



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

امیرحسین قاسمی<sup>1</sup>، مهرزاد شمس<sup>2\*</sup>، محمد مهدی هیهات<sup>3</sup>

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 استوانه ای گاز مایع

بهینه سازی چند هدفه

حمل مایع از زیر

حمل گاز از بالا

### چکیده

در این مطالعه به بررسی عملکرد جداکننده گاز مایع استوانه ای و تاثیر تغییر پارامترهای هندسی ورودی سیکلون و شبیه سازی آن ها به روش دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته شده است. پس از انتخاب شبکه بندی مناسب برای هندسه ی سیکلون، تاثیر تغییر پارامترهای هندسی ورودی بر مقدار حمل مایع از بالا و مقدار حمل گاز از پایین مطالعه گردید. پارامترهای هندسی به خصوص هندسه ی ورودی تاثیر به سزایی در بهبود عملکرد سیکلون دارند. در این طراحی، سطح مقطع ورودی، زاویه ی ورودی و ارتفاع ورودی از کف سیکلون به طور همزمان بهینه شدند. از مدل آر-اس-ام برای شبیه سازی جریان آشفته استفاده شده و جریان دوفازی نیز با استفاده از روش اوپلر- اوپلر مدل سازی شده است. مطابق این شبیه سازی ها مقدار حمل گاز از زیر با کاهش زاویه ی ورودی و کاهش می یابد و یک نقطه ی بهینه برای حمل گاز از زیر با تغییر ارتفاع ورودی و تغییر سطح مقطع ورودی سیکلون وجود دارد. همچنین یک نقطه ی بهینه برای حمل مایع از بالا با تغییر پارامترهای هندسی ورودی و تغییر سطح مقطع ورودی و ارتفاع ورودی از کف سیکلون به دست می آید. افزایش زاویه ی ورودی باعث کاهش حمل مایع از بالا می گردد. در مدل بهینه مقدار حمل گاز از پایین کاهش یافته و حمل مایع از بالا به صفر می رسد.

## Modeling Gas Liquid Cylindrical Cyclone Separator and Optimizing Effective Geometry Parameters

Amirhosein Ghasemi<sup>1</sup>, Mehrzad Shams<sup>2\*</sup>, Mohammad Mahdi Heyhat<sup>2</sup>

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 جداکننده های جدید گاز مایع، نیروی گریز از مرکز در کنار نیروی جاذبه به جدایش فازها از هم کمک می کند. شرایط مختلف نظیر هزینه و فشار کاری، صنایع نفت و گاز را وادار به گرایش به سمت جداکننده های ارزان تر، کوچک تر و با بازدهی جدایش بهتر کرد. جداکننده هایی که فشرده بوده و مناسب کاربردهای کنار ساحلی و زیر دریا باشد [2]. در جداسازی فازهای مختلف در جداکننده ی استوانه ای گاز مایع، ممکن است مشکلاتی به وجود آید که باعث کاهش بازدهی این جداکننده ها می-

امروزه جداکننده های استوانه ای گاز مایع<sup>1</sup>، از آنجا که برتری زیادی نسبت به جداکننده های قدیمی دارند، بیش از پیش مورد توجه صنایع نفت و گاز قرار می گیرند. استفاده از سیکلون جداکننده ی گاز مایع در کاربردهای میدانی، نیازمند فهمیدن کامل هیدرودینامیک جریان در داخل این جداکننده ها است [1]. در جداکننده های قدیمی، نیروی جاذبه تنها عامل جداکننده ی فازها از

1- Gas liquid cylindrical cyclone (GLCC)

در طول این سال ها و افزایش استفاده از این نوع جداکننده ها، بررسی های مختلفی برای ارتقای دانش درباره ی ساختار جریان در سیکلون ها و بهینه کردن عملکرد آن ها صورت گرفت. عدم وجود درک کامل و صحیح از هیدرودینامیک پیچیده ی جریان چندفازی در داخل جداکننده ها، اعتماد به نفس کافی برای طراحی این جداکننده ها را کم کرده و نیاز به تحقیق بیش از پیش را در این زمینه نشان می دهد. همچنین ارتقای دانش در مورد هیدرودینامیک جریان، استفاده کنندگان از جداکننده های سیکلونی را قادر می سازد تا عملکرد آن ها را پیش بینی کرده و جداکننده ی مناسبی را برای کاربردهای مختلف طراحی کنند [7]. اینتا آرپندی و همکاران مطالعه ای تجربی بر روی جداکننده ی استوانه ای گاز مایع و چندین پارامتر رفتار جریان و ساختار این جداکننده ها، درحالی که جداکننده شرایطی را دنبال می کند که حمل مایع از بالا و حمل گاز از پایین اتفاق نمی افتد، انجام دادند [8]. با استفاده از بررسی آن ها پیش بینی رفتار جریان در جداکننده ی استوانه ای گاز مایع ممکن خواهد بود. رینر هریز و همکاران جریان چرخشی را در جداکننده های استوانه ای گاز مایع بررسی کردند و نتایج حاصل از شبیه سازی عددی جریان تکفاز در سیکلون با استفاده از مدل های مختلف جریان آشفته ارائه دادند [9]. آن ها در مطالعه ی خود، مدل تجربی اردال (2001) را شبیه سازی کردند و ساختار و ویژگی های جریان را در جداکننده ی استوانه ای گاز مایع نشان دادند. رینر هریز و همکاران در سال 2013، هیدرودینامیک و سرعت سیال را در جریان های چرخشی گاز مایع در جداکننده های استوانه ای به صورت تجربی بررسی کردند و نتایج جالبی از هیدرودینامیک جریان و هسته ی گازی در جداکننده های سیکلونی ارائه دادند [10].

در طول سال های گذشته تلاش های مختلفی برای بهینه سازی عملکرد جداکننده ها 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 مطالعه ی آن ها محدود به جداکننده های گاز جامد بود [11]. گوانک کای و همکاران تاثیر زاویه ی پره را بر الگوی جریان و عملکرد جداکننده های محوری بررسی کردند. اما بررسی آن ها نیز تنها محدود به جداکننده های گاز جامد بوده است [12]. ونگ و همکاران یک مدل پویا<sup>4</sup> برای کنترل سطح مایع و فشار در جداکننده ی استوانه ای گاز مایع با استفاده از تکنیک های کنترلی کلاسیک توسعه دادند [13]. آن ها یک طرح کنترلی براساس مدل سیستم کنترل خطی ارائه دادند و پاسخ گذرای سیستم را با یک نرم افزار مناسب شبیه سازی کردند. در نهایت یک چارچوب طراحی برای اجرای سیستم کنترلی در جداکننده های استوانه ای گاز مایع با استفاده از یک شبیه ساز اختصاصی، توسط آن ها ارائه شد.

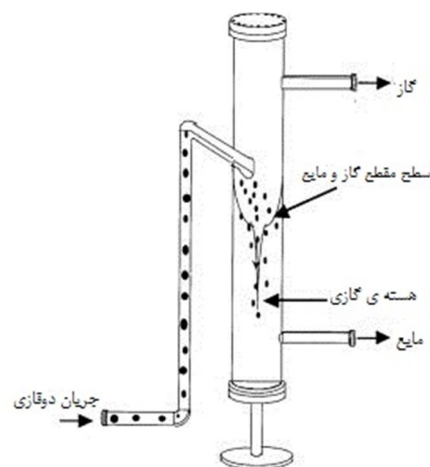
در این مقاله سه پارامتر از هندسه ی ورودی سیکلون بهینه سازی شده اند. برای این منظور، یک جداکننده ی استوانه ای به صورت عددی شبیه سازی شد. مدل شبیه سازی شده با مدل تجربی هریز و همکاران [10] ارزشیابی شد و نتایج قابل قبولی بدست آمد. بنابراین از همین مدل برای بهینه سازی استفاده شد و تاثیر تغییر پارامترهای هندسی ورودی سیکلون مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای بهینه شده، ارتفاع ورودی، سطح مقطع ورودی و شیب ورودی سیکلون می باشند.

## 2- معادلات حاکم

از روش اویلر اویلر برای مدل سازی جریان دوفاز در سیکلون استفاده شده است و برای این نوع جریان، معادله ی 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 می کند که به آن حمل گاز از پایین<sup>1</sup> گفته می شود. مشکل دیگری که وجود دارد حمل مایع توسط گاز از خروجی گاز می باشد که حمل مایع از بالا<sup>2</sup> نامیده می شود. منتیلا و همکاران یک مدل خط سیر حباب برای تعیین زمان شروع حمل گاز از پایین در جداکننده های استوانه ای گاز مایع، برای طراحی این جداکننده ها برای کاربردهای میدانی توسعه دادند [3]. آن ها مثال هایی را برای نمایش این که خط سیر حباب چگونه می تواند در طراحی جداکننده های سیکلونی کمک کند، فراهم کردند. فرهاد اردال و همکاران شبیه سازی های عددی از جریان تکفاز و دوفاز در سیکلون های مختلف برای بررسی میدان پیچیده ی جریان در جداکننده ی گاز مایع و پیش بینی پدیده های مرتبط با این جداکننده ها نظیر حمل گاز از پایین ارائه دادند [4]. آن ها کار خود را با داده های تجربی که شامل نمودار سرعت مماسی و کاهش سرعت مماسی بود مقایسه کردند و توافق خوبی نیز حاصل شد. آن ها همچنین یک مدل متقارن محوری را توسعه دادند که از نظر محاسباتی مفید می باشد. کیرینوس یک مدل مکانیسمی برای پیش بینی درصد حمل مایع از بالا در داخل سیکلون استوانه ای توسعه داد [5]. همچنین یک مدل موجود برای پیش بینی حمل مایع از بالا در شرایط فشار بالا شامل مدل های پیشرفته برای جریان خالص صفر مایع<sup>3</sup> در ناحیه ی قطره و سرعت بحرانی توسط آن ها توسعه داده شده است. هدف کار آن ها بررسی داده های بدست آمده برای حمل مایع از بالا و گسترش مدل مکانیسمی برای شرایط فشار بالا و پیش بینی درصد مایع از بالا حمل شده بود. گومز به طور تئوری و تجربی، هیدرودینامیک جریان دوفازی پخش شده ی چرخشی را برای پیش بینی حمل گاز از بالا و سنجش عملکرد جداکننده های سیکلونی، مطالعه کرد [6]. هدف مطالعه ی او دو چیز بود، مطالعه ی تجربی هیدرودینامیک جریان دوفازی پخش شده ی چرخشی در قسمت پایینی سیکلون و توسعه ی مدل مکانیسمی برای مشخص کردن رفتار پیچیده ی این نوع جریان که پیش بینی حمل گاز از پایین را در جداکننده ی سیکلونی گاز مایع ممکن می کند.

یک جداکننده ی سیکلونی گاز مایع شامل یک لوله ی عمودی استوانه ای با یک ورودی مماسی شیب دار 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 جداکننده ی استوانه ای را نشان می دهد.



شکل 1- نمایی از یک سیکلون استوانه ای

- 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،  $\rho$  چگالی،  $v$  سرعت،  $\rho g$  و  $F$  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 درواقع کاربردی ترین مدل برای جریان داخل سیکلون است [12]. بنابراین برای مدل سازی جریان آشفته در سیکلون، از مدل آر-اس-ام<sup>1</sup> استفاده شده است که نتایج خوبی نیز از آن حاصل شد. مدل های تنش رینولدز<sup>2</sup>، همچنین به عنوان مدل های انتقال تنش های رینولدز<sup>3</sup>، 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 رینولدز به طور مستقیم محاسبه می شود. معادله دقیق تنش های رینولدز به طور مستقیم بر پایه میدان تنش های رینولدز استوار است. مدل تنش های رینولدز شامل محاسبه مجزای مولفه تنش رینولدز 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 رینولدز با الگوریتم دوفازی ترکیب شده تا هم مدل آر-اس-ام و هم مدل اولر اولر لحاظ شوند. معادله انتقال تنش های رینولدز چندفازی به شکل رابطه (3) نوشته می شود:

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

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)

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

$\alpha$  کسر جرمی هر فاز،  $\rho$  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 رینولدز چندفازی، معادله انتقال را برای تنش های رینولدز ( $R_{ij}$ ) حل می کند.

### 3- مدل سازی جریان دوفازی

#### 4- بررسی استقلال از شبکه

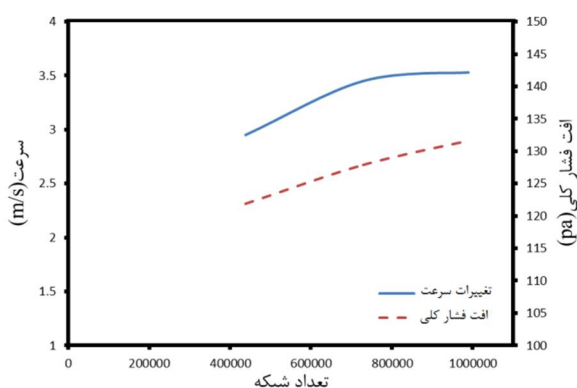
برای دستیابی به استقلال از شبکه در نتایج، تعداد مختلفی از شبکه ها مورد آزمایش قرار رفت. در جدول 1 نتایج محاسباتی شبکه مستقل براساس تغییرات افت فشار نشان داده شده است که شکل 2 چگونگی این تغییرات را به صورت نمودار به تصویر می کشد. 437940، 729013، 989554 شبکه در جدول نشان داده شده اند. بیشینه اختلاف بین 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 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 معقول بودن شبکه بندی در نزدیکی دیواره است.

#### 5- شرایط مرزی

یک شرط سرعت ورودی<sup>5</sup> 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         |



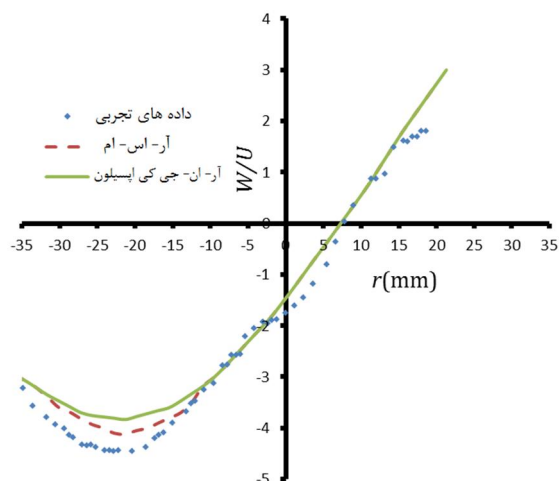
شکل 2 بررسی استقلال از شبکه

4- scalable  
5- Velocity inlet

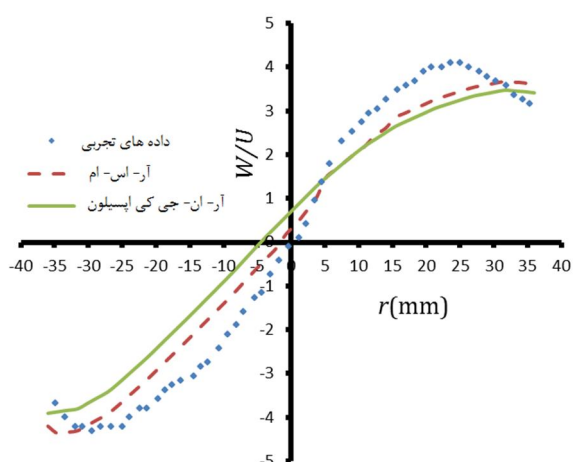
1- RSM  
2- Reynolds Stress Model  
3- Reynolds Stress Transport

6- اعتبارسنجی مدل عددی<sup>1</sup>

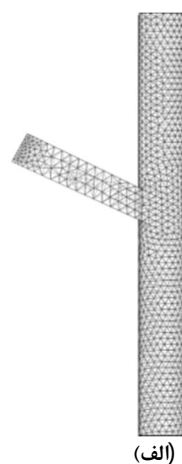
برای کسب اطمینان از نتایج شبیه سازی سیکلون، شبیه سازی در نرم افزار CFX با یک مورد تجربی از هریز و همکاران [10] مقایسه شده است. برای بررسی درستی مدل ساخته شده، پروفیل سرعت مماسی به دست آمده از نرم افزار در فاصله 500 میلی متر و 600 میلی متر در زیر ورودی با نتایج حاصل از مدل تجربی مقایسه شده است. این شکل ها نشان دهنده نمودار سرعت براساس تغییرات شعاع است. شکل 5 پروفیل های مربوط به مدل سازی جریان آشفته با روش آر-ان-جی کی اپسیلون<sup>2</sup> و آر-اس-ام و مقایسه ای آن ها با نتایج تجربی در فاصله 500 میلی متر زیر ورودی و شکل 6 همین پروفیل ها را در فاصله 600 میلی متر زیر ورودی نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود در شکل 5، از شعاع 10- و بیشتر، نتایج حاصل از روش آر-ان-جی کی اپسیلون و آر-اس-ام روی هم افتاده اند اما در شعاع های کمتر، روش آر-اس-ام نزدیکی بیشتری با نتایج تجربی دارد. در شکل 6 نیز مشاهده می شود که روش آر-اس-ان نزدیکی بیشتری با نتایج تجربی دارد.



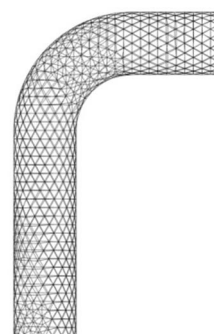
شکل 5 پیش بینی سرعت مماسی متوسط در 500 mm زیر ورودی روش آر-ان-جی کی اپسیلون و آر-اس-ام



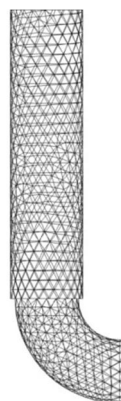
شکل 6 پیش بینی سرعت مماسی متوسط در 600 mm زیر ورودی روش آر-ان-جی کی اپسیلون و آر-اس-ام



(الف)



(ب)

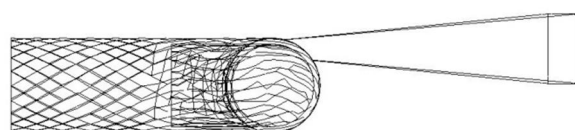


(ج)

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

قسمت بالایی سیکلون (ج) قسمت پایینی سیکلون

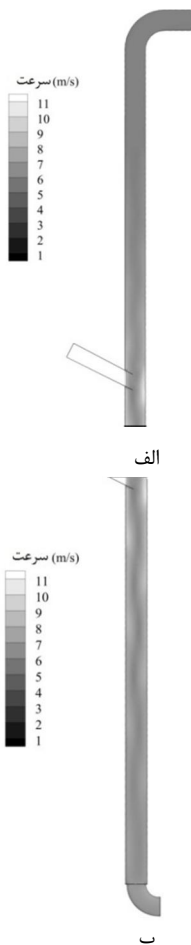
شد. نرخ حجمی جریان هوا  $35 \text{ m}^3/\text{h}$ ، چگالی هوا  $1/185 \text{ kg/m}^3$  و ویسکوزیته دینامیکی آن برابر  $1/831 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$  است. و نرخ حجمی جریان آب برابر با  $7/05 \text{ m}^3/\text{h}$  با چگالی  $997 \text{ kg/m}^3$  و ویسکوزیته دینامیکی  $8/899 \times 10^{-4} \text{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



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 گازی<sup>3</sup> 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.

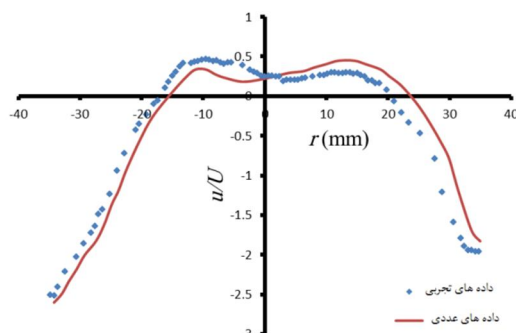


شکل 10 کانتور سرعت (الف) کانتور سرعت در قسمت بالایی سیکلون (ب) کانتور سرعت در قسمت پایینی سیکلون

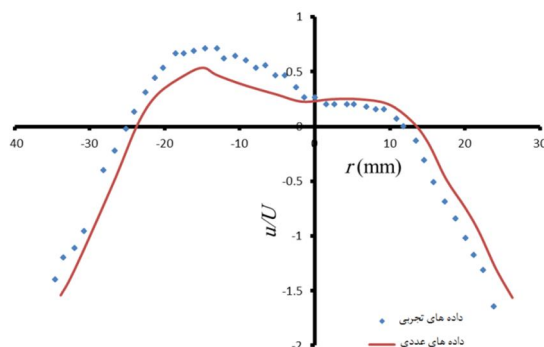
با توجه به بهتر بودن جواب حاصل از مدل آر-اس-ام و انتخاب این روش برای محاسبات بعدی، مقایسه‌ی حاصل از نتایج روش آر-اس-ام با نتایج تجربی برای سرعت محوری نیز در شکل‌های 7 و 8 به ترتیب برای 500 میلی‌متر و 600 میلی‌متر زیر ورودی آورده شد.

## 7- شبیه‌سازی مدل عددی و نتایج:

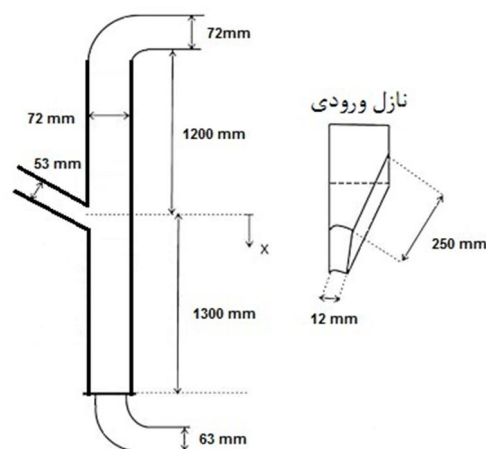
برای شبیه‌سازی عددی سیکلون، از نرم‌افزار آنسیس<sup>1</sup> CFX استفاده شده است. ابعاد و هندسه‌ی سیکلون در شکل 9 نشان داده شده است. شبکه‌ی 729013 مثلثی برای شبکه بندی این هندسه استفاده شده است. این هندسه شامل یک ورودی شیب‌دار مماسی با شکل نازل مستطیلی، و دو خروجی، یکی در بالا برای خروج گاز و دیگری در پایین برای خروج مایع است. جریان در سیکلون، پایدار<sup>2</sup> 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

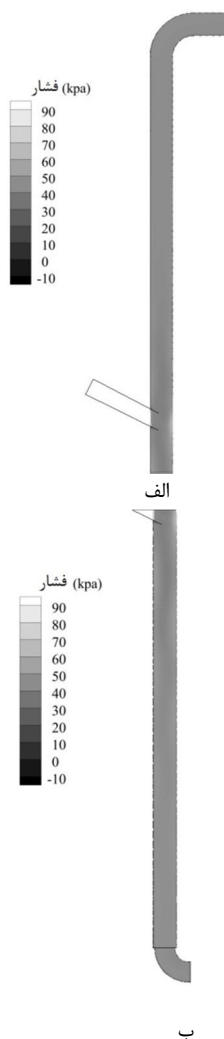
که در شکل پیداست، قسمت بالایی سیکلون فشار کمتری دارد، چون گاز بعد از پایین رفتن به همراه سیال و متحمل شدن افت فشار، در حالی که فشار کمی دارد به قسمت بالایی بر می‌گردد تا از خروجی گاز خارج شود. در قسمت نزدیکی ورودی به علت بالا بودن سرعت، ناحیه‌ای با فشار کمتر از فشار خروجی مشهود است.

## 8- بهینه‌سازی

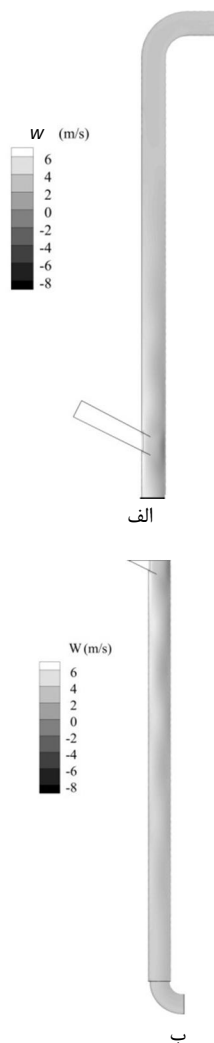
### 8-1- روش بهینه‌سازی

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 هدف<sup>1</sup> 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 مؤلفه‌های سرعت) را به خودش اختصاص می‌دهد. کانتور مربوط به فشار در 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



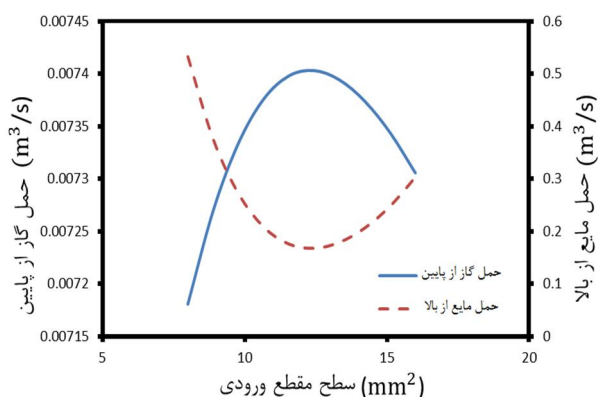
شکل 11: کانتور سرعت مماسی (الف) کانتور سرعت مماسی در قسمت بالایی سیکلون (ب) کانتور سرعت مماسی در قسمت پایینی سیکلون



به صورت جداگانه بر میزان حمل مایع از بالا و حمل گاز از پایین بررسی شده و مقدار بقیه پارامترهای هندسی برابر مقدار اولیه ذکر شده در بخش هندسه (بخش 7) می باشد. در شکل 13 مشاهده می شود که افزایش پهنای مقطع ورودی باعث افزایش حمل گاز از پایین تا رسیدن به یک نقطه ی ماکزیمم می شود. 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 می شود. 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 می گیرد. از این شکل همچنین نتیجه گرفته می شود که یک نقطه ی 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 می شود. 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 می رود. با رسیدن سطح مقطع به اندازه ای 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 می شود. اما باید دقت داشت که با افزایش بیش از اندازه ی پهنای ورودی، سرعت بیش از اندازه کاهش یافته و منجر به اختلاط دوباره گاز و مایع و حمل مایع به بالا توسط گاز می شود.

شکل 14 رابطه ی بین زاویه ی ورودی و تغییرات حمل گاز از پایین و حمل مایع از بالا را نشان می دهد. همان طور که مشهود است در زوایای کم ورودی حمل گاز از پایین کمتری اتفاق می افتد 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 می دهد و دو فاز بهتر از هم جدا شده و گاز کمتری به همراه مایع از خروجی مایع خارج می شود. با افزایش زاویه ی ورودی جهت حرکت سیال به سمت پایین بیشتر شده و مایع راحت تر به سمت خروجی مایع حرکت کرده و خارج می شود.

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



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

سازی تابع هدف دسته ای از قیود، تکنیک های بهینه سازی چند مؤلفه ای چند هدفه الگوریتم ژنتیک است که در آن بهترین طرح ممکن از میان دسته ای از پارامترهای داده شده به عنوان هدف، به دست می آید. سه روش بهینه سازی در این روش در دسترس است: الگوریتم ژنتیک با چند تابع هدفه<sup>1</sup> و روش غربالگری<sup>2</sup>، برنامه ی غیرخطی با روش لاگرانژی مرتبه ی چهار<sup>3</sup>، روش های الگوریتم ژنتیک با چند تابع هدفه و NLPQL زمانی قابل استفاده اند که تمام پارامترهای ورودی پیوسته باشند. فرایند بهینه سازی تابع هدف به شما این امکان را می دهد تا تأثیر تغییرات پارامترهای ورودی را با استفاده از یک سری قیود که بر روی پارامترهای خروجی اعمال شده اند را بررسی کنید. در این مطالعه از روش الگوریتم ژنتیک با چند تابع هدفه برای بهینه سازی استفاده شده است. و سه پارامتر که برای بهینه سازی انتخاب شده اند شامل سطح مقطع نازل ورودی، ارتفاع ورودی نسبت به پایه ی جداکننده ی استوانه ای گاز مایع و زاویه ی ورودی می باشند، و هدف از بهینه سازی نیز کمینه کردن مقدار حمل مایع از بالا و حمل گاز از پایین است.

مسائل بهینه سازی از نظر تعداد توابع هدف و معیارهای بهینه سازی، به دو نوع تقسیم پذیر هستند: مسائل بهینه سازی تک هدفه و مسائل بهینه سازی چند هدفه. در مسائل بهینه سازی تک هدفه، هدف از حل مسأله بهبود یک شاخص عملکرد یگانه است که مقدار کمینه یا بیشینه ی آن، کیفیت پاسخ به دست آمده را به طور کامل منعکس می کند. اما در برخی موارد، نمی توان صرفاً با اتکا به یک شاخص، یک پاسخ فرضی برای مسأله بهینه سازی 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.

بهینه سازی چند هدفه، یکی از زمینه های بسیار فعال و پرکاربرد تحقیقاتی در میان مباحث بهینه سازی است. غالباً بهینه سازی چند هدفه به نام های بهینه سازی چند معیاره<sup>4</sup> و بهینه سازی برداری<sup>5</sup> نیز شناخته می شود. روش های فراوانی تاکنون برای حل این مسائل ارائه شده اند که در حالت کلی می توان آنها را به دو دسته تقسیم نمود: روش های کلاسیک، که اغلب مسأله چند هدفه را به یک مسأله یک هدفه تقلیل می دهند، و روش های تکاملی، که اغلب مسأله بهینه سازی چند هدفه را واقعاً به صورت چند هدفه حل می نمایند.

الگوریتم ژنتیک چند پارامتری این امکان را می دهد که دسته ی جدیدی از نمونه ها را تولید کرده یا از داده های موجود برای رسیدن به روشی بهتر از روش اسکرینینگ استفاده کنیم. الگوریتم ژنتیک با چند تابع هدفه فقط برای داده های پیوسته قابل استفاده بوده و قادر به بررسی کردن چند پارامتر و بهینه سازی آن است. الگوریتم ژنتیک با چند تابع هدفه یک متغیر از الگوریتم ژنتیک مرتب شده ی غیر غالب<sup>6</sup> براساس مفاهیم کنترل شده ی برتر است. در این الگوریتم روش مرتبه بندی پارتو<sup>7</sup> به صورت سریع و غیر غالب با سرعت یک مرتبه بیشتر از روش پارتو سابق انجام می گیرد.

## 8-2- نتایج بهینه سازی

به عنوان نتایج بهینه سازی، تأثیر تغییر پارامترها بر توابع هدف، بر روی نمودارهای مختلف نشان داده شده است. در این شکل ها 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

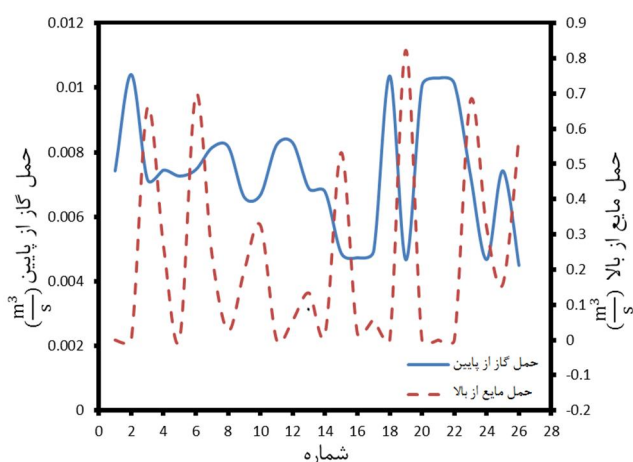
6- Non-Dominated Sorted Genetic Algorithm

7- Pareto

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

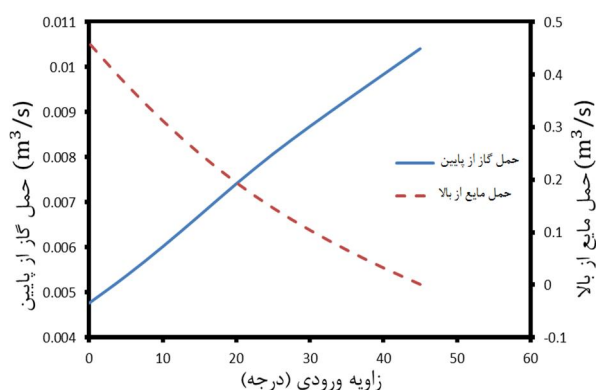
پایین

| نام | ارتفاع ورودی (mm) | پهنای نازل ورودی (mm) | زاویه ورودی (درجه) | حمل گاز از پایین (m <sup>3</sup> /s) | حمل مایع از بالا (m <sup>3</sup> /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                               |



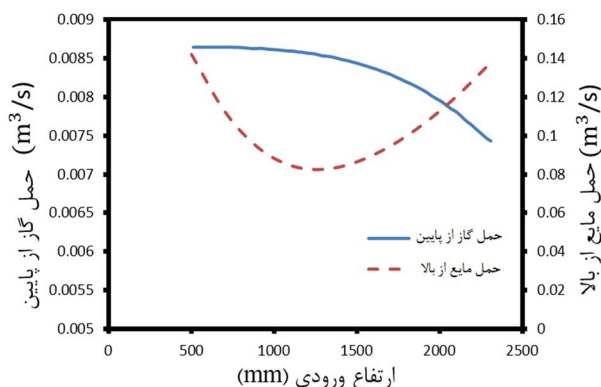
شکل 16 تغییرات حمل گاز از پایین و مایع از بالا بر اساس تغییر پارامترهای

هندسی ورودی



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



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

جدول 3 نتایج حاصل برای حمل گاز از پایین و حمل مایع از بالای مدل اولیه و مدل بهینه را نشان می دهد. همان طور که از جدول مشهود است، یک نقطه ی بهینه وجود دارد که در آن هم حمل مایع از بالا و هم حمل گاز از پایین کمتر از مقدار اولیه است. شکل 17 مقایسه ی مدل اولیه و بهینه را به صورت نمودار نشان می دهد.

## 10- مراجع

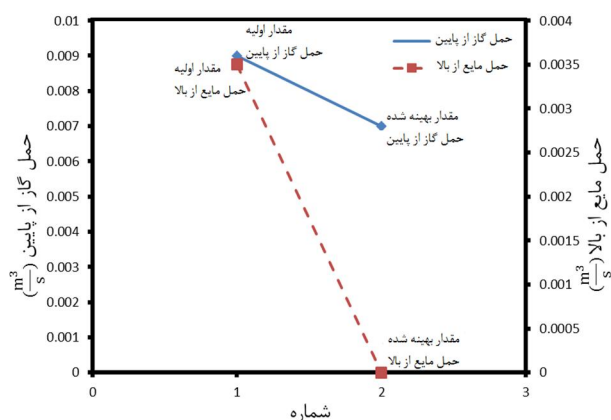
- [1] S. K. Marti, F. M. Erdal, O. Shoham, S. A. Shirazi, G. E. Kouba, *Analysis of gas carry-under in gas-liquid cylindrical cyclones*, The University of Tulsa and Chevron Petroleum Technology Company, 1996.
- [2] G. E. Kouba, S. Wang, L. E. Gomez, R. S. Mohan, O. Shoham, Review of the state-of-the-art 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- نتیجه گیری

با افزایش پهنای ورودی و کاهش سرعت سیال و افزایش زمان ماند سیال در سیکلون، حمل گاز از پایین کاهش می یابد. کاهش زاویه ی ورودی باعث زمان بیشتر حضور سیال در سیکلون شده و در نتیجه با جدایش بهتر، حمل گاز از پایین کاهش می یابد. پارامتر دیگر بررسی شده ارتفاع ورودی است که با تغییر آن یک مقدار بهینه برای حمل گاز از پایین به دست می آید.

تأثیر تغییر پارامترهای هندسی ورودی بر مقدار حمل مایع از بالا نیز بررسی شد. با تغییر زاویه ی ورودی، ارتفاع ورودی و پهنای ورودی، یک مقدار جدول 3 مقایسه ی حمل گاز از پایین و حمل مایع از بالا در مدل اولیه و مدل

| نام       | ارتفاع ورودی (mm) | پهنای نازل ورودی (mm) | زاویه ورودی (درجه) | بهینه                                |                                      |
|-----------|-------------------|-----------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
|           |                   |                       |                    | 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 مقایسه ی مقدار اولیه ی حمل گاز از پایین و حمل مایع از بالا با مقدار بهینه شده