



انتخاب زاویه شیب بدنه و تحریک آکوستیک بهینه موثر در عملکرد جداکننده هیدروسیکلونی ذرات براساس الگوریتم ژنتیک

جواد وزیری ناین نژاد¹، فتح الله امی^{2*}، سید حسین موسوی³

1- فارغ التحصیل کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- فارغ التحصیل دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* صندوق پستی 14115-111، fommi@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 08 دی 1395

پذیرش: 21 دی 1395

ارائه در سایت: 09 اسفند 1395

کلید واژگان:

هیدروسیکلون

چشمه صوت

قطر ذرات

جداسازی

بهینه‌سازی

چکیده

در هسته مرکزی هیدروسیکلون‌های معمول، جریان ثانویه در جهت عکس جریان اولیه که مجاور دیواره فعالیت می‌کند گردش دارد و باعث ایجاد چاه فشار در محور مرکزی هیدروسیکلون می‌شود. این چاه فشار موجب کشیده شدن ذرات به هسته مرکزی و فرار ذرات سبک‌تر از مقطع بالایی هیدروسیکلون می‌شود. لذا در این پژوهش با افزودن چشمه صوت در هسته مرکزی هیدروسیکلون، عملکرد یک هیدروسیکلون آکوستیک در جداسازی ذرات بررسی می‌شود. سپس اثر زاویه شیب بدنه سیکلون با افق بر عملکرد هیدروسیکلون تعیین می‌گردد. به این منظور ابتدا مدل مناسب تحلیل جریان دو فازی و مدل مناسب جهت شبیه‌سازی آشفته‌گی انتخاب می‌شود و جریان سیال به صورت عددی تحلیل و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی صحه‌گذاری می‌شود. حل عددی قدرت بهینه و فرکانس لازم برای تحریک آکوستیک را تعیین می‌کند و نشان می‌دهد در زوایای شیب مختلف چه قطری از ذرات با چه سرعتی بهتر جدا می‌شوند. همچنین در این پژوهش قطر و سرعت پاشش ذرات که در آن به کارگیری چشمه صوت، بیشترین تاثیر را بر افزایش بازده جداسازی ذرات دارد معرفی می‌شود. در انتها با اعمال الگوریتم ژنتیک با تابع دو هدفه، از میان تمام حالت‌های موجود مدلی که از نظر بیشترین بازده جمع‌آوری ذرات و کمترین افت فشار بهینه است، معرفی می‌گردد.

Investigation of optimized body tilt angle and acoustic excitation affecting performance of hydro cyclone particles separator based on genetic algorithm

Javad Vaziri Naeen Nejad¹, Fatollah Ommi^{2*}, Seyed Hossein Moosavy²

1- Department of Aerospace Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

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

* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, fommi@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 30 December 2016

Accepted 10 January 2017

Available Online 27 February 2017

Keywords:

Hydro cyclone

Sound source

Particle diameter

Separation

Optimization

ABSTRACT

At the core of the conventional hydro cyclone, the secondary flow is created in the opposite direction of the primary flow which is adjacent the wall and causes sink pressure on the central axis of the hydro cyclone. This low pressure zone may drag fine particles to the core and enable them to escape from the upper section of hydro cyclone. In this research, by adding a sound source at the core of the hydro cyclone the separation performance of an acoustic hydro cyclone is studied. Then the effects of the hydro cyclone's body tilt angle with the horizon are reviewed in the next step. To this end, the flow simulation is carried out by the appropriate turbulent and two-phase fluid flow model and consequently the results are validated with experimental data. The result shows the optimum strength and frequency of acoustic stimulation and the performance of conventional hydro cyclone in different tilt angles, particle diameters and inlet velocities. In addition, in this study, the optimum injection velocity for any diameters which has a considerable impact on separation efficiency of the acoustic cyclone, is introduced. Finally, by applying a genetic algorithm with two objective functions, among all the states, the model that has the highest efficiency and lowest pressure drop is selected.

1- مقدمه

امروزه در بسیاری از صنایع از جمله: صنایع پتروشیمی، معادن (برای تولید زغال‌سنگ با توزیع یکسان)، صنایع غذایی (به‌عنوان مثال نشاسته با قطر خاص)، تکنولوژی نانو (جداسازی ذرات درشت‌تر از مقیاس نانو)، کارخانجات سیمان و تصفیه‌خانه‌های آب برای جدا نمودن شن و سنگ از آب، نیاز به

جداسازی ذرات فاز پراکنده¹ (اغلب فاز جامد و گاهی نیز فاز مایع) از فاز پیوسته² (سیال) همواره در صنعت موردنظر بوده و تلاش‌های فراوانی برای بهبود بازده جداسازی در حال انجام می‌باشد.

² Continuous phase

¹ Discrete phase

Please cite this article using:

J. Vaziri Naeen Nejad, F. Ommi, S. H. Moosavy, Investigation of optimized body tilt angle and acoustic excitation affecting performance of hydro cyclone particles separator based on genetic algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 37-46, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

جداسازی ذرات با قطر و جنس مختلف احساس می‌شود.

در میان روش‌های گوناگون جمع آوری ذرات، استفاده از هیدروسیکلون‌ها بسیار مورد اقبال است. معمولاً از هیدروسیکلون‌ها جهت جداسازی ذرات با قطر 50-5 میکرومتر استفاده می‌شود و در این بازه، کارایی آن‌ها حداکثر خواهد بود [1].

علت استفاده‌ی وسیع از هیدروسیکلون‌ها دارا بودن مزایایی همچون سادگی در ساخت، صرفه‌ی اقتصادی، ظرفیت بالا و عدم وجود قطعه‌ی متحرک در آن که هزینه‌های تعمیر و نگهداری را پایین نگه می‌دارد، می‌باشد. همچنین با انتخاب جنس مناسب، سیکلون قابلیت کار در شرایط فشار و دمای بالا و سیالات خورنده را نیز دارد [2]. از جمله معایب هیدروسیکلون می‌توان به جمع شدن رسوبات در دیواره‌ها و همچنین ظرفیت محدود در ورود ذرات سنگین اشاره نمود که با ملاحظات قابل برطرف شدن است.

با توجه به احتیاجات بالا و نقاط ضعف و قوت هیدروسیکلون می‌توان نتیجه گرفت که این وسیله برای جمع‌آوری ذرات با قطر خاص و در شرایط خاص، صرفه‌ی اقتصادی دارد و استفاده از آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

بر اثر چرخش سیال در هیدروسیکلون‌ها دو گردابه‌ی اولیه و ثانویه ایجاد می‌شود. گردابه‌ی اول، ذرات معلق درشت را به سمت دیواره می‌فرستد. در سطح دیواره به علت وجود اصطکاک، سرعت گاز کم می‌شود و ذرات در اطراف دیواره در یک جریان با سرعت کم به دام می‌افتند و تحت تأثیر جاذبه به سمت ته هیدروسیکلون می‌روند. گردابه‌ی ثانویه، ذرات سبک و ریز را به همراه هوا از طریق مجرای بالایی طی مسیری مارپیچ به بیرون می‌فرستد [3].

در هسته‌ی مرکزی هیدروسیکلون، گردابه‌های ثانویه در جهتی مخالف گردابه‌های اولیه، که در کنار دیواره تشکیل می‌شوند، فعالیت می‌کند. در واقع در هسته مرکزی هیدروسیکلون افت محسوس فشار مانند چاه فشاری عمل می‌کند و ذرات را از نقاط پرفشار نزدیک دیواره‌ها به هسته مرکزی می‌کشد و موجبات فرار ذرات را از هیدروسیکلون فراهم می‌کند. یک راه حل موثر برای جبران این چاه فشار، قرار دادن چشمه صوت نقطه‌ای با فرکانس و قدرت مشخص در نقطه‌ای تعیین شده می‌باشد تا ذرات را از محور مرکزی هیدروسیکلون به سمت دیواره‌ها بفرستد و به جداسازی ذرات ریزتر کمک کند. در واقع این کار باعث می‌شود ذرات با قطر کمتر بر اثر انتشار موج صوتی به یکدیگر بچسبند و تشکیل یک واحد ذره با قطری بزرگتر دهند، به علاوه وجود چشمه باعث افزایش سرعت ذرات می‌شود با این توضیح که افزایش قطر و سرعت پاشش موجب افزایش بازده جداسازی ذرات می‌شود [4].

هدف عمده‌ی این مطالعه، بهینه‌سازی هیدروسیکلون است که منجر به افزایش توان جداکنندگی ذرات می‌شود.

بررسی سابقه‌ی طرح سیکلون نشان می‌دهد، اولین اطلاعات در زمینه‌ی اختراع سیکلون مربوط به فینچ در سال 1885 در آمریکاست. وی در این سال اولین طرح یا اختراع مربوط به سیکلون را ثبت نمود [5]. اما شاید مهمترین اثر را در این حوزه بتوان مربوط به استیرمند و دانشجویش لاپل دانست که فرمول‌هایی کاربردی جهت طراحی ارائه کردند به طوری که هم اکنون نیز بسیاری از طراحی‌های صنعتی از این مدل استفاده می‌کنند. تلاش‌های این دو در سال‌های 1950-1990 منجر به طراحی سیکلون‌های کلاسیک و ارائه‌ی روابطی شد که نشان می‌داد سیکلون‌های کلاسیک در مقایسه با سایر

سیکلون‌ها در قطر ذره و سرعت ورودی متفاوت، بیشترین بازدهی را دارند [3].

بررسی و تحلیل هیدروسیکلون‌ها در ابتدا با شیوه‌های آزمایشگاهی و به ویژه سرعت‌سنج لیزری داپلر انجام گرفت (مانند بررسی راجامانی و همکارانش در سال 1991) [6].

سپس چن و همکارانش در سال 2000 با بررسی هفت نمونه هیدروسیکلون معروف آزمایش شده توسط بونت، براون، مولر، نیس، اسواروسکی، پلیت و کرز قصد داشتند بهترین نمونه را برای کاربردهای عملی معرفی کنند اما دریافتند که هر نمونه دارای یک ویژگی مثبت مانند بازده حداکثر، افت فشار حداقل و... است [7].

سال 2005 ناراسیمها و همکاران با شبیه‌سازی سه بعدی هیدروسیکلون و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی، میزان قطر برش را بررسی کردند که با افزایش سرعت پاشش، این قطر کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین هسته هوا و اضافه شدن ذرات را عاملی برای آشفته‌گی غیر یکنواخت و دشواری مدل‌سازی جریان آشفته ذکر کردند [8].

سال 2006 ونگ و همکارانش روابطی تحلیلی برای تعداد دور موثر ذره در گردابه‌های داخل سیکلون ارائه کردند و به بررسی عوامل موثر بر افت فشار سیکلون پرداختند [9]. در واقع آن‌ها تأکید داشتند که با افزایش قطر و سرعت پاشش ذرات، افت فشار افزایش می‌یابد.

در سال 2006 ونگ و یو با استفاده از مدل تنش رینولدز¹، اندازه و طول هیدروسیکلون را مطالعه کردند. آن‌ها با به‌کارگیری دیدگاه لاگرانژی برای فاز گسسته، نتیجه گرفتند هیدروسیکلون کوچک‌تر، بازده جداسازی بیشتری دارد [6].

سال 2010 لیم و همکارانش جریان دو فازی داخل هیدروسیکلون را تحلیل کردند، آن‌ها در نرم‌افزار انسیس با انتخاب مدل دو فازی اولرین-اولرین، مدل آشفته‌گی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و شبکه‌بندی سازمان یافته، توانستند با موفقیت نتایج حل را با مقادیر آزمایشگاهی اعتبارسنجی کردند [10].

قدیریان و همکارانش در سال 2012 شبیه‌سازی سه بعدی دو هندسه هیدروسیکلون را با استفاده از شبکه‌بندی غیرسازمان یافته انجام دادند و نتایج بازده جمع‌آوری، سرعت شعاعی و سرعت محوری را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند [10].

با حصول موفقیت در شبیه‌سازی هیدروسیکلون، تلاش‌ها برای افزایش بازده جداسازی ذرات با بهینه‌سازی متغیرهای هندسی ساختار هیدروسیکلون و افزودن عملیاتی مانند، میدان مغناطیسی، الکتریکی، صوتی و ... صورت گرفت هرچند در بسیاری موارد این تغییرات باعث ایجاد ساختار پیچیده و هزینه اضافی می‌شود.

در پژوهشی دیگر برای افزایش بازده جداسازی ذرات در سیکلون، در سال 2012 وکتریس و همکاران قبل از ورود هوای دارای غبار به سیکلون، میدان صوت به آن اعمال کردند که توانایی سیکلون در جداسازی ذرات ریزتر را بالا برد [11].

در سال 2013 وینس و همکاران به بهینه‌سازی سیکلون‌های چگالی متوسط پرداختند تا بتواند دبی کافی از ذرات درشت‌تر را وارد سیکلون کنند [12]. که در نتیجه آن مشخص شد سیکلون‌های بلندتر بازده بیشتر و سیکلون‌های عریض‌تر گنجایش بیشتری دارند.

¹ Reynolds Stress Model(RSM)

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

اصلی ترین معادله که در مورد فاز پیوسته باید ذکر شود، معادله ی مومنوم است که نمایش تانسوری آن در قالب معادله (2) بیان می شود [11].

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad (2)$$

که $\tau_{ij}^R = \overline{u_i u_j}$ تانسور تنش رینولدز و $\tau_{ij} = \vartheta \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$ تانسور تنش ویسکوز می باشد. S_i جمله ی چشمه یا گرادیان فشار، بین دو نقطه با فشار معلوم، یکی چشمه صوت در کف سیکلون و دیگری فشار در مقطع خروج جریان بر واحد چگالی است.

جریان آشفته و تانسور تنش رینولدز توسط رابطه (3) بیان می شود.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\overline{u_i u_j}) + C_{ij} = D_{ij}^T + D_{ij}^L + P_{ij} + G_{ij} + \varphi_{ij} + \varepsilon_{ij} + F_{ij} \quad (3)$$

که در آن به ترتیب جملات جابجایی¹، نفوذ آشفته گی، نفوذ مولکولی، تولید تنش، تولید شناوری²، کرنش فشار³، اتلاف و تولید در اثر چرخش سیستم است و در معادلات (4-11) مشخص شده اند. از آنجایی که سایر مدل های متوسط گیری زمانی⁴ معادله ناویر-استوکس با این فرض صحیح هستند که آشفته گی همگن⁵ باشد یعنی در تمام جهات انتشار آشفته گی یکنواخت است، اما این مسئله مطابق با فیزیک جریان در هیدروسیکلون ها نیست. لذا مدل آشفته گی باید همزمان معادلات انتقال برای هر تنش رینولدز و معادلات نرخ اتلاف را حل کند که در جریان سه بعدی منجر به هفت معادله اضافی می شود [16].

$$C_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} (U_k \overline{u_i u_j}) \quad (4)$$

$$D_{ij}^T = -\frac{\partial}{\partial x_k} [\overline{u_k u_i u_j}] - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_k} [p(\delta_{kj} u_i + \delta_{ik} u_j)] \quad (5)$$

$$D_{ij}^L = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\vartheta \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_i u_j}) \right] \quad (6)$$

$$P_{ij} = -\left(\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right) \quad (7)$$

$$G_{ij} = \frac{1}{\rho} (\overline{f_i u_j} + \overline{f_j u_i}) \quad (8)$$

$$\varphi_{ij} = \frac{p}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

$$\varepsilon_{ij} = -2\vartheta \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} \quad (10)$$

$$F_{ij} = -2\Omega_k [\overline{u_j u_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u_i u_m} \varepsilon_{jkm}] \quad (11)$$

که در آن Ω_k ، ε_{ikm} ، ϑ و Ω_k به ترتیب نوسانات فشار، عملگر جابجاست، ویسکوزیته سینماتیکی و سرعت زاویه ای می باشند.

2-2- فاز گسسته

برای ردیابی فاز پراکنده از دیدگاه لاگرانژین استفاده می شود یعنی ابتدا معادلات اولرین فاز سیال حل می شود سپس با انتگرال گیری از معادله ی لاگرانژین که در واقع معادله ی موازنه ی نیرویی ذره است، مکان و پارامترهای مجهول ذرات معین می شود.

مدل لاگرانژین برای ذرات به صورت معادله (12) بیان می شود:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu C_D \text{Re}_p}{\rho_p d_p^2} \frac{24}{24} (u_l - u_p) + \frac{(\rho_p - \rho_l)}{\rho_p} g + F_x \quad (12)$$

سیکلون های آکوستیک در قیاس با سایر روش های بهبود بازده جداسازی ذرات، موثرتر است. جمع آوری ذرات با این روش توسط تولید موج های صوتی با شدت صوت بالا صورت می گیرد که باعث حرکت نسبی بین ذرات معلق و برخورد ذرات با یکدیگر می شوند و در نهایت موجب چسبیدن ذرات به یکدیگر و تشکیل یک واحد ذره با قطر بیشتر می گردد به طوری که با سطح فشاری معادل 150-170 دسی بل می توان ذراتی با قطر کوچکتر از 5-1 میکرومتر را جداسازی کرد [13].

سیکلون آکوستیک در کمترین زمان ممکن (حدود یک ثانیه) انرژی آکوستیک خود را به ذره اعمال می کند و موجب افزایش سایز ذرات و جداسازی بهتر می شود [14].

از جمله دلایل فراگیر نشدن استفاده از سیکلون آکوستیک می توان به کمبود چشمه ی صوت مناسب با شدت و توان مناسب اشاره کرد [15]. همچنین تاثیر بعضی پارامترهای وابسته به صوت، مانند فرکانس، بر جداسازی ذرات هنوز به طور واضحی اثبات نشده است [13].

تحریک آکوستیک در مقالات قبلی به صورت محدود و به روش آزمایشگاهی برای ذرات، قبل از ورود به سیکلون به عنوان عملیات پیش فرآوری اعمال شده است اما در این مقاله تاثیر اعمال تحریک کننده آکوستیک بر بازده جداسازی و افت فشار هیدروسیکلون به صورت عددی بررسی می شود که چنین کاری تاکنون صورت نگرفته است. در این پژوهش، هیدروسیکلون با مدل دو فازی اولرین-لاگرانژین مدل سازی می شود به این معنی که فاز پیوسته (آب) با دیدگاه اولرین و آشفته گی توسط مدل تنش رینولدز شبیه سازی می شود. سپس فاز پراکنده (ذرات جامد) با دیدگاه لاگرانژین و تحت تاثیر نیروها و مومنوم فاز پیوسته پاشش می شود تا وضعیت ذرات در طول هیدروسیکلون مشخص شود. در ادامه نیز برای نخستین بار در یک پژوهش، تاثیر زاویه شیب بدنه با افق، فرکانس صوت و قدرت چشمه بررسی می شود.

2- معادلات حاکم

2-1- فاز پیوسته

به علت غلظت حجمی کم ذرات معلق نسبت به گاز حامل، حرکت ذرات معلق تاثیر قابل ملاحظه ای بر روی حرکت سیال ندارد از این رو می توان حرکت هر کدام از فازها را به صورت جداگانه بررسی کرد به این صورت که ابتدا حرکت سیال بدون حضور ذرات جامد معلق بررسی شود و سپس با استفاده از نتایج این بخش، حرکت ذرات به منظور به دست آوردن نیروهای وارد بر ذره، شبیه سازی می شوند.

برای مدل سازی هیدروسیکلون به منظور جداسازی ذرات جامد، مدل دو فازی اولرین-لاگرانژین انتخاب گردیده است. انتخاب مدل اولرین برای در نظر گرفتن فاز پیوسته (اغلب فاز گاز و بعضاً فاز مایع) به معنای حل معادلات بقا با دیدگاه انتگرالی در کل حوزه ی حل می باشد. در این دیدگاه معادلات در کل حوزه یعنی هندسه ی هیدروسیکلون حل می شوند و توزیع سرعت، فشار و ... در تک تک نقاط به دست می آیند.

معادله ی پیوستگی برای جریان تراکم پذیر فاز پیوسته (آب) را می توان به فرم رابطه (1) نمایش داد:

¹ Convection

² Buoyancy production

³ Pressure strain

⁴ RANS

⁵ Isotropic

انجام می‌شود. برای سطح دایره‌ای پایینی و کوچکتر مخروط ناقص از شرط مرزی "به دام اندازی" برای دیوار¹ استفاده می‌شود تا ذرات در این سطح جمع‌آوری شوند. "شکل 2" و جدول 2 جزئیات شرایط مرزی را بیان می‌کند. همچنین به منظور در نظر گرفتن تاثیر چشمه صوتی، فرم هارمونیک فشار و سرعت چشمه صوت با فرکانس ثابت w در مقطع پایینی هیدروسیکلون مطابق رابطه (14) اعمال شده است:

$$P(x, t) = P(x)e^{-iwt}, u(x, t) = U(x)e^{-iwt} \quad (14)$$

اگر رابطه (14) را در معادله مومنوم برای مختصات استوانه‌ای قرار دهیم بدون در نظر گرفتن مقطع ورودی، هیدروسیکلون در جهت z دارای تقارن محوری است لذا با صرف‌نظر از این راستا رابطه‌ی (15) که رابطه انتشار موج در حوزه فرکانسی برای تمام نواحی هیدروسیکلون بجز مکعب مستطیل ورودی است، حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 P}{\partial \theta^2} + \frac{w^2 \rho_0}{K} P = 0 \quad (15)$$

حل تحلیلی این رابطه در حوزه فرکانسی منجر به رابطه (16) می‌شود.

$$p(r, \theta) = (A_\alpha J_\alpha(kr) + B_\alpha I_{-\alpha}(kr)) [A_\alpha e^{i\alpha\theta} + D_\alpha e^{-i\alpha\theta}] \quad (16)$$

که در آن J تابع بسل و A, B, C, D ضرایب وابسته به شرایط مرزی در فاز α هستند.

2-3- روش حل

حل با استفاده از نرم افزار انسیس فلوئنت و با اعمال توابع تعریف شده توسط کاربر² برای تعیین چشمه آکوستیک در مرز پایینی انجام گرفته است. الگوی گسسته‌سازی کوپل سرعت و فشار از نوع سیمپل، برای فشار از اسکیم پرستو³، معادلات تنش‌های رینولدز از مرتبه اول و انرژی جنبشی و اتلاف توسط الگوی مرتبه دو گسسته شده است [5]. گام زمانی حل 0.0001 ثانیه در نظر گرفته شده است. مدل آشفتگی تنش رینولدز بهتر از مدل استاندارد می‌تواند نتایج را پیش‌بینی کند [5].

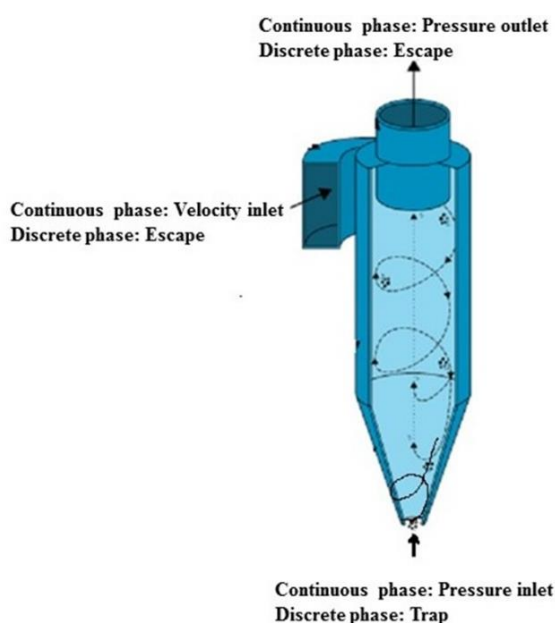


Fig. 2 Boundary conditions schematic of hydro cyclone

شکل 2 نمایش شرایط مرزی در هیدروسیکلون

عبارت اول در سمت راست عبارت (12) نیروی درگ بر واحد جرم، عبارت دوم نیروی شناوری بر واحد جرم و عبارت سوم نیز سایر نیروها بر واحد جرم از قبیل نیروی بست، سافمن، مگنوس، جرم مجازی و ... است. آنالیز بزرگی نیروها نشان می‌دهد به دلیل قطر کوچک ذرات و کم بودن عدد رینولدز آن‌ها می‌توان از مقدار این نیروها در مقایسه با نیروی درگ صرف‌نظر کرد. عدد رینولدز ذرات به صورت رابطه (13) تعریف می‌شود.

$$Re_p = \frac{\rho_l d_p (u_l - u_p)}{\mu} \quad (13)$$

در این عبارات Re_p چگالی، سرعت و عدد رینولدز ذرات، C_D ضریب درگ که وابسته به عدد رینولدز ذره است و از روابط تجربی استخراج می‌شود، ρ_l و u_p چگالی و سرعت مایع و d_p قطر ذره می‌باشد [8].

3- حل عددی

مطابق "شکل 1" هیدروسیکلونی با ابعاد جدول 1 با نرم‌افزار انسیس فلوئنت شبیه‌سازی شده است. ابتدا سیال و ذرات شن از ورودی مکعب مستطیل شکل وارد می‌شود و بر اثر چرخش سیال، حول استوانه بزرگ خارجی، دو گردابه‌ی اولیه و ثانویه ایجاد می‌شود. گردابه‌ی اول در مخروط ناقص، ذرات معلق درشت را به سمت دیواره می‌فرستد و تحت تاثیر جاذبه در انتهای هیدروسیکلون به دام می‌افتند. گردابه‌ی ثانویه، ذرات سبک و ریز را به همراه هوا از طریق مجرای بالایی یعنی استوانه کوچک داخلی طی مسیری مارپیچ به بیرون می‌فرستد.

3-1- شرایط مرزی

ورودی جریان مستطیلی شکل و خروج از طریق استوانه‌ی کوچک داخلی

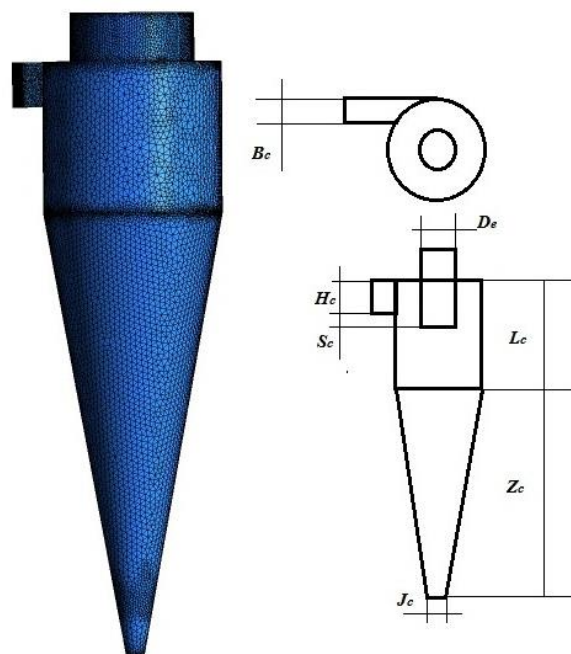


Fig. 1 Grid and geometry of hydro cyclone separator

شکل 1 هندسه و شبکه‌بندی هیدروسیکلون

جدول 1 اندازه بخش‌های هیدروسیکلون

Table 1 Size of hydro cyclone parts

Z_c	L_c	H_c	D_e	J_c	B_c	
125	85	25	75	10	12.5	ابعاد (mm)

¹ Wall trap

² User Define Function(UDF)

³ PRESTO!

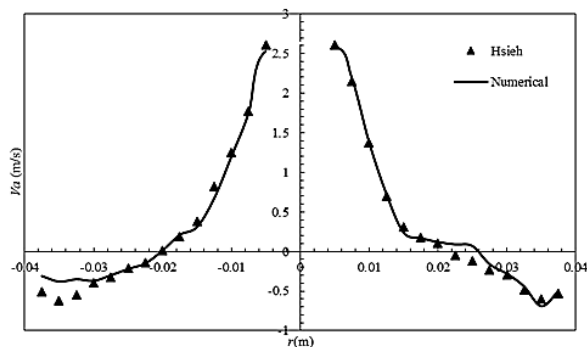


Fig. 3 Comparison of numerical results with Hsieh experimental data of axial velocity along radial positions of hydro cyclone

شکل 3 مقایسه نتایج سرعت محوری حاصل از حل عددی و نتایج آزمایشگاهی هسیه در طول موقعیت‌های شعاعی هیدروسیکلون

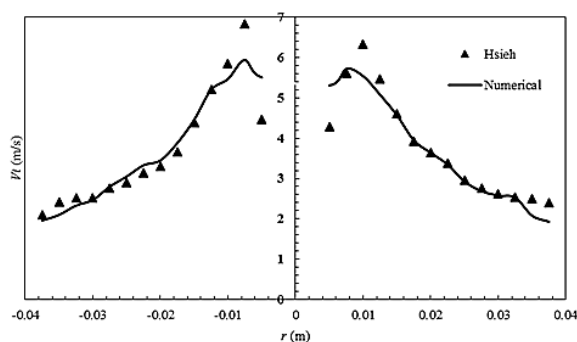


Fig. 4 Comparison of numerical results with Hsieh experimental data of tangential velocity profile along radial positions of hydro cyclone

شکل 4 مقایسه نتایج سرعت مماسی حاصل از حل عددی و نتایج آزمایشگاهی هسیه در طول موقعیت‌های شعاعی هیدروسیکلون

بین 0.01 متر و 0.005 متر که محدوده هسته جریان سیال است و نزدیک دیواره‌ها، مقدار خطا افزایش می‌یابد.

تشکیل هسته مرکزی جریان، بیانگر توسعه یافتگی آن و کامل شدن حل است. "شکل 5" توزیع فشار در مقطعی گذرنده از هیدروسیکلون را نشان می‌دهد. رفتار این توزیع فشار مشابه مورد گزارش شده توسط برنان و همکارانش [18] است. لازم به ذکر است پروفیل فشار این مقطع از سیکلون، به طور واضحی هسته مرکزی جریان که همان جریان ثانویه می‌باشد را به تصویر می‌کشد. چاه فشاری مورد اشاره در متن مقاله، اشاره به همین هسته مرکزی دارد.

نتایج این حل عددی با داده‌های آزمایشگاهی ناراسیمها و همکارانش [8] در جدول 4 برحسب اختلاف دبی خروج حل عددی و آزمایشگاهی محاسبه شده است. در "شکل 6" راندمان جداسازی با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است که میزان خطا و انحراف از حالت آزمایشگاهی در بدترین حالت 9.3 درصد است. قبلاً ذکر شد که فاز ذرات با توجه به مومنتوم وارد شده از جانب فاز پیوسته، تعیین مسیر می‌شود، لذا مطابق بودن راندمان عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که فاز پیوسته نیز با دقت مناسبی حل گردیده است.

4- نتایج حل

1-4- زاویه شیب

افت فشار در هیدروسیکلون‌ها ناشی از عوامل مختلفی از جمله: اصطکاک

جدول 2 مقادیر شرایط مرزی

Table 2 The values of Boundary conditions

شرط مرزی ورود آب به سیکلون	
نوع سیال	آب
چگالی (kg/m^3)	998
سرعت (m/s)	5-20
شدت توربولانسی	5%
قطر هیدرولیکی (mm)	16
شرط مرزی خروج سیال از سیکلون	
فشار نسبی (Pa)	0
شدت توربولانسی	5%
قطر هیدرولیکی (mm)	70
شرط مرزی ورود ذرات به سیکلون	
سرعت (m/s)	5-20
قطر ذرات (μm)	1-1000
چگالی (kg/m^3)	2600
شرط مرزی اعمال چشمه فشار	
دامنه چشمه (db)	150-170
فرکانس چشمه (kHz)	0-12

3-3- استقلال از مش

در هیدروسیکلون‌ها بازده جمع‌آوری مطابق رابطه‌ی (17) است:

$$\eta = 1 - \frac{n_{\text{escaped}}}{n_{\text{tracked}}} \quad (17)$$

که صورت کسر تعداد ذراتی که فرار کرده‌اند و مخرج بیانگر تعداد کل ذراتی که پرتاب شده‌اند می‌باشد. به منظور تایید نهایی نتایج، تست استقلال از شبکه¹ بر روی نتایج انجام می‌گردد. جدول 3 نتایج بررسی برای تعداد مش‌های شبکه در سرعت ورودی 10.70 متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. اختلاف سرعت بیشینه و کمینه با عنوان سرعت بیشینه و افت فشار فاز پیوسته با ریز شدن شبکه دقت بهتری دارد و نشان می‌دهد تعداد مش اول کافی نیست لذا به منظور انتخاب تعداد بهینه شبکه با قبول مقدار اختلاف ذکر شده در جدول 3 از 1243852 تعداد سلول استفاده می‌شود که شبکه‌بندی در "شکل 1" مشاهده می‌شود.

4-3- اعتبارسنجی

برای اطمینان از صحت حل عددی فاز پیوسته، نتایج پروفیل سرعت محوری و مماسی برحسب موقعیت شعاعی در فاصله‌ی 60 میلی‌متر از بالای سیکلون به ترتیب در "شکل‌های 3 و 4" با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج آزمایشگاهی از اندازه‌گیری سرعت سنج داپلر فازی توسط هسیه در شرایط دبی جرمی آب تغذیه برابر با 1.116 کیلوگرم بر ثانیه به دست آمده است [17]. نتایج حل عددی در هر دو نمودار سرعت محوری و مماسی در موقعیت شعاعی‌های بیشتر از 0.01 متر تطابق مناسبی دارد اما برای موقعیت شعاعی

جدول 3 بررسی استقلال از شبکه

Table 3 Grid independency test

تعداد سلول	سرعت بیشینه (m/s)	افت فشار (kPa)
895471	14.7	27.92
1243852	13.3	26.63
1611714	12.6	26.24
اختلاف %	5.5	1.4

¹ Grid independency

اگر هیدروسیکلون به صورت مایل قرار گیرد، یعنی بدنه آن با افق زاویه داشته باشد، افت فشار در هیدروسیکلون کمتر می شود.

در کاربردهای جداسازی ذرات چگال تر و یا ذرات با قطر بیشتر - 0.5 تا 50 میلی متر - وزن نقش مهمی در معادلات تعادل نیرویی ایفا می کند و قابل صرف نظر کردن نیست. شیب دار ساختن هیدروسیکلون ها در واقع باعث ایجاد مولفه در نیروها و به خصوص نیروی وزن می شود. می توان زاویه ی شیب بدنه ی هیدروسیکلون با افق را طوری در نظر گرفت که ذرات تمایل بیشتری برای برخورد با دیواره و به دام افتادن در گردابه های بزرگ تر داشته باشند. در "شکل 7" مسیر حرکت تعدادی ذره در هیدروسیکلونی با زاویه 30 درجه با افق دیده می شود.

برای بررسی اثر قطر ذرات بر بازده جداسازی ذرات در هیدروسیکلون های شیب دار "شکل 8" در دو زاویه ی شیب مختلف رسم و با هیدروسیکلون قائم (90°) مقایسه شده است. این شکل نشان می دهد هر چه قطر ذرات افزایش یابد، بازده جمع آوری ذرات ابتدا افزایش می یابد به

جدول 5 افت فشار در دو سرعت ورودی و زاویه های متفاوت شیب بدنه با افق

Table 5 Pressure drop for some different slope angles in two inlet velocities

زاویه شیب	10	30	50	70	90	سرعت (m/s)
افت فشار (kPa)	6.98	7.31	7.78	8.14	8.97	5.91
	20.55	21.97	22.56	23.69	26.63	10.70

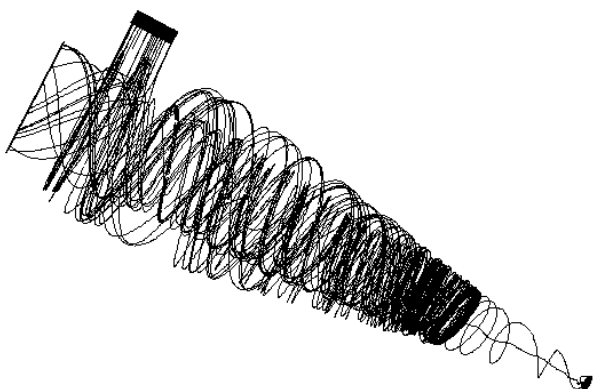


Fig. 7 Some particles' trajectory in a slope hydro cyclone

شکل 7 مسیر تعدادی ذره در هیدروسیکلون شیب دار

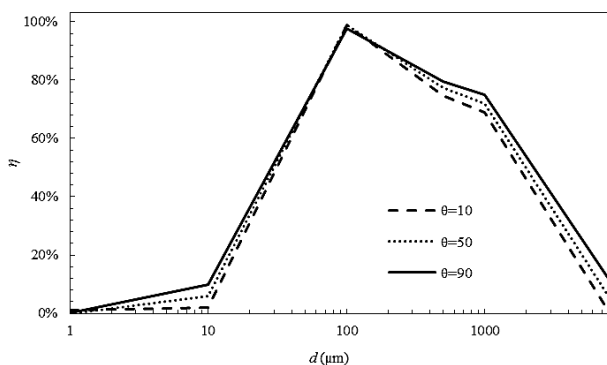


Fig. 8 Separation efficiency for some slope angles in different particles diameter

شکل 8 بازده جداسازی ذرات در قطرهای مختلف ذرات و برای سه زاویه شیب سیکلون با افق

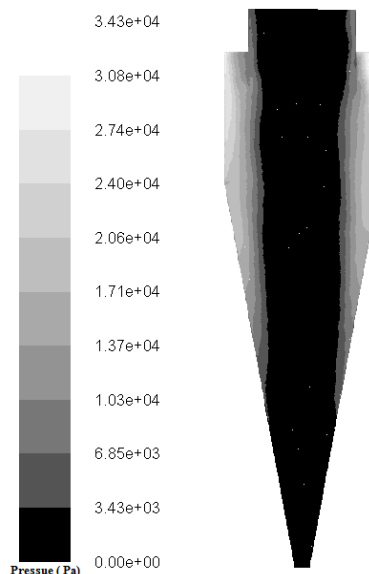


Fig. 5 Contour of pressure in a plane section of the hydro cyclone

شکل 5 توزیع فشار در مقطعی از هیدروسیکلون

جدول 4 مقایسه دبی ورود و خروج در دو حالت عددی و آزمایشگاهی

Table 4 Comparison of experimental and numerical mass flow inlet and outlet

سرعت ورودی (m/s)	مقادیر دبی حاصل از حل عددی (kg/s)	مقادیر دبی حاصل از آزمایش (kg/s)	مقادیر دبی حاصل از حل عددی (kg/s)	مقادیر دبی حاصل از آزمایش (kg/s)	خطا %
دبی ورودی	دبی خروجی	دبی ورودی	دبی خروجی	دبی ورودی	دبی خروجی
5.91	1.838	1.813	1.937	1.894	4.3
8.25	2.581	2.549	2.604	2.563	0.55
10.70	3.341	3.312	3.378	3.325	0.39
12.35	3.844	3.817	3.868	3.850	0.86

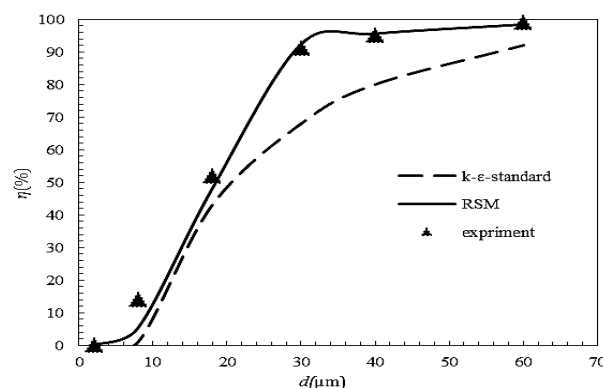


Fig. 6 Separation efficiency of some different particles diameter for 5.91(m/s) injection velocity

شکل 6 بازده جداسازی ذرات در قطرهای مختلف برای سرعت پاشش 5.91 متر بر ثانیه

برخورد ذرات با دیواره ها، تلفات ناشی از اغتشاشات جریان و ... می باشد. این افت فشار عاملی منفی در کارکرد سیکلون به حساب می آید چرا که انرژی جنبشی که توسط جرم و سرعت پاشش ذرات به وجود می آید را کم می کند. اثر این افت فشار بر ذرات ریزتر مشهودتر است به طوری که با اعمال نیرویی رو به بالا باعث می شود ذرات ریزتر که انرژی جنبشی کمتری دارند از مقطع بالا خارج شوند یعنی موجب کاهش بازدهی هیدروسیکلون می گردد. مطابق جدول 5 در دو سرعت ورودی ذرات و سیال (5.91 و 10.70 متر بر ثانیه)،

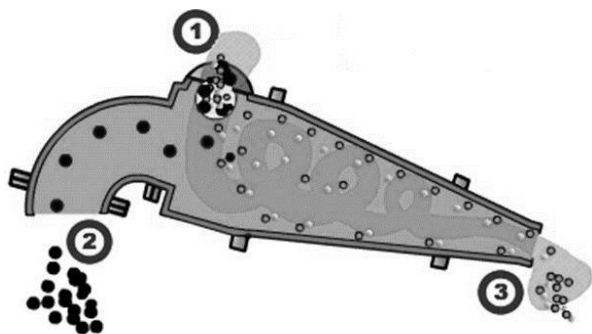


Fig. 10 The performance of slope hydro cyclone (1. feeding particles 2. separation of coarse particles 3. separation of fine particles)

شکل 10 عملکرد هیدروسیکلون شیب دار (1- ورود ذرات 2- جداسازی ذرات درشت 3- جداسازی ذرات ریز از مقطع پایین)

2-4- تأثیر چشمه صوتی

در ادامه تحقیق، تأثیرات چشمه صوتی بر عملکرد هیدروسیکلون و همچنین بهینه‌سازی سرعت ذرات به منظور افزایش تأثیر منبع صوتی، بررسی می‌گردد. به این منظور، تأثیر چشمه صوتی به صورت میدان فشار نوسانی در میدان زمان و مکان در نظر گرفته می‌شود. در این راستا، مقایسه‌ای بین دو وضعیت با و بدون استفاده از منبع صوتی انجام شده که مطابق "شکل 11" اندازه گردابه‌ها در یک مقطع از هیدروسیکلون معمولی و آکوستیک نشان داده شده است.

شکل سمت چپ مربوط به هیدروسیکلون معمولی است که گردابه‌های کوچک اثری منفی بر عملکرد هیدروسیکلون دارد به طوری که به ذرات، نیرویی رو به بالا وارد می‌کند و باعث می‌شود ذرات ریزتر که انرژی جنبشی کمتری دارند از مقطع بالا خارج شوند یعنی موجب کاهش بازدهی هیدروسیکلون می‌گردد. این افت فشار در تمام هسته مرکزی هیدروسیکلون

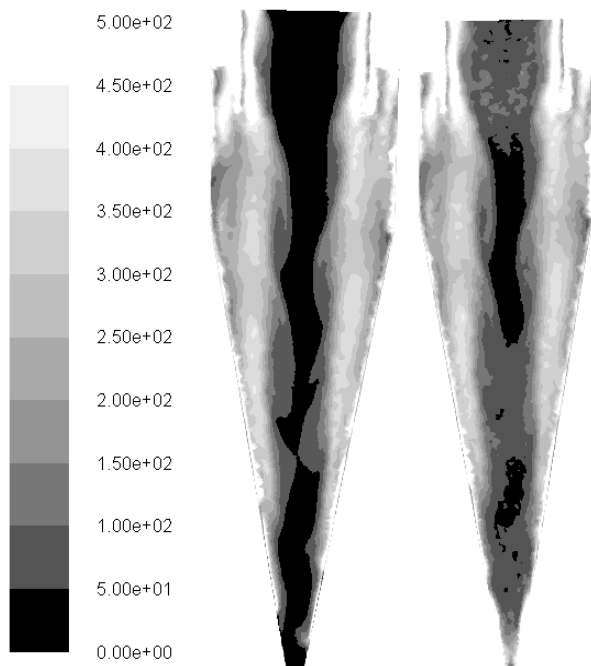


Fig. 11 Comparison of vorticity magnitude (1/s) in a conventional (left) and an acoustic (right) hydro cyclone

شکل 11 مقایسه توزیع اندازه گردابه‌ها (یک بر ثانیه) در هیدروسیکلون معمولی (سمت چپ) و هیدروسیکلون آکوستیک (سمت راست)

طوری که بیشینه بازدهی مستقل از زاویه بوده و برای تمام زوایای شیب در محدوده‌ی قطر ذرات 100 میکرومتر رخ می‌دهد و با بزرگ‌تر شدن قطر ذرات، بازدهی نیز دچار کاهش می‌شود این یعنی ذرات درشت تمایل به خارج شدن از مقطع بالایی هیدروسیکلون دارند.

همچنین لازم به ذکر است در محدوده‌ی قطر ذرات کوچک‌تر از 100 میکرومتر، هیدروسیکلون قائم دارای بازده جداسازی ذرات بیش‌تری است اما برای ذرات درشت‌تر از 100 میکرومتر هیدروسیکلون شیب‌دار اگر چه بازده جداسازی حاصل از رابطه (17) آن کم‌تر است اما در واقع در حال جداسازی ذرات درشت از مقطع بالایی سیکلون با مقدار افت فشار کم‌تری است. بنابراین برای محدوده قطر ذرات بیشتر از 100 میکرومتر سیکلون با زاویه شیب با افق 10 درجه بهینه به نظر می‌رسد.

با انتخاب زاویه شیب بهینه 10 درجه برای هیدروسیکلون، این بار اثر سرعت پاشش ذرات با قطرهای مختلف بر بازده جداسازی ذرات در "شکل 9" بررسی می‌شود و این نکته دریافت می‌شود که در سرعت پاشش بیش‌تر، بازده جداسازی بیش‌تر است. اما برای ذرات درشت-قطر بیش‌تر از 100 میکرومتر- اگر چه بازده حاصل از رابطه (17) کمتر است اما ذرات در حال خارج شدن از مقطع بالا هستند ضمن این‌که افت فشار نیز در سرعت 5.91 متر بر ثانیه به مراتب کمتر از افت فشار در سرعت پرتاب ذرات 10.70 متر بر ثانیه است.

اما علت دو نتیجه‌ی حاصل از "شکل‌های 8 و 9" آن است که مولفه‌ی کسینوسی نیروی وزن در زاویه‌های شیب کوچک سیکلون، مقدار بیش‌تری دارد و این یعنی ذرات شانس بیش‌تری برای گردش به همراه گردابه‌های اولیه و در نتیجه برخورد با دیواره دارند که این موضوع به دام افتادن ذرات در مقطع پایینی و مخروطی شکل هیدروسیکلون را تسهیل می‌کند. اما با افزایش زاویه‌ی شیب، مولفه‌ی افقی نیروی وزن کم شده و شانس کمتری برای برخورد ذرات با دیواره وجود دارد که موجب کاهش بازده جمع‌آوری ذراتی می‌شود که از رابطه‌ی (17) محاسبه می‌شود. در این وضعیت، کاربری هیدروسیکلون عوض می‌شود یعنی ذرات تمایل به جداسازی از مقطع بالایی هیدروسیکلون دارند و برای بازدهی باید تعریف جدیدی ارائه کرد. این موضوع در "شکل 10" قابل مشاهده است.

در یک جمع بندی می‌توان گفت برای ذرات ریز، هیدروسیکلون قائم و سرعت پاشش بیش‌تر باعث عملکرد بهتر هیدروسیکلون هستند اما برای ذرات درشت، هیدروسیکلون با زاویه شیب کم با افق و سرعت پاشش کمتر علاوه بر افت فشار کمتر به جداسازی ذرات از مقطع بالایی هیدروسیکلون کمک می‌کند.

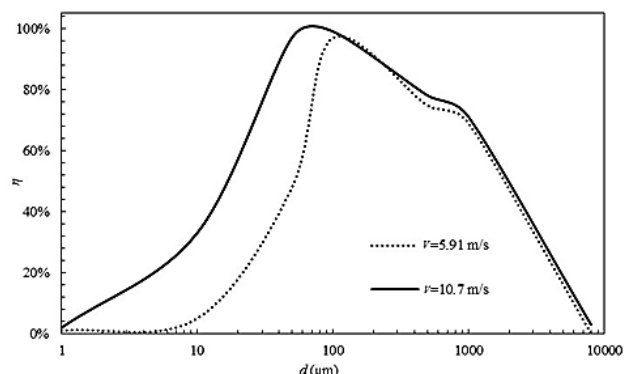


Fig. 9 Separation efficiency for different particles diameter in $\theta=10$

شکل 9 بازده جمع‌آوری ذرات در قطرهای مختلف ذرات و زاویه شیب 10 درجه

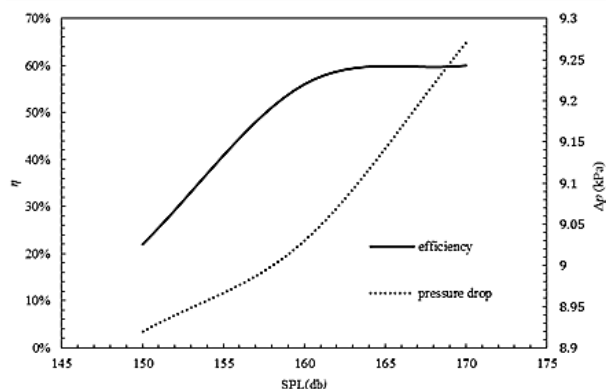


Fig. 13 Separation efficiency and pressure drop for different pressure levels

شکل 13 بازده جمع‌آوری ذرات و افت فشار برای سطح فشارهای مختلف

در بررسی دیگری چشمه صوت با فرکانس 9 کیلوهرتز و سطح فشار 170 دسی بل که بیشترین بازدهی را دارند در کف هیدروسیکلون قرار می‌گیرد و در دو سرعت پاشش، بازده جداسازی ذرات در قطرهای مختلف بررسی شده است. "شکل 14" نشان می‌دهد که بازده جداسازی با تقریباً دو برابر شدن سرعت پاشش تغییر قابل توجهی ندارد این یعنی در سرعت پاشش کمتر، چشمه صوتی فرصت بیشتری خواهد داشت تا بر ذرات در هیدروسیکلون آکوستیک اثر گذارد و آن‌ها را به سمت دیواره به دام اندازد. به بیان دیگر میزان افزایش بازده به دلیل به کار بردن چشمه صوت در سرعت‌های پاشش کمتر، نسبت به میزان افزایش بازده در سرعت‌های پاشش بالاتر، بیشتر است. از طرفی دیگر میزان افت فشار در سرعت 5.91 متر بر ثانیه برابر 9.27 کیلوپاسکال و در سرعت ورود 10.70 متر بر ثانیه برابر 27.45 کیلوپاسکال می‌باشد. این مقادیر تقریباً توسط معادل‌سازی رابطه افت فشار با توان دو سرعت نیز قابل پیش‌بینی بود. لذا سرعت 5.91 متر بر ثانیه تأثیر بهتری هم بر بازدهی و هم بر افت فشار دارد و به عنوان سرعت بهینه انتخاب می‌شود.

در "شکل 15" مقایسه‌ی میان بازده جداسازی ذرات در سرعت 5.91 متر بر ثانیه در هیدروسیکلون آکوستیک و هیدروسیکلون معمولی انجام شده است. که نشان می‌دهد با افزایش قطر ذرات (در محدوده‌ی با قطر بیشتر از 30 میکرومتر) تأثیر اعمال چشمه آکوستیک کمتر می‌شود. لازم به ذکر است

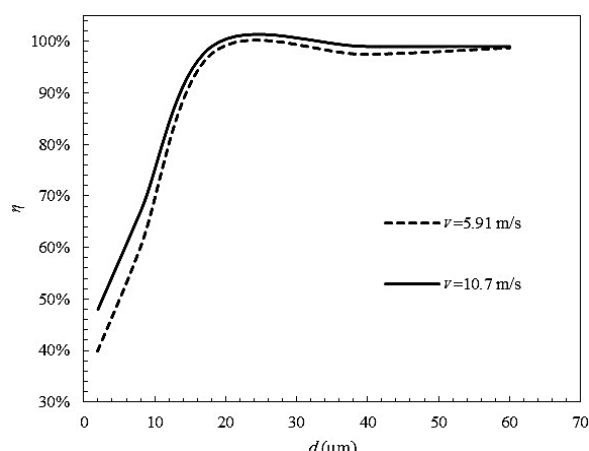


Fig. 14 Separation efficiency in two injection velocities and for 9(kHz) frequency and 170(db) pressure level

شکل 14 بازده جمع‌آوری ذرات در دو سرعت پاشش برای فرکانس 9 کیلوهرتز و

سطح فشار 170 دسی بل

وجود دارد و باعث می‌شود ذرات از نقاط پرفشار جریان اولیه واقع در نزدیک دیواره به چاه فشاری کشیده شوند و از مقطع بالایی فرار کنند. لذا تعبیه چشمه‌ی صوت نقطه‌ای با پالس فشاری در محور مرکزی هیدروسیکلون آکوستیک، مطابق شکل سمت راست، باعث بر هم زدن فعالیت گردابه‌ها در ناحیه مرکزی، هدایت محل فعالیت آن‌ها به نقاط دور دست و پرتاب ذرات از جریان ثانویه واقع در محور مرکزی به ناحیه‌ی جریان اولیه دیواره‌ها می‌گردد که در سیکلون آکوستیک فشار کمتری دارند.

5- بهینه‌سازی و انتخاب چشمه صوتی

در این پژوهش دو پارامتر بازده جداسازی و افت فشار به عنوان پارامترهای هدف برای بهینه‌سازی انتخاب شده‌اند به طوری که باید بازده جداسازی را افزایش داد و افت فشار را کم کرد. به این منظور از بهینه‌سازی توسط کد در نرم‌افزار متلب و روش الگوریتم ژنتیک با چند تابع هدف استفاده شده است در این بررسی سطح فشار چشمه صوت و فرکانس تحریک بایستی به عنوان متغیرهای وابسته طوری انتخاب شوند که بازده جمع‌آوری ذرات را بیشینه و افت فشار را کمینه کنند.

در یک بررسی چشمه نقطه‌ای صوت در کف هیدروسیکلون قرار داده می‌شود و در سرعت پاشش ثابت و برابر 5.91 متر بر ثانیه، قطر ذره 8 میکرومتر و فرکانس مقادیر 4، 8 و 12 کیلوهرتز انتخاب می‌شود. نتایج نیز در نمودار "شکل 12" نشان داده شده است. مطابق شکل با افزایش فرکانس تحریک، بازده جمع‌آوری ذرات و افت فشار ابتدا زیاد شده و سپس کاهش می‌یابد. به این دلیل که حداکثر فرکانس گردابه‌ها در هیدروسیکلون آکوستیک، برابر و یا مضربی طبیعی از 9 کیلوهرتز می‌باشد و با تحریک صوتی در این فرکانس، تشدید اتفاق می‌افتد که باعث می‌شود ذرات بیشتر و ریزتری به سمت دیواره‌ها بروند که منجر به جداسازی آن‌ها می‌گردد.

اثر قدرت چشمه نیز در "شکل 13" برای فرکانس 9 کیلوهرتز با سرعت پاشش 5.91 متر بر ثانیه، قطر ذره 8 میکرومتر و در سطح فشار صوت 150، 160 و 170 دسی بل با رسم بازده جداسازی ذرات بررسی شده است. با افزایش سطح فشار صوت، بازده جداسازی و افت فشار افزایش می‌یابد چرا که با افزایش فشار موج سینوسی، محل تشکیل گردابه ثانویه تحت تأثیر تحریک کننده آکوستیک مطابق "شکل 11" به مختصات بالاتر منتقل می‌شود و باعث به هم چسبیدن ذرات، تشکیل واحدهای بزرگتری از ذرات، افزایش سرعت و در نتیجه منجر به جداسازی بهتر و مانع فرار ذرات از مقطع بالایی هیدروسیکلون می‌شود.

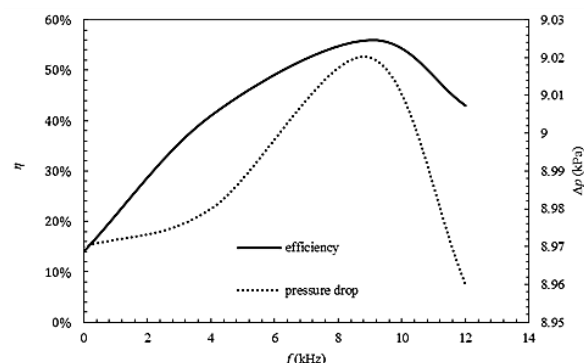


Fig. 12 Separation efficiency and pressure drop for different acoustic frequencies

شکل 12 بازده جمع‌آوری ذرات و افت فشار در فرکانس‌های تحریک مختلف

هیدروسیکلون و افزایش بازده جداسازی پیشنهاد می‌شود: در دو سرعت ورودی ذرات و سیال، اگر هیدروسیکلون به صورت مایل قرار گیرد، یعنی بدنه آن با افق زاویه داشته باشد، افت فشار در هیدروسیکلون حدود 2 کیلوپاسکال کمتر می‌شود.

برای ذرات با قطر کمتر از 100 میکرومتر هیدروسیکلون قائم و برای ذرات با قطر بزرگتر از 100 میکرومتر هیدروسیکلون مایل مناسب‌تر است طوری که هیدروسیکلون با زاویه 10 درجه ذرات درشت‌تر را با افت فشار کمتر از مقطع بالا خارج می‌کند. همچنین سرعت ورود 5.91 متر بر ثانیه بهتر از سرعت 10.70 متر بر ثانیه ذرات درشت را از مقطع بالایی هیدروسیکلون خارج می‌کند. با افزایش زاویه‌ی شیب، مولفه‌ی افقی نیروی وزن کم شده و شانس کمتری برای برخورد ذرات با دیواره وجود دارد که موجب کاهش بازده جمع‌آوری ذراتی می‌شود در این وضعیت، کاربری هیدروسیکلون عوض می‌شود یعنی ذرات تمایل به جداسازی از مقطع بالایی هیدروسیکلون دارند.

تعبیه چشمه‌ی صوت نقطه‌ای با پالس فشاری در محور مرکزی هیدروسیکلون آکوستیک باعث بر هم زدن فعالیت گردابه‌ها به ناحیه مرکزی، هدایت محل فعالیت آن‌ها به نقاط دور دست و پرتاب ذرات از جریان ثانویه واقع در محور مرکزی به ناحیه‌ی جریان اولیه دیواره‌ها می‌گردد که فشار کمتری دارند.

با افزایش فرکانس تحریک، بازده جمع‌آوری ذرات و افت فشار ابتدا زیاد شده و سپس کاهش می‌یابد. به این دلیل که حداکثر فرکانس گردابه‌ها در هیدروسیکلون آکوستیک، برابر و یا مضربی طبیعی از 9 کیلوهرتز می‌باشد و با تحریک صوتی در این فرکانس، تشدید اتفاق می‌افتد که باعث می‌شود ذرات بیشتر و ریزتری به سمت دیواره‌ها بروند که منجر به جداسازی آن‌ها می‌گردد. با افزایش سطح فشار صوت، بازده جداسازی و افت فشار افزایش می‌یابد چرا که افزایش فشار موج سینوسی باعث به هم چسبیدن ذرات، تشکیل واحدهای بزرگتری از ذرات، افزایش سرعت و در نتیجه منجر به جداسازی بهتر و مانع فرار ذرات از مقطع بالایی هیدروسیکلون می‌شود. بالاترین میزان بازدهی در سطح فشار 170 دسی بل رخ می‌دهد.

میزان تاثیر چشمه صوتی بر بازده جداسازی ذرات در سرعت‌های کمتر پاشش، بیشتر است چرا که در سرعت کمتر ذره مدت زمان بیشتری در هیدروسیکلون در حال چرخش است و بیشتر تحت اثر میدان آکوستیک قرار می‌گیرد.

مقایسه بین هیدروسیکلون آکوستیک و معمولی در سرعت پاشش یکسان نشان می‌دهد برای ذرات با قطر کمتر از 30 میکرومتر با افزایش قطر ذرات میزان افزایش بازده جداسازی بیشتر است چرا که نیروی آکوستیک به سطح بزرگتر، اثر بیشتری دارد. اما برای ذرات با قطر بیشتر از 30 میکرومتر اعمال چشمه آکوستیک تاثیر قابل توجهی ندارد.

در نهایت با به کارگیری الگوریتم ژنتیک با تابع دو هدفه برای بیشینه کردن بازده جداسازی و کمینه کردن افت فشار، مدلی بهینه بدست می‌آید که اگر چه 3 درصد افت فشار بیشتری دارد اما 17 درصد بازده بیشتری نیز خواهد داشت.

7- مراجع

- [1] RC Flagan, J. H Seinfeld, *Fundamental of air pollution engineering*(Eds), Chapter7: *Removal of particle from gas stream*, pp. 391-392, California: Courier Corporation, 2013.
- [2] S. Altmeyer, V. Mathieu, S. Jullemier, P. Contal, N. Midoux, S. Rode, J.-P. Leclerc, Comparison of different models of cyclone prediction performance for various operating conditions using a general software, *Chemical Engineering and Processing Journal*, Vol. 43, No. 4, pp. 511-522, 2004.

با اعمال چشمه فشار (در محدوده قطر کمتر از 30 میکرومتر) افزایش بازده جداسازی برای ذرات کوچک‌تر، کمتر است؛ چراکه گرادیان فشار نیرویی سطحی است که بر ذره بزرگتر بیشتر اثر می‌گذارد.

بهینه‌سازی چند هدفه¹ که از آن با نام‌های بهینه‌سازی چند معیاره و برداری نیز یاد می‌شود دارای دو نوع حل است: حل به روش کلاسیک یا تجزیه² که در آن چند هدف را به یک هدف تبدیل می‌کند؛ و حل به روش تکاملی، که مسئله را به همان شکل چند هدف حل می‌کند.

توسط الگوریتم ژنتیک چند هدفه³ براساس داده‌های موجود علاوه‌بر تولید دسته‌ی جدیدی از داده‌ها می‌توان حالت بهینه‌ی داده‌های موجود را پیش‌بینی کند [19].

با اعمال الگوریتم ژنتیک با تابع دو هدفه به منظور کاهش افت فشار و افزایش بازده جداسازی، از میان متغیرها و حالات مختلف، در جدول 6 حالت بهینه معرفی و با مورد اولیه انتخابی برای حل عدد هیدروسیکلون آکوستیک مقایسه شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود اگرچه مورد بهینه 3 درصد افت فشار بیشتری دارد اما بازده جداسازی 17 درصد از مورد اولیه بیشتر است که پیشرفت بسیار خوبی در جهت بهبود عملکرد هیدروسیکلون آکوستیک به حساب می‌آید.

6- جمع بندی

در این مقاله جداکننده‌ی هیدروسیکلونی ذرات مورد ارزیابی قرار گرفت به طوری که با معرفی مدل ریاضی پدیده، شبکه‌بندی انجام شد. شرایط مرزی انتخاب و تست استقلال از شبکه بررسی شد. نتایج حل با داده‌های آزمایشگاهی صحه‌گذاری گردید. در ادامه موارد زیر برای بهبود عملکرد

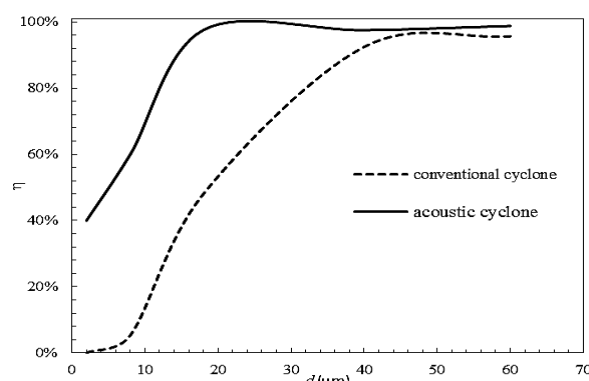


Fig. 15 Separation efficiency for conventional and acoustic hydro cyclone in 5.91(m/s) injection velocity

شکل 15 بازده جمع‌آوری ذرات برای هیدروسیکلون معمولی و آکوستیک و در سرعت پاشش 5.91 متر بر ثانیه

جدول 6 مقایسه هیدروسیکلون اولیه با مدل بهینه شده

Table 6 Comparison of primary and optimized hydro cyclone

نوع سیکلون	سرعت ورودی (m/s)	فرکانس (kHz)	فشار صوت (db)	بازده جداسازی (%)	افت فشار (kPa)
مورد اولیه	5.91	4	160	43	8.98
مورد بهینه	5.91	9	170	60	9.27

¹ multi objective optimization

² Decomposition

³ Multi- Objective Genetic Algorithm(MOGA)

- 509-513, 2012.
- [12] A. Vince, G.D. Barnett, P.J. Barnett, How to optimize design and operation of dense medium cyclones in coal preparation, *Minerals Engineering*, Vol. 62, PP. 55–65, 2014.
- [13] J. Liu, G. Zhang, J. Zhou, J. Wang, W. Zhao, K. Cen, Experimental study of acoustic agglomeration of coal-fired fly ash particles at low frequencies, *Powder Technology*, Vol.193, No. 1, pp. 20–25, 2009.
- [14] T.L. Hoffmann, Environmental Implications of Acoustic Aerosol Agglomeration, *Ultrasonics*, Vol. 38, No. 1, pp. 353–357, 2000.
- [15] H. Hamakawa, A.B.M. Arshad, M. Ohta, Effect of Acoustic Resonance Phenomenon on Fluid Flow with Light Dust, *Journal of Thermal science*, Vol. 20, No. 5, pp. 430–434, 2011.
- [16] P. Bagdi, P. Bhardwaj, A. K. Sen, Analysis and Simulation of a Micro Hydrocyclone Device for Particle Liquid Separation, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 134, No. 2, pp. 021105, 2012.
- [17] M.S. Brennan, M. Narasimha, P. N. Holtham, Multiphase modelling of hydrocyclones—prediction of cut-size, *Minerals Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 395–406, 2007.
- [18] M.S. Brennan, M. Narasimha, CFD modeling of cyclone separators: Validation against plant hydrodynamic performance, In: *7th International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, CSIRO, Melbourne, Australia, 9-11 December, 2009.
- [19] A. Ghasemi, M. Shams, M. M. Heyhat, Modeling Gas Liquid Cylindrical Cyclone Separator and Optimizing Effective Geometry Parameters, *Modares Mechanical Engineering*, Vol.15, No. 4, pp. 67-75, 2015. (in Persian فارسی)
- [3] L. Wang, *Theoretical Study of Cyclone Design*, PhD Thesis Graduated Studies of Texas A&M University, Texas, 2004.
- [4] N. N. Chernov, *Acoustic Methods and Means of Precipitation of Particles of Industrial Smokes*, PhD Thesis, Taganrog State Radioengineering University, Russia, 2004.
- [5] Khairy Elsayed, *Analysis and Optimization of Cyclone Separators Geometry Using RANS and LES Methodologies*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Vrije Universiteit, Brussel, 2011.
- [6] B. Wang, A. Yu, Numerical study of particle-fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions, *Mineral Engineering*, Vol. 19, No. 10, pp. 1022–1033, 2006.
- [7] W. Chen, N. Zydek, F. Parma, Evaluation of hydrocyclone models for practical applications, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 80, No.1, pp. 295-303, 2000.
- [8] M. Narasimha, R. Stripriya, P. K. Banerjee, CFD modelling of hydrocyclone—prediction of cut size, *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 75, No. 1, pp. 53-68, 2005.
- [9] L. Wang, C. B. Parnell, B. W. Shaw, R. E. Lacey, A theoretical approach for predicting number of turns and cyclone pressure drop, *Transactions of the ASABE*, Vol. 49, No. 2, pp. 491–503, 2006.
- [10] M. Ghadirian, E. Hayes, J. Mmbaga, A. Afacan, Z. Xu, On the Simulation of Hydrocyclones using CFD, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 91, No. 5, pp. 950-958, 2012.
- [11] V. Vekteris, V. Striška, D. Ozarovskis, V. Mokšin, Tribological Adhesion of Particles in Acoustic Field, *Journal of Vibroengineering*, Vol. 14, No. 2, pp.