

AV, 1, 107905

AA, 1, 1A

110912

110912

۸۲/۱۱۰۴۹۵۴  
۱۸ - ۱۸



دانشگاه شهید باهنر کرمان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی معدن

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی

## بهبود سازی عملکرد هیدروسیکلون های کارخانه زغالشویی زرنند

استاد راهنما:

دکتر عباس سام

مشاور صنعتی:

مهندس رضا کازرانی نژاد

مؤلف:

محمد رنجبر

بهار ۱۳۸۷

۱۱۰۹۱۴



دانشگاه شهید باهنر کرمان

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

گروه: مهندسی معدن

دانشکده: فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو: محمد رنجبر

استاد راهنما: دکتر عباس سام

۱۳۸۷/۳/۲۵

۱۳۸۷/۱۱/۲۷

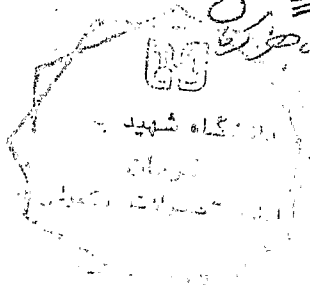
داور ۱: دکتر حسن حاجی امین شیرازی

داور ۲: دکتر صمد بنیسی

داور ۳:

تحصیلات تکمیلی یا نماینده دانشکده: دکتر منصوری

حق چاپ محفوظ و مخصوص به مؤلف است.



تقدیم به عزیزترین کسانی که در دنیا دارم

تقدیم به آنهایی که از خود گذشتند تا سر بلند باشم

تقدیم به

# پدر و مادرم

که همیشه در یادم خواهند بود

سپاس خدای را که انسان را آفرید و به او قدرت آموختن بخشید

بدین وسیله بر خود لازم می دانم از استاد ارجمند و گرامی جناب آقای دکتر عباس سام به پاس تمام زحماتی که برای بنده در طول مدت تحصیل در این مقطع تحصیلی، هم به عنوان استاد مشاور و هم به عنوان استاد راهنمای پروژه، متحمل شده اند کمال قدردانی را به عمل آورم. همچنین از جناب آقای مهندس رضا کازرانی نژاد، مدیر تحقیق و توسعه شرکت معادن ذغالسنگ کرمان به جهت همکاری بی دریغ در مدت انجام پروژه قدردانی به عمل می آید. در خاتمه از تمامی کسانی که به نحوی در انجام این تحقیق نقش داشته ولی نام بردن از همه آنها در این مجال نمی گنجد، تشکر می شود.

## چکیده

مدار هیدروسیکلون- ماریچج کارخانه زغالشویی زرنند که به تازگی به مدار فرآوری اضافه شده است، وظیفه طبقه بندی و جدایش ذرات درشت دانه را بر عهده دارد. خوراک ورودی به هیدروسیکلونهاى کارخانه از ته ریز تیکر های ۱۸ متری تامین می شود. آزمایشها نشان داد که ته ریز تیکر شامل تقریباً ۴۰ درصد ذرات بالای ۵۰۰ میکرون با خاکسترموسط ۱۴ درصد می باشد. به همین دلیل وقتی این جریان وارد مدار فلوتاسیون می شد، راندمان این بخش ابعادی به شدت کاهش می یافت. بعد از نصب مدار سیکلون- ماریچج، بازیابی این بخش از ذرات افزایش چشمگیری یافت. اما برای تعیین بهترین شرایط عملیاتی هیدروسیکلون، استفاده از مدل ریاضی وسیله ضروری به نظر رسید. با استفاده از مدل میزان اختلاف بین مقادیر شبیه سازی شده میزان درصد مانده روی سرند سرریز و ته ریز با مقادیر عملیاتی به ترتیب به میزان ۰/۹۶ و ۱/۰۶ درصد برای خط ۱ (پابدانا) و ۲/۲۱ و ۰/۸۴ درصد برای خط ۲ (بابنیزو) به دست آمد. با استفاده از مدل اندازه قطر بهینه ته ریز برای هیدروسیکلونهاى خط ۱ و ۲ به ترتیب ۵ و ۴ سانتیمتر و تعداد هیدروسیکلون برای دو خط، ۱ واحد به دست آمد. در این حالت حد جدایش برای خط ۱، ۲۰۰ میکرون و برای خط ۲، ۱۶۵ میکرون به دست آمد.

## فهرست

صفحه	عنوان
	<b>فصل اول: مقدمه و آشنایی</b>
۱	۱-۱ آشنایی با کارخانه زغالشویی زرنند
۱	۱-۱-۱ ساختمان پذیرش خوراک
۱	۲-۱-۱ ساختمان تغلیظ
۲	۳-۱-۱ ساختمان خشک کن
۲	۴-۱-۱ ساختمان سیلوهای ذخیره و بارگیری
۳	۲-۱ تاریخچه سیکلون ها
۴	۳-۱ ترکیبات مکانیکی هیدروسیکلون
۴	۴-۱ تاثیر متقابل سیالات و اجسام جامد
۴	۱-۴-۱ اثر متقابل ذره - سیال در غلظت های کم
۸	۲-۴-۱ اثر متقابل ذره - سیال در غلظت های بالا
۹	۵-۱ اصول حاکم بر حرکت ذرات در هیدروسیکلون
۱۲	۱-۵-۱ سرعت مماسی
۱۳	۲-۵-۱ سرعت محوری
۱۴	۳-۵-۱ سرعت شعاعی
۱۵	۶-۱ انواع جریان در هیدروسیکلون
۱۶	۷-۱ معیارهای تعریف کارایی
۱۶	۸-۱ کارایی کلی براساس جریان ته ریز
۱۷	۹-۱ موازنه جرم داده ها به روش کمینه سازی مجموع مربعات باقیمانده ها
۲۰	۱۰-۱ مدلسازی عملیاتی هیدروسیکلون
۲۳	۱۰-۱-۱ تابع دنباله روی $B(d)$
۲۳	۲-۱۰-۱ تابع طبقه بندی $C(d)$
۲۴	۱۱-۱ شرایط زغال برای مدلسازی
	<b>فصل دوم: روش تحقیق</b>
۲۷	۱-۲ نمونه برداری از هیدروسیکلون
۲۸	۲-۲ فرآیند مدلسازی از نگاه کلی
۲۹	۳-۲ روش انجام آزمایش غرق و شناورسازی
	<b>فصل سوم: ارائه یافته ها و تحلیل نتایج</b>
۲۹	۱-۳ تعیین کارایی فعلی هیدروسیکلون
۳۱	۲-۳ فرآیند مدلسازی هیدروسیکلون با داده های موازنه شده
۳۳	۳-۳ تعیین ضرائب نهایی مدل و مقایسه با نتایج واقعی
۳۶	۴-۳ تحلیل آماری برای معنی دار بودن مدل هیدروسیکلون

	(خط پابدانا)
۳۸	۵-۳ مدل‌سازی هیدروسیکلون های خط بابنیزو
۳۹	۶-۳ رسم منحنی توزیع غیر معمول ( Peculiar Tromp Curve)
۴۲	۱-۶-۳ نمونه برداری برای تعیین منحنی توزیع غیر معمول
۴۴	۲-۶-۳ بررسی نتایج
۴۴	۷-۳ بررسی عملکرد مدار هیدروسیکلون - ماریچ بخش باطله فلوتاسیون
۴۸	۸-۳ تعیین شرایط بهینه هیدروسیکلون
۴۹	نتیجه گیری و پیشنهادها
۵۱	منابع
۵۳	پیوست ها
۵۵	پیوست ۱: داده های خام حاصل از نمونه برداری از خط ۱ (پابدانا)
۵۸	پیوست ۲: داده های خام حاصل از نمونه برداری از خط ۲(بابنیزو)
۶۱	پیوست ۳: دانه بندی جریان های هیدروسیکلون در دانسیته های مختلف



## فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱. آرایش ساختمانهای موجود در کارخانه ذغالشویی زرنند.....	۲
شکل ۱-۲. ضریب درگ برحسب عدد رینولدز برای ذرات کروی.....	۵
شکل ۱-۳. مقطع عرضی یک هیدروسیکلون.....	۱۰
شکل ۱-۴. شماتیکی از جریان گردابی در هیدروسیکلون.....	۱۱
شکل ۱-۵. توزیع سرعت مماسی هیدروسیکلون.....	۱۳
شکل ۱-۶. توزیع سرعت محوری در هیدروسیکلون.....	۱۴
شکل ۱-۷. توزیع سرعت شعاعی داخل هیدروسیکلون.....	۱۴
شکل ۱-۸. عملیات جدایش در یک هیدروسیکلون.....	۱۶
شکل ۱-۹. مدار جداکننده ساده.....	۱۸
شکل ۱-۱۰. پدیده های دنباله روی و طبقه بندی در هیدروسیکلون.....	۲۱
شکل ۱-۱۱. شمایی از پدیده قلاب ماهی در اندازه های ریز.....	۲۴
شکل ۱-۲. مدار هیدروسیکلون کارخانه ذغالشویی زرنند.....	۲۸
شکل ۱-۳. دانه بندی جریان های اطراف هیدروسیکلون.....	۳۱
شکل ۲-۳. نمودار ضریب توزیع هیدروسیکلون در حال کار.....	۳۲
شکل ۳-۳. شمایی از هندسه هیدروسیکلون.....	۳۳
شکل ۳-۴. اختلاف بین مقادیر واقعی و شبیه سازی شده.....	۳۵
شکل ۳-۵. مقایسه سرریز و ته ریز شبیه سازی شده و عملیاتی.....	۳۶
شکل ۳-۶. مقایسه منحنی توزیع در دو حالت.....	۳۷
شکل ۳-۷. صفحه گسترده Excel برای تحلیل آماری.....	۳۹
شکل ۳-۸. نمودار دانه بندی خوراک، سرریز و ته ریز هیدروسیکلون خط بانیزو.....	۴۰
شکل ۳-۹. نمودار ضریب توزیع تصحیح شده و تصحیح نشده در حالت عادی.....	۴۱
شکل ۳-۱۰. مقایسه سرریز و ته ریز شبیه سازی شده با حالت واقعی.....	۴۱
شکل ۳-۱۱. مقایسه ضریب توزیع عملیاتی و شبیه سازی شده.....	۴۲
شکل ۳-۱۲. دانه بندی خوراک ورودی براساس دانسیته ذرات.....	۴۵
شکل ۳-۱۳. نمودار دانه بندی سرریز هیدروسیکلون براساس دانسیته ذرات.....	۴۵
شکل ۳-۱۴. نمودار دانه بندی ته ریز هیدروسیکلون براساس دانسیته ذرات.....	۴۶
شکل ۳-۱۵. منحنی توزیع دو بخش سبک و سنگین و نمونه کلی.....	۴۶
شکل ۳-۱۶. نمودار ضریب توزیع برای هر بخش دانسیته ای برای حذف تاثیر ناهمگنی.....	۴۷

شکل ۳-۱۷. منحنی ضریب توزیع تصحیح شده و تصحیح نشده..... ۴۹

## فهرست جدول ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱. تعریف متغیر های مربوط به شکل (۱-۱۰).....	۲۲
جدول ۱-۳. داده های موازنه شده حاصل از نمونه برداری.....	۳۱
جدول ۲-۳. مشخصات خوراک ورودی و هندسه هیدروسیکلون.....	۳۳
جدول ۳-۳. مقادیر به دست آمده با استفاده از مدل.....	۳۴
جدول ۳-۴. شبیه سازی جریانهای سرریز و ته ریز.....	۳۵
جدول ۳-۵. ضرائب به دست آمده از اولین تکرار فرآیند مدلسازی.....	۳۶
جدول ۳-۶. ضرائب مدل در تکرار پنجم.....	۳۷
جدول ۳-۷. ضرائب نهایی مدل Plitt.....	۳۷
جدول ۳-۸. مقادیر به دست آمده از مدل و نمونه.....	۳۸
جدول ۳-۹. مقایسه دو خط از لحاظ درصد جامد خوراک.....	۴۰
جدول ۳-۱۰. ضرائب نهایی مدل Plitt برای هیدروسیکلونهاى خط ۲.....	۴۲
جدول ۳-۱۱. نتایج حاصل از انجام فرآیند بهینه سازی جهت یافتن بهترین شرایط.....	۵۰

# فصل اول

## مقدمه و آشنایی

## ۱-۱-آشنایی با کارخانه زغالشویی زرنند

کارخانه زغالشویی زرنند در سال ۱۳۵۷ به منظور شستشوی زغالسنگهای استخراجی منطقه کرمان تأسیس شده است. این کارخانه از چهار واحد اصلی شامل ساختمان پذیرش بار و خوراک دهی، ساختمان تغلیظ، ساختمان خشک کن و ساختمان ذخیره و بارگیری کنسانتره تشکیل شده است. فرایند تغلیظ در این کارخانه در دو خط مجزا و مشابه هم صورت می گیرد.

### ۱-۱-۱- ساختمان پذیرش خوراک

خوراک کارخانه از دو گروه معادن پابدانا و بابنیزو تأمین می شود. این دو در دو خط مجزا تحت عنوان پابدانا و بابنیزو شسته می شوند. گروه پابدانا شامل معادن پابدانای اصلی، هشونی، گلتوت، اسد آباد، کمسار و سراپرده و گروه بابنیزو شامل معادن بابنیزو، اشکلی، هجدک، همکار، طبس و داربید خون می باشد.

زغالسنگهای ورودی هر خط بعد از نمونه برداری توسط کامیون وارد چهار بونکر پذیرش می شود. با توجه به برنامه خوراک دهی کارخانه هر کدام از این بونکرها به تعدادی از معادن اختصاص یافته است. در ادامه زغالسنگ ورودی به این بونکرها به ده بونکر ذخیره برای هر خط منتقل می شود. از بونکرهای ده گانه با توجه به برنامه خوراک دهی کارخانه زغالسنگ خام با تناژی در حدود ۲۰۰ - ۱۵۰ تن در ساعت به هر خط خوراک دهی می شود.

### ۲-۱-۱- ساختمان تغلیظ

عملیات فراوری زغالسنگ خام در این ساختمان انجام می گیرد. این ساختمان از سه واحد واسطه سنگین، جیگ و فلو تاسیون تشکیل شده است. زغالسنگ ورودی به هر خط توسط سرندهای اولیه و سیستم نرمه گیری قبل از واحد جیگ به سه بخش ابعادی ۲۴+ میلی متر، ۲۴-۰/۵ میلی متر و ۰/۵- میلی متر طبقه بندی شده و به ترتیب وارد واحدهای واسطه سنگین، جیگ و فلو تاسیون می شود. البته به منظور افزایش راندمان کارخانه، محصول میانی مدار جیگ و باطله درشت واحد فلو تاسیون در مدار دایناویرپول که توسط کادر فنی کارخانه در ساختمان تغلیظ احداث شده است، فراوری مجدد شده و کنسانتره آن به کنسانتره واحد واسطه سنگین اضافه می شود.

به دلیل وجود ذرات درشت با خاکستر پایین (۴۰ درصد ذرات بالای ۵۰۰ میکرون با خاکستر متوسط ۱۴ درصد) در ته ریز تیکنر که به سمت مدار فلو تاسیون جریان می یافت و از آنجایی که کارایی فلو تاسیون برای این بخش در حد نرمال ارزیابی نشد، مسئولین کارخانه را بر آن داشت تا

ابتدا این جریان را به سمت چهار عدد هیدروسیکلون فرستاده، سرریز هیدروسیکلونها به سمت فلو تاسیون و ته ریز آنها به سمت مدار جدا کننده ماریپیچی ارسال شوند. همچنین در بخش باطله فلو تاسیون نیز از دو عدد هیدروسیکلون به همراه جدا کننده ماریپیچی استفاده شده است تا خروج ذرات با ارزش زغال از کارخانه به حداقل ممکن برسد.

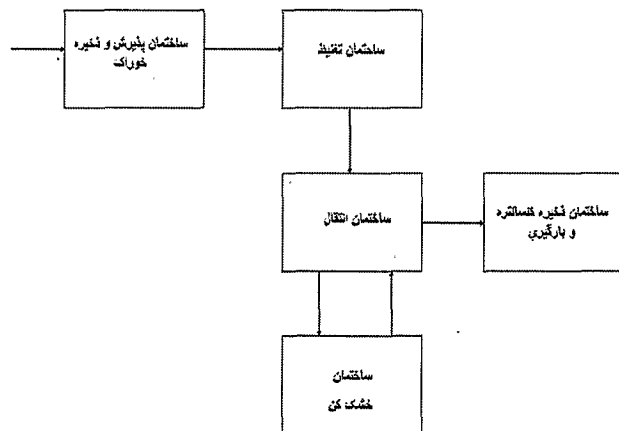
### ۳-۱-۱ ساختمان خشک کن

رطوبت قابل قبول محصول در حدود ۹ درصد است. برای رسیدن محصول به رطوبت مورد نظر کنسانتره واحد جیگ و فلو تاسیون هر خط با هم مخلوط شده و وارد ساختمان خشک کن می گردد. در خشک کن پنج کوره در نظر گرفته شده است که گرمای مورد نیاز بارابانها را برای خشک کردن کنسانتره مرطوب فراهم می کنند. از پنج کوره مذکور، دو کوره به خط پابدانا و بقیه به خط بابنیزو اختصاص دارد. کنسانتره پس از خشک شدن از خشک کن خارج شده و در ساختمان انتقال با کنسانتره واسطه سنگین مخلوط شده و به ساختمان سیلوهای ذخیره منتقل می شود.

### ۴-۱-۱ ساختمان سیلوهای ذخیره و بارگیری

در این ساختمان در هر خط چهار بونکر ذخیره کنسانتره در نظر گرفته شده است که ظرفیت هر کدام ۱۵۰۰ تن است. در زیر بونکرها خوراک دهنده هایی با نوار نقاله متحرک نصب شده است که به وسیله آنها بارگیری به درون واگن های حمل کنسانتره انجام می شود. عمل بارگیری برای هر خط جداگانه صورت گرفته و کنسانتره بارگیری شده برای مصرف کوره بلند به ذوب آهن اصفهان حمل می شود.

آرایش ساختمانهای مورد نظر در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱. آرایش ساختمانهای موجود در کارخانه ذغالشویی زرنند

## ۱-۲ تاریخچه سیکلون ها [۱]

به کار گیری هیدرو سیکلونها در فرآیند طبقه بندی ذرات به دلیل ساختار و اساس ساده ای که دارد به قبل از سال ۱۸۹۰ برمی گردد. در سال ۱۸۹۱ در آمریکا و در شهر بریتری یک وسیله برای جدایش ماسه از آب و جمع آوری ماسه در یک ظرف سر بسته و تخلیه متناوب آن از محفظه استفاده شد که امروزه به آن وسیله سیکلون ماسه شوی گفته می شود. بین سالهای ۱۹۰۰ تا ۱۹۳۷ بیش از ۳۰ نوع الگو برای سیکلونهای مایع (هیدروسیکلون) و یا ترتیب کار آنها تهیه شد. حدود سال ۱۹۳۷ سیکلونهای مایع (هیدروسیکلونها) جای خود را در صنایع کاغذ و صنایع فیبرهای سلولوزی باز کردند که در صنایع کاغذ سیکلون با جدا کردن ناخالصی های ذرات موجود در فیبر کیفیت محصول کاغذ خروجی را بالا می برد. موسسه تحقیقاتی و مهندسی نیکول (۱۹۳۷) در شهر نیویورک محل فروش سیکلونهای مایع (هیدروسیکلونها) برای جدایش ذرات ناخالصی از فیبر و سیکلونهای مورد استفاده در صنعت ماسه شویی بود. در تمام این مدت اصول طراحی هیدروسیکلونها بر این اساس بود که درصد کمی از مواد با دانسیته نسبی بالا را در محفظه ای جمع آوری کرده و از خروجی ته ریز تخلیه و وارد یک محفظه بسته شده و در نهایت به صورت متناوب از محفظه خارج می شدند. از سال ۱۹۴۰ به بعد علاوه بر اینکه هیدروسیکلونها در صنعت کاغذ و ماسه شویی به کار می رفتند، در صنعت ذغالشویی نیز این وسیله جای خود را باز کرد. در صنعت فرآوری آهن یکی از معادن کمپانی اریک<sup>۱</sup> کلاسیفایر های مارپیچی خود را از مدار خارج و به جای آنها از هیدروسیکلون استفاده نمود که مزایای زیر را به دنبال داشت:

۱. حد جدایش به راحتی قابل کنترل بود.
۲. مصرف آب کاهش یافت.
۳. میزان هزینه های اولیه کاهش یافت.
۴. حجم فضای مورد نیاز کاهش یافت.
۵. بار در گردش به راحتی قابل کنترل بود.

به خاطر اینکه هیدروسیکلونها از لحاظ ساختاری و مکانیکی بسیار ساده اند و اجزای متحرک نیز ندارند، امکان تحقیقات پیشرفته با صرف زمان کمتری نسبت به کلاسیفایر های پیچیده تر برای آنها وجود دارد. به همین دلیل است این وسیله توانست خیلی زود جای خود را در صنایع گوناگون باز کند.

### ۱-۳ ترکیبات مکانیکی هیدروسیکلون [۲]

هیدروسیکلونها در نهایت سادگی ترکیب مکانیکی مشخصی دارند که تمامی اجزای آنها ثابت و بدون حرکت می باشد. هیدروسیکلون یک وسیله استوانه ای مخروطی است که قطر بخش استوانه ای آن از کمتر از یک میلیمتر تا بیشتر از ۱۰۰ اینچ متغیر است. نسبت طول به قطر سیکلون در محدوده وسیعی قابل تغییر است که به اندازه و طرح هیدروسیکلون بستگی دارد. محدوده مربوطه از ۲:۱ تا ۱۰:۱ متغیر است. وزن این وسیله از چند اونس تا چند هزار پوند متغیر است که این تغییرات به جنس و نوع موادی که هیدروسیکلون از آن ساخته می شود بستگی دارد. مواد ساخت هیدروسیکلونها با کاربرد تغییر می کنند. رایجترین مواد عبارتند از: فولاد (با آستر لاستیکی یا سرامیکی)، سرامیک، چینی، باکلیت، پلی اورتان و پلاستیک های دیگر همچون پارچه پشم شیشه مستحکم و دیگر مواد مشابه آن.

استفاده آسترها در سیکلونهای بزرگ فولادی یا آلیاژی بسیار وسیع است. آسترهای مخصوص مقاوم در برابر سایش و خوردگی شامل: کربور سیلیسیم، آلومین، لاستیک طبیعی زنجیری یا مصنوعی، کلروپلی وینیل، نایلون و غیره می باشند. البته محدودیت دمایی با مواد پلاستیکی یا مصنوعی وجود دارد: پلی وینیل کلرید حدود ۷۷ درجه سانتی گراد، نایلون ۶۶ درجه سانتی گراد، پلی اورتان ۸۶ درجه سانتی گراد و لاستیک چسبی ۶۵ درجه سانتی گراد.

### ۱-۴-۱ اثر متقابل سیالات و اجسام جامد [۳]

حرکت جسم جامد در داخل سیال، در فصل مشترک جسم و سیال با اصطکاک همراه است. در نتیجه سرعت سیال در فصل مشترک، نسبت به سرعت جسم جامد برابر صفر است. به این معنی که لایه ای از سیال به سطح جامد می چسبد و با آن حرکت می کند و در فاصله کمی از سطح جامد جریان آرام تشکیل می شود.

### ۱-۴-۱-۱ اثر متقابل ذره - سیال در غلظت های کم

در غلظت های کمتر از حدود ۰/۵ درصد حجمی، ذرات آنقدر از یکدیگر فاصله دارند که در حرکت از میان سیال بر یکدیگر تاثیر نمی گذارند. طبقه بندی ذره می تواند توسط اعمال نیروی روی ذرات صورت گیرد که در نهایت باعث جداسازی ذرات خواهد شد. جهت این نیرو برخلاف جهت حرکت ذره است. تعیین نیروی درگ مشکل می باشد لذا روش معمول برای بیان نیروی درگ مطابق با قانون نیوتن است:



$$F_D = C_D A \frac{\rho u^2}{2 g_c} \quad (1-1)$$

که در آن  $u$  سرعت نسبی بین سیال و ذره است.  $\rho$  دانسیته سیال،  $A$  سطحی که در معرض برخورد ذره است (در جهت حرکت ذره) و  $C_D$  ضریب درگ است. برای حرکت سریع ذرات درشت، نیروی درگ ناشی از اینرسی سیال است و لذا ضریب درگ ثابت می ماند.

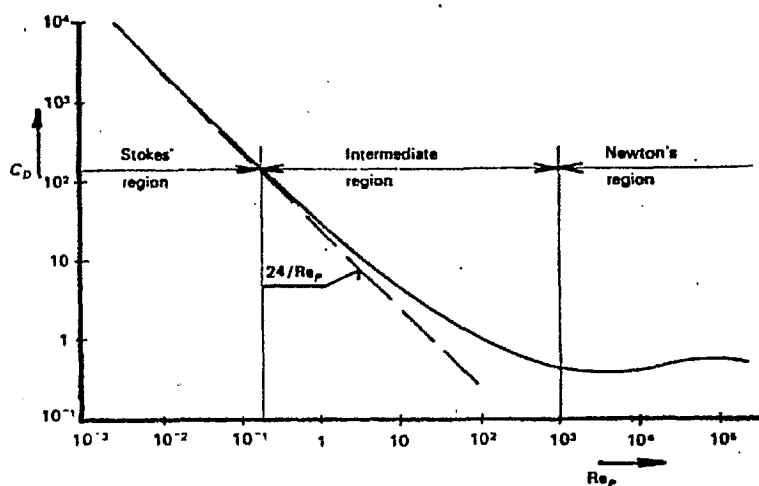
ذرات ریزتر آهسته تر حرکت می کنند و نیروی درگ ناشی از نیروهای ویسکوز است و لذا در این حالت ضریب درگ به عدد رینولدز ذره برمی گردد که جریان به دور ذره را مشخص کرده و توسط رابطه زیر داده می شود:

$$Re_p = \frac{ux\rho}{\mu} \quad (2-1)$$

که در آن  $\mu$  ویسکوزیته سیال و  $x$  قطر ذره است.

ذرات ضرورتاً "کروی نیستند و برای ذرات با اشکال مختلف و بدون قاعده،  $x$  ترجیحاً از روشهای ته نشینی تعیین می شود که در این روشها قطر معادل با یک ذره کروی که دارای سرعت ته نشینی یکسانی است به عنوان قطر ذره واقعی بیان می گردد.

شکل ۱-۲ نشان می دهد که چطور ضریب درگ به عدد رینولدز برای ذرات کروی مربوط می گردد که در نمودار تمام لگاریتمی رسم شده است.



شکل ۱-۲. ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز برای ذرات کروی

در اعداد رینولدز پایین، وقتی که نیروهای ویسکوز غالب هستند،  $C_D$  به طور تئوری از معادله ناویر-استوکس تعیین می گردد که حل آن به عنوان قانون استوکس شناخته شده است:

$$F_D = 3\pi\mu ux \quad (3-1)$$

این رابطه تقریبی است که با افزایش  $Re_p$  دقت آن نیز کاهش می یابد. در محدوده های بالاتر روی منحنی (اعداد رینولدز کمتر) اعتبار آن با خطای قابل قبولی پذیرفته می شود. محدوده ای که معمولاً برای ناحیه استوکس شناخته شده  $Re_p = 0.2$  است و این مقدار بر اساس خطایی در حدود ۲ درصد در سرعت ته نشینی نهایی ذرات است. ترکیب معادلات (۱-۱)، (۲-۱) و (۳-۱) شکل دیگری از قانون استوکس را به صورت زیر به دست می دهد:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad (۴-۱)$$

برای  $Re_p < 0.2$  رابطه بالا برقرار بوده و به صورت خط مستقیم در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.

ناحیه بین  $Re_p = 0.2$  و  $Re_p = 1000$  به عنوان ناحیه انتقالی شناخته شده است که در آنجا  $C_D$  با یک منحنی و یا توسط یک یا چند معادله تجربی توصیف شده است.

برای اعداد رینولدز بیش از ۱۰۰۰ (ناحیه نیوتنی) جریان کاملاً درهم است که نیروهای اینرسی در این نواحی کاملاً غالب بوده و مقدار  $C_D$  ثابت می گردد (حدوداً برابر ۰/۴۴) و با داشتن تخمینی از نیروی درگ می توان اغلب گروه های بدون بعد مهم را به دست آورد. اکثر تقریب های کلی بر اساس معادله سه بعدی حرکت است اما فقط یک روش ساده شده در اینجا داده شده است که مبنای معادله یک بعدی و درجهتی است که میدان شتاب روی ذره عمل می نماید:

$$m \frac{du}{dt} = ma - ma \frac{\rho}{\rho_s} - F_D \quad (۵-۱)$$

در کاربردهایی از هیدروسیکلونها که به جدایش ذرات ریز می پردازند، اعداد رینولدز پایین هستند و معمولاً از ۰/۲ کمتر می باشد که ناشی از مقادیر کم  $X$  و  $U$  (سرعت ذره) است و لذا در اینجا قابل قبول است که قانون استوکس مورد استفاده قرار گیرد.

اگر قانون استوکس (معادله (۳-۱)) به جای  $F_D$  در معادله (۵-۱) جایگزین شود حل آن برای سرعت ذره  $U$  بر حسب زمان  $t$  به صورت زیر درمی آید:

$$u(t) = \frac{\Delta\rho}{\rho_s} \tau^* a (1 - e^{-\frac{t}{\tau^*}}) \quad (۶-۱)$$

که در آن  $\Delta\rho = \rho_s - \rho$  و  $\tau^*$  ثابت مرکبی است که به سیستم سیال - ذره مربوط می گردد و تحت عنوان زمان استراحت ذره (Relaxation Time) اطلاق شده و از رابطه زیر به دست می آید:

$$\tau^* = \frac{\rho_s x^2}{18\mu} \quad (7-1)$$

اگر سطح افقی در داخل سیال در نظر بگیریم مفهوم فیزیکی زمان استراحت را می توان زمان مورد نیاز برای کاهش سرعت افقی ذره توسط نیروی درگ به حدود ۳۶/۸ درصد مقدار اولیه اش نشان داد.

معادله (۶-۱) یک تابع نمایی بر حسب زمان است و  $u(t)$  به سمت مقداری به عنوان سرعت ته نشینی نهایی ذرات ( $u_t$ )، میل می کند:

$$u_t = \frac{\Delta\rho}{\rho_s} a\tau^* \quad (8-1)$$

همچنین مشخص شده است که زمانهای ضروری برای اینکه سرعت ذره بسیار نزدیک به سرعت ته نشینی نهایی (به ۹۹ درصد آن) برسد بسیار کوتاه هستند که در حدود میلی ثانیه می باشند. لذا در عملیات مهندسی معمول است که از زمانهای شتاب صرف نظر کنند و فرض گردد که ذرات در هر زمانی در سرعت های حدی مربوط به خود حرکت می کنند.

در میدانهای گریز از مرکز وقتی که یک ذره به طور شعاعی به سمت بیرون حرکت می کند، به طور مداوم برای حفظ افزایش سرعت نهایی خود شتاب می گیرد. بهتر است نیروی شناوری را نیز که نظیر میدان جاذبه در میدان گریز از مرکز نیز وجود دارد در محاسبه  $\tau$ ، ثابت لحاظ کنیم و داریم:

$$\tau = \frac{\Delta\rho x^2}{18\mu} \quad (9-1)$$

معادله (۸-۱) برای سرعت ته نشینی حدی به صورت زیر ساده می گردد:

$$u_t = \tau \cdot a \quad (10-1)$$

سرعت ته نشینی شعاعی در یک هیدروسیکلون ناشی از شتاب شعاعی است که با مربع سرعت مماسی ذره رابطه دارد و به طور غیر مستقیم با موقعیت شعاعی ذره ارتباط دارد. به دلیل اینکه از حرکت مماسی ذره صرف نظر نشده است سرعت مماسی ذره می تواند مساوی با مولفه مماسی میدان سرعت در همان نقطه فرض شود.

یکی از اعداد بدون بعد مورد استفاده در هیدروسیکلونها، عدد استوکس است که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$St_k = \frac{\tau \cdot v}{D} \quad (11-1)$$

که  $D$  قطر هیدروسیکلون می باشد.

گروه بدون بعد دیگر در عملکرد هیدروسیکلونها، ضریب مقاومت ( $E_u$ ) است و در اینجا به عنوان افت فشار استاتیکی ( $\Delta P$ ) از میان ورودی و خروجی سرریز سیکلون برفشار دینامیکی که از سرعت ویژه می آید، تعریف می گردد:

$$E_u = \frac{\Delta P}{\frac{\rho V^2}{2}} \quad (12-1)$$

وقتی درصد جامد خوراک در طبقه بندی ذرات موثر باشد، درصد جامد به صورت یک جز حجمی، گروه بدون بعد دیگری را به دست می دهد. یکی از اعداد بدون بعد دیگر در طبقه بندی توسط نسبت جریان ته ریز به خوراک بیان گردد:

$$R_s = \frac{U}{F} \quad (13-1)$$

که در آن  $U$  شدت جریان حجمی ته ریز و  $Q$  شدت جریان خوراک است.

#### ۱-۴-۲ اثر متقابل ذره - سیال در غلظت های بالا

با افزایش درصد جامد پالپ، فاصله بین ذرات کاهش یافته و در نتیجه ذرات شروع به برخورد با یکدیگر می نمایند.

اگر در پالپ، ذرات به طور یکنواخت توزیع نشده باشند ممکن است نتیجه این فرآیند، افزایش در سرعت خالص ته نشینی آنها باشد، زیرا در نواحی که درصد جامد کم است جریان برگشتی ناشی از جابجایی حجمی، عمده و غالب خواهد بود. این پدیده به تشکیل خوشه (Cluster Formation) معروف است و اثر آن فقط در پالپ هایی که تقریباً دارای ذرات با ابعاد یکسان هستند، قابل توجه است.

در اغلب پالپ هایی که در عمل ذراتی با اندازه های مختلف را شامل می شوند، خوشه ها به اندازه کافی دوام نمی آورند تا بر چگونگی نشست ذرات تاثیر بگذارند و در نتیجه با افزایش درصد جامد ذرات، به خاطر توزیع یکنواخت تر جریان برگشتی، سرعت ته نشینی به طور ثابت و یکنواخت کاهش می یابد.

این مسئله به رفتار تاخیری در ته نشینی ذرات (Hindered Settling Behaviour) معروف است و از سه طریق می توان به آن رسید: به صورت تصحیح قانون استوکس و با تعریف یک ضریب، با پذیرش خواص ظاهری پالپ که با خواص متناظر در سیال خالص متفاوت است، و یا از طریق بسط دادن شکل اصلاح شده معادله مشهور کارمان - کوزنی (Carman - Kozeny)