

بهبود فرآیند جداسازی فازی هیدروکربن جامد- مایع بر اساس مکانیسم هیدروسیکلون

میلاذ سمایی^{۱*}، شرکت بهره‌برداری نفت و گاز آغاچاری

چکیده

بیش از ۵۰ سال هیدروسیکلون‌ها به‌عنوان ابزاری عملیاتی برای جداسازی مایعات از جامدات در صنایع مختلف استفاده شده‌اند. در این مقاله تأثیر سرعت مماسی ورودی به هیدروسیکلون بر عملکرد آن و همچنین شناخت الگوی جریان بررسی و مطالعه شد. بدین منظور از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و نرم‌افزار COMSOL استفاده شد. طبق نتایج سرعت محوری در ناحیه‌ی نزدیک به بدنه‌ی سیکلون منفی است و این به‌معنی جهت رو به پایین جریان است. این در حالی است که سرعت حرکت رو به بالا در مرکز سیکلون مقدار مثبتی دارد. از طرفی فشار استاتیک در نزدیکی دیواره بیشترین مقدار خود را دارد. با این حال فشار به‌سمت مرکز فشار در حال کاهش است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شعاع از مرکز محور، سرعت مماسی افزایش می‌یابد. با این وجود بیشینه‌ی سرعت مماسی در فاصله‌ی بین مرکز است.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۷/۰۲/۱۰

تاریخ ارسال به داور: ۹۷/۰۲/۱۸

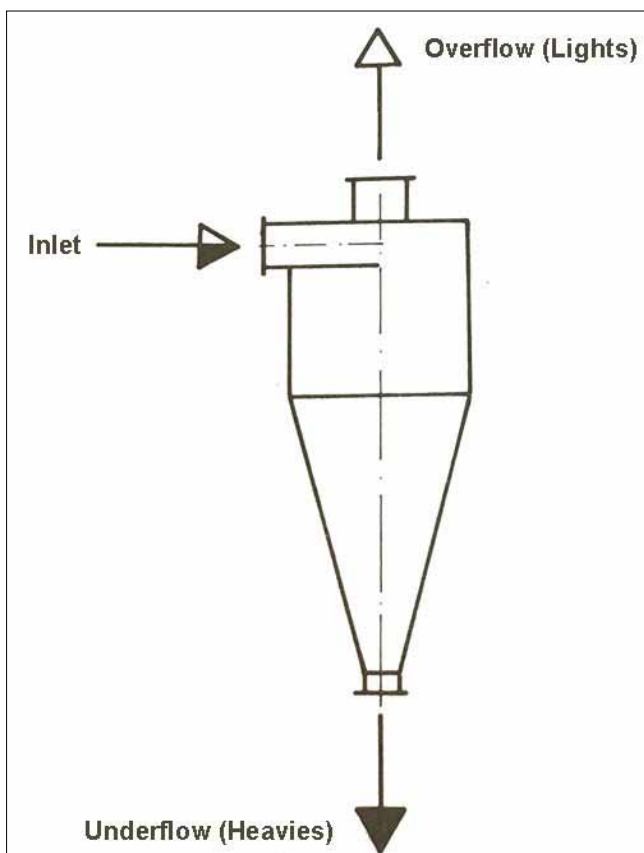
تاریخ پذیرش داور: ۹۷/۰۴/۲۱

واژگان کلیدی:

هیدروسیکلون، شبیه‌سازی CFD، الگوی جریان، افت فشار، سرعت مماسی

مقدمه

می‌توانند به‌عنوان فاز دوم باشند یا می‌توانند به‌صورت مجزا پس از محاسبه‌ی اولیه‌ی فاز سیال مسیریابی گردند.



هیدروسیکلون وسیله‌ای به‌شکل ظرف استوانه‌ای-مخروطی است. آن دسته از سیکلون‌هایی که مخصوص مایعات طراحی شده‌اند را هیدروسیکلون^۱ یا سیکلون هیدرولیکی می‌نامند. پایه و اساس جداسازی فازها در سیکلون‌ها ته‌نشینی گریز^۲ از مرکز است. در ته‌نشینی گریز از مرکز، ذره‌ی معلق شده تحت تأثیر شتاب گریز از مرکز قرار می‌گیرد که این باعث جداسازی آنها از سیال می‌شود. اگرچه در یک سیکلون نیروی گریز از مرکز به‌وجود می‌آید اما خود سیکلون‌ها هیچ قسمت محرکی ندارند و حرکت گردابه‌ای مورد نیاز توسط جریان سیال ایجاد می‌گردد. شکل-۱ نمایی از سطح مقطع هیدروسیکلون با طراحی رایج را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل مشخص است هیدروسیکلون از یک قسمتی استوانه‌ای که به قسمتی تحتانی منتهی می‌شود تشکیل شده است. ذرات معلق همراه مایع به‌صورت مماسی از قسمت بالا (ورودی) وارد هیدروسیکلون می‌گردند و در نتیجه‌ی این حرکت مماسی سیال، حرکتی چرخشی در داخل سیکلون ایجاد می‌شود. قسمتی از مایع حاوی ذرات ریز از طریق خروجی سیلندری‌شکلی که در بالای هیدروسیکلون واقع شده خارج می‌گردد. این خروجی به نام سرریز^۳ شناخته شده است. مایعات باقیمانده که حاوی اجرام درشت‌تری هستند از خروجی سیلندری‌شکل واقع شده در نوک (ته) مخروط خارج می‌شوند. این خروجی منتهی مخروطی‌شکل را ته‌ریز^۴ می‌گویند [۱-۷].

در CFD معادلات حاکم بر هیدروسیکلون (معادلات نویر- استوکس) به‌شکل تفاضل محدود^۵ نوشته شده و با گره‌بندی^۶ کل فضای هیدروسیکلون حل می‌شوند. در این شبیه‌سازی ذرات

^۱ نمای یک هیدروسیکلون

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (Miladsama999@gmail.com)

کارهای آزمایشگاهی و شبیه‌سازی با نرم‌افزار ANSYS/FLUENT فضای مرکزی تشکیل دهنده‌ی هوا را مطالعه کردند. آنها که معتقد بودند تا آن زمان بیشتر مطالعات در زمینه‌ی توزیع سرعت سیال بوده و تحقیقاتی در زمینه‌ی هوای مرکزی موجود در هیدروسیکلون انجام نشده، با این دیدگاه مطالعات خود را در زمینه‌ی تشکیل هوای مرکزی و عوامل مؤثر بر اندازه‌ی آن خلاصه کرده و برای مدل‌سازی از Reynolds Stress Model RSM جهت محاسبه‌ی شدت آشفتگی استفاده کردند. آنها نتایج کار خود را با آزمایش‌ها مقایسه کرده و به‌طور خلاصه نشان دادند که در مقابل اثر زیاد قطر سرریز بر عملکرد هیدروسیکلون، تغییر قطر ته‌ریز اثر چندانی بر جریان سیال در هیدروسیکلون ندارد.

مثل همه‌ی اصول جداسازی در دینامیک سیالات، دانستن الگوی جریان در هیدروسیکلون نیز امری ضروری است. در این مطالعه نیز با هدف دانستن الگوهای حرکتی سیال درون هیدروسیکلون، بررسی و آنالیز این مهم با نرم‌افزار COMSOL Multiphysics انجام می‌شود.

۱- روند شبیه‌سازی و متغیرهای ورودی مدل

در ادامه جزئیات مربوط به مدل و روند شبیه‌سازی جریان مثل هندسه‌ی هیدروسیکلون، مواد، شرایط مرزی، مش‌بندی، روش حل و آنالیز پس از پردازش توسط نرم‌افزار COMSOL Multiphysics-3.5 آمده است. شکل ۲- فلوجارت خلاصه‌ی روند شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جهت شبیه‌سازی باید از سیال و ذرات جامد استفاده شود که خواص آنها در جدول ۱- ارائه شده است.

در جدول ۲- تمامی شرایط مرزی در یک هیدروسیکلون همراه با سطوحی با خوراک ورودی، دیواره‌ی سیکلون، سرریز و ته‌ریز نشان

شبیه‌سازی سه‌بعدی کامل برای طراحی هیدروسیکلون در اواخر دهه‌ی ۹۰ میلادی به‌ثمر رسید [۸ و ۹]. هی^۷ و همکاران [۱۰] بیان کردند که برای مدل‌سازی جریان سیال هیدروسیکلون حتماً باید شبیه‌سازی سه‌بعدی انجام شود. شبیه‌سازی دوبعدی با مدنظر گرفتن تقارن، حتی با دخیل کردن معادلات آشفتگی و چندفازی جریان نمی‌تواند حرکت چرخشی سیال را به‌دست آورد.

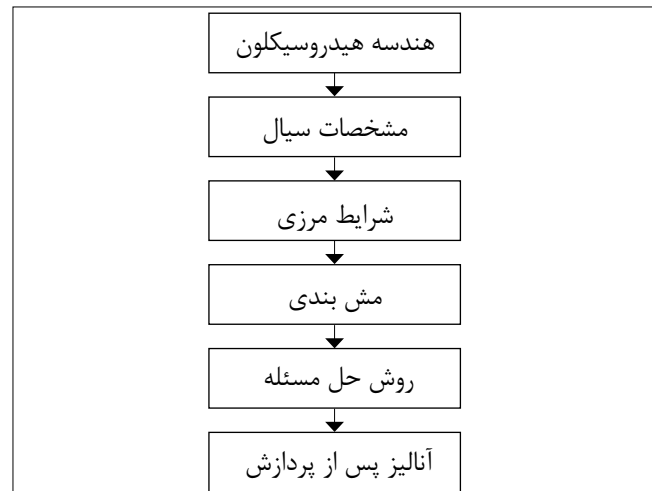
در ۲۰۰۴ یانگ^۸ و همکاران [۱۱] با شبیه‌سازی CFD هیدروسیکلون در سه‌بعد، مدعی تخمین توزیع سرعت سیال و بازدهی جداسازی مایع-جامد (آب-خاک) درون یک سیکلون شدند. جهت دستیابی به این هدف، جریان سیکلون را با مدنظر گرفتن حالت آشفتگی و طی آن بیان معادلات نویر-استوکس و پیوستگی، همراه با به‌کارگیری مدل محاسبه کردند. سپس با توجه به روش مسیریابی ذرات^۹ و اعمال توازن نیروی متقابل روی ذرات، مسیر حرکت ذرات جامد درون سیکلون را دنبال کردند. همچنین با تعریف بازدهی جداسازی، بر اساس نسبت خروجی ذرات ته‌ریز به خروجی ذرات سرریز در سیال، بازدهی را محاسبه کردند. آنها در نهایت برای ارزیابی کار خود نتایج مدل را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند که تطابق مطلوب و نتایجی راضی‌کننده داشت.

در ۲۰۰۶ راجامانی^{۱۰} و دلگادیلو^{۱۱} [۱۲] با هدف بررسی تأثیر شکل و هندسه‌ی هیدروسیکلون بر بازدهی جداسازی، از نرم‌افزار Fluent-6.0 استفاده کردند تا با استفاده از معادلات حاکم در هیدروسیکلون، متغیرهای جریان را طی فرآیند اندازه‌گیری کنند. آنها در این مدل‌سازی جریان آشفتگی را مدنظر قرار داده و با تغییر هندسه‌ی ساختار هیدروسیکلون، کارایی شش نوع متفاوت از سیکلون را مطالعه کردند.

در سال ۲۰۱۴ جوی^{۱۲} و همکاران [۱۳] به صورت هدفمند با انجام

۱ خواص فیزیکی مواد مورد استفاده در شبیه‌سازی	
اطلاعات	مواد تشکیل دهنده
۹۹۸	چگالی سیال مایع (kg/m^3)
۲۷۰۰	چگالی ذرات جامد (kg/m^3)
۰/۰۰۱	گرانروی سیال (pa.s)
۵-۴۰۰	اندازه‌ی ذرات مورد تحلیل (μm)

۲ شرایط مرزی استفاده شده در شبیه‌سازی هیدروسیکلون		
مقدار	پارامتر	مرزهای تعریف شده
۰	سرعت	دیواره‌ی هیدروسیکلون
m/s ۱/۲۵	سرعت	خوراک ورودی
KPa.	فشار	سرریز
KPa.	فشار	ته‌ریز

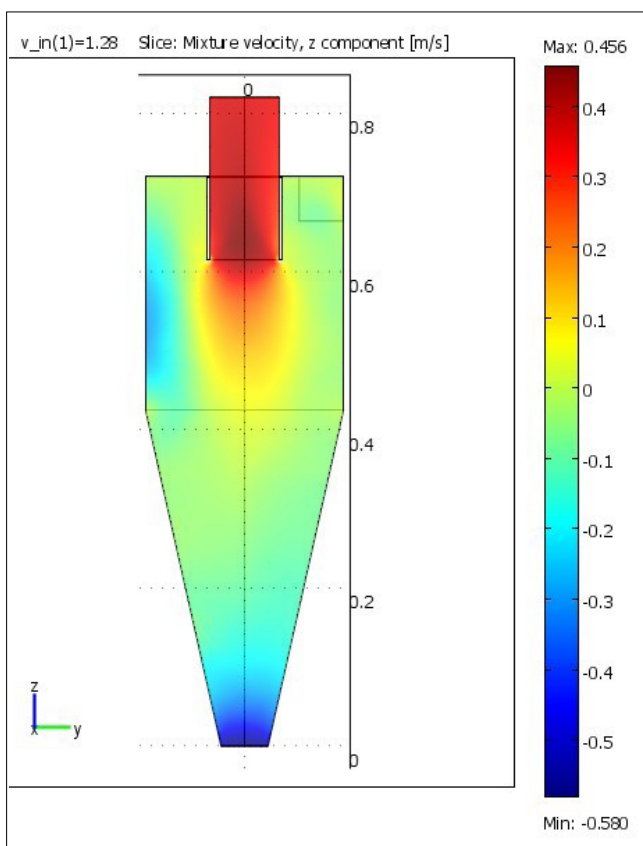


۲ | فلوجارت روند کلی در شبیه‌سازی هیدروسیکلون با نرم‌افزار COMSOL Multiphysics

است (از سرریز تا ته‌ریز). بنابراین ذرات سرگردان در نزدیکی دیواره‌ی هیدروسیکلون به صورت حرکتی منظومی شکل به سمت پایین کشیده می‌شوند. همچنین افت فشار در مرکز هیدروسیکلون به گونه‌ای کاهش می‌یابد که ذرات نزدیک به محوطه‌ی CS این توانایی را داشته باشند که به صورت عمودی با حرکت چرخشی به سمت بالا حرکت کرده و از سرریز خارج شوند.

۲-۲- سرعت محوری

با مشاهده‌ی شکل ۴- می‌توان یکی از ویژگی‌های مهم حرکت محوری سیال درون سیکلون را یافت. در این شکل مشخص است که در ناحیه‌ی نزدیک به بدنه‌ی سیکلون سرعت محوری منفی است. یعنی جهت جریان رو به پایین است. این در حالی است که سرعت حرکت رو به بالا در مرکز سیکلون، مقدار مثبتی است. مکان اتصال این دو سرعت مخالف هم، مکانی است که سرعت محوری صفر دارد و به LZVV مشهور است. از شکل ۴- می‌توان LZVV را به صورت ظاهری تخمین زد. این نکته قابل‌بازبینی است که ذراتی که مسیرشان در ناحیه‌ی LZVV است را می‌توان به صورت تخمینی به عنوان ذراتی با حد قطر جدایش شناخت. پس



شکل ۴ | Error! No text of specified style in document: توزیع سرعت محوری با نمای کانتوری از سرعت در سطح مقطعه ای عمودی

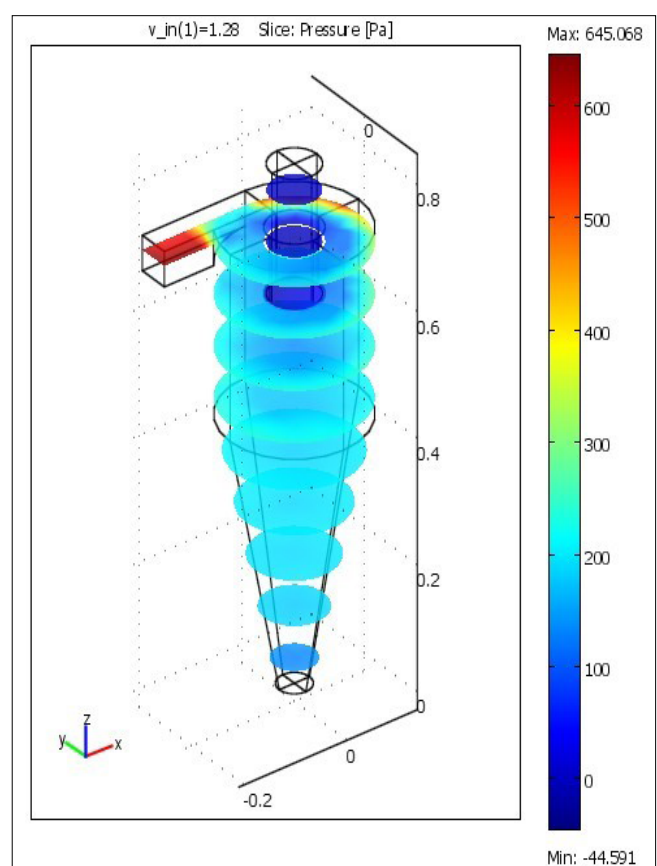
داده شده است. اطلاعات مربوط به مش‌بندی و هندسه نیز در جدول ۳- ارائه شده است. پس از وارد کردن اطلاعات انتخاب روش حل مناسب، شبیه‌سازی انجام شد که در ادامه، نتایج ارائه و در خصوص آنها بحث می‌شود.

۲- بحث و نتایج

۲-۱- فشار استاتیکی

اگرچه نرم‌افزار COMSOL در شبیه‌سازی هیدروسیکلون محدودیت‌هایی دارد اما نتایج حاصل از توزیع فشار استاتیکی، به صورت غیرمستقیم مدارکی دال بر به‌وجود آمدن یک فضای مرکزی CS درون هیدروسیکلون ارائه می‌دهد. در شکل ۳- مشخص است که کمترین یا حتی مقداری منفی از فشار استاتیکی در منطقه‌ای در مرکز محور سیکلون محیط شده‌اند که نشانی از وجود یک فضای سیلندری شکل CS است.

با توجه به این شکل مشخص است که توزیع فشار استاتیکی در هر ارتفاع از ستون محور، در نزدیکی دیواره بیشترین مقدار خود را دارد. این در حالی است که فشار به سمت مرکز در حال کاهش است. همچنین بیشترین فشار استاتیکی از بالا به پایین در حال کاهش



شکل ۳ | توزیع فشار درون هیدروسیکلون در صفحه xy در ارتفاعات متفاوت از محور z

سرعت محوری بیشتر، جهت انتقال به محفظه‌ی CS (که در مرکز هیدروسیکلون واقع است) مهیا می‌گردد. در نهایت مجموعه‌ی اندازه‌ی ذرات قابل جداسازی کاسته می‌شود؛ به معنای دیگر قطر حد جدایش کاهش یابد.

۲-۳- سرعت مماسی

شکل ۵- نمایی کانتره‌ای از توزیع سرعت مماسی در سطح مقطع عمودی (عمود بر صفحه‌ی XY) را نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شعاع از مرکز محور، سرعت مماسی مطابق با نیروی گریز از مرکز اعمال شده بر سیال افزایش می‌یابد. با این وجود با در نظر گرفتن نیروی اصطکاک دیواره بر سیال، حداکثر سرعت مماسی در فاصله‌ای بین مرکز هیدروسیکلون و دیواره‌ی سیکلون واقع شده است.

۲-۴- سرعت لغزش ذرات

تا اینجا مشخص شده که پس از ورود سیال به داخل سیکلون بر اثر حرکت چرخشی سیال، نیروی گریز از مرکزی بر ذرات اعمال می‌شود که باعث حرکت آنها در جهت بدنه‌ی سیکلون می‌گردد. شکل-۶ مقدار تفاوت سرعت ذرات به سیال (سرعت لغزش ذرات) را با بردارهای جهت‌دار در سطح مقاطع متفاوت نشان می‌دهد. بردارهای مشخص شده در شکل همواره در هر سطح مقطعی به سمت بیرون هستند. زیرا نیروی گریز از مرکز با افزایش شعاع به طرف بدنه‌ی سیکلون افزایش می‌یابد. همان‌طور که اشاره شد نیروی گریز از مرکز و به تبع آن سرعت لغزشی ذرات از بالا به پایین به حداقل می‌رسد. شکل-۶-ب این موضوع را نشان می‌دهد.

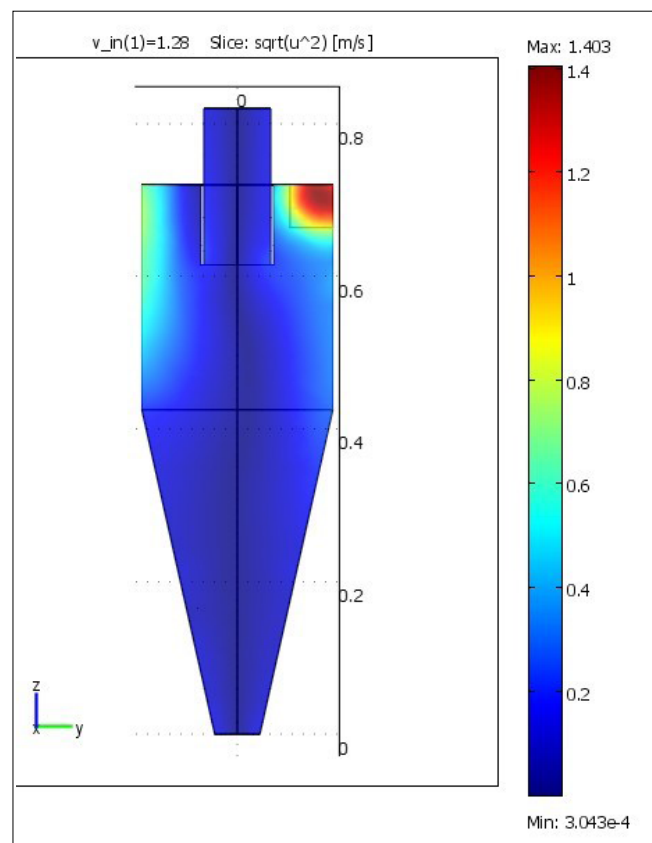
نتیجه‌گیری

در هر ارتفاع از ستون محور، فشار استاتیکی در نزدیکی دیواره بیشترین مقدار خود را دارد. این در حالی است که با حرکت به سمت مرکز فشار در حال کاهش است.

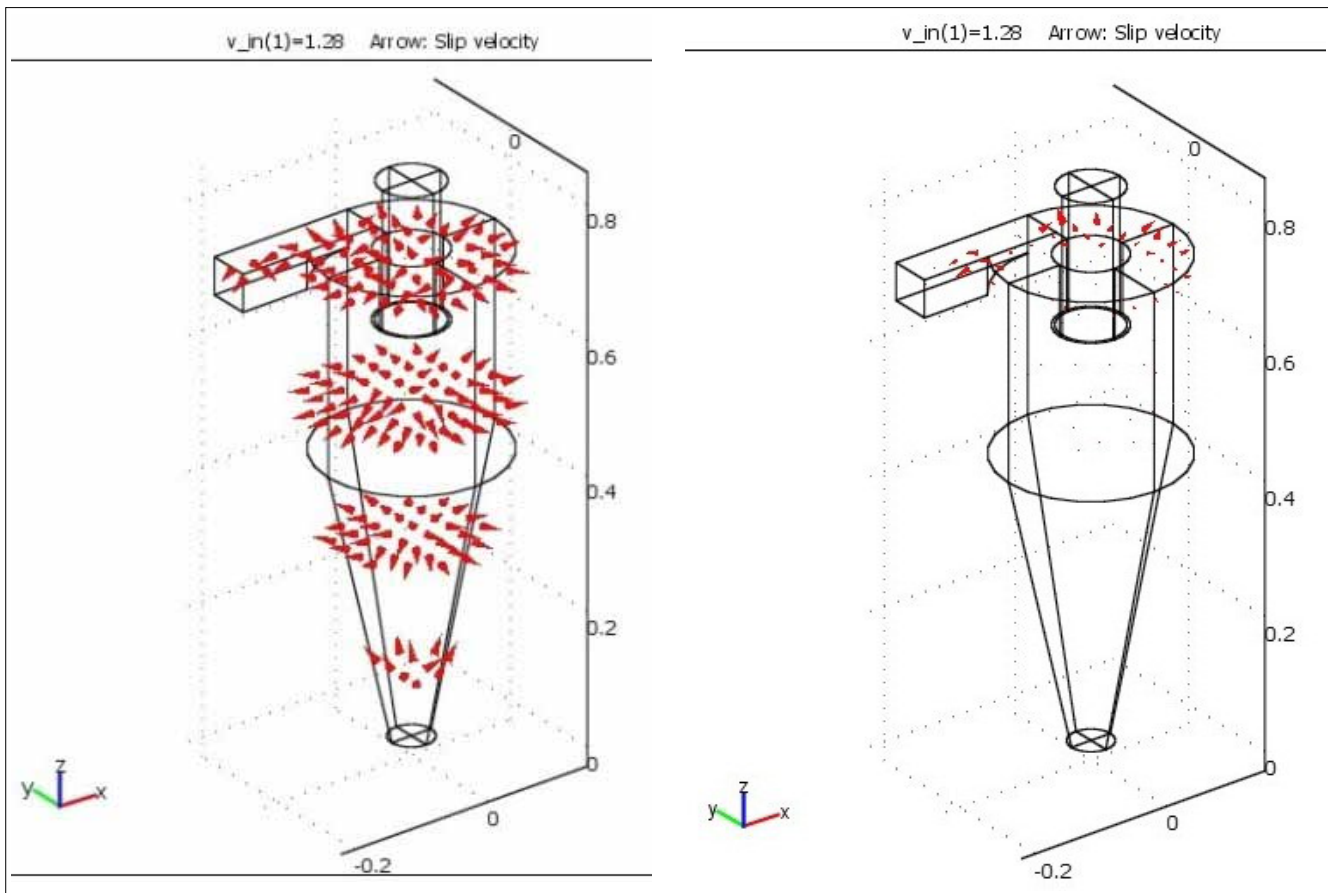
- با استفاده از CFD مشخص شد که فضایی فرضی به نام CS در مرکز هیدروسیکلون و در زیر سرریز آن وجود دارد.
- بردارهای سرعت لغزش ذرات نسبت به سیال همواره در هر سطح مقطعی به سمت بیرون هستند. پس در هر ارتفاعی نیروی خروجی بر ذرات عمل می‌شود.
- جریان محوری سیال، از دیواره‌ی هیدروسیکلون تا CS به طرف ته‌ریز (پایین) و در داخل CS به طرف سرریز (بالا) جاری است.
- حرکت مماسی در هیدروسیکلون، پیوسته از بالا تا پایین آن در جریان است و شدت آن از بالا به پایین در حال کاهش است.
- محیط فضای CS لایه‌ی مرزی است که روند جریان در داخل هیدروسیکلون را به دو قسمت تقسیم می‌کند. ■

خط مسیر LZVV در هیدروسیکلون می‌تواند بیانی دیگر برای تعریف عملکرد هیدروسیکلون در جداسازی ذرات جامد باشد. بدین دلیل که مقدار سرعت محوری نقش به‌سزایی در تعیین زمان ماند دارد. افزایش سرعت عمودی، زمان ماند را کاهش می‌دهد یا به عبارت دیگر زمان کمتری برای ذرات با قطر درشت‌تر توأم با

مقدار	متغیرهای مش‌بندی
۲۶۱۰۶	درجه‌ی آزادی
۷۵۳	تعداد نقاط مش بندی
۲۹۴۲	تعداد المان‌ها
۲۹۴۲	چهار ضلعی
۰	منشوری
۰	مکعبی
۹۴۶	تعداد المان‌های مرزی
۹۴۶	مثلی
۰	چهار پهلو
۲۵۱	تعداد لبه‌های المان
۳۸	تعداد المان‌های گردابی
۰/۲۸۸۵	حداقل المان‌های کیفی
۰/۰۰۰۳۰۶	حجم نسبی المان



شکل ۵- توزیع کانتره‌ای از سرعت مماسی در روی صفحه‌ی yz



شکل ۶ | توزیع سرعت لغزش ذرات در سطح متفاوت الف) شکل توزیع سرعت لغزش ب) شکل نرمال از توزیع سرعت لغزش

پانویس‌ها

1. Hydro cyclone
2. Centrifugal Sedimentation
3. Overflow pipe or Vortex finder
4. Spigot or Under flow orifice
5. Finite Difference
6. Grid
7. He
8. Yang
9. Particle Trajectory
10. Rajamani
11. Delgadillo
12. Gui

منابع

- [1] Tongsiri, S., The Simulation of Hydrocyclone Network for Separating Yeast and Calcium in Ethanol Production. Chemical and Process Engineering, 2007.
- [2] Bradley, D., The Hydrocyclone Pergamon Press, 1965.
- [3] Svarovsky, L., Hydrocyclones Rinehart & Winston, 1984.
- [4] Rushton, A., A.S. Ward, and R.G. Holdich, Solid-liquid Filtration and Separation Technology. 2nd ed. Weinheim, Germany: Wiley- VCH, 2000.
- [5] Hoffmann, A.C. and L.E. Stein, Gas cyclones and swirl tubes: Principle, Design and Operation. 2 ed Springer, 2008.
- [6] Smith, V.C., Particle Size Estimation of Hydrocyclone Overflow. Chemical Engineering, Cape Town, 2000.
- [7] Dahlstrom, D.A. "Fundamentals and Applications of the Liquid Cyclone". Mineral Engineering Techniques, 1951.
- [8] Concha, F., et al. "Numerical simulation of the flow pattern in a hydrocyclone". Innovation in Physical Separation Technology. 1998.
- [9] Slack, M.D., et al., "Advances in cyclone modelling using unstructured grids". Chemical Engineering Research and Design, 2000. 78, 8: pp. 1098-1104.
- [10] He, P., M. Salcudean, and I.S. Gartshore, "A numerical simulation of hydrocyclones". Chemical Engineering Research and Design, 1999. 77, 5: pp. 429441-.
- [11] Nowakowski, A.F., et al., "Application of CFD to modelling of the flow in hydrocyclones. Is this a realizable option or still a research challenge?". Minerals Engineering, 2004. 17 pp. 661669-.
- [12] Delgadillo, J.A. and R.K. Rajamani, "Exploration of hydrocyclone designs using computational fluid dynamics". J. Miner. Process, 2007. 84 pp. 252261-
- [13] Slack, M.D., et al., "Advances in cyclone modelling using unstructured grids". Chemical Engineering Research and Design, 2000. 78, 8: pp. 1098-1104.