ISME2016-55279

# شبیه­سازی و بررسی نحوه جدایش ذرات در سیکلون­های واسطه سنگین

# امید پیله ور1، محمد مقیمان2،علیرضا عرب3

# 1دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد pilevar.omid@gmail.com

# 2استاد گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهدmmoghiman@yahoo.com

3 کارشناسی ارشد مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهدalireza.arab@hotmail.com

**چکیده**

سیکلون­های واسطه سنگین (شیب­دار)[[1]](#footnote-1) نوع پیشرفته­ای از سیکلون­ها هستند که توانایی جداسازی دو فاز از ذرات جامد مختلف را از یکدیگر دارند. در این نوع سیکلون­ها برای قرارگیری چگالی سیال واسطه ما بین دو فاز جامد از ذرات مگنت استفاده می­شود که این ذرات به صورت ناهمگن و به نسبت قطر و سرعت در سیال تمرکز پیدا می­کنند. بنابراین ویسکوزیته و چگالی سیال واسطه را در سیکلون متغییر می­کنند که با وجود جریان آشفته­ی چرخشی و هسته هوا در مرکز سیکلون مدل­سازی این چند فاز در کنار هم دشوار است. در این مقاله توسط نرم­افزار فلوئنت و با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی معادلات ناویراستوکس و معادلات توربولانسی تنش­های رینولدز از روش حجم محدود حل شده­اند. سیال چند فازی به وسیله روش­های حجم سیال و مخلوط و فاز گسسته مدل شده است. در این راستا برای سیال واسطه یک کد یودی اف نوشته شده که بوسیله آن توزیع ذرات مگنت و چگالی سیال واسطه در هر مکان محاسبه می شود. مقایسه عملکرد سیکلون شبیه سازی شده با نتایج تجربی تطابق مناسبی را نشان می­دهد. همچنین تاثیر چگالی و قطر ذرات برجدا شدن آن­ها مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شده در ذرات با قطر کمتر از 0.1 میلی­متر چگالی تاثیر کمی در جدایش ذرات می­گذارد و هرچه ذرات بزرگتر شوند چگالی عامل تعیین کننده­تری است. همچنین نتایج نشان داده ذراتی که چگالی نزدیک به محیط واسطه دارند به شرایط حرکت سیال در سیکلون وابستگی بیشتری دارند.

**واژه های کلیدی**

سیکلون، سیکلون شیب دار، سیکلون واسطه سنگین

**مقدمه**

سیکلون‌ها در سال 1950 برای جداسازی فاز جامد از سیال ساخته شدند که کاربرد گسترده‌ای در معادن و صنایع شیمیایی بدلیل کاربری آسان، گنجایش بالا و هزینه‌ی کم پیدا کردند]1[. سیکلون وسیله‌ای است که از یک استوانه تشکیل شده که به یک مخروط متصل شده است و معمولاً با داشتن یک ورودی در بالای استوانه به شکل مماسی می تواند با استفاده از نیروی فشار سیال جریان چرخشی بوجود آورد که با استفاده از این نیروی سانتریفیوژ ذرات سنگین تر به سمت دیواره ی سیکلون رانده می شوند و به سمت پایین سیکلون ته نشین می شوند و در خروجی پایین سیکلون به دام می‌افتند، اما فاز سبکتر با استفاده از جریان برگشتی که در وسط سیکلون بوجود می‌آید به سمت دهانه‌ی بالای سیکلون رفته و از آن خارج می‌شود. سیکلون‌ها را می توان به دو دسته‌ی کلی سیکلون‌های قائم و شیب‌دار تقسیم کرد. سیکلون های قائم عموماً برای جداسازی فاز جامد از سیال کاربرد دارند که در جداسازی شن و ماسه از آب مصرفی شهرها و گرد و غبار از هوای خروجی کارخانه‌ها مانند کارخانه سیمان استفاده می­شوند. اما هنگامی که بخواهند ذرات مختلف فاز جامد را از هم جدا کنند یا عیار برخی از این ذرات را افزایش دهند از سیکلون های شیب دار که عموماً به سیکلون های واسطه سنگین معروف‌اند، استفاده می‌کنند. این سیکلون‌ها برای جداسازی زغال سنگ از سنگ ریزه‌های همراه آن و یا در فرآیندهای شیمیایی برای افزایش عیار ماده‌ی مورد نظر در مقابل ناخالصی‌های همراه آن استفاده می شوند. این سیکلون‌ها را واسطه سنگین نامند زیرا برای جداسازی ذرات جامد از هم باید چگالی محیط سیال واسطه که در سیکلون جاری است ما بین چگالی ذره‌ی مورد نظر با ذرات ناخالص باشد، از این رو باید سیالی سنگین‌تر از آب و هوا در این کاربردها استفاده شود و همچنین این سیکلون‌ها را مایل می‌سازند تا نیروی وزن در خروج ذرات سبکتر (که از بالای سیکلون خارج می شوند) تأثیر کمتری داشته باشد. هرچند که با زاویه‌دار کردن سیکلون رژیم جریان در داخل آن کمی تغییر می کند که می‌تواند با توجه به زاویه سیکلون، قطر و چگالی ذرات عمل جداسازی را مختل و یا تقویت کند. لذا برای جداسازی بهینه باید زاویه‌ی بهینه سیکلون تعیین شود]2[. با این که اساس کار و طراحی سیکلون ساده است، اما بدلیل وجود جریان آشفته چرخشی و حضور ذرات با قطر و چگالی مختلف آن را پیچیده می کند. از این رو برای شبیه­سازی باید مدل توربولانی مناسب برای جریان آشفته و مدلی مناسب برای جریان چند فازی انتخاب شود. مقالات زیادی برای مدل سازی جداکنندگان سیکلونی وجود دارد که تعداد زیادی از آن‌ها از نتایج کار هسیه (1986) برای تأیید اعتبار استفاده کردند. هسیه در این کار، یک سیکلون با محیط واسطه ی تک فازی را با قطر 75 میلی متر مطالعه کرد که توانست پروفیل سرعت، آشفتگی و سرعت نسبی ذرات نسبت به یکدیگر را پیش‌بینی کند]1[. اکثر مقالات حال حاضر بیان می‌کنند که جریان داخل سیکلون دارای پیچیدگی‌ها و نامتقارنی‌های زیادی است که مدل k-ɛ از عهده ی آن بر نمی‌آید. لذا حداقل باید از مدل تنش‌های رینولدز برای پیش‌بینی مناسب سرعت استفاده کرد]3,4[. سواسنابار در تز خود مدل k-ɛ را برای سیکلون هسیه کالیبره کرد]5[. دینامیک سیالات محاسباتی می تواند خصوصیات جریان و مسیر عبوری ذرات را مانند افت فشار بخوبی پیش‌بینی کند، ولی مدل k-ɛ استاندارد و RNG برای جریان‌های با چرخش زیاد بهینه‌سازی نشده‌اند]6[. هرچند که برای کاهش هزینه محاسبات، مدل k-ɛ RNG می تواند با 12% خطا در مقایسه با داده‌های تجربی استفاده شود]7[.

هدف این مقاله شبیه­سازی سیکلون­های شیب­دار با جریان گاز-مایع-جامد با محاسبه دقیق توزیع ذرات مگنت و اثرش بر چگالی مکانی سیال واسطه است، که برای این مهم از مدل تنش­های رینولدز[[2]](#footnote-2) برای شبیه سازی جریان و مدل­های حجم سیال[[3]](#footnote-3) و مدل مخلوط[[4]](#footnote-4) برای شبیه سازی فازهای مختلف سیال استفاده خواهد شد. در نهایت اثر چگالی و قطر ذرات در جدا شدن آن­ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

**تئوری سیکلون**

سیکلون‌ها اساساً برای جداسازی ذرات از فاز سیال استفاده می‌شوند که مکانیک سیالت و معادلات انتقال می‌توانند رفتار سیکلون را تشریح کنند. در صورتی که یک ذره مجزا را در سیکلون در نظر بگیریم، با فرض کروی بودن آن و وجود شرایط پایا و صرف نظر کردن از گردابه‌ها و اغتشاشات آن را بررسی کنیم، آنگاه ذره در اثر حرکت در سیال و چرخیدن حول محور سیکلون، تحت تاثیر نیروهای درگ، گریز از مرکز و اختلاف فشار لایه‌های سیال (نیروی شناوری) قرار می‌گیرد.

طبق قانون استوکس نیروی درگ برابر است با:

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |

نیروی گریز از مرکز برابر است با:

|  |  |
| --- | --- |
| (2) |  |

نیروی شناوری یا همان نیروی اختلاف فشار لایه­های سیال که در راستای شعاع افزایش می­یابد، در جهت عکس نیروی گریز از مرکز ذره است. به عبارت دیگر این نیرو بر حجمی از سیال عمل می‌کند که وجود ندارد و ذره آن حجم را اشغال کرده است.

|  |  |
| --- | --- |
| (3) |  |

باتوجه به قانون دوم نیوتون در راستای شعاعی خواهیم داشت:

|  |  |
| --- | --- |
| (4) |  |

برای ساده سازی اگر فرض کنیم که ذره به سرعت نهایی خود رسیده باشد، آنگاه شتاب آن صفر می‌باشد. لذا معدله (4) تبدیل می‌شود به:

|  |  |
| --- | --- |
| (5) |  |

حال با جایگزین کردن معادلات (1)، (2) و (3) در (5) سرعت شعاعی ذره را بدست می‌آوریم:

|  |  |
| --- | --- |
| (6) |  |

*از رابطه (6) به خوبی درک می شود که اگر چگالی ذره بیش از سیال باشد، سرعت ذره مثبت است و در جهت شعاع به سمت دیواره حرکت می کند. و اگر چگالی ذره کمتر از سیال باشد، ذره به سمت مرکز می‌رود که این عمل باعث جدایش ذرات سبک‌تر و سنگین‌تر از سیال می‌شود.*

*اما مشخص است که ساده ‌سازی‌های زیادی صورت گرفته و برای پیش‌بینی مناسب رفتار سیکلون باید از روش‌های دقیق استفاده کرد که با توجه به شرایط مسئله باید سراغ حل‌های دینامیک سیالات محاسباتی رفت.*

**معادلات حاکم**

*معادلاتی که پردازش حل کامپیوتری بر اساس آن‌ها شکل گرفته است، معادلات بقای جرم، قانون دوم نیوتون و بقای انرژی است. فرم کلی معادله بقای جرم و معادله ممنتوم که در دینامیک سیالات استفاده می‌شود، موسوم به معادلات ناویر-استوکس است. در سیکلون ها نیز معادلات بقای جرم و ناویر استوکس اصلی ترین شکل معادلات اند.*

|  |  |
| --- | --- |
| *(7)* |  |

|  |  |
| --- | --- |
| *(8)* |  |

*چون جریان داخل سیکلون متلاطم است، از این رو برای شبیه سازی این جریان از مدل تنش‌های رینولدز استفاده می‌شود. در این مدل هر متغیر به دو قسمت متوسط و نوسانی تقسیم می‌شود. معادله ممنتوم به این صورت متوسط­گیری شده است:*

|  |  |
| --- | --- |
| *(9)* |  |

*که ترم در آن موسوم به تنش رینولدز است و احتیاج به مدل سازی دارد. برای هر تنش رینولدز یک معادله انتقال حل می‌شود.*

***معادلات ذرات جامد***

*برای پیش‌بینی مسیر حرکت فاز جامد از سه روش مدل حجم سیال[[5]](#footnote-5) مخلوط[[6]](#footnote-6) و مدل فاز گسسته[[7]](#footnote-7) استفاده می‌شود.* مدل حجم سیال (VOF) برای مدل سازی دو یا چند سیال مختلف که باهم مخلوط نمی­شوند و در سطح مشترکی باهم در تماسند استفاده می­شود. در این مدل یک دستگاه معادلات ممنتوم بین فازها تقسیم می­شود و چون فازها در هم فرو نمی­روند تنها در مرز مشترک سیال، در هر سلول امکان وجود بیشتر از یک فاز وجود دارد. به همین دلیل ضریبی در معادلات بقای جرم به نام حجم کسری ) qα ( فاز سیال وجود دارد که در مرز سیال ها مقداری بین صفر و یک اختیار میکند.

|  |  |
| --- | --- |
| *(11)* |  |

|  |  |
| --- | --- |
| *(12)* |  |

*مدل مخلوط برای دو یا چند فاز مخلوط شونده استفاده می‌شود. این مدل برهم کنش بین ذرات و سیال را به خوبی در نظر می گیرد و معادله ممنتوم مخلوط را حل می کند:*

|  |  |
| --- | --- |
| *(13)* |  |

*در آن بردار سرعت متوسط ذره و چگالی مخلوط است.*

*در روش مدل فاز گسسته مسیر حرکت ذره سوار بر سیال نمایش داده می‌شود که بر هم کنش میان ذرات با هم را در نظر نمی‌گیرد و در رژیم جریان سیال تاثیر نمی‌گذارد. لذا دقت پایین‌تری دارد و برای مواقعی استفاده می شود که درصد حجمی ذرات شناور در سیال حداکثر 12% باشد. معادله آن بدین صورت است:*

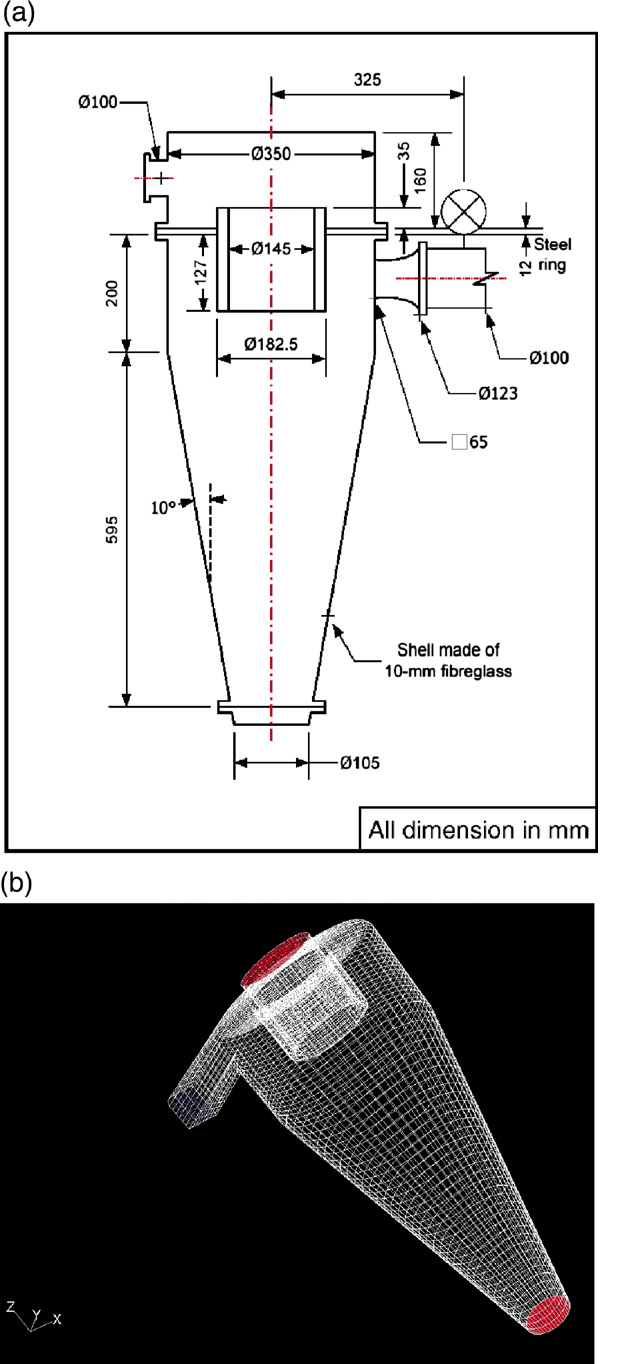
|  |  |
| --- | --- |
| *(14)* |  |

*در آن نیروی درگ وارد بر ذره، نمایانگر نیروی وزن و نیروی ناشی از اختلاف فشار لایه های سیال است. اهمیت این مدل در این است که با مشخص شدن رژیم سیال، مسیر حرکت ذرات مشخص می‌شود و زمان و محاسبات کمتری احتیاج دارد.*

***نتایج***

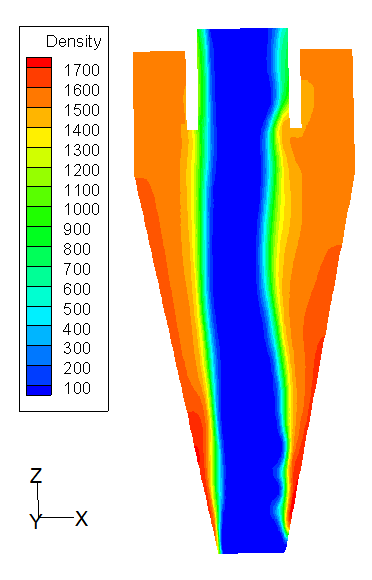
*برای شبیه سازی از نرم افزار فلوئنت و شبکه سه بعدی تولید شده در گمبیت استفاده شده است. که برای حل جریان داخل سیکلون از معادلات پیوستگی، ممنتوم و معادلات اغتشاشات تنش‌های رینولدز استفاده شده است. در اینجا برای ورودی سیکلون شرط مرزی سرعت ورودی و برای خروجی‌های سیکلون شرط فشار خروجی انتخاب شده است. برای مدل‌سازی ذرات داخل سیکلون، ذراتی که در ابعاد میکرومتر برای افزایش چگالی سیال واسطه استفاده شده­اند از مدل مخلوط، و ذراتی که در ابعاد سانتی متر بودند و باید از هم جدا می­شدند، (جداسازی زغال از سنگ ریزه‌های همراه آن) از مدل فاز گسسته استفاده شده است.*

*کانتور چگالی بدست امده با کار تجربی اقای سوبرمانیان*]*8*[ *تایید اعتبار می­شود. که این توزیع چگالی به علت تزریق ذرات مگنتیت با چگالی نسبی 5 به اب است که در ابعاد میکرون هستند. این ذرات در چهار رنج قطری به اب وارد میشوند که چون در ابعاد میکرون هستند مانند نانو ذرات در اب همگن پخش نمی­شوند و در در میدان حل تمرکز پیدا میکنند و موجب تغییر ویسکوزیته و چگالی ان محل از سیال واسطه میشوند. این ذرات 10درصد وارد اب شده اند که چگالی میانگین سیال واسطه را به چگالی نسبی 1.4 رسانده­اند. ایشی و میشیما*]9[ *رابطه بین چگالی و ویسکوزیته سیال را به صورت تجربی برای محیط واسطه بدست اورده اند، که برای این منظور کد* UDF *نوشته شد تا به وسیله آن چگالی محیط واسطه شبیه سازی شود.*

**

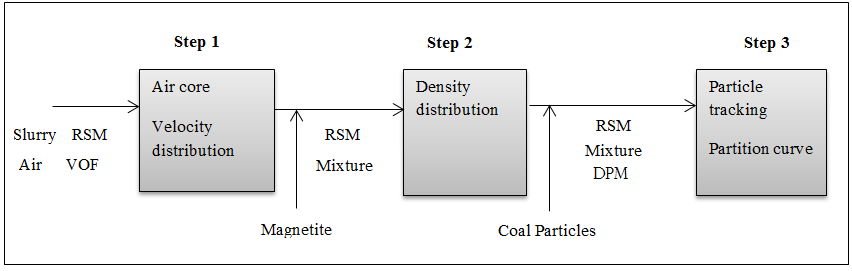
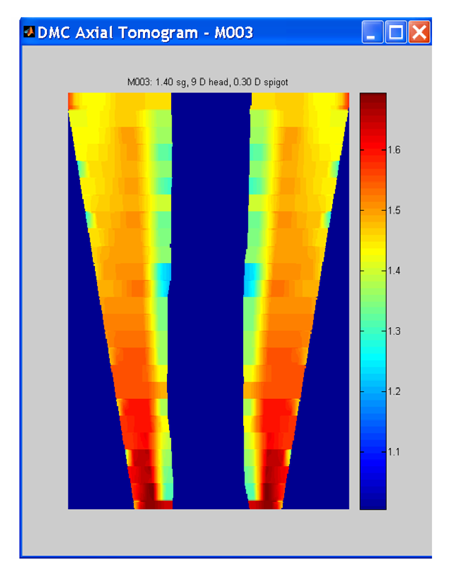
شکل 1: a) ابعاد سیکلون b) مش تولید شده در گمبیت

جدول 1: پارامترها و شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه سازی

****

شکل3: کانتور چگالی محیط واسطه

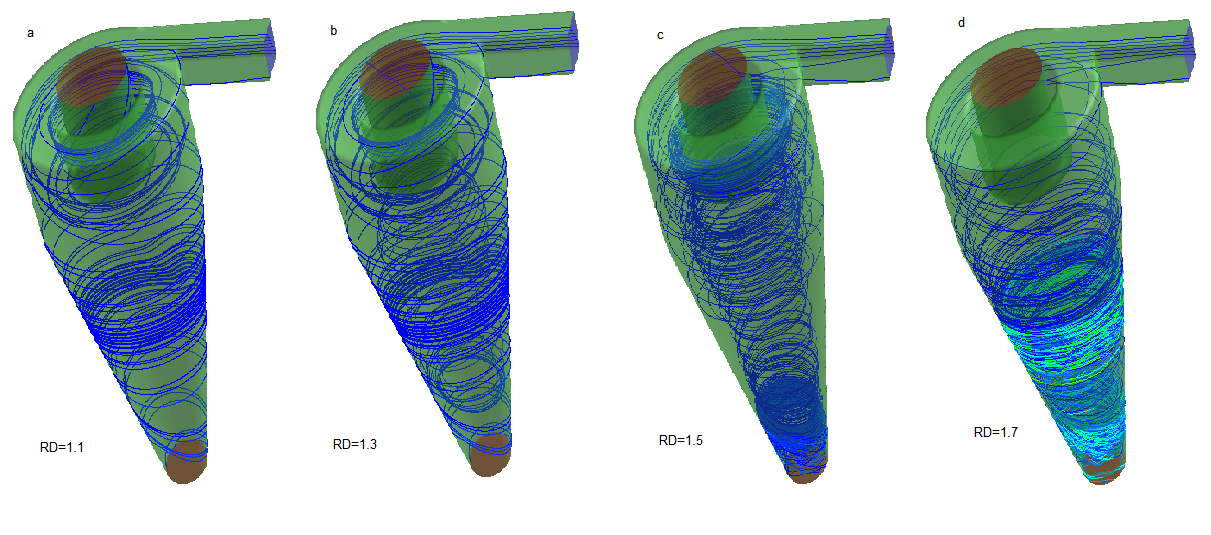
|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| فاز | پارامتر | نماد | واحد | مقدار |
| جامد(زغال) | توزیع چگالی  رنج قطر  سرعت ورود | 𝜌  d  \_ | kg/m3  mm  m/s | 1100- 1300-1500 - 1700  10- 1- 0.1  2.485 |
| هوا | چگالی  ویسکوزیته | 𝜌  µ | kg/m3  kg/m/s | 1.225  10-5\*1.8 |
| آب | چگالی  ویسکوزیته  (شرط سرعت ثابت) سرعت ورود | 𝜌  µ  \_ | kg/m3  kg/m/s  m/s | 998.2  0.001  2.485 |
| مگنتیت | چگالی  قطر(درصدحجمی)  ویسکوزیته  سرعت ورود | 𝜌  \_  µ  \_ | kg/m3  mµ  kg/m/s  m/s | 4945  (6%)2- (10%)7- (19%)15- (38%)32- (17%)54- (10%)82  ایشی و میشیم*ا*]9[  2.485 |
| چگالی­ورودی­مخلوط  (شرط فشار ثابت) فشاردرخروجی بالا  (شرط فشار ثابت) فشاردرخروجی پایین | | \_  \_  \_ | kg/m3  Pa  Pa | 1467  101325  101325 |

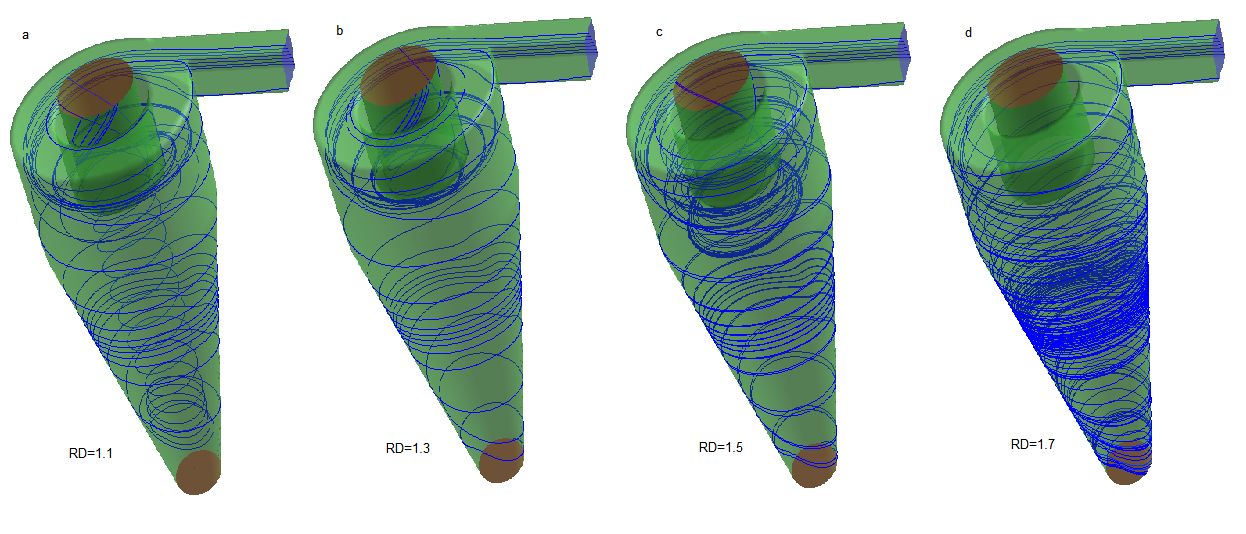
****

شکل 2: گراف نحوه شبیه سازی و استفاده از مدل­ها

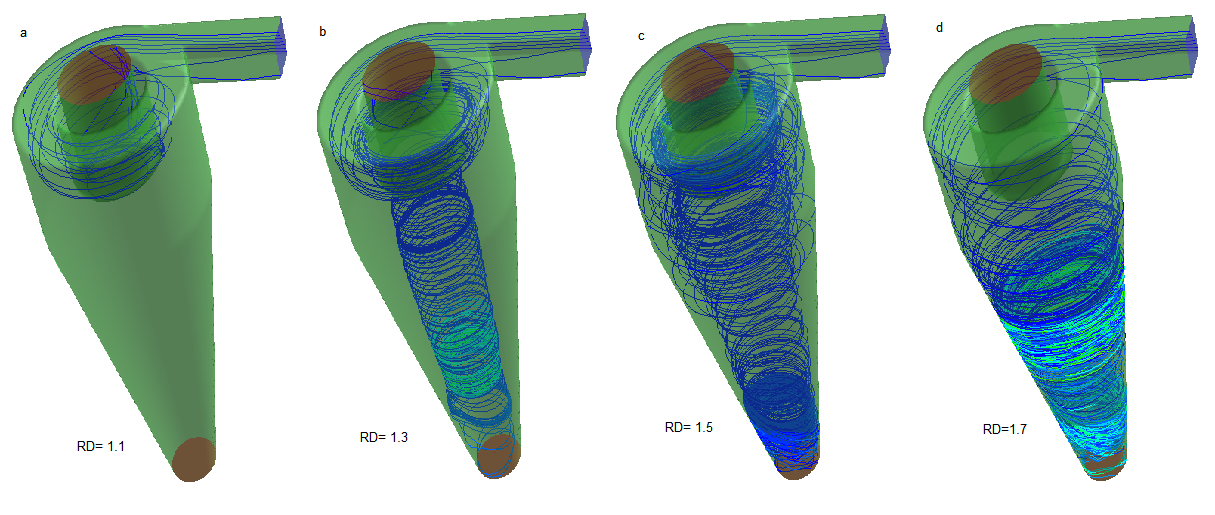
شکل4: کانتور چگالی بدست امده از پرتو نگاری اشعه گاما سوبرمانیان ]8[

شکل5: تزریق ذرات با قطر 0.1 میلی متر در چهار چگالی مختلف a) 8 ذره با چگالی نسبی1.1 b) 8 ذره با چگالی نسبی 1.3 c) 8 ذره با چگای نسبی 1.5 d) 8 ذره با چگالی نسبی 1.7

****

****

شکل6: تزریق ذرات با قطر 1 میلی متر در چهار چگالی مختلف a) 8 ذره با چگالی نسبی1.1 b) 8 ذره با چگالی نسبی 1.3 c) 8 ذره با چگای نسبی 1.5 d) 8 ذره با چگالی نسبی 1.7

****

شکل7: تزریق ذرات با قطر10 میلی متر در چهار چگالی مختلف a) 8 ذره با چگالی نسبی1.1 b) 8 ذره با چگالی نسبی 1.3 c) 8 ذره با چگای نسبی 1.5 d) 8 ذره با چگالی نسبی 1.7

شکل 5 مسیر حرکت 8 ذره با قطر 0.1 میلی­متر است، که این ذرات با چهار چگالی نسبی مختلف در چهار سیکلون وارد شده­اند. مشاهده می­شود علیرقم تغییر چگالی در هر حالت، پنج ذره از خروجی بالا و سه ذره از خروجی پایین خارج میشود. که این بدان معنی است که در ذرات با ابعاد کوچکتر از 0.1 میلی متر چگالی ذرات نقش مهمی در جدایش ایفا نمی­کنند. اما چگالی ذرات در مسیر حرکت و زمان ماند آن­ها تاثیر گذار بوده و با افزایش چگالی نسبی به 1.7 ذرات تعداد دور بیشتری برای خروج از پایین طی کرده اند.

شکل 6 نیز مسیر حرکت 8 ذره اما با قطر 1 میلی­متر است، که این ذرات با چهار چگالی نسبی مختلف در چهار سیکلون وارد شده­اند. مشاهده می­شود که در چگالی های نسبی کمتر از 1.4 (چگالی سیال واسطه)، هفت ذره از خروجی بالا و یک ذره از خروجی پایین خارج میگردد و در چگالی نسبی 1.5 پنج ذره از بالا و در چگالی نسبی 1.7 هیچ ذره ای از بالا خارج نمی­شود. لذا سنگین­تر و سبک­تر بودن ذرات در این 1میلی­متر تعیین کننده است. و هرچه چگالی ذرات بیشتر می­شود تعداد ذراتی که به دیواره سیکلون نزدیک می­شود بیشتر است.

شکل 7 نیز مسیر حرکت 8 ذره اما با قطر 10 میلی­متر است، که این ذرات با چهار چگالی نسبی مختلف در چهار سیکلون وارد شده­اند. در این شکل نیز مشاهده می­شود ذرات سبک­تر از سیال واسطه کاملا از بالا خارج شده و ذرات سنگین­تر از پایین خارج میشوند. حال آنکه با نزدیک شدن چگالی ذرات به چگالی سیال واسطه در چگالی نسبی 1.3 دیده میشود ذره­ای به دام می­افتد و به سمت پایین سیکلون کشیده میشود. این موضوع اهمیت موقعیت ذرات با چگالی نزدیک به سیال را روشن میسازد که باتوجه به موقعیتشان و نحوه حرکت سیال واسطه ممکن است رفتار متفوت نشان دهند. این موضوع در ذرات با چگالی نسبی 1.5 نیز مشهود است. در مجموع شکل­های 5، 6 و 7 دیده می­شود در چگالی نسبی 1.7 ذرات بیشتری به سمت دیواره امده و تعداد دور بیشتری می­زنند.

همان طور در معادله (6) دیده شد، قطر ذرات نقش تعیین کننده­ای

در حرکت ذرات در راستای شعاع ایفا میکند و همچنین نیروهای درگ و اختلاف فشار لایه های سیال با توجه به قطر و چگالی ذرات در جدایش ان ها از یکدیگر سهیم هستند.

**نتيجه‌گيری و جمع‌بندي**

سیکلون ها کاربرد گسترده ای در صنعت و معدن دارند. سیکلون ها بدلیل استفاده از نیروی گریز از مرکز در مقایسه با دیگر روش های ثقلی کاربرد آسان‌تر و هزینه کمتری دارند. در سیکلون های شیب دار به علت وجود فاز مایع، گاز و چندین فاز جامد و متغیر بودن ویسکوزیته و چگالی سیال واسطه در آن­ها و همچنین شرایط توربولانی، کار شبیه سازی دشوار است. اما برای تشخیص مسیر حرکت ذرات و وابسته بودن حرکت آن­ها به مسیر حرکت، سرعت، چگالی، ویسکوزیته و فشار سیال لازم است تا در هر کاربردی برای بهینه سازی و پیشبینی عملکرد سیکلون آن­ها را شبیه سازی کرد. که در این کار رفتار دوازده حالت از ذرات مورد بررسی قرار گرفت و مشخص قطر و چگالی ذرات و شرایط سیال واسطه عوامل تاثیر گذار در عملکرد این سیکلون­ها هستند.

**مراجع**

1. Hsieh K.T. and Rajamani, K., (1986). Phenomenological Model of the Hydrocyclone: Model Development and Verification for Single Phase Flow, International Journal of Mineral Processing. 22: 223-237.
2. عبدالمطلب حاجتی، علی دهقانی، جواد سامعی برزکی. (2010). پرعیارسازی اولیه خوراک مدار فلوتاسیون سرب و روی لکان بوسیله سیکلون واسطه سنگین، نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، صفحات 69 تا 78
3. A. Farzanegan, M. Gholami, M.H. Rahimyan (2013) Multiphase flow and tromp curve simulation of dense medium cyclones using Computational Fluid Dynamics, Minerals Engineering.
4. Slack, M.D., Prasad, R. O., Bakker, A. and Boysan, F. (2000). Advances in Cyclone Modeling Using Unstructured Grids, Chemical Engineering Research and Design. 78: 1098-1104.
5. Suasnabar, D.J. (2000). Dense Medium Cyclone Performance, Enhancements Via Computational Modeling of The Physical Process, Ph.D. Thesis, University of New South Wales.
6. Narasimha, M., Brennan, M.S., Holtham, P.N. and Napier-Munn, T. J. (2006). A Comprehensive CFD Model of Dense Medium Cyclone Performance, Minerals Engineering. 20: 414-426.
7. Griffiths, W.D. and Boysan, F. (1996). Computational Fluid Dynamics (CFD) and Empirical modeling of The Performance of A Number of Cyclone Samplers, Aerosol Science. 27: 281-304.
8. Subramanian, V.J. (2002). Measurement of Medium Segregation in The Dense Medium Cyclone Using Gamma-Ray Tomography, Ph.D. Thesis, JKMRC, University of Queensland.
9. M. Ishii, K. Mishima, Two-fluid model and hydrodynamic constitutive relations, Nuclear Engineering and Design 82 (1984) 107–126.

1. Dense Medium Cyclone (DMC) [↑](#footnote-ref-1)
2. RSM [↑](#footnote-ref-2)
3. Volume Of Fluid (VOF) [↑](#footnote-ref-3)
4. Mixture [↑](#footnote-ref-4)
5. Volume Of Fluid (VOF) [↑](#footnote-ref-5)
6. Mixture Model [↑](#footnote-ref-6)
7. Discrete Phase Model (DPM) [↑](#footnote-ref-7)