



## بررسی تاثیر چشمه آکوستیک بر عملکرد سیستم جداکننده سیکلونی تصفیه آب

جواد وزیری ناین نژاد<sup>1</sup>، فتح الله امی<sup>2\*</sup>، سید حسین موسوی<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

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

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

### چکیده

در تصفیه‌خانه‌های آب پس از جمع‌آوری ذرات با قطر میلی‌متری توسط فیلترها، از جداکننده‌های سیکلونی برای ته‌نشین و خارج نمودن ذرات در محدوده قطر میکرومتری استفاده می‌شود. در این پژوهش ابتدا شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل دوفازی اولرین - لاگرانژین و مدل توربولانسی هفت معادله‌ای تنش رینولدزی انجام می‌گیرد و پس از بررسی حل از نظر استقلال از شبکه، نتایج با یک نمونه آزمایش شده اعتبارسنجی می‌گردد. در ادامه با تعبیه یک تحریک کننده آکوستیک با دامنه و فرکانس مشخص، بازده جمع‌آوری ذرات بررسی می‌شود. نتایج این بررسی نشان می‌دهد با افزایش قطر و سرعت پاشش ذرات، بازده جداسازی افزایش می‌یابد همچنین جداسازی ذرات ریز با اعمال تحریک آکوستیک به طور چشمگیری بهبود می‌یابد. اما تاثیر آن برای ذرات درشت‌تر، کم است. در ادامه تفاوت ناحیه تشکیل گردابه‌ها در سیکلون معمولی و آکوستیک بررسی شده و فرکانس و سطح فشار بهینه برای تحریک آکوستیک به منظور جداسازی بهتر معرفی خواهد شد. همچنین تاثیر تحریک آکوستیک در سرعت‌های مختلف پاشش نیز بررسی می‌گردد تا معلوم شود چه ذراتی در چه سرعت‌هایی در معرض تحریک آکوستیک بهتر جدا می‌شوند و نیز مقایسه‌ای بین افزایش بازده جداسازی در سیکلون آکوستیک نسبت به سیکلون معمولی انجام می‌گیرد.

کلید واژگان: سیکلون، جداسازی، تحریک آکوستیک، فرکانس

## The effect of an acoustic source on performance of the cyclone separator system for water purification

Javad Vaziri Naen Nejad, Fathollah Ommi\*, Seyed Hossein Moosavy

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

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

### ABSTRACT

In water treatment plants, after collecting millimeter-sized particles by filters, cyclone separator are being used to deposit and remove micron-sized particles. In this study, a numerical simulation is carried out by applying two-phase Eulerian-Lagrangian and RSM turbulence model and grid independency test is performed. Then results are validated by comparison with experimental data. Continuously, by embedding an acoustic stimulator with specific frequency and amplitude, the collection efficiency of fine particles is investigated. Results show an increase in particles' separation efficiency as the injection diameter and velocity increase. It has been shown that by applying an acoustic excitation, the separation of fine particles noticeably increased but this increase has no tangible effect on separation of large particles. Wake formation in a conventional and an acoustic cyclone is also compared. An optimized frequency and pressure level are introduced for better separation efficiency of sand particles. Finally, the effect of an acoustic excitation in different injection velocities has been studied and compared with a conventional cyclone.

**Keywords:** Cyclone, Separation, Acoustic excitation, Frequency

### 1- مقدمه

سیالات خورنده را نیز دارد [2]. از جمله معایب سیکلون می‌توان به جمع شدن رسوبات در دیواره‌ها و همچنین ظرفیت محدود در ورود ذرات سنگین اشاره نمود که با ملاحظات قابل بر طرف شدن است.

با توجه به احتیاجات بالا و نقاط ضعف و قوت سیکلون 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.

مطابق "شکل 1" در سیکلونی با ابعاد جدول 1 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. در سطح دیواره به علت وجود اصطکاک، سرعت گاز کم می‌شود و ذرات در اطراف

کیفیت آب آشامیدنی همواره مورد توجه بوده است. در تصفیه‌خانه‌های آب نیز فرآیندهای گوناگونی برای جداسازی ذرات، حذف میکروبوها و سایر مواد زاید از آب آشامیدنی انجام می‌شود. به عنوان مثال جداسازی ذرات شن با قطرهای مختلف، روش‌های متفاوتی دارد به طوری که ذرات با قطری در محدوده میلی‌متری به وسیله فیلتر جمع‌آوری می‌شود و برای ذرات شن با قطر میکرومتری نیز از جداکننده‌های سیکلونی استفاده می‌شود [1].

علت استفاده‌ی وسیع از سیکلون‌ها 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، دمای بالا و

Please cite this article using:

J.Vaziri Naen Nejad, F.Ommi, S.H.Moosavy, The effect of an acoustic source on performance of the cyclone separator system for water purification, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations*, Vol. 16, No. 13, pp. 166-170, 2016 (in Persian فارسی)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

در این پژوهش سیکلون با مدل دو فازی اولرین-لاگرانژین مدل سازی می شود به این معنی که فاز پیوسته<sup>1</sup> (سیال) با دیدگاه اولرین و مدل آشفتگی هفت معادله ای تنش رینولدز در نظر گرفته می شود. سپس فاز پراکنده<sup>2</sup> (ذرات جامد) با دیدگاه لاگرانژین و تحت تاثیر نیروها و مومنتوم فاز پیوسته پاشش می شود تا وضعیت ذرات در طول سیکلون مشخص شود. در ادامه نیز تاثیر فرکانس صوت و قدرت چشمه بررسی می شود.

## 2- معادلات حاکم

### 2-1- فاز پیوسته

برای مدل سازی سیکلون 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 بعضا فاز مایع) به معنای حل معادلات بقا با دیدگاه انتگرالی در کل حوزه حل می باشد. در این دیدگاه معادلات در کل حوزه یعنی هندسه ی سیکلون حل می شوند و توزیع سرعت، فشار و ... در تک تک نقاط به دست می آیند.

معادله ی پیوستگی را می توان به فرم رابطه (1) نمایش داد:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + K \frac{\partial \rho}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

که در آن  $k$  مدول حجمی (بالک) است.

اصلی ترین معادله که در مورد فاز پیوسته باید ذکر شود، معادله ی مومنتوم است که نمایش تانسوری آن در قالب معادله (2) بیان می شود و هر سه جهت را بیان می کند [10].

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_{ij} \quad (2)$$

که  $\tau_{ij}^R$  تانسور تنش رینولدز و  $\tau_{ij}$  تانسور تنش ویسکوز می باشد. جمله ی  $S_{ij}$  جمله ی چشمه یعنی نیروی خارجی بر واحد جرم است.

فرم هارمونیک فشار و سرعت چشمه صوت با فرکانس ثابت مطابق رابطه (3) است:

$$P(x, t) = P(x)e^{-i\omega t}, u(x, t) = U(x)e^{-i\omega t} \quad (3)$$

اگر رابطه (3) را در معادله مومنتوم برای سیکلون و در مختصات استوانه ای قرار دهیم و از جهت  $z$  به دلیل تقارن محوری در سیکلون صرف نظر کنیم رابطه ی (4) در حوزه فرکانسی حاصل می شود:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 P}{\partial \theta^2} + \frac{w^2 \rho_0}{K} P = 0 \quad (4)$$

حل تحلیلی این رابطه در حوزه فرکانسی منجر به رابطه (5) می شود.

$$p(r, \theta) = (A_\alpha J_\alpha(kr) + B_\alpha J_{-\alpha}(kr)) (A_\alpha e^{\alpha \theta i} + D_\alpha e^{-\alpha \theta i}) \quad (5)$$

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

### 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 معادلات (6) و (7) بیان می شود:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p + g_x) \left( \rho_p - \frac{\rho}{\rho_p} \right) + F_s \quad (6)$$

<sup>1</sup> Continuous phase

<sup>2</sup> Discrete phase

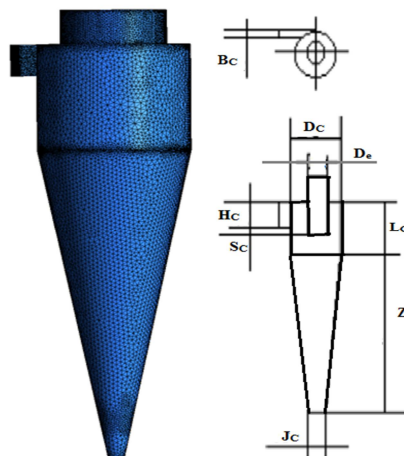


Fig. 1 Grid and geometry of cyclone separator

شکل 1 هندسه و شبکه بندی سیکلون

جدول 1 اندازه بخش های سیکلون

Table 1 Size of cyclone parts

Zc	Lc	Hc	Dc	De	Jc	Bc
125	85	25	101	70	10	12.5
ابعاد (mm)						

دیواره در یک جریان با سرعت کم به دام می افتند و تحت تاثیر جاذبه به سمت ته سیکلون به دام می افتند. گردابه ی ثانویه، ذرات سبک و ریز را به همراه هوا از طریق مجرای بالایی یعنی استوانه کوچک خارجی طی مسیری مارپیچ به بیرون می فرستد [3].

بررسی سابقه ی طرح سیکلون نشان می دهد، اولین اطلاعات در زمینه ی اختراع سیکلون مربوط به فینچ در سال 1885 در آمریکاست. وی در این سال اولین طرح یا اختراع مربوط به سیکلون را ثبت نمود [4]. اما شاید مهم ترین اثر را در این حوزه بتوان مربوط به استیرمند و دانشجویش لاپل دانست که فرمول هایی کاربردی جهت طراحی ارائه کردند به طوری که هم اکنون نیز بسیاری از طراحی های صنعتی از این مدل استفاده می کنند. تلاش های این دو در سال های 1950-1990 منجر به طراحی سیکلون های کلاسیک و ارائه ی روابطی شد که نشان می داد سیکلون های کلاسیک در مقایسه با سایر سیکلون ها در قطر ذره و سرعت ورودی متفاوت، بیشترین بازدهی را دارند [3]. سال 2005 ناراسیمها و همکاران با شبیه سازی سه بعدی سیکلون و مقایسه با داده های آزمایشگاهی، میزان قطر برش در هیدروسیکلون را بررسی کردند که با افزایش سرعت پاشش، این قطر کاهش می یابد [5].

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 گردید که توانایی سیکلون در جداسازی ذرات ریزتر را بالا برد [6].

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 [7].

از جمله دلایل فراگیر نشدن استفاده از سیکلون آکوستیک می توان به کمبود چشمه ی صوت مناسب با شدت و توان مناسب اشاره کرد [8]. همچنین تاثیر بعضی پارامترهای وابسته به صوت، مانند فرکانس، بر جداسازی ذرات هنوز به طور واضحی اثبات نشده است [9]. پیش تر از واحدهای مجزای تولید صوت و جریان مافوق صوت در سیکلون استفاده شده است اما این سیستم ها به دلیل ایجاد تاسیسات اضافه مشکلات حجیم بودن و نگهداری دارند [8].

شبهه<sup>1</sup> بر روی نتایج انجام می‌گردد. جدول 2 نتایج بررسی تعداد مش‌های شبهه در قطرهای مختلف ذرات و سرعت ورودی 10.70 متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. بازده جداسازی ذرات با ریز شدن شبهه دقت بهتری دارد و برای مش اول این تعداد کافی نیست لذا به منظور انتخاب تعداد بهینه شبهه از 1243852 مش استفاده می‌شود که شبهه‌بندی در "شکل 1" مشاهده می‌شود.

4-3- اعتبار سنجی

نتایج این حل عددی توسط داده‌های آزمایشگاهی ناراسیمها و همکارانش [5] در "شکل 3" مقایسه شده است. میزان خطا و انحراف از حالت آزمایشگاهی در بدترین حالت 9 درصد است. بنابراین اعتبارسنجی صورت می‌پذیرد. مدل توربولانسی هفت معادله‌ای تنش رینولدز با تابع دیواره افزایش یافته<sup>2</sup> بهتر از مدل استاندارد می‌تواند نتایج را پیش‌بینی کند [4]. مقدار کمینه پارامتر وای پلاس برابر 0.0001، مقدار بیشینه 47.11 و مجموع میانگین سطحی آن برابر 4.99 می‌باشد.

4- نتایج حل

در "شکل 4" اندازه گردابه‌ها در یک مقطع از سیکلون معمولی و آکوستیک نشان داده شده است. شکل سمت چپ مربوط به سیکلون معمولی است که گردابه‌های کوچک اثری منفی بر عملکرد سیکلون 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 سیکلون می‌گردد. افت فشار در سیکلون‌ها ناشی از عوامل مختلفی از جمله: اصطکاک ناشی از برخورد ذرات با دیواره‌ها، تلفات ناشی از اغتشاشات جریان و ... می‌باشد.

جدول 2 مقادیر بازده جداسازی ذرات در قطرهای مختلف و برای تعداد مش‌های مختلف و سرعت ورودی 10.70 متر بر ثانیه

Table 2 Separation efficiency study in different number of meshes and particles diameter for 10.70[m/s] velocity inlet

قطر ذرات (میکرومتر)						تعداد مش
60	40	30	18	8	2	
بازده جداسازی (%)						
99	91	84	52	17	2	895471
99	96	97	74	31	4	1243852
98	97	96	75	33	5	1611714

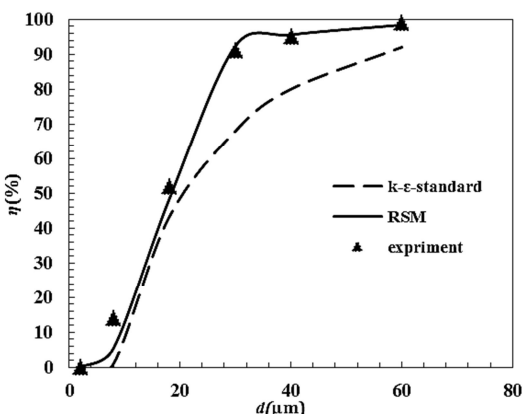


Fig. 3 Separation efficiency of some different particles diameter for 5.91[m/s] injection velocity

شکل 3 بازده جداسازی ذرات در قطرهای مختلف برای سرعت پاشش 5.91 متر بر ثانیه

$$\rho_p \frac{du_p}{dt} = \frac{3\rho_p}{4} C_D |v-u_p| + (v-u_p) \tag{7}$$

که در آن  $\rho_p$  و  $u_p$  چگالی و سرعت ذرات،  $F_D$  و  $C_D$  نیرو و ضریب درگ و  $F_s$  نیروی لیفت ساافمن است که از آن صرف‌نظر می‌شود.

3- حل عددی

1-3- شرایط مرزی

شرایط مرزی سیکلون برای هر دو فاز پیوسته و گسسته در "شکل 2" مشاهده می‌شود. فاز پیوسته (آب) با چگالی  $998\text{kg/m}^3$ ، سرعت 5.91 و 10.70 متر بر ثانیه، شدت توربولانس 5 درصد و طول مشخصه 16 میلی‌متر وارد می‌شود و با فشار نسبی صفر، شدت توربولانس 5 درصد و قطر مشخصه 70 میلی‌متر خارج می‌شود. ذرات شن از جنس کوارتز با چگالی معادل  $2600\text{kg/m}^3$ ، با سرعتی برابر فاز پیوسته و با قطری در محدوده 1-1000 میکرومتر وارد سیکلون می‌شوند. موج سینوسی فشار در مختصات مورد نظر با عنوان ترم چشمه به معادله مومنوم اضافه و حل می‌شود.

2-3- روش حل

حل با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت و با اعمال سورس ترم چشمه آکوستیک صورت گرفته است. الگوی گسسته‌سازی کوپل سرعت و فشار از نوع سیمپل، برای فشار از اسکیم پرستو (PRESTO)، معادلات تنش‌های رینولدز از مرتبه اول و انرژی جنبشی و اتلاف توسط الگوی مرتبه دو گسسته شده است [4]. گام زمانی حل 0.0001 ثانیه در نظر گرفته شده است.

3-3- استقلال از مش

در سیکلون‌ها بازده جمع‌آوری مطابق رابطه‌ی (8) است:

$$\eta = 1 - \frac{n_{\text{escaped}}}{n_{\text{tracked}}} \tag{8}$$

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

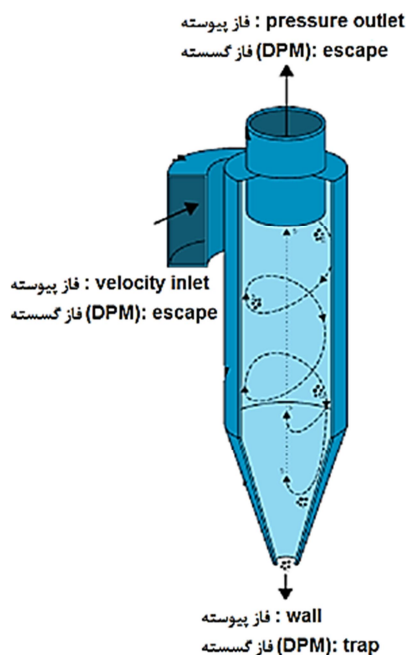


Fig. 2 Boundary Conditions [11]

شکل 2 شرایط مرزی [11]

<sup>1</sup> Grid independency

<sup>2</sup> Enhanced wall function

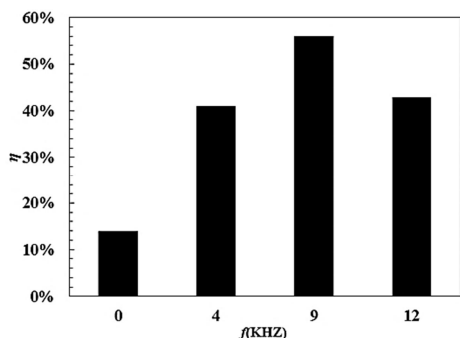


Fig.5 Separation efficiency in some frequencies for 5.91[m/s] injection velocity of 8 micrometer particle diameter

شکل 5 بازده جمع‌آوری ذرات برای چند فرکانس در سرعت پاشش 5.91 متر بر ثانیه و قطر ذرات 8 میکرومتر

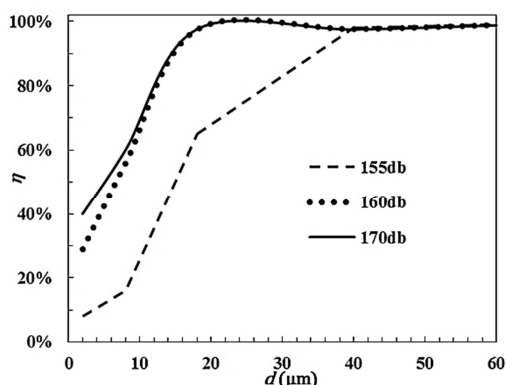


Fig.6 Separation efficiency in different particles diameter for some pressure levels

شکل 6 بازده جمع‌آوری ذرات برحسب قطر ذرات در سطح فشارهای متفاوت

سیکلون قرار می‌گیرد و در دو سرعت پاشش، بازده جداسازی ذرات در قطرهای مختلف بررسی شده است. "شکل 7" 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 سیکلون 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.

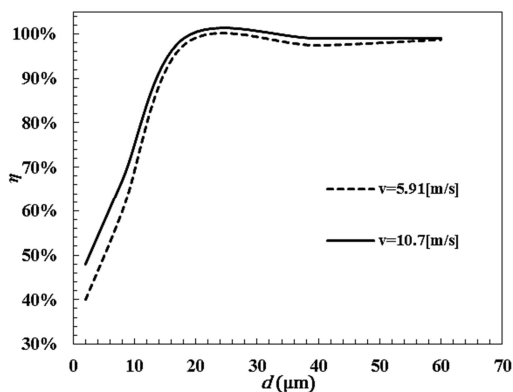


Fig.7 Separation efficiency in two injection velocities and for 9 [kHz] frequency and 170[db] pressure level

شکل 7 بازده جمع‌آوری ذرات در دو سرعت پاشش برای فرکانس 9 کیلوهرتز و سطح فشار 170 دسی بل

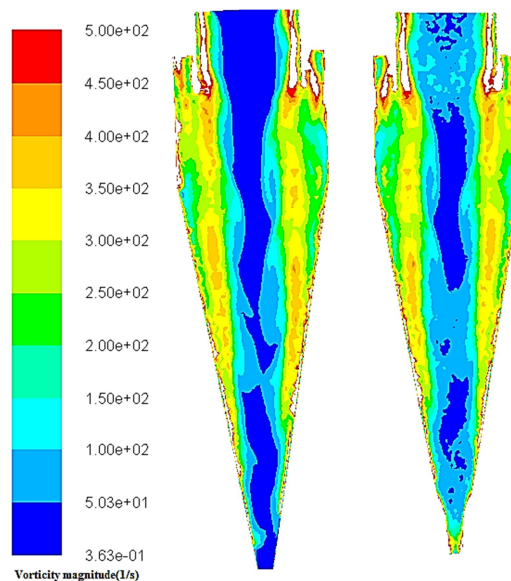


Fig.4 Comparison of vorticity magnitude in a conventional (left) and an acoustic(right) cyclone

شکل 4 مقایسه توزیع اندازه گردابه‌ها (یک بر ثانیه) در سیکلون معمولی (سمت چپ) و سیکلون آکوستیک (سمت راست)

این افت فشار در تمام هسته مرکزی سیکلون 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 چشمه صوت نقطه‌ای با پالس فشاری در محور مرکزی سیکلون آکوستیک، مطابق شکل سمت راست، 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 ناحیه جریان اولیه دیواره‌ها می‌گردد که فشار کمتری دارند.

#### 1-4- بررسی تاثیر فرکانس تحریک

در یک بررسی چشمه نقطه‌ای صوت در کف سیکلون قرار داده می‌شود، سرعت پاشش ثابت و برابر 5.91 متر بر ثانیه، قطر ذره 8 میکرومتر و فرکانس مقادیر 4، 9 و 12 کیلوهرتز انتخاب می‌شود. مقایسه نتایج در نمودار "شکل 5" نشان داده شده است. مطابق شکل با افزایش فرکانس تحریک، بازده جمع‌آوری ذرات ابتدا زیاد شده و سپس کاهش می‌یابد. به این دلیل که فرکانس گردش ذرات، مضرری طبیعی از 9 کیلوهرتز می‌باشد و با تحریک صوتی در این فرکانس، تشدید اتفاق می‌افتد و ذرات بیشتر و ریزتری را به سمت دیواره‌ها می‌فرستد و منجر به جداسازی آن‌ها شود.

#### 2-4- بررسی اثر سطح فشار چشمه

در "شکل 6" برای فرکانس 9 کیلوهرتز با سرعت پاشش 5.91 متر بر ثانیه و در سطح فشار صوت 150، 160 و 170 دسی بل بازده جداسازی ذرات بررسی شده است. مطابق این شکل با افزایش سطح فشار صوت، بازده جداسازی افزایش می‌یابد چرا که با افزایش فشار موج سینوسی محل تشکیل گردابه ثانویه تحت تاثیر تحریک کننده آکوستیک به مختصات بالاتر منتقل می‌شود و باعث می‌شود تعداد ذرات کمتری از مقطع بالایی فرار کنند.

#### 3-4- بررسی اثر سرعت ورودی در سیکلون آکوستیک

چشمه صوت با فرکانس 9 کیلوهرتز و سطح فشار 170 دسی بل در کف

## 4-4- مقایسه سیکلون معمولی و آکوستیک

در "شکل 8" مقایسه‌ی میان بازده جداسازی ذرات در سرعت 5.91 متر بر ثانیه در سیکلون آکوستیک و سیکلون معمولی انجام شده است. که نشان می‌دهد با افزایش قطر ذرات (در محدوده‌ی با قطر بیشتر از 30 میکرومتر) تاثیر اعمال چشمه آکوستیک کمتر می‌شود. لازم به ذکر است با اعمال چشمه فشار (در محدوده قطر کمتر از 30 میکرومتر) افزایش بازده جداسازی برای ذرات کوچک‌تر، کمتر است؛ چراکه گردآیان فشار نیرویی سطحی است که بر ذره بزرگتر بیشتر اثر می‌گذارد.

## 5- جمع بندی

در این مقاله جداکننده‌ی سیکلونی ذرات با ساختار "شکل 1" و جدول 1 مورد ارزیابی قرار گرفت به طوری که با معرفی مدل ریاضی پدیده، شبکه بندی مطابق "شکل 1"، شرایط مرزی در "شکل 2" معرفی شد و نتایج حل با داده‌های آزمایشگاهی در "شکل 3" صحنه‌گذاری گردید. در ادامه موارد زیر برای بهبود عملکرد سیکلون و افزایش بازده جداسازی پیشنهاد می‌شود. در "شکل 4" قرار دادن یک چشمه تحریک کننده آکوستیک موجب تشکیل گردابه‌های کوچک در فاصله بالاتری از کف سیکلون می‌شود و ذرات کمتری را با خود فراری می‌دهد.

بررسی تاثیر فرکانس تحریک مطابق "شکل 5" نشان می‌دهد با افزایش فرکانس خطی تحریک، بازده جمع‌آوری ذرات، ابتدا افزایش یافته سپس دچار کاهش می‌شود. علت این تغییرات برابر شدن فرکانس تحریک با فرکانس گردش ذرات و بروز پدیده تشدید در فرکانس 9 کیلوهرتز می‌باشد.

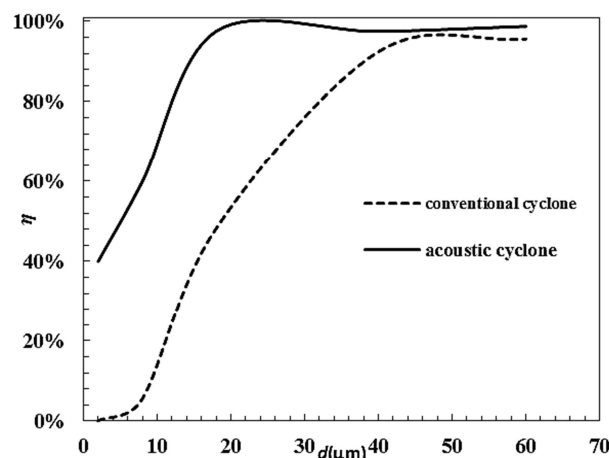


Fig.8 Separation efficiency for conventional and acoustic cyclone in 5.91[m/s] injection velocity

شکل 8 بازده جمع‌آوری ذرات برای سیکلون معمولی و آکوستیک و در سرعت پاشش 5.91 متر بر ثانیه

بررسی اثر قدرت چشمه صوت در "شکل 6" نشان می‌دهد با افزایش فشار صوت، بازده جداسازی نیز افزایش می‌یابد چراکه افزایش فشار صوت باعث به هم چسبیدن ذرات، تشکیل واحدهای با قطر بزرگتر ذرات و هدایت آن‌ها به نزدیک دیواره‌ها و گردابه‌های اولیه می‌شود. لذا سطح فشار 170 دسی بل بیش‌ترین بازدهی را در پی دارد.

بررسی اثر سرعت ورود ذرات در "شکل 7" نشان 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 سیکلون در حال چرخش است و بیشتر تحت اثر میدان آکوستیک قرار می‌گیرد.

مقایسه بین سیکلون آکوستیک و معمولی مطابق "شکل 8" در یک 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.

## 6- مراجع

- [1] D. Alaa H. Wadi, A. Osamah, A. Al-Hashimi, Improve Water Quality by Cyclone Separator as a Pre-Treatment Technique, *International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences (IJCEBS)*, Vol. 1, No. 4, pp. 2320-408, 2013.
- [2] S. Altmeyer, V. Mathieu, S. Jullemier, P. Contal, N. Midoux, S. Rode, J. 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.
- [3] L. Wang, *Theoretical Study of Cyclone Design*, PhD thesis, Texas A&M University, Texas, 2004.
- [4] K. Elsayed, *Analysis and Optimization of Cyclone Separators Geometry Using RANS and LES Methodologies*, PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, Vrije Universiteit, Brussel, 2011.
- [5] M. Narasimha, R. Sriprya, P.K. Banerjee, CFD modelling of hydrocyclone—prediction of cut size, *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 75, No. 1–2, pp. 53-68, 2005.
- [6] V. Vekteris, V. Striška, D. Ozarovskis, V. Mokšin, Tribological Adhesion of Particles in Acoustic Field, *Journal of Vibroengineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 509-513, 2012.
- [7] T.L.Hoffmann, Environmental Implications of Acoustic Aerosol Agglomeration, *Ultrasonics*, Vol. 38, No. 1–8, pp. 353-357, 2000.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] V. Vekteris, V. Strishka, D. Ozarovskis, V. Mokshin, Numerical Simulation of Air Flow inside Acoustic Cyclone Separator, *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 15, pp. 625–633, 2015.
- [11] 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)