

بررسی تأثیر قسمت استوانه‌ای بر عملکرد هیدروسیکلون آبزدا با استفاده از شبیه‌سازی CFD

امین کولیوند، سید حسن هاشم آبادی*

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقاتی CFD

پیام نگار: hashemabadi@iust.ac.ir

چکیده

در این مطالعه، یک هیدروسیکلون جداکننده آب از نفت از نوع (کولمن^۱ - تئو^۲)، به صورت سه بعدی با استفاده از روش CFD شبیه‌سازی شده است. برای مدل‌سازی جریان مغشوش از مدل RSM و برای تحلیل جریان دو فازی، از مدل (اولرین-اولرین) استفاده شده است. صحت نتایج شبیه‌سازی با مقایسه بازدهی و درصد جریان خروجی از پایین هیدروسیکلون با نتایج تجربی گزارش شده، تأیید شده است. این نتایج، خطای متوسط ۹٪ و ۷٪ را به ترتیب برای بازدهی و نسبت جدایش، در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی، نشان می‌دهند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با کاهش طول قسمت استوانه‌ای ورودی از $h=1.5D$ به $h=0.29D$ بازدهی و بازدهی کلی به طور متوسط به مقدار ۲۰٪ افزایش می‌یابند. همچنین با استفاده از یک قسمت مخروطی به جای قسمت استوانه‌ای، بازدهی و بازدهی کلی هیدروسیکلون به طور متوسط ۱۰٪ بهبود می‌یابد.

کلمات کلیدی: هیدروسیکلون، آب، نفت، استوانه ورودی. شبیه‌سازی CFD

۱- مقدمه

برای سال‌ها از هیدروسیکلون‌ها در صنایع مختلف استفاده می‌شده است. علت مقبولیت عامه برای هیدروسیکلون به سادگی طراحی، دربر نداشتن هزینه‌های نگهداری و عملیاتی، ظرفیت بالا، بهره‌برداری آسان و نداشتن قطعات متحرک بر می‌گردد. از دیگر مزایای این وسیله، کوچکی و زمان ماند کم جریان در آن است که کنترل آنرا ساده‌تر می‌کند. از سال ۱۹۸۰ به بعد جداسازی (مایع/مایع) توسط هیدروسیکلون‌ها به دلیل استفاده گسترده از آنها در صنایع نفت مورد توجه قرار گرفت. هیدروسیکلون‌ها در صنایع

نفت برای جداسازی نفت از پساب‌های نفتی^۳ و همچنین آب از نفت^۴ در جداسازی ته چاهی و همین‌طور فرایند نمکزدایی^۵ نفت مورد استفاده قرار می‌گیرند.

اکثر کارهایی که در زمینه جداسازی (مایع-مایع) توسط هیدروسیکلون‌ها انجام گرفته، در زمینه نفت زدایی بوده و آبزدایی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است و اکثر کارهای انجام شده نیز بیشتر جنبه آزمایشگاهی داشته‌اند. از جمله کارهای آزمایشگاهی انجام شده در این زمینه، می‌توان به کارهای کولمن و تئو و اسمیت^۶

3. Deoiling Hydrocyclone
4. Dewatering Hydrocyclone
5. Desalting
6. Smyth

1. Colman
2. Thew

از این مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی CFD به بررسی تغییر طول قسمت استوانه‌ای بر عملکرد هیدروسیکلون پرداخته شده است.

۲- معادلات حاکم

از معادله پیوستگی جرم که ناشی از مقدار جرم ثابت در هر فرایند است به صورت زیر استفاده می‌شود [۱۵]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \Delta \cdot (\rho U) = S_m \quad (1)$$

S_m در سمت راست این معادله، دربرگیرنده جمله انتقال جرم بین فازهاست که در این شبیه‌سازی برابر صفر در نظر گرفته شده است. معادله ممنتوم (تکانه) یا حرکت، از بررسی برآیند نیروهای وارد بر سیال به دست می‌آید و به صورت معادله (۲) بیان می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U) + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot \tau + \rho g + F \quad (2)$$

در این رابطه p فشار استاتیکی و τ تنسور تنش است. F نیز در این شبیه‌سازی‌ها بیان‌کننده تأثیر نیروهای بدنه است که بر سیال وارد می‌شود. از آنجا که توربولنسی (آشفستگی) در هیدروسیکلون شدید و به طور طبیعی غیر ایزنتروپیک است، لذا در اکثر موارد به منظور انجام یک شبیه‌سازی با دقت بالا و از نظر محاسباتی به صرفه، از مدل RSM استفاده می‌شود [۱۶، ۵-۱۹]. در این مطالعه نیز از مدل RSM استفاده شده است. به منظور مدل‌سازی جریان چند فاز، از مدل (اولرین-اولرین) که برای درصد حجمی بالاتر از ۱۰٪ از فاز گسسته مناسب است استفاده شده است.

۳- شبکه محاسباتی، شرایط مرزی و شبیه‌سازی CFD

به منظور شبیه‌سازی هیدروسیکلون، به دلیل پیچیدگی هندسه و محدودیت در ایجاد مش شش وجهی، از مش چهار وجهی استفاده شده است. در شکل (۱۱-الف) یک هیدروسیکلون با مش چهار وجهی نشان داده شده است. در همه موارد شبیه‌سازی، شرط جرم ورودی در ورودی‌ها و شرط فشار خروجی در خروجی‌ها در نظر گرفته شده است. این هیدروسیکلون دارای دو ورودی استوانه‌ای

اشاره کرد [۱۲ و ۱]. همچنین بلیدی^۱ بر روی نوع سیال چند فاز، از لحاظ ساده و چند گانه کار کرده است. سیال چند فاز چند گانه به سیالی گفته می‌شود که در آن قطرات فاز پیوسته در داخل قطرات فاز گسسته قرار گرفته و مجدداً این قطرات در داخل فاز پیوسته قرار داده شده باشند [۳]. از کارهای شبیه‌سازی انجام شده، می‌توان به کار چاتز^۲ و همکارانش که بر روی شکستگی و به هم پیوستگی قطرات در سیال دو فاز کار کرده‌اند اشاره کرد [۴]. شان و لین^۳ نیز فرایند آزدایی توسط هیدروسیکلون را شبیه‌سازی کرده و به بررسی تأثیر شدت جریان پرداخته‌اند [۵]. اما در شرایط عملیاتی ثابت، هندسه هیدروسیکلون تعیین‌کننده عملکرد هیدروسیکلون است. یکی از پارامترهای هندسی مهم هیدروسیکلون، طول قسمت استوانه‌ای ورودی آن است. رفتار هیدروسیکلون با تغییر طول قسمت استوانه‌ای، بنا بر شرایط عملیاتی، متغیر است. در هیدروسیکلون‌های (جامد-مایع) که خروجی آنها به طرف اتمسفر است، با افزایش طول قسمت استوانه‌ای هیدروسیکلون، به دلیل افزایش زمان ماند قطرات، احتمال جداسازی آنها بیشتر و بازدهی نیز بیشتر می‌شود. در بعضی مواقع که فشار داخل هیدروسیکلون از فشار اتمسفری کمتر شود، هوا به داخل نفوذ کرده و باعث به وجود آمدن هسته هوایی می‌شود. هسته هوایی در هیدروسیکلون‌ها پدیده مطلوبی نیست و باید از بروز آن جلوگیری کرد زیرا باعث اشغال مقداری از حجم هیدروسیکلون و خروجی‌ها خواهد شد و این، زمان ماند و جداسازی را کاهش می‌دهد. کاهش طول قسمت استوانه‌ای، باعث افزایش افت فشار و در نتیجه افزایش ضخامت هسته هوایی می‌شود. افزایش ضخامت این هسته، باعث کاهش بازدهی هیدروسیکلون می‌شود [۶-۱۱]. اما در هیدروسیکلون‌هایی که خروجی آنها به اتمسفر نیست و در آنها هسته هوایی به وجود نمی‌آید، هر گاه طول قسمت استوانه‌ای افزایش یابد، احتمال بروز پدیده‌ای به نام گردابه‌های کوچک^۴ افزایش می‌یابد. این پدیده باعث آشفستگی در میدان‌های سرعت شده و جداسازی را کاهش می‌دهد. همچنین در قسمت استوانه‌ای به دلیل تنش‌های بالای وارد شده از طرف دیواره به سیال، سرعت دورانی سیال برای جداسازی کمتر است [۱۲-۱۴].

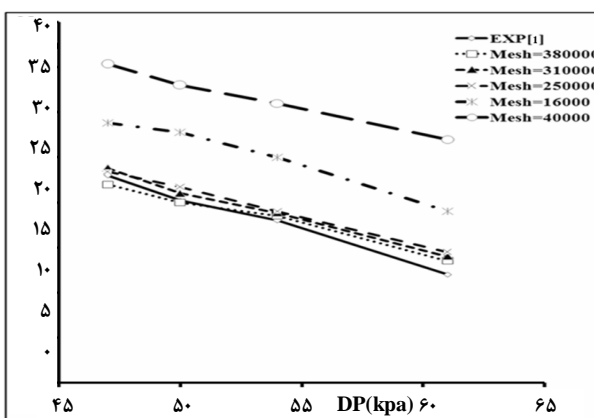
1. A. Belaidi
2. S. Schutz
3. Shun and Lin
4. short-circuit

گردد. بنابراین اگر چه افزایش نسبت جداسدن باعث خروج آب بیشتری از قسمت پایین هیدروسیکلون می‌شود، ولی مقدار نفت خروجی از پایین نیز افزایش می‌یابد. لذا برای این منظور، بازدهی کلی^۳ به صورت زیر تعریف می‌شود [۱،۲].

$$E_O = \frac{(100 - F)}{100} \left(\frac{100 - \alpha_o}{100 - \alpha_i} - \frac{\alpha_o}{\alpha_i} \right) \quad (3)$$

اندیس u و i به ترتیب به معنی جریان بالایی و ورودی است. F و k نیز به ترتیب نسبت جداسدن و درصد حجمی هستند. در این شکل‌ها، همان‌طور که دیده می‌شود، با افزایش تعداد مش، خطای شبیه‌سازی کم می‌شود. در جدول (۱) مقادیر متوسط خطا و زمان محاسبات، برای مش‌های ۴۰۰۰۰، ۲۵۰۰۰۰، ۳۱۰۰۰۰ و ۳۸۰۰۰۰، برای سیستمی با مشخصات (RAM:6GB, HARD:500GB, CPU:2.67GHz-920-i7) آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود، با تغییرات مش از ۳۱۰۰۰۰ به ۳۸۰۰۰۰، نتایج شبیه‌سازی تنها به مقدار ۲٪ به مقادیر آزمایشگاهی نزدیک می‌شود و این در حالی است که زمان محاسبات از ۸۹ ساعت به ۱۲۸ ساعت افزایش می‌یابد. بنابراین در اینجا به نظر می‌رسد که استفاده از چگالی مش ۳۱۰۰۰، هم از لحاظ زمان محاسبات و هم از نظر دقت، نسبت به بقیه چگالی مش‌ها قابل پذیرش تر بوده و لذا در این تحقیق از این چگالی مش استفاده می‌شود.

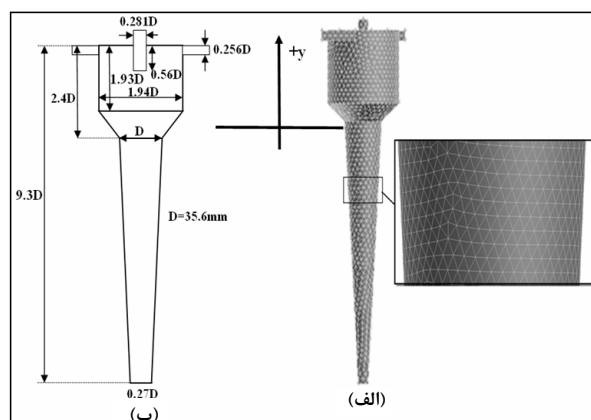
F(%)



شکل ۲- تغییرات نسبت جداسدن با تغییر اختلاف فشار بالا و پایین هیدروسیکلون برای مش‌های مختلف

3. Overall Efficiency

است که نفت با ۱۵٪ آب به‌طور مماسی به قسمت بالای آن وارد می‌شود. شدت جریان سیال ورودی نیز در همه موارد ۴۵ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شده است. گرانیوی و چگالی نفت در دمای ۲۰ درجه سلسیوس نیز به ترتیب 0.00143 (kg/m.s) و $780 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ می‌باشند. همچنین متوسط اندازه قطرات، ۴۵ میکرومتر در نظر گرفته شده است. ابعاد و شکل هیدروسیکلون شبیه‌سازی شده در شکل (۱) (ب) آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود، این هیدروسیکلون از نوع مدل (کولمن-تنو) است که دو قسمت مخروطی در آن وجود دارد [۱].



شکل ۱- (الف) هیدروسیکلون با مش چهار وجهی -

(ب) هیدروسیکلون (کولمن-تنو) با ابعاد مشخص شد [۱]

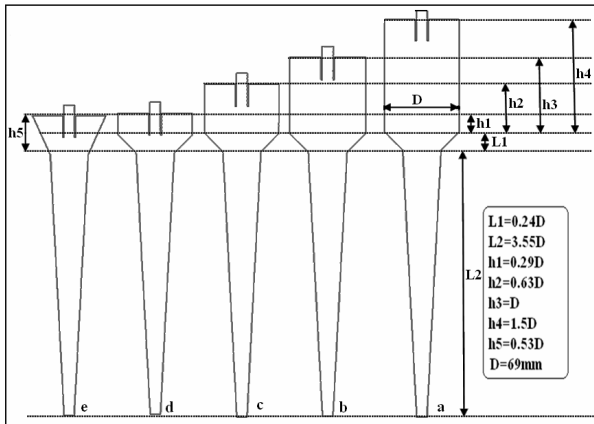
۴- تجزیه و تحلیل نتایج شبیه‌سازی CFD

۴-۱ استقلال نتایج از مش

در شکل‌های (۲) تا (۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای چهار نوع چگالی مش مختلف و نتایج تجربی آمده است. نسبت جداسدن^۱ (F) به صورت نسبت شدت جریان خروجی از پایین هیدروسیکلون به شدت جریان ورودی به هیدروسیکلون و بازدهی^۲ (E) نیز به صورت نسبت جرمی آب خروجی از پایین به آب ورودی تعریف می‌شود. در مورد هیدروسیکلون‌های نفت زدا، مقدار بالای نسبت جداسدن و بازدهی بالا مطلوب و مورد نظر است. ولی در مورد هیدروسیکلون‌های آبزدا این طور نیست. در هیدروسیکلون‌های آبزدا، مطلوب آن است که آب همراه نفت از نفت جدا شده و از پایین خارج شود و نفت خالص شده نیز از بالای هیدروسیکلون خارج

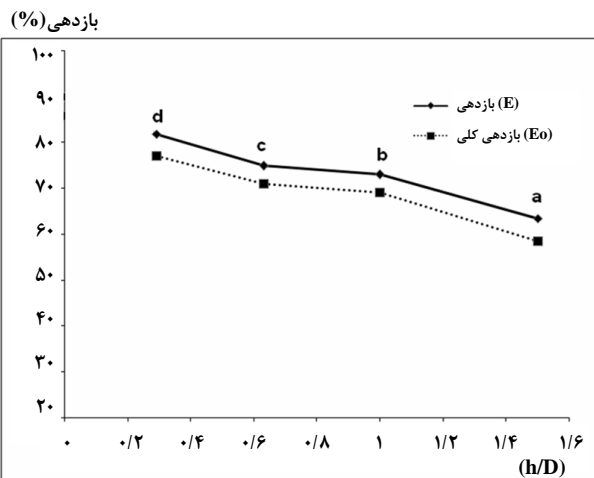
1. Split Ratio
2. Efficiency

بهبود عملکرد هیدروسیکلون شده است. در شکل (د) هیدروسیکلون‌های با طول قسمت استوانه‌ای متفاوت (a-d) و هیدروسیکلون اصلاح شده (e) آمده است.

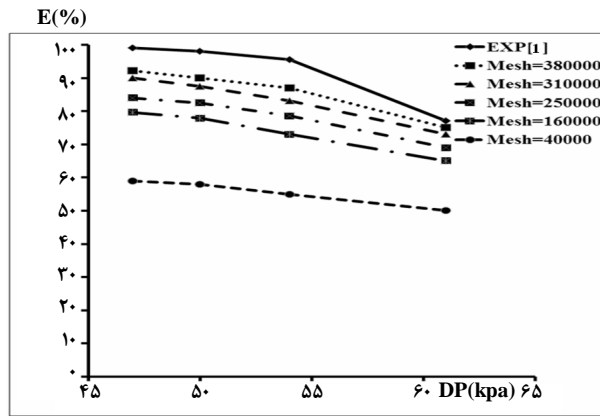


شکل ۵- هیدروسیکلون‌های با طول قسمت استوانه‌ای مختلف (a تا d) و هیدروسیکلون اصلاح شده (e)

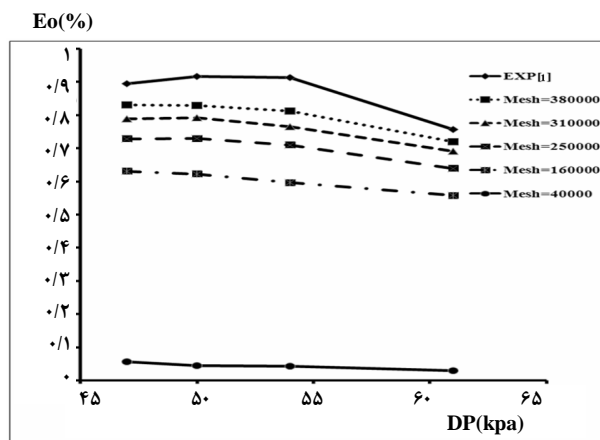
در شکل (۶) نمودار بازدهی و بازدهی کلی برای هیدروسیکلون با طول قسمت استوانه‌ای مختلف آمده است. h و D به ترتیب طول و قطر قسمت استوانه‌ای هیدروسیکلون هستند. همان‌طور که دیده می‌شود، با کاهش طول قسمت استوانه‌ای از $h=1.5D$ به $h=0.29D$ ، هر کدام از مقادیر بازدهی و بازدهی کلی در هیدروسیکلون تقریباً ۲۰٪ افزایش می‌یابند. در اینجا به توضیح علت این پدیده پرداخته می‌شود. در شکل (۷) بردارهای سرعت محوری برای هیدروسیکلون با طول قسمت استوانه‌ای ۸۳mm آمده است.



شکل ۶- تأثیر طول قسمت استوانه‌ای بر بازدهی و بازدهی کلی هیدروسیکلون



شکل ۳- بازدهی با تغییر اختلاف فشار بالا و پایین هیدروسیکلون برای مش‌های مختلف



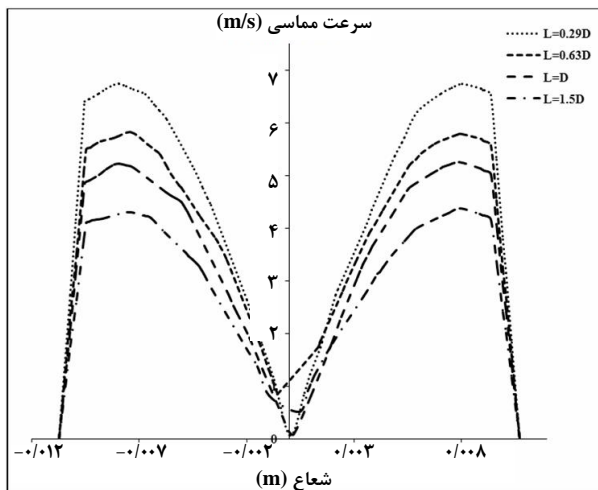
شکل ۴- تغییرات بازدهی کلی با تغییر اختلاف فشار بالا و پایین هیدروسیکلون برای مش‌های مختلف

جدول ۱- متوسط خطای نسبت جدا شدن، بازدهی و بازدهی کلی برای مش‌های مختلف

مش	متوسط خطا (%)			زمان محاسبات (ساعت)
	F	E	E_0	
۴۰۰۰۰	۳۹	۷۸	۹۵	۹/۲
۲۵۰۰۰۰	۸/۸	۱۴	۱۹	۴۶
۳۱۰۰۰۰	۷	۹	۱۲	۸۹/۲۸
۳۸۰۰۰۰	۵	۷	۸	۱۲۸

۴-۲ طول و شکل قسمت ورودی استوانه‌ای

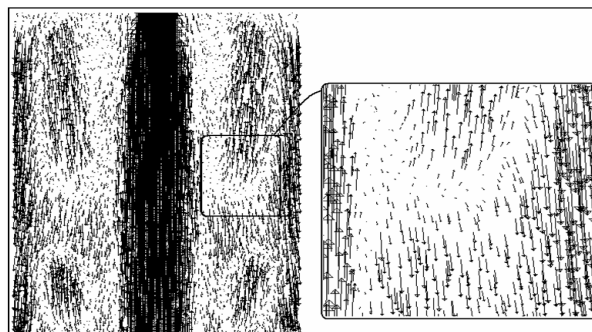
در این مطالعه، تأثیر تغییر طول قسمت استوانه‌ای هیدروسیکلون، بر بازدهی و بازدهی کلی جداسازی بررسی شده است. همچنین با جایگزینی یک قسمت مخروطی به جای قسمت استوانه‌ای، سعی در



شکل ۹- سرعت مماسی برای قسمت مخروطی هیدروسیکلون ($y=0.15m$)

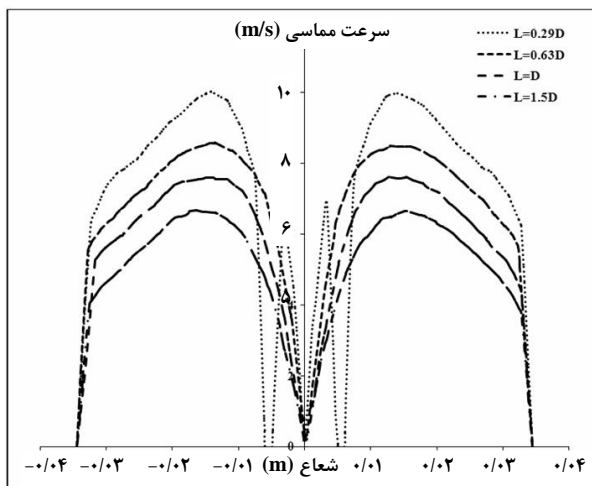
همان‌طور که دیده می‌شود، با افزایش طول قسمت استوانه‌ای، سرعت مماسی که عامل جداسازی قطرات آب است، در هر دو قسمت استوانه‌ای و مخروطی کاهش می‌یابد. بنابراین، قسمت استوانه‌ای ورودی تأثیر مهم در توزیع جریان داخل هیدروسیکلون دارد. در نمودار (۸) که مربوط به سرعت مماسی در قسمت استوانه‌ای است، نمودار مربوط به $L=0.29D$ رفتاری متفاوت نسبت به بقیه نمودارها دارد که به علت وجود گردابه‌یاب^۱ در این سطح مقطع است. نقاطی که سرعت آنها به صفر می‌رسد مربوط به دیواره استوانه و گردابه‌یاب است. در اینجا به منظور انجام یک طراحی با بازدهی بالاتر، از یک قسمت ورودی با شکل مخروطی و طولی برابر با کمترین طول قسمت استوانه‌ای (شکل ۵-e) استفاده شده است. راجامانی^۲ و دلگادیلو^۳ با استفاده از این طراحی، افزایش بازدهی را در یک هیدروسیکلون (جامد- مایع) کولمن تئو گزارش کرده‌اند [۲۰]. شکل (۱۰) نیز مقایسه بازدهی هیدروسیکلون اصلاح شده و استاندارد را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، با اصلاحی که در طول و شکل قسمت استوانه‌ای ورودی هیدروسیکلون انجام می‌شود، بازدهی و بازدهی کلی هرکدام به‌طور متوسط ۱۰٪ افزایش می‌یابند. علت این پدیده، همان‌طور که قبلاً گفته شد، کاهش اتلافات انرژی جنبشی سیال و در نتیجه افزایش مقدار سرعت سیال و افزایش بازدهی است.

1. Vortex Finder
2. Rajamani
3. Delgadillo,



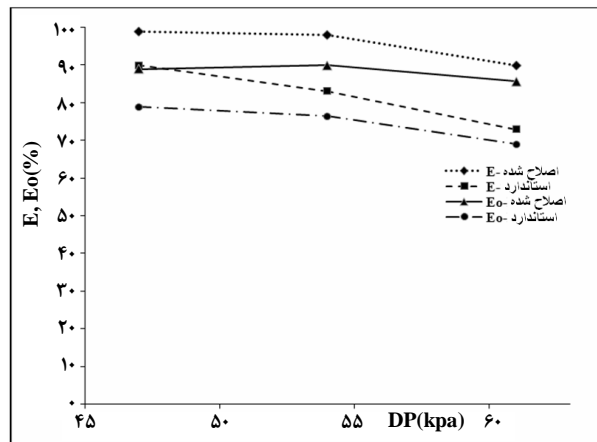
شکل ۷- ایجاد گردابه‌های کوچک در قسمت استوانه‌ای هیدروسیکلون

همان‌طور که دیده می‌شود، در ناحیه مشخص شده، بردارهای سرعت محوری که مسئولیت انتقال قطرات آب را به انتهای هیدروسیکلون دارند، بسیار مغشوش و نامنظم‌اند. لذا در این ناحیه‌ها گردابه‌های کوچک ایجاد شده و جداسازی کاهش می‌یابد. با کاهش طول قسمت استوانه‌ای، احتمال به وجود آمدن چنین گردابه‌هایی کاهش یافته و بازدهی زیاد می‌شود. همچنین همان‌طور که گفته شد، به دلیل تنش بالای دیواره که بر سیال وارد می‌شود، سرعت مماسی سیال با افزایش طول قسمت استوانه‌ای کاهش می‌یابد و این کاهش سرعت به بقیه نقاط هیدروسیکلون انتقال پیدا می‌کند [۱۴-۱۲]. در شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب بردارهای سرعت مماسی بر حسب شعاع برای قسمت استوانه‌ای ($y=0.01m$) و قسمت سیکلونی ($y=-0.15m$)، برای هیدروسیکلون‌های با اندازه مختلف قسمت استوانه‌ای آمده است.



شکل ۸- سرعت مماسی برای قسمت استوانه‌ای هیدروسیکلون ($y=0.01m$)

- D.A., "Small scale experiments on hydrocyclones for dewatering light oils", 1st international conference on hydrocyclones, 189-208, (1980).
- [3] Belaidi, A., Thew, M.T., Munaweera, S.J., "Hydrocyclone performance with complex oil-water emulsions in the feed", The Canadian Journal of Chemical Engineering, 81, 1159-1170, (2003).
- [4] Schutz, S., Gorbach, G., Piesche, M., "Modeling fluid behavior and droplet interactions during liquid-liquid separation in hydrocyclones", Chemical Engineering Science, 64, 3935-3952, (2009).
- [5] Bai, Zh., Wang, Hu., "Numerical Simulation of the Separating Performance of Hydrocyclones", Chem. Eng. Technol, 29, 1161-1166, (2006).
- [6] Olson, T.J., Turner, P.A., "Hydrocyclone selection for plant design", Mineral Processing Plant Design, Operating Practices and Control Proceedings, 1, 880-893, (2004).
- [7] Martinez, L.F., Lavin, A.G., Mahamud, M.M., Bueno, J.L., "Improvements in hydrocyclone design flow lines stabilization," Powder Technology, 176, 1-8, (2007).
- [8] Wang, B., Yu, A.B., "Numerical study of particle-fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions", Minerals Engineering, 19, 1022-1033, (2006).
- [9] Neesse, T., Dueck, J., "Air core formation in the hydrocyclone", Minerals Engineering 20, 349-354, (2007).
- [10] Chu, L., Chen, W., Lee, X., "effect of structural modification on hydrocyclone performance", Separation and Purification Technology 21, 71-86, (2000).
- [11] Ko, J., Zahrai, S., Macchion, O., "Numerical Modeling of Highly Swirling Flows in a Through-Flow Cylindrical Hydrocyclone", Fluid Mechanics and Transport Phenomena, 25, 3334-3344, (2006).
- [12] Young, G.A.B., Wakley, W.D., "Oil-water separation using hydrocyclones: an experimental search for optimum dimensions", Journal of Petroleum Science and Engineering 11, 37-50, (1994).
- [13] Souza, F., Silveira Neto, A., "Simulation of turbulent flow in a rietema hydrocyclone", 20th Congresso Brasileiro de P&D em Petroleo & Gas, (2003).
- [14] Dai, G.Q., Li, J.M., Chen, W.M., "Numerical prediction of the liquid flow within a hydrocyclone", Chemical Engineering Journal 74, 217-223, (1999).
- [15] Udaya Bhaskara, K., Murthy, Y.R., Ramakrishnan, N., Srivastava, J.K., Sarkar, S., Kumar, V., "CFD validation for flyash particle classification in hydrocyclones", Miner. Eng., 20, 290-302, (2007).
- [16] Huang, S., "Numerical Simulation of Oil-water Hydrocyclone Using Reynolds-Stress Model for Eulerian Multiphase Flows", Can. J. Chem. Eng., 83, 829-834, (2005).



شکل ۱۰- مقایسه بازدهی و بازدهی کی برای هیدروسیکلون استاندارد و اصلاح شده

۵- بحث و نتیجه گیری

روش CFD، با در نظر گرفتن مدل‌ها و شرایط مناسب، به عنوان یک روش قابل اطمینان در شبیه‌سازی تلقی می‌شود. در این مطالعه، با در نظر گرفتن مدل RSM برای شبیه‌سازی اغتشاشات و مدل دو فاز (اولرین-اولرین) برای حل جریان چند فاز، به شبیه‌سازی یک هیدروسیکلون آبردای مدل کولمن تئو پرداخته شد. برای برخورداری از دقت کافی و زمان منطقی در محاسبات، از چگالی مش ۳۱۰۰۰۰ برای طراحی استاندارد استفاده شده است که این چگالی مش، در زمان محاسبات ۸۹ ساعت، بازدهی و نسبت جداسازی را به ترتیب با خطای متوسط ۹٪ و ۷٪ محاسبه می‌کند. با بررسی‌های انجام شده نتیجه می‌شود که با کاهش طول قسمت استوانه‌ای هیدروسیکلون، به دلیل کاهش میزان تلفات انرژی، سرعت مماسی در هیدروسیکلون افزایش یافته و در نتیجه بازدهی و بازدهی کلی هر کدام تقریباً به مقدار ۲۰٪ افزایش می‌یابند. همچنین با استفاده از یک قسمت مخروطی به جای قسمت استوانه‌ای در هیدروسیکلون، عملکرد هیدروسیکلون بهبود یافته و بازدهی و بازدهی کلی هیدروسیکلون تقریباً ۱۰٪ زیاد می‌شوند.

مراجع

- [1] Smyth, I.C., Thew, M. T., Colman, D.A., "The effect of split ratio on heavy dispersion liquid-liquid separation in hydrocyclones", 2th International Conference on Hydrocyclone, 177-190, (1984).
- [2] Smyth, I.C., Thew, M.T., Debenham, P.S., Colman,

- [17] Medronho, R.A., Schuetze, J., Deckwer, W. D., "Numerical simulation of hydrocyclones for cell separation", *Lat. Am. Appl. Res.*, 35, 1-8, (2005).
- [18] Shalaby, H., Pachler, K., Wozniak, K., Wozniak, G., "Comparative study of the continuous phase flow in a cyclone separator using different turbulence models", *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 48, 1175-1197, (2005).
- [19] Dlamini, M.F., Powell, M.S., Meyer, C.J., "A CFD simulation of a single phase hydrocyclone flow field, *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*", 105, 711-718, (2005).
- [20] Delgadillo, J.A., Rajamani, R.K., "Exploration of hydrocyclone designs using computational fluid dynamics", *Int. J. Miner. Process.* 84, 252-261, (2007).