kouba, *Analysis of gas carry-under in gas-liquid cylindrical cyclones*, The University of Tulsa and Chevron Petroleum Technology Company, 1996.
- [2] G. E. Kouba, S. Wang, L. E. Gomez, R. S. Mohan, O. Shoham, Review of the state-of-the-art gas-liquid cylindrical cyclone (GLCC) technology-field applications, Society of Petroleum Engineers, *International Oil & Gas Conference and Exhibition in China, Beijing, China*, 2006.
- [3] I. Mantilla, S. A. Shirazi and O. Shoham, flow field prediction and bubble trajectory model in gas-liquid cylindrical cyclone (GLCC) separators, *J. Energy Resour. Technol.*, No. 121(1), pp. 9-14, 1999.
- [4] F. M. Erdal, S. A. Shirazi, O. Shoham, G. E. Kouba, CFD simulation of single-phase and two-phase flow in gas-liquid cylindrical cyclone separators, *Society of Petroleum Engineers, SPE Journal*, 1997.
- [5] W.A. Chirinos, L.E. Gomez, S. Wang, R.S. Mohan, O. Shoham, G.E. Kouba, Liquid carry-over in gas/liquid cylindrical cyclone compact separators, *Society of Petroleum Engineers, SPE Journal*, 2000.
- [6] L. E. Gomez, *Dispersed two-phase swirling flow characterization for predicting gas carry-under in gas-liquid cylindrical cyclone compact separators*, A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Discipline of Petroleum Engineering, The Graduate School, The University of Tulsa, 2001.
- [7] L. E. Gomez, R.S. Mohan, O. Shoham, G.E. Kouba, Enhanced mechanistic model and field-application design of gas/liquid cylindrical cyclone separators, *Society of Petroleum Engineers, SPE Journal*, 2000.
- [8] I. A. Arpandi, A. R. Joshi, O. Shoham, S. A. Shirazi, Hydrodynamics of swirling flows in gas-liquid cylindrical cyclone separators, *SPE annual technical conference and exhibition*, 1995.
- [9] R. Hreiz, C. Gentric, N. Midoux, Numerical investigation of swirling flow in cylindrical cyclone, *Chemical engineering research and design*, No. 89, pp. 2521-2539, 2011.
- [10] R. Hreiz, C. Gentric, N. Midoux, R. Laine, D. Funschilling, Hydrodynamics and velocity measurements in gas-liquid swirling flows in cylindrical cyclones, *Chemical engineering research and design*, 2014.
- [11] K. Elsayed, C. Lacor, The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance, *Applied mathematical modeling*, 2011.
- [12] G. Gong, Zh. Yang, Sh. Zhu, Numerical investigation of the effect of helix angle and leaf margin on the flow pattern and the performance of the axial flow cyclone separator, *Applied mathematical modeling*, No. 36, pp. 3916-3930, 2012.
- [13] S. Wang, R.S. Mohan, O. Shoham, G.E. Kouba, Dynamic Simulation and Control-System Design for Gas/Liquid Cylindrical Cyclone Separators, *Society of Petroleum Engineers, SPE Journal*, 2001.
- [14] M.A. Reyes-Gutiérrez, L.R. Rojas-Solórzano, J.C. Marín-Moreno, A.J. Meléndez-Ramírez, J. Colmenare, Eulerian-Eulerian Modeling of Disperse Two-Phase Flow in a Gas-Liquid Cylindrical Cyclone, *J. Fluids Eng*, No. 128(4), pp. 832-837, 2006.

9- نتیجه‌گیری

با افزایش پهنای ورودی و کاهش سرعت سیال و افزایش زمان ماند سیال در سیکلون، حمل گاز از پایین کاهش می‌یابد. کاهش زاویه‌ی ورودی باعث زمان بیشتر حضور سیال در سیکلون شده و در نتیجه با جدایش بهتر، حمل گاز از پایین کاهش می‌یابد. پارامتر دیگر بررسی شده ارتفاع ورودی است که با تغییر آن یک مقدار بهینه برای حمل گاز از پایین به دست می‌آید. تأثیر تغییر پارامترهای هندسی ورودی بر مقدار حمل مایع از بالا نیز بررسی شد. با تغییر زاویه‌ی ورودی، ارتفاع ورودی و پهنای ورودی، یک مقدار جدول 3 مقایسه‌ی حمل گاز از پایین و حمل مایع از بالا در مدل اولیه و مدل

بهینه

نام	ارتفاع ورودی (mm)	پهنای نازل ورودی (mm)	زاویه ورودی (درجه)	حمل گاز از پایین ($\frac{m^3}{s}$)	حمل مایع از بالا ($\frac{m^3}{s}$)
مدل اولیه	1300	12	-27	0/009	0/0035
مدل بهینه	1400	12	-22/5	0/007	0



شکل 17 مقایسه‌ی مقدار اولیه‌ی حمل گاز از پایین و حمل مایع از بالا با مقدار بهینه شده