به نام خداوند بخشایشگر مهربان

**دانشکده مهندسی شیمی**

عنوان:

# شبیه سازی سیکلون واحد FCC با تکنیک های CFD

اساتید راهنما:

**آقای دکتر سید حسن هاشم آبادی و آقای دکتر منصور شیروانی**

**دانشجو:**

**شاهین تمجید**

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی شیمی

شبیه سازی و کنترل فرایندها

تابستان ۸۷

# تقدیر و تشکر

بدینوسیله مراتب سپاس و تشکر خود را از تلاشهای ارزنده **جناب آقای دکتر هاشم آبادی و جناب آقای دکتر شیروانی** به سبب راهنمایی های بی دریغشان در طول تحصیل در این مقطع و همچنین تهیه و ارائه این پایان نامه اظهار می نمایم.

تقدیم به پدر و مادر عزیز و همسر مهربانم

بهترین و زیباترین هدایای الهی به من

## چکیده

سیکلونهای جداکننده گازی درصنایع نفت، گاز، پتروشیمی و سایر صنایع فرایندی بصورت گسترده ای برای جداسازی غبار از گاز یا جهت بازیابی محصول مورد استفاده قرار می گیرند. طراحی ساده، هزینه ساخت کم، قابلیت استفاده در دامنه وسیعی از شرایط عملیاتی و انعطاف پذیری با توجه به فشار و درجه حرارتهای بالا، سیکلونها را به یکی از گسترده ترین دستگاههای جداسازی ذرات تبدیل نموده است. یکی از موارد مهم استفاده سیکلونها بازیابی کاتالیست در فرایند کراکینگ کاتالیستی سیال(FCC) می باشد که در آن سیکلونها به علت چرخش کاتالیست به صورت پایا و پیوسته در فرایند تحت مقدار بار زیادی از ذرات جامد عمل می نمایند. بازده جمع آوری و افت فشار از مهمترین عوامل در عملکرد سیکلون می باشد و هر دوی این عوامل تحت تاثیر مقدار بار ذرات قرار دارند. سایش کاتالیست نیز در راکتورهای بستر سیال دارای نقشی اساسی در هزینه ها می باشد. در واقع این پدیده باعث از دست دادن ذرات کاتالیست گران قیمت می گردد که توسط تزریق کاتالیست تازه جبران می شود. از این رو هدف از انجام این تحقیق بررسی کارکرد سیکلون برای مقدار زیاد غلظت ذرات ورودی یعنی تا ۲۰ کیلوگرم ذرات ورودی در یک کیلوگرم گاز ورودی توسط تکنیکهای دینامیک سیالات محاسباتی می باشد، حال آنکه در نهایت در منابع تحقیقاتی پیشین تا ۶/۵ کیلوگرم ذرات ورودی در یک کیلوگرم گاز ورودی بحث شده است. در این مطالعه سیکلون مورد نظر از نوع استیرمند با بازدهی بالا و دارای هندسه سه بعدی می باشد که سیکلونی مرسوم از راکتور احیاء کاتالیست واحدFCC در صنعت نفت است. از آنجا که ایجاد هندسه سیکلون واقعی با ابعادی بزرگ، عامل ایجاد موانعی از قبیل طولانی شدن زمان محاسبات، نیاز به حافظه بالای رایانه ای و غیره می گردد لذا جهت انجام شبیه سازی ابعاد سیکلون با مقیاس مشخص به اندازه های کوچکتر تغییر یافته و توسط نرم افزار تولید شبکه gambit ترسیم و شبکه بندی و برای شبیه سازی از نسخه (۶/۳) نرم افزار Fluent استفاده شده است. نتایج شبیه سازی حاکی از این است که اگرچه افت فشار نسبت به افزایش غلظت ذرات در ورودی زیاد تغییر نمی کند ولیکن ممکن است بتوان کاهش افت فشار جریان حاوی ذرات را تا ۳۰ درصد افت فشار جریان هوای تمیز تخمین زد. افزایش بازده جمع آوری نیز با افزایش غلظت کاتالیست ورودی تا مقدار نسبت ۱۰کیلوگرم ذره در ۱ کیلوگرم هوای ورودی قابل نتیجه گیری است، حال آنکه این تغییرات در مقادیر بالاتر از این مقدار روندی رو به کاهش را نشان خواهد داد. ضمنا کد نوشته شده بر اساس یک رابطه تجربی جهت پیش بینی سایش کاتالیست، بصورت UDF وارد نرم افزار Fluent گشته و نتایج PSD ذرات جمع آوری شده حاصل از سایش نسبت به تغییر سرعت در نسبت های مختلف جامد به گاز گزارش شده است.



**واژه های کلیدی:** سیکلون، دینامیک سیالات محاسباتی، گاز و جامد، CFD ، اولرین – لاگرانژین، FCC، سایش.

**فهرست مطالب**

**فصل اول : بررسی سیکلون و مروری بر شبیه سازیهای مختلف**


**مقدمه** ..... ۲

۱-۱- جداکننده های چرخانه ای ..... ۲

۱-۲- مکانیسم کارکرد سیکلون ..... ۴

۱-۳- طول طبیعی گردابه ..... ۶

۱-۴-افت فشار در سیکلون ..... ۶

۱-۵- بازده سیکلون ..... ۸

۱-۶- کاربرد سیکلون ..... ۸

۱-۷- سیکلونهای واحد کراکینگ کاتالیستی سیال ..... ۹

۱-۸- سایش کاتالیست در سیکلون ..... ۱۳

۱-۹- مروری بر مطالعات سیکلون ..... ۱۶

۱-۹-۱- شبیه سازیهای ریاضیاتی انجام شده روی سیکلون ..... ۱۶

۱-۹-۲- شبیه سازیهای CFD انجام شده روی سیکلون ..... ۱۷

۱-۹-۳- شبیه سازیهای انجام شده مربوط به ارزیابی تاثیرات افزایش غلظت کاتالیست ورودی ..... ۲۰

۱-۹-۴- بررسی سایش کاتالیست در تحقیقات قبلی ..... ۲۱


**فصل دوم: مقدمه ای بر دینامیک سیالات محاسباتی**


۲-۱- یک برنامه CFD چگونه کار می کند؟ ..... ۲۴

۲-۱-۱ پیش پردازنده ..... ۲۴

۲-۱-۲- حل کننده ..... ۲۴

۲-۱-۳- پس پردازنده ..... ۲۵

۲-۲- حل مسئله بوسیله CFD ..... ۲۵

۲-۳- معادلات حاکم بر جریان سیال ..... ۲۶

**فهرست مطالب**


۲-۳-۱- بقای جرم در حالت سه بعدی ..... ۲۶

۲-۳-۲- معادله اندازه حرکت در حالت سه بعدی ..... ۲۸

۲-۳-۳- معادلات ناویر– استوکس برای سیال نیوتنی ..... ۳۱

۲-۴- روش حجم محدود ..... ۳۳

۲-۴-۱- طرح اختلاف مرکزی ..... ۳۹

۲-۴-۲ طرح اختلاف بالادست ..... ۴۰

۲-۴-۳- طرح اختلاف پیوندی ..... ۴۲

۲-۴-۴- روشهای اختلاف مرتبه بالا برای مسائل نفوذ-جابه جایی ..... ۴۳

۲-۴-۴-۱- طرح اختلاف بالادست مرتبه دوم : روش QUICK ..... ۴۴

۲-۵- الگوریتمهای حل تؤام سرعت-فشار در جریانهای دائم ..... ۴۶

۲-۵-۱- الگوریتم سیمپلر ..... ۴۸

۲-۵-۲- الگوریتم سیمپلک ..... ۴۸

۲-۵-۳- الگوریتم پیسو ..... ۴۸


**فصل سوم: اثر اغتشاش روی معادلات حاکم**


۳-۱- آشفتگی ..... ۵۰

۳-۲- اثر آشفتگی روی معادلات میانگین زمانی ناویر-استوکس ..... ۵۱

۳-۳- مدلهای آشفتگی ..... ۵۱

۳-۳-۱- مدل اسپالارت-آلماراس ..... ۵۲

۳-۳-۲- مدل $K-\varepsilon$ ..... ۵۳

۳-۳-۲-۱- شرایط مرزی معادلات $K-\varepsilon$ ..... ۵۴

۳-۳-۳- مدل تنش رینولد ..... ۵۵

۳-۴- مدلسازی تأثیر حضور دیواره بر جریانهای آشفته ..... ۵۶

**فهرست مطالب**

**فصل چهارم: مروری بر جریانهای چند فازی**


۴-۱- جریانهای چند فازی ..... ۶۰

۴-۲- جریانهای گاز-جامد ..... ۶۰

۴-۲-۱- جریان مملو از ذرات ..... ۶۰

۴-۲-۲- انتقال نیوماتیک ..... ۶۰

۴-۲-۳- بسترهای سیال ..... ۶۱

۴-۳- دیدگاههای مختلف در مدلسازی چند فازیها ..... ۶۱

۴-۳-۱- دیدگاه اولر - اولر ..... ۶۱

۴-۳-۱-۱- مدل حجم سیال ..... ۶۱

۴-۳-۱-۲- مدل مخلوط ..... ۶۲

۴-۳-۱-۳- مدل اولرین ..... ۶۲

۴-۳-۲- دیدگاه اولر - لاگرانژ ..... ۶۳

۴-۴- تئوری مدل فاز مجزاء ..... ۶۳


**فصل پنجم: شبیه سازی سیکلون واحد FCC**


مقدمه ..... ۶۶

۵-۱- الگوی شبکه بندی هندسی سیکلون ..... ۶۶

۵-۲- روش حل جریان ..... ۶۸

۵-۳- شرایط مرزی ..... ۷۰

۵-۴- تزریق و تعقیب ذرات ..... ۷۱

۵-۴-۱- مدل DPM ..... ۷۲

۵-۴-۲- معادلات حاکم بر ذرات ..... ۷۳

۵-۴-۳- انتگرالگیری از معادله حرکت ذره ..... ۷۴

۵-۴-۴- شبیه سازی تاثیر اغتشاش روی پراکندگی ذرات ..... ۷۴
۵-۴-۴-۱- مدل ردیابی آماری ..... ۷۵
۵-۴-۷-۲- مدل DRW ..... ۷۶
۵-۴-۵- تاثیر متقابل فاز پراکنده و فاز پیوسته ..... ۷۷
۵-۴-۵-۱- تغییرات مومنتوم ..... ۷۷
۵-۴-۵-۲- زیر تخفیفهای ترمهای متغیر در فصل مشترک ..... ۷۸
۵-۴-۶- شرایط مرزی دی-پی-ام ..... ۷۸
۵-۵- تأیین میزان سایش ذرات با استفاده از روش هایCFD ..... ۷۹

**فصل ششم: نتایج و بحث**

مقدمه ..... ۸۳
۶-۱- شبیه سازی و معتبرسازی مدل ..... ۸۳
۶-۲- گزارش نتایج شبیه سازی ..... ۹۲
۶-۲-۱- افت فشار ..... ۹۲
۶-۲-۱-۱- تأثیر افزایش سرعت ورودی ..... ۹۳
۶-۲-۱-۲- تأثیر افزایش بار ورودی ..... ۹۵
۶-۲-۲- بازده ..... ۱۰۰
۶-۲-۳- کانتورهای سرعت ..... ۱۰۲
۶-۲-۴- تأیین شدت سایش ذرات ..... 104

**فصل هفتم: جمع‌بندی و پیشنهادات**

۷-۱- جمع‌بندی ..... ۱۰۸
۷-۲- پیشنهادات ..... ۱۰۹
منابع ..... ۱۱۰
پیوست A: UDF مربوط به مدلسازی سایش ذرات در اثر برخورد با دیواره ..... ۱۱۶

**فهرست مطالب**

جدول۱-۱- راهنمای طراحی مکانیکی و فرایندی سیکلونهای راکتور و احیاء کننده ..... ۱۲

جدول ۵-۱- ابعاد سیکلون مورد نظر ..... ۶۸

جدول۶-۱-مدت زمان رسیدن به همگرایی کامل در شبیه سازیهای اولیه (بدون حضور کاتالیست) ..... ۸۵

جدول ۶-۲- مدت زمان رسیدن به همگرایی کامل(شبیه سازی همراه با تزریق کاالیست) ..... ۹۹

جدول۶-۳- مقادیر متوسط ذرات در خروجی از پایین سیکلون ..... ۱۰۶

**فهرست اشکال**


شکل ۱-۱- تصویر کلی از یک سیکلون ..... ۳

شکل ۱-۲- سرعتهای مماسی گاز در سیکلون ..... ۴

شکل ۱-۳- سرعتهای شعاعی گاز در سیکلون ..... ۵

شکل ۱ -۴- سرعتهای عمودی گاز در سیکلون ..... ۵

شکل ۱-۵- تغییرات فشار استاتیکی در سیکلون ..... ۷

شکل ۱-۶- شکل یک واحد FCC ..... ۱۰

شکل ۱-۷- سیستم سیکلون closed- coupled داخلی ..... ۱۱

شکل ۱-۸- تأثیر مشخصات فرایند و جنس ذرات بر میزان سایش ..... ۱۳

شکل ۱-۹- روش بدست آوردن میزان سایش ..... ۱۴

شکل ۲-۱ - جریانهای جرمی ورودی و خروجی از المان سیال ..... ۲۷

شکل ۲-۲- مولفه های نه گانه تنش ..... ۲۹

شکل ۲-۳- مولفه های تنش در جهت $x$ ..... ۲۹

شکل ۲-۴ - نمونه ای از گسسته سازی میدان جریان در حالت یک بعدی ..... ۳۳

شکل ۲-۵- سیستم علامتگذاری برای روش حجم محدود ..... ۳۴

شکل ۲-۶ - نمونه ای از حجم کنترل سه بعدی ..... ۳۷

شکل ۲ -۷- حجم کنترل اطراف گره $P$ ..... ۳۸

شکل۲-۸- مقادیر گره‌ای استفاده شده برای محاسبه مقادیر روی سطح سلول در جریان مثبت ..... ۴۱

شکل۲-۹- مقادیر گره‌ای استفاده شده برای محاسبه مقادیر روی سطح سلول در جریان منفی ..... ۴۱

شکل ۲-۱۰- پروفیلهای مرتبه دوم استفاده شده در روش $QUICK$ ..... ۴۴

شکل ۳-۱- اندازه گیری سرعت نقطه ای در جریان آشفته ..... ۵۰

شکل ۳ -۲- نمودار نیمه لگاریتمی زیر لایه های جریان درهم ..... ۵۷

شکل ۳-۳- دو روش عمده برای مدلسازی جریان آشفته در نزدیکی دیواره ..... ۵۸

شکل ۵-۱- شکل هندسی سیکلون ..... ۶۷

**فهرست اشکال**


شکل ۵-۲- الگوریتم روش حل بر مبنای فشار ..... ۶۹

شکل ۵-۳- نمونه ای از یک PSD ..... ۷۱

شکل ۵-۴- دیاگرام محاسبات کوپل فاز منفصل ..... ۷۳

شکل ۵-۵- انتقال حرارت، جرم و مومنتوم بین فازهای پیوسته و پراکنده ..... ۷۷

شکل ۵-۶- شرط مرزی انعکاس در مدل DPM ..... ۷۹

شکل ۵-۷- شرط مرزی فرار در مدل DPM ..... ۷۹

شکل ۶-۱- مقایسه تغییرات سرعت مماسی بر حسب شعاع در فاصله ۱۷ سانتیمتر از بالای سیکلون در دو مدل RSM و K-e بانتایج آزمایشگاهی[۱۲]-۲۹۷۹۷ سلول ..... ۸۴

شکل ۶-۲- مقایسه تغییرات سرعت مماسی بر حسب شعاع در فاصله ۱۷ سانتیمتر از بالای سیکلون در دو مدل RSMو K-e با نتایج آزمایشگاهی [۱۲]-۱۷۷۹۳سلول ..... ۸۶

شکل ۶-۳- تغییرات سرعت مماسی بر حسب شعاع در فاصله ۱۷ سانتیمتر از بالا و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی[۱۲] ۸۸

شکل ۶-۴- تغییرات سرعت مماسی بر حسب شعاع در فاصله ۴۷ سانتیمتر از بالا و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی[۱۲]۸۸

شکل ۶-۵- تغییرات سرعت عمودی بر حسب شعاع در فاصله ۱۷ سانتیمتر از بالا و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی[۱۲]۸۹

شکل ۶-۶- تغییرات سرعت عمودی بر حسب شعاع در فاصله ۴۷ سانتیمتر از بالا و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی[۱۲]۹۰

شکل ۶-۷- تاثیر اندازه ذره روی بازده سیکلون و مقایسه با شبیه سازی دیگر [۶۶] ..... ۹۱

شکل۶-۸-مقایسه افت فشار جریان بدون ذره، بدست آمده از شبیه سازی CFD و معادله(۶-۲) ..... ۹۴

شکل ۶-۹ - افت فشار جریان با مقادیر مختلف غلظت و سرعت ذرات ورودی ..... ۹۶

شکل ۶-۱۰- تغییرات سرعت مماسی بر حسب شعاع در فاصله۱۷ سانتیمتر از بالا و سرعت ورودی ۱۸ متر بر ثانیه در دو غلظت متفاوت کاتالیست ورودی ..... ۹۸

شکل ۶-۱۱- تغییرات سرعت عمودی بر حسب شعاع در فاصله۱۷سانتیمتر از بالا و سرعت ورودی۱۸ متر بر ثانیه در دو غلظت متفاوت کاتالیست ورودی ..... ۹۸

شکل۶-۱۲-بازده جمع‌آوری نسبت به غلظت کاتالیست ورودی در سرعتهای۱۸و۲۷ متر بر ثانیه ..... ۱۰۱

شکل ۶-۱۳- کانتور سرعت محوری(عمودی) در سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه و نسبت غلظت ۲۰ کیلوگرم کاتالیست بر کیلوگرم هوای ورودی ..... ۱۰۳

شکل ۶-۱۴- کانتور برایند سرعت مماسی در سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه و نسبت غلظت ۲۰ کیلوگرم کاتالیست بر کیلوگرم هوای ورودی ..... ۱۰۴

شکل ۶-۱۵- PSD ذرات خروجی از پایین سیکلون در سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه ..... ۱۰۵

شکل ۶-۱۶- PSD ذرات خروجی از پایین سیکلون در سرعت ورودی ۱۸ متر بر ثانیه ..... ۱۰۵

شکل ۶-۱۷- PSD ذرات خروجی از پایین سیکلون در سرعت ورودی ۲۷ متر بر ثانیه ..... ۱۰۶

$\boldsymbol{A}$ : سطح مقطع عرضی حجم کنترل

$A_{c,in}$ : سطح مقطع ورودی سیکلون

$a$ : ارتفاع ورودی سیکلون

$b$ : عمق ورودی سیکلون

$B$ : قطر خروجی ذرات از سیکلون

$\boldsymbol{b_{i,J}}$ : بخش چشمه اندازه حرکت

$C_c$ : ضریب کونینگهام

$C_D$ : ضریب درگ

$D$ : ضریب نفوذ

$D$ : قطر سیلندر اصلی سیکلون

$D_e$ : قطر لوله خروجی گاز از سیکلون

$\overline{d}$ : قطر متوسط ذرات

$d_p$ : قطر ذره جامد

$\dot{E}_{c,in}$ : انرژی کینتیک ذرات ورودی به سیکلون

$\dot{E}_{a,c}$ : انرژی صرف سایش ذرات

$f$ : ضریب اصطکاک

$F$ : شار جابجایی عبوری از وجوه سلول در واحد جرم

$F_A$ : نیروی جرم مجازی

$F_D$ : نیروی درگ

$F_G$ : نیروی ناشی از جاذبه

$F_x$ : سایر نیروها

$Fr$ : عدد فرود: $u_a / \left(gD\right)^{1/2}$

$Fr_P$ : عدد فرود ذره جامد $\omega_s /\left(g\, d_p\right)^{1/2}$

$g$ : شتاب جاذبه

$G_k$ : نرخ تولید انرژی جنبشی

$H$ : سختی ذرات

$H$ : ارتفاع کل سیکلون

$h$ : ارتفاع استوانه اصلی سیکلون

$h_e$ : ارتفاع استوانه خروجی هوا

$I$ : شدت آشفتگی

$k$ : انرژی جنبشی آشفتگی (در واحد جرم)

$K_c$ : چقرمگی شکست

$Kn$ : عدد ناتسن

$l$ : طول مشخصه ذرات ( برابر قطر در ذرات کروی)

$m_p$ : جرم ذره جامد

$\dot{m}_{c,in}$ : جریان جرمی ذرات ورودی به سیکلون

$\dot{m}_{a,\,fines}$ : جرم تولید شده توسط سایش

$Pe$ : عدد پکلت

$P$ : بین میدان فشار صحیح

$P^*$ : میدان فشار حدسی

Re عدد رینولدز جریان

$Re_p$ : عدد رینولدز برای ذره جامد= $\mathrm{Re}_p = \rho_f d_p |u_R| / \mu$

$r_c$ : میزان سایش

$S$ : مساحت ذرات

$S_m$ : سطح جرمی ویژه محصولات سایش

$S_{ui}$ : ترم چشمه ذرات

$\overline{\boldsymbol{S}}$ : مقدار متوسط چشمه

T: دمای مطلق

$u$ : بردار سرعت

$u_{c,in}$ : سرعت ذره جامد ورودی به سیکلون

$u_i$ : سرعت فاز پیوسته در راستای بردار یکه $i$

$u_p$ : سرعت ذره جامد

$u_{P1}$ سرعت ذره در راستای محور $\boldsymbol{x}$

$u_R$ : سرعت نسبی ذره جامد $\left(u-u_p\right)$

$U_{ref}$ : سرعت جریان متوسط مرجع

$V_s$ : سرعت ته نشینی برای یک ذره جامد

$W_{P1}$ : سرعت ذره در راستای محور $\boldsymbol{z}$

$Y_d$ : جزء جرمی از ذرات

$\alpha$: ضریب تناسب

$\varphi$ : ضریب شکل

$\lambda$ :متوسط فاصله آزاد(mean free path)

$\nu$ : ویسکوزیته سینماتیک

$\nu$ : سرعت سیال

$\rho$ : دانسیته فاز گاز

$\rho_p$ : دانسیته فاز جامد

$\zeta$: یک متغیر تصادفی گوسین (با میانگین صفر و انحراف استاندارد یک)

$\phi$: خاصیت جریان

$\Gamma$: ضریب نفوذ

$\Gamma_t$ قابلیت نفوذ آشفته

$\varepsilon$: نرخ استهلاک انرژی آشفته

$\gamma$: نسبت دبی جرمی جامد به دبی جرمی گاز

$\gamma$: انرژی آزاد سطح ویژه

$\Phi$: متوسط خاصیت جریان

$\mu$ :ویسکوزیته دینامیک

$\mu_c$: بار کاتالیست ورودی

$\mu_t$: لزجت آشفته (لزجت ادی)

$\eta_c$: بازده سایش

$\sigma_t$: عدد اشمیت/پرانتل $\sigma_t = \mu_t / \Gamma_t$

$\omega_{P1}^{x}$: سرعت زاویه ای ذره حول محور $\boldsymbol{x}$

$\omega_{P1}^{z}$: سرعت زاویه ای ذره حول محور $\boldsymbol{z}$

$\mu_0$ : ضریب اصطکاک سکون

$\mu_d$: ضریب اصطکاک دینامیک

$\Delta\gamma$: ویژگی زبری سطح بیانگر انحراف استاندارد تابع توزیع نرمال زاویه زبری سطح

$\tau_0$: تنش برشی بر روی دیواره

$\frac{\Delta P}{L}$: افت فشار بر واحد طول خط انتقال نیوماتیک

$\delta x_u$ : پهنای حجم کنترل $u$

$\delta y_v$ : پهنای حجم کنترل $v$

# فصل اول

# بررسی سیکلون
# و مروری بر شبیه سازیهای مختلف

## مقدمه

بسیاری از فرایندهای صنعتی همانند فرایندهای معدنی، پالایش نفت، مهندسی شیمی، صنایع غذایی وپاکسازی محیط زیست شامل جداسازی ذرات از جریان هوا می باشد. جهت جداسازی گاز از جامد و برعکس می توان از فناوریهایی مانند فیلترهای فابریک، شتاب دهنده های الکترواستاتیک[۱]، جداکننده‌های هوایی و جداکننده‌های چرخانه ای[۲] استفاده نمود.

اگرچه بازده فیلترهای الیافی و شتاب دهنده های الکترواستاتیک برای بازیابی ذرات کوچک بالاست اما به علت بالا بودن هزینه اولیه و هزینه های عملیاتی برای استفاده در بسیاری از صنایع مناسب نیستند.

جداکننده‌های هوایی که هریک برای جداسازی ذرات خاصی مناسبند و مستقلا دارای مشخصات فنی ویژه ای می باشند، دارای انواع مختلفی ازقبیل جداکننده‌های هوایی سانتریفیوژی و گرانشی[۳]، جداکننده‌های بسترسیال[۴] و جداکننده‌های هوایی اینرسیک[۵] می باشند . در این میان جداکننده های چرخانه ای به علت مزیت اصلی شان که ساختمان ساده و قیمت پایین این دستگاهها می باشد از اواخر سال ۱۸۰۰ میلادی در صنایع بطور گسترده ای مورد استفاده قرار گرفته اند .[۱]

## ۱- ۱- جداکننده های چرخانه ای یا سیکلونی

این دستگاهها دارای هیچ جزء متحرکی نبوده و به نیروی گریز از مرکز فزونی یابنده حاصل از جریان گازهایی متکی اند که از هنگام ورود شروع به دوران و چرخش می نمایند.

کانال ورودی با شکلی مکعبی و یا استوانه ای، بر بدنه سیکلون یا همان استوانه اصلی متصل است و مماس بودن این اتصال حرکت پیچشی را در جریان گاز و ذرات ایجاد می کند. حرکت پیچشی عامل ایجاد نیروی گریز از مرکز است و این نیرو به ذرات در جهت دیواره نیرو وارد کرده و در جدایی ذرات جامد از گاز حامل کمک می نماید. در این زمان وزن ذرات یا نیروی جاذبه عاملی در سقوط آنها در کنار دیواره به سمت پایین سیکلون می باشد. با ادامه یافتن حرکت مواد از

---

۱ Electrostatic precipitators
۲ cyclone separator
۳ gravitational and centrifugal air classifiers
۴ Fluidized bed classifiers
۵ Inertial air classifiers