

١٠٧٤٥٧

۸۷/۱/۱۰۵۷۵۸

۸۷/۱/۳۰



دانشگاه شهید باهنر کرمان  
دانشکده فنی و مهندسی - بخش معدن

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی

---

## بررسی پارامترهای موثر بر کارآیی مدار سیکلون - ماریچ کارخانه زغالشویی اینترکربن

---

استاد راهنما:

دکتر صمد بنیسی

مشاور صنعتی:

مهندس سید محمد صلحی

مؤلف:

محمد جواد اسماعیلی

خرداد ۸۷

کتابخانه اطلاعات معدن و صنایع معدنی  
شهرک صنعتی کرمان

۱۳۸۷ / ۹ / ۲۳

۱۰۸۴۵۷



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 جواد اسماعیلی

استاد راهنما: دکتر صمد بنیسی

داور ۱: دکتر حسن حاجی امین شیرازی

داور ۲: دکتر عباس سام

داور ۳:

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی یا نماینده دانشکده: دکتر منصوری

رئیس هیئت مدیران

حق چاپ محفوظ و مخصوص به است.



(ج)

## تقدیر نامه

بر خود لازم می دانم از کلیه عزیزانی که انجام این پروژه بدون مساعدت آنها ممکن نبود تشکر نمایم. از استاد عزیزم جناب آقای دکتر نیسی که با دانش زیاد، طبع بلند و فکر پویای خود راهنمایی های ارزشمندی به بنده نموده و درس های زیادی به من آموختند تشکر می نمایم. از آقای مهندس صلحی مدیر فنی کارخانه زغالشویی اینترکربن که تجربه و توصیه های ارزشمند خود را از من دریغ ننموده و مرا در انجام این پروژه یاری نموده است قدردانی می کنم. از آقای مهندس یحیایی دانشجوی دوره دکتری فرآوری مواد معدنی دانشگاه شهید باهنر کرمان که با صبر و متانتی بالا همواره مرا راهنمایی نموده و به بنده در پیشرفت پروژه کمک های بسیاری نموده اند تشکر می کنم. در پایان از مدیران کارخانه زغالشویی اینترکربن که از این پروژه حمایت کرده و اجازه انتشار نتایج آن را دادند سپاسگزارم.

## چکیده

کارخانه زغالشویی ایترکربن که در یک کیلومتری شرق کارخانه زغالشویی زرنند واقع شده است با تناژ متوسط ۵۰ تن بر ساعت، باطله قدیمی کارخانه زغالشویی زرنند را برای دستیابی به زغال حرارتی با خاکستر متوسط ۲۵ درصد فرآوری می کند. مدار جدایش اصلی این کارخانه از ترکیب سیکلون و ماریچ تشکیل شده است. به علت آن که خوراک کارخانه، از مناطق مختلف استخر باطله کارخانه زغالشویی زرنند تامین می شود، توزیع دانه بندی و خاکستر آن دارای تغییرات زیادی است. به همین دلیل، راندمان کارخانه تحت تاثیر میزان ذرات بالای ۱۰۰ میکرون و خاکستر خوراک ورودی، دارای نوسان زیادی است. در این تحقیق تاثیر تغییرات خوراک بر کارایی سیکلون و ماریچ بررسی گردید. به منظور مدل سازی عملکرد هیدروسیکلون کارخانه زغالشویی ایترکربن بر اساس دو مدل پلیت (Plitt) و راتو (Rao)، نمونه برداری لازم در چهار مرحله انجام و داده های به دست آمده موازنه شدند. پس از کالیبره شدن مدل ها، نتایج به دست آمده از هر دو مدل در مقایسه با نتایج حاصل از نمونه برداری مستقل که در کالیبراسیون مدل مورد استفاده قرار نگرفته بود، نشان داد که پیش بینی مدل پلیت در سرریز حداکثر ۲/۹ و در ته ریز ۵/۱ درصد و پیش بینی مدل راتو نیز در سرریز حداکثر ۳/۷ و در ته ریز ۵/۲ درصد خطا به همراه داشت. پیش بینی تاثیر کاهش قطر ته ریز در کاهش میزان ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرون، توسط دو مدل پلیت و راتو به ترتیب ۲/۳٪ و ۷/۹٪ خطا به همراه داشت. بررسی کارایی ماریچ در محدوده های ابعادی مختلف نشان داد که در محدوده بالای ۱۵۰ میکرون، بیشترین کارایی (۴۴/۲ درصد) و در محدوده زیر ۱۰۰ میکرون کمترین کارایی (۹/۹۵ درصد) را دارد. درصد جامد بهینه خوراک ماریچ، ۱۹ درصد تعیین شد. با افزایش دهانه دریچه کنسانتره ماریچ های مرحله اول از ۶ به ۱۰ سانتیمتر، راندمان از ۶۷ به ۷۷/۶ درصد و خاکستر از ۲۱/۳ به ۲۵/۹ درصد افزایش یافت. همچنین این افزایش دهانه دریچه موجب افزایش ۵/۶ درصدی بازیابی آب و به دنبال آن افزایش ۱۳/۶ درصدی راندمان ذرات کوچکتر از ۱۰۰ میکرون گردید. تغییر مدار سیکلون - ماریچ از سری به موازی در شرایطی که امکان آن وجود داشت، سبب افزایش ۱۲/۵ درصدی راندمان مدار سیکلون - ماریچ و افزایش ۷/۲ درصدی راندمان کارخانه شد. افزایش تعداد مخلوط کننده ها از ۱ به ۳ واحد موجب جلوگیری از هدرروی ۴۶۲۰ تن زغالسنگ در ماه از مدار کارخانه گردید.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱- تاریخچه
۲	۲-۱- مدار کارخانه زغالشویی اینترکربن
۳	۳-۱- ضرورت انجام تحقیق
۵	۴-۱- اصول و روش های طبقه بندی ذرات
۶	۵-۱- نحوه کار هیدروسیکلون
۷	۱-۵-۱- روابط مدل Plitt برای مدل سازی عملکرد هیدروسیکلون
۹	۲-۵-۱- روابط مدل Rao برای مدل سازی عملکرد هیدروسیکلون
۱۱	۶-۱- فرآوری مواد به روش ثقلی
۱۱	۷-۱- ماریپچ
۱۲	۱-۷-۱- نیروهای وارد بر ذره در ماریپچ
۱۵	۲-۷-۱- نحوه جدایش ذرات در مقطع ماریپچ
۱۸	۳-۷-۱- مشخصات ماریپچ های کارخانه اینترکربن
۲۱	۴-۷-۱- عوامل موثر بر کارآیی ماریپچ
۲۱	۵-۷-۱- پارامترهای طراحی
۲۶	۶-۷-۱- پارامترهای عملیاتی
۲۹	۷-۷-۱- مدارهای چند مرحله ای ماریپچ
۳۴	فصل دوم: روش تحقیق
۳۵	۱-۲- بررسی خصوصیات خوراک ورودی به کارخانه
۳۵	۲-۲- تعیین توزیع دانه بندی و خاکستر خوراک سیکلون های نرمة گیری
۳۶	۳-۲- تعیین کارآیی سیکلون و حد جدایش در آن
۳۷	۴-۲- مدل سازی عملکرد هیدروسیکلون کارخانه اینترکربن
۳۸	۵-۲- مشخصات سیکلون های کارخانه
۳۸	۶-۲- تعیین توزیع دانه بندی و درصد خاکستر خوراک ورودی به ماریپچ
۳۹	۷-۲- تعیین محدوده ابعادی بهینه خوراک برای جداکننده ماریپچی
۳۹	۸-۲- ارزیابی کارآیی ماریپچ در خوراک های مختلف کارخانه

۴۰	۹-۲- بررسی کارآیی ماریپیچ در درصد جامدهای مختلف خوراک
۴۰	۱۰-۲- بررسی تاثیر عملکرد سرند ماقبل سیکلون های مرحله اول (سرند ۵ میلی متر) در کارآیی ماریپیچ
۴۱	۱۱-۲- بررسی تاثیر اندازه دهانه دریچه کنسانتره
۴۱	۱۲-۲- بررسی امکان تغییر مدار از حالت سری به موازی
۴۳	<b>فصل سوم : ارائه یافته ها و نتایج</b>
۴۴	۱-۳- تعیین توزیع دانه بندی و شرایط خوراک ورودی به کارخانه
۴۴	۲-۳- تعیین توزیع دانه بندی و خاکستر خوراک سیکلون های نرمه گیری
۴۷	۳-۳- بررسی کارآیی سیکلون های نرمه گیری
۴۸	۴-۳- مدل سازی عملکرد سیکلون با استفاده از مدل پلیت
۵۰	۵-۳- مدل سازی عملکرد سیکلون با استفاده از مدل راتو
۵۱	۶-۳- کاربرد مدل سازی هیدروسیکلون کارخانه زغال شویی ایترکربن
۵۴	۷-۳- تعیین توزیع دانه بندی و درصد خاکستر خوراک ورودی به ماریپیچ
۵۵	۸-۳- تعیین محدوده ابعادی بهینه خوراک ورودی به ماریپیچ
۵۶	۹-۳- ارزیابی کارآیی ماریپیچ با تغییر خوراک ورودی به کارخانه
۵۷	۱۰-۳- بررسی کارآیی ماریپیچ در درصد جامدهای مختلف خوراک ورودی
۵۸	۱۱-۳- تاثیر اندازه دهانه دریچه کنسانتره در کارآیی جداکننده ماریپیچی
۶۰	۱۲-۳- بررسی تاثیر سرند ماقبل سیکلون های مرحله اول (۵ میلی متر) در کارآیی ماریپیچ
۶۱	۱۳-۳- تغییر مدار سیکلون - ماریپیچ دو مرحله ای (حالت سری) به یک مرحله (حالت موازی)
۶۲	۱۴-۳- بررسی تاثیر افزایش تعداد مخلوط کننده ها
۶۴	<b>فصل چهارم : نتیجه گیری و پیشنهادات</b>
۶۵	۱-۴- نتیجه گیری
۶۷	۲-۴- پیشنهادات
۶۸	<b>فصل پنجم : فهرست منابع</b>
۷۰	<b>پیوست ها</b>
۷۱	پیوست ۱: منحنی کارآیی سیکلون های مرحله اول

- ۷۵ پیوست ۲: نتایج آزمایش های بررسی تاثیر درصد جامدهای مختلف خوراک ماریچ
- ۷۸ پیوست ۳: نتایج آزمایش های بررسی تاثیر اندازه های مختلف دهانه دریچه کنسانتره ماریچ
- ۸۱ پیوست ۴: نتایج آزمایش های بررسی مدار سیکلون - ماریچ

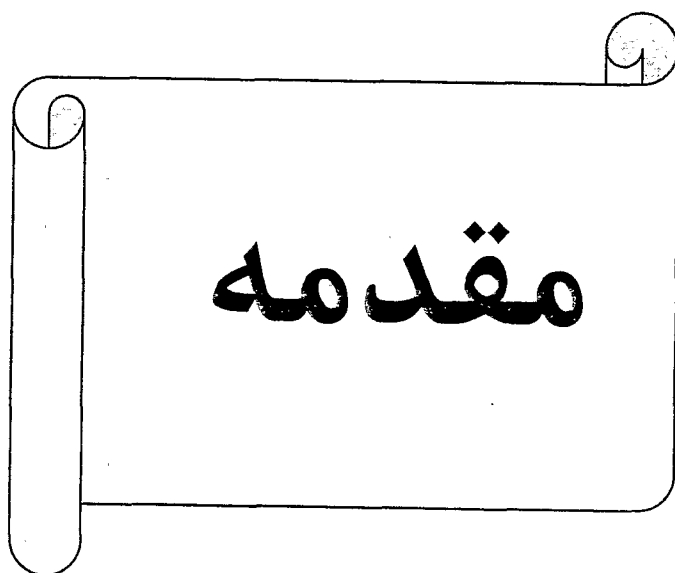


## فهرست شکل ها و جداول

صفحه	عنوان
۴	شکل ۱-۱- شمای کارخانه زغالشویی اینترکربن
۶	شکل ۲-۱- ساختمان هیدروسیکلون و نحوه حرکت پالپ در آن
۸	شکل ۳-۱- متغیرهای طراحی سیکلون
۱۲	شکل ۴-۱- وضعیت نیروهای وارد بر یک ذره در مقطع مارپیچ
۱۶	شکل ۵-۱- جدایش ذرات در مقطع مارپیچ
۱۷	شکل ۶-۱- شبیه سازی موقعیت ذرات بر اساس دانسیته و ابعاد آنها
۱۹	شکل ۷-۱- تصویر ورودی های مجزای خوراک در مارپیچ های سه شروعی کارخانه زغالشویی اینترکربن
۲۰	شکل ۸-۱- نحوه کار جعبه مخلوط کن
۲۰	شکل ۹-۱- جایگزینی دو مرحله مارپیچ با یک مارپیچ دو مرحله ای
۲۱	شکل ۱۰-۱- ساختمان جعبه خوراک دهی به مارپیچ
۲۲	شکل ۱۱-۱- رابطه بازبایی زغال با قطر مارپیچ در دورهای مختلف مارپیچ
۲۳	شکل ۱۲-۱- شمای جعبه مخلوط کن و نحوه کار آن
۲۴	شکل ۱۳-۱- مقایسه کارآیی جدایش مارپیچ در دو حالت با جعبه مخلوط کن و بدون آن
۲۵	شکل ۱۴-۱- مقایسه کارآیی مارپیچ در طول های مختلف مارپیچ
۲۶	شکل ۱۵-۱- شمای دریچه های خروجی مارپیچ
۲۸	شکل ۱۶-۱- کارآیی مارپیچ در نرخ های خوراک دهی مختلف
۳۰	شکل ۱۷-۱- مدار پر عیارکنی اولیه تنها
۳۱	شکل ۱۸-۱- مدار رافر-کلینر با بار در گردش
۳۳	شکل ۱۹-۱- مدارهای مختلف و کارآیی نسبی آنها
۴۲	شکل ۳-۲- نقاط نمونه گیری از مدار سیکلون _ مارپیچ در حالت سری
۴۲	شکل ۳-۲- نقاط نمونه گیری از مدار سیکلون _ مارپیچ در حالت موازی
۴۴	شکل ۱-۳- مقایسه منحنی دانه بندی دو نوع از خوراک ورودی به کارخانه
۴۴	شکل ۲-۳- رابطه بین میزان ذرات بزرگ تر از ۱۰۰ میکرون و خاکستر خوراک
۴۵	شکل ۳-۳- رابطه بین درصد خاکستر خوراک و راندمان کارخانه
۴۵	شکل ۴-۳- رابطه بین درصد ذرات ۱۰۰+ میکرون و راندمان کارخانه
۴۶	شکل ۵-۳- توزیع دانه بندی خوراک سیکلون های نر مه گیری

- شکل ۳-۶- درصد خاکستر دامنه های ابعاد مختلف در خوراک سیکلون
- شکل ۳-۷- منحنی کارآیی سیکلون های نرمه گیری
- شکل ۳-۸- مقایسه دانه بندی سرریز شبیه سازی شده در مدل پلیت و مقدار واقعی
- شکل ۳-۹- مقایسه دانه بندی ته ریز شبیه سازی در مدل پلیت و مقدار واقعی
- شکل ۳-۱۰- مقایسه دانه بندی سرریز شبیه سازی شده در مدل راتو و مقدار واقعی
- شکل ۳-۱۱- مقایسه دانه بندی ته ریز شبیه سازی شده در مدل راتو و مقدار واقعی
- شکل ۳-۱۲- رابطه اندازه دهانه ته ریز و میزان ذرات زیر ۷۵ میکرون بر اساس مدل پلیت
- شکل ۳-۱۳- رابطه اندازه دهانه سر ریز و میزان ذرات زیر ۷۵ میکرون بر اساس مدل پلیت
- شکل ۳-۱۴- رابطه میزان دبی حجمی خوراک و میزان ذرات زیر ۷۵ میکرون طبق مدل پلیت
- شکل ۳-۱۵- دانه بندی خوراک ورودی به جداکننده ماریپیچ
- شکل ۳-۱۶- توزیع خاکستر دامنه های ابعادی مختلف در خوراک ماریپیچ
- شکل ۳-۱۷- کارآیی جدایش و راندمان جداکننده ماریپیچ در محدوده های ابعادی مختلف
- شکل ۳-۱۸- مقایسه توزیع دانه بندی دو نوع خوراک ورودی به ماریپیچ
- شکل ۳-۱۹- راندمان و کارآیی جدایش در خوراک های مختلف ماریپیچ
- شکل ۳-۲۰- مقایسه کارآیی جدایش و راندمان ماریپیچ در درصد جامدهای مختلف خوراک
- شکل ۳-۲۱- تغییرات راندمان و خاکستر در اندازه های مختلف دهانه دریچه کنسانتره
- شکل ۳-۲۲- افزایش راندمان به ازای افزایش ۱ درصد خاکستر در اندازه های مختلف دهانه دریچه کنسانتره
- شکل ۳-۲۳- رابطه راندمان ذرات زیر ۱۰۰ میکرون با بازیابی آب به کنسانتره
- شکل ۳-۲۴- کارآیی جدایش و راندمان جداکننده ماریپیچ در زمان پارگی سرند و بعد از تعمیر آن
- شکل ۳-۲۵- تاثیر مخلوط کننده های جدید در تناژ و خاکستر ذرات روی سرند ۵ میلی متر
- جدول ۱-۱- داده های مربوط به ماریپیچ کارخانه Creek در آلمان
- جدول ۱-۲- مشخصات سیکلون کارخانه زغالشویی اینترکربن
- جدول ۳-۱- ضرایب ثابت پارامترهای مدل پلیت برای سیکلون های نرمه گیری کارخانه
- جدول ۳-۲- ضرایب ثابت پارامترهای مدل راتو برای سیکلون های نرمه گیری کارخانه زغالشویی اینترکربن
- جدول ۳-۳- راندمان مدار سیکلون ماریپیچ و راندمان کلی کارخانه در دو حالت مدار سری و موازی

## فصل اول



## ۱-۱- تاریخچه

در گذشته با توجه به بالا بودن عیار مواد معدنی و مساعدتر بودن شرایط استخراج آن و عدم کارآیی لازم کارخانه های فرآوری، باطله این کارخانه ها دارای مواد با ارزش زیادی بود. این مواد با گذشت زمان باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی عدیده ای برای صنایع گردیده اند. امروزه با توجه به کم شدن عیار و ذخیره مواد معدنی و افزایش قیمت کنسانتره این مواد و توسعه روش های فرآوری جدید با قابلیت ها و کارآیی جدایش بالاتر، توجه صنایع به سمت استفاده مجدد از این مواد جلب شده است. استفاده از این مواد به دلیل حذف هزینه های مربوط به معدنکاری از قبیل هزینه های اکتشاف، ارزیابی ذخیره، طراحی استخراج، دارای ارزش افزوده بسیار زیادی می باشند.

در ایران، کارخانه های زغالشویی معادن زغالسنگ کرمان، البرز شرقی، البرز مرکزی و البرز غربی نزدیک به ۳۰ سال است که در حال فرآوری زغالسنگ می باشند. حاصل این مدت کار این کارخانه ها، استخرهای باطله فلوتاسیون و دپوهای بزرگ باطله درشت زغالسنگ و زغالسنگ میانی است که با توجه به عدم کارآیی مناسب تجهیزات این کارخانه ها در سال های گذشته، مقدار بسیار زیادی زغالسنگ قابل بازیابی در این دپو ها انباشته شده است. با توجه به قیمت بالای زغالسنگ در بازارهای جهانی (۱۲۰ دلار بر تن زغال حرارتی با خاکستر ۲۷ - ۲۴ درصد) و نیاز روزافزون صنایع به این ماده معدنی، فرآوری مجدد این مواد با استفاده از روش های موثر و کم هزینه به منظور تولید زغالسنگ حرارتی مورد توجه قرار گرفته است.

کارخانه زغالشویی زرنند بخشی از باطله مدار فلوتاسیون کارخانه را که همراه با آب می باشد، بوسیله یک خط لوله به استخر باطله اکبرآباد منتقل می نماید. زغالسنگ موجود در این استخر به دلیل ایجاد مشکلات زیست محیطی فراوان، همواره جزو معضلات عمده کارخانه زغالشویی زرنند بوده است و با توجه به گنجایش محدود این استخر، این کارخانه در طول مدت کار خود بارها مجبور به پرداخت هزینه جهت تخلیه آن شده است. شرکت اینترکربن با تاسیس یک کارخانه زغالشویی در شهرستان زرنند استان کرمان و در کنار کارخانه زغالشویی زرنند، اقدام به استفاده از زغالسنگ موجود در استخر باطله اکبرآباد و تولید زغالسنگ حرارتی از آن نموده است.

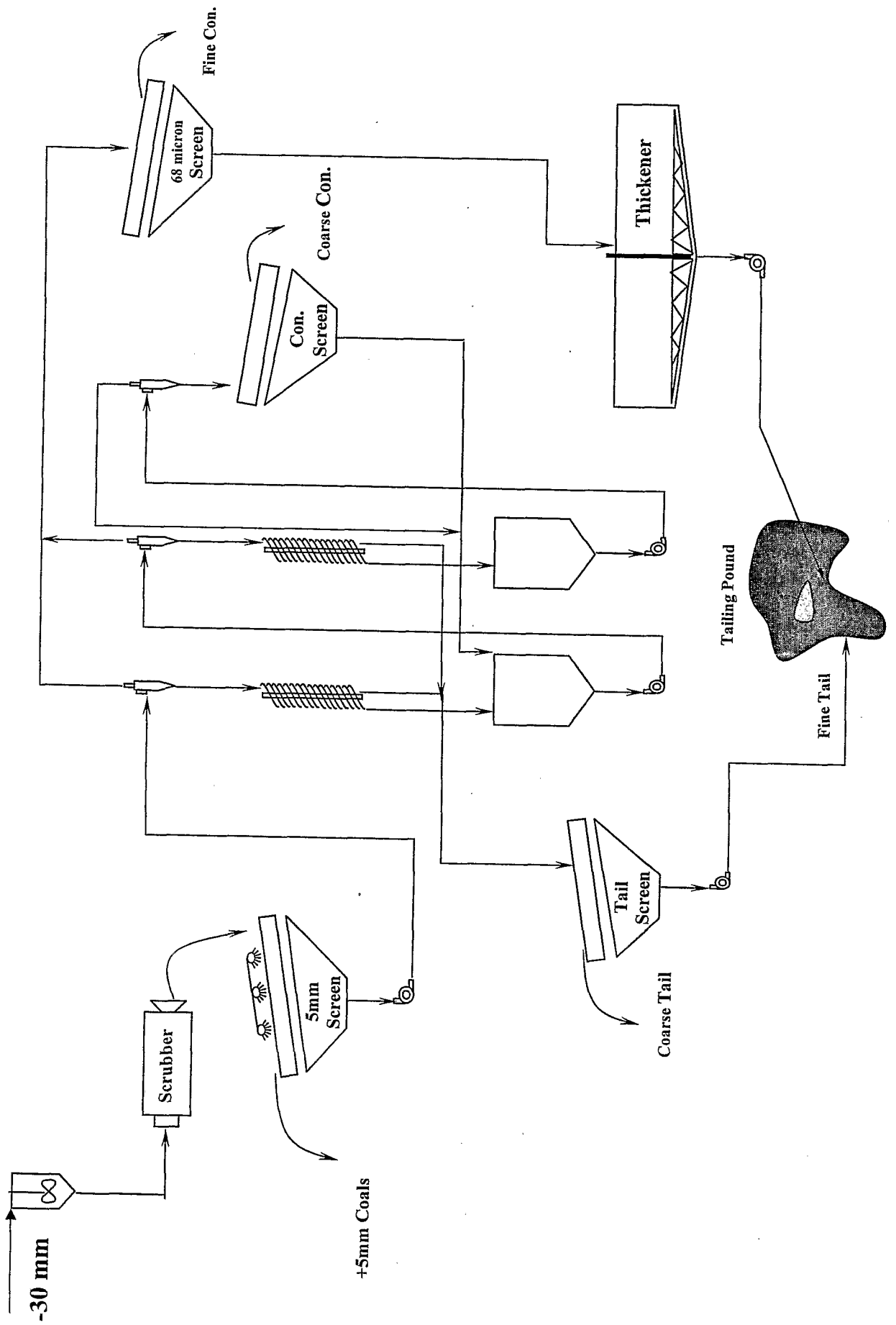
## ۲-۱- مدار کارخانه زغالشویی اینترکربن

مدار فرآوری کارخانه در شکل ۱-۱ آمده است. زغال حمل شده به کارخانه از استخر باطله کارخانه زغالشویی زرنند، ابتدا به روی سرنند ۳۰ میلیمتر منتقل می شود تا ذرات کوچک تر از ۳۰

میلیمتر در زیر سرنند وارد بونکر خوراک دهی شده و به وسیله خوراک دهنده زیر آن به مخلوط کننده (همزن) منتقل شود. در همزن با اختلاط آب و زغال، پالپی از زغال ساخته می شود. سپس پالپ زغال جهت آزاد شدن بیشتر ذرات به هم جسیده، وارد مخزن استوانه ای گردان به نام اسکرابر (Scrubber) می شود. پالپ همگن شده به روی سرنند ۵ میلی متر منتقل می شود. مواد زیر سرنند به درون مخزن خوراک دهی سیکلون های نرمه گیری پمپ می شود و مواد روی سرنند، به عنوان باطله محسوب شده و از مدار خارج می شوند. به دلیل اینکه ماریچ برای ذرات نرمه (کوچکتر از ۱۵۰ میکرون) کارآیی مطلوبی ندارد، این سیکلون ها به عنوان نرمه گیر عمل می کنند تا ذرات نرمه وارد ماریچ نشود. ته ریز سیکلون ها وارد مخزن خوراک دهی ماریچ های مرحله اول شده تا از طریق آن به ۶ ماریچ مرحله اول به طور یکنواخت خوراک دهی شود. محصول و میانی ماریچ های مرحله اول وارد یک مخزن شده و به سیکلون های مرحله دوم پمپ می شود. ته ریز این سیکلون ها وارد مخزن خوراک دهی ماریچ های مرحله دوم شده تا از طریق آن به ۴ ماریچ مرحله دوم به طور یکنواخت خوراک دهی شود. محصول و میانی این ماریچ ها نیز وارد یک مخزن شده، سپس به سیکلون آب گیری پمپ می شود. مدار دو مرحله ای سیکلون - ماریچ به صورت پرعیارکنی اولیه - پرعیارکنی ثانویه می باشد تا محصولی مرغوب با خاکستر کمتر از ۳۰ درصد را تولید کند. ته ریز سیکلون آب گیری به روی سرنند ۳۰۰ میکرون وارد می شود. روی این سرنند به عنوان محصول نهایی درشت محسوب می شود و زیر آن به مخزن محصول و میانی ماریچ های مرحله اول وارد می شود تا مجدداً فرآوری گردد. سرریز سیکلون آب گیری نیز وارد مخزن ماریچ های مرحله اول می شود تا مجدداً فرآوری گردد. سرریز سیکلون های نرمه گیری مرحله اول و دوم نیز به روی یک سری سرنند ۶۸ میکرون ریخته می شود، که مواد روی آن به عنوان محصول نهایی ریز بوده و زیر آن به تیکنر منتقل می شود. ته ریز تیکنر به سد باطله پمپ می شود. باطله ماریچ های مرحله اول و دوم نیز به روی سرنند ۳۰۰ میکرون ریخته می شود، که سرریز آن به عنوان باطله درشت دپو می شود و ته ریز آن به سد باطله پمپ می شود.

### ۳-۱- ضرورت انجام تحقیق

مهم ترین بخش مدار کارخانه زغال شویی اینترکربن، مدار سیکلون - ماریچ است که در دو مرحله خوراک ورودی را فرآوری می کند. مدل سازی به منظور پیش بینی عملکرد تجهیزات گوناگون در اثر تغییرات احتمالی در پارامترهای آنها و برای جلوگیری از انجام عملیات سعی و



شکل ۱-۱- شمای کارخانه زغالشویی ایترکرین

خطایی پرهزینه و زمان بر انجام می شود. از مدل های رایج برای هیدروسیکلون، پلیت (Plitt) و راثو (Rao) می باشند. به دلیل نقش مهم سیکلون های نرمه گیری کارخانه زغالشویی اینترکربن در کیفیت محصول نهایی کارخانه، پیش بینی عملکرد آنها در اثر تغییرات احتمالی حائز اهمیت است. عملکرد ماریچ ها از عوامل عملیاتی متعددی تاثیر می پذیرد. بررسی تاثیر این عوامل بر راندمان و کارآیی جدایش در ماریچ، موجب تولید محصولی مناسب از ماریچ می شود. بررسی عملکرد مدار سیکلون - ماریچ و تاثیر آن بر راندمان کلی کارخانه بسیار حائز اهمیت می باشد. این تحقیق با هدف بررسی عوامل موثر بر عملکرد ماریچ، مدار سیکلون - ماریچ و مدل سازی عملکرد سیکلون های نرمه گیری کارخانه زغالشویی اینترکربن انجام گرفت.

#### ۱-۴- اصول و روش های طبقه بندی ذرات

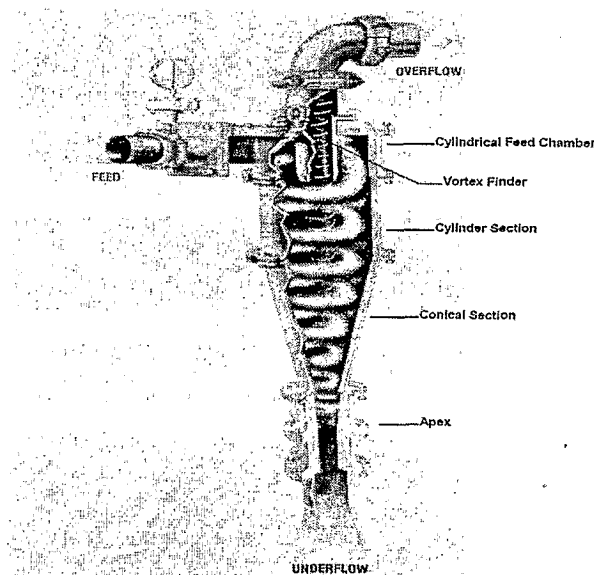
کاربرد سرنها در صنعت به طور رایج در حد ۹۰۰ میکرون تا ۴۰۰ میلیمتر است و طبقه بندی مواد در ابعاد کوچکتر از این محدوده به روش مستقیم (سرنده کردن) بازدهی مناسبی ندارد، لذا برای طبقه بندی این نوع مواد از روش غیر مستقیم استفاده می شود. در این روش، مخلوطی از دانه های جامد با ابعاد مختلف در وسیله ای به نام کلاسیفایر بر مبنای سرعت نسبی حرکت دانه ها در یک سیال، به بخش هایی با ابعاد محدودتر تقسیم می شود. البته باید به این نکته توجه کرد که علاوه بر ابعاد، عوامل دیگری از قبیل چگالی دانه های جامد، نیروی مقاومت سیال در مقابل حرکت آن ها (که خود تابعی از ابعاد و شکل دانه ها و همچنین مشخصات سیال است) نیز بر روی سرعت حرکت دانه ها در سیال تاثیر می گذارند [۱].

یکی از این کلاسیفایرها، هیدروسیکلون است. هیدروسیکلون برای انجام عملیات طبقه بندی قبل از سال ۱۸۹۰ معرفی شد. اما به طور مشخص در سال ۱۸۹۱ در آمریکا به عنوان وسیله ای برای جدایش ماسه از آب مورد استفاده قرار گرفت. با وجود سادگی ساختار هیدروسیکلون، بیش از چند سال نیست که مکانیزم عملیات آن مشخص شده است [۲]. اساسی ترین پارامتر هیدروسیکلون قطر آن است که با افزایش آن حد جدایش افزایش می یابد [۱]. در صنعت زغال از هیدروسیکلون برای نرمه گیری مواد، جدا کردن مواد دانه درشت از یک سیال، غلیظ کردن پالپ و شستشوی زغال ریز دانه استفاده می شود. از آنجائیکه اغلب دستگاه هایی که براساس روش ثقلی مواد را از یکدیگر جدا می کنند در دانه بندی محدود از کارآیی بالاتری برخوردار هستند می توان با استفاده از سیکلون قبل از یک جداکننده ثقلی مانند ماریچ، خوراک اولیه مناسب ماریچ تهیه نمود [۳].

از سال ۱۹۵۰ میلادی، مدل های ریاضی متعددی برای تشریح کار سیکلون ها بر اساس مشخصات هندسی و پارامترهای عملیاتی آن ارائه شد [۲]. از کامل ترین مدل ها، مدل های ارائه شده توسط پلیت (Plitt) و راثو (Rao) به ترتیب در سال های ۱۹۷۶ و ۱۹۷۸ می باشد [۴]. امروزه مدل سازی کار سیکلون های صنعتی بر اساس این دو مدل با کمک نرم افزارهای کامپیوتری و پیش بینی تغییرات کارآیی سیکلون ها با تغییر پارامترهای مختلف امری رایج و ضروری است.

### ۱-۵- نحوه کار هیدروسیکلون

خوراک اولیه تحت فشار از مسیر دهانه ورودی به طور مماسی وارد هیدروسیکلون می شود و سپس در مسیر دایره ای شروع به چرخش می کند (شکل ۱-۲). با ورود پالپ به داخل هیدروسیکلون، ذرات تحت تاثیر نیروهای مختلفی قرار می گیرند، که مهم ترین این نیروها، نیروی گریز از مرکز و نیروی مقاومت سیال می باشند. جهت نیروی گریز از مرکز به سمت دیواره سیکلون است که طی آن ذرات درشت و با جرم مخصوص زیاد بیشتر تحت تاثیر این نیرو واقع شده و به سمت دیواره حرکت می کنند و در امتداد جداره مخروطی به سمت دهانه ته ریز هدایت شده و سپس از آن خارج می شوند. جهت نیروی مقاومت سیال از خارج به داخل است و ذرات را با سرعت ته نشینی کم به محور مرکزی هیدروسیکلون هدایت می کند تا از طریق دهانه سرریز خارج شوند. بدیهی است که احتمال خروج ذراتی که تاثیر این دو نیرو بر آن ها یکسان است، از دو دریچه به یک اندازه می باشد [۱ و ۵].



شکل ۱-۲- ساختمان هیدروسیکلون و نحوه حرکت پالپ در آن [۶]



## ۱-۵-۱- روابط مدل Plitt برای مدل سازی عملکرد هیدروسیکلون [۷]

یکی از کاملترین و رایج ترین مدل‌های ریاضی هیدروسیکلون، مدل پلیت (Plitt) است که در سال ۱۹۷۶ میلادی در مقاله ای با عنوان "مدل ریاضی هیدروسیکلون ها"، توسط پلیت ارائه شده است. پلیت رابطه ریاضی مربوط به بازیابی مواد در ته ریز را با در نظر گرفتن دو پدیده طبقه بندی و دنباله روی به صورت زیر ارائه کرد:

$$R_u = R_f + (1 - R_f) \left(1 - e^{-0.693 \left(\frac{d_i}{d_{50c}}\right)^m}\right) \quad \text{رابطه (۱-۱)}$$

که در آن  $R_u$ ،  $R_f$ ،  $d_i$ ،  $d_{50c}$  و  $m$  به ترتیب درصد مواد راه یافته به ته ریز، میزان بازیابی آب به ته ریز، اندازه ذرات، حد جدایش تصحیح شده و کیفیت جدایش می باشند.

متغیرهای مدل پلیت به دو دسته تقسیم می شوند که عبارتند از:

## ❖ متغیرهای وابسته

۱- حد جدایش تصحیح شده ( $d_{50c}$ )

۲- فشار ( $P$ )

۳- تقسیم حجمی جریان ( $S$ )

۴- کیفیت جدایش ( $m$ )

## ❖ متغیرهای مستقل یا طراحی

۱- مشخصات هندسی سیکلون شامل قطر سیکلون ( $D_c$ )، قطر پیدا کننده گرداب ( $D_o$ )، قطر

ته ریز ( $D_u$ )، قطر ورودی ( $D_i$ )، (وقتی ورودی دایره ای شکل نباشد، اندازه ورودی معادل

شعاع دایره ای با همان مساحت در نظر گرفته می شود) (شکل ۱-۲).

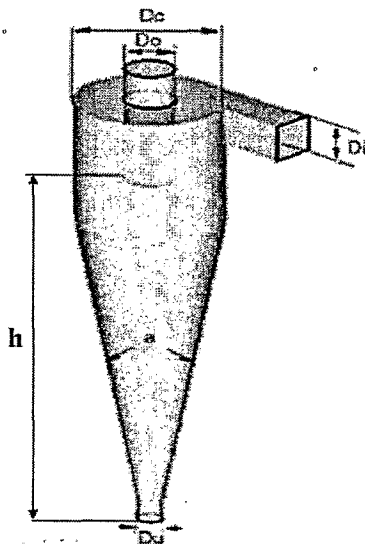
۲- ترکیبی از عوامل بالا،  $D_o^2 + D_u^2$ ،  $D_u/D_o$

۳- ارتفاع آزاد پیدا کننده گرداب ( $h$ )، (فاصله بین انتهای پیدا کننده گرداب و بالای ته ریز،

که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است).

مسئله اصلی مدل پلیت این است که تاثیر ابعاد ذرات خوراک در آن به طور مستقیم در نظر گرفته نشده است. در این مدل به طور کلی درصد جامد، تناژ جامد و دانسیته جامد خوراک و همچنین دانسیته سیال که در تعیین دبی حجمی خوراک و دانسیته پالپ به کار می روند، پارامترهایی از

خوراک هستند که در روابط مدل در نظر گرفته شده اند. انتخاب شکل توابع صرفاً بر اساس نتایج رگرسیون خطی چند گانه بوده است.



شکل ۱-۳- متغیرهای طراحی سیکلون [۸]

آخرین ویرایش مدل پلیت، توسط Flintoff و همکاران در سال ۱۹۸۷ ارائه گردید [۴]. این معادلات عبارتند از:

$$d_{50} = F_1 \frac{50.5 D_c^{0.46} D_i^{0.6} D_o^{1.21} e^{0.063\phi}}{D_u^{0.71} h^{0.38} Q^{0.45} (\rho_s - 1)} \quad (2-1)$$

$$P = F_2 \frac{1.88 Q^{1.78} e^{0.0055\phi}}{D_c^{0.37} D_i^{0.94} h^{0.28} (D_u^2 + D_o^2)^{0.87}} \quad (3-1)$$

$$S = F_3 \frac{1.9 \left(\frac{D_u}{D_o}\right)^{3.31} h^{0.54} (D_u^2 + D_o^2)^{0.36} e^{0.0054\phi}}{H^{0.24} D_c^{1.11}} \quad (4-1)$$

$$m = 1.94 F_4 e^{-1.58 R_v} \times \left(\frac{D_c^2 h}{Q}\right)^{0.15} \quad (5-1)$$

در این معادلات، واحد  $D_c, D_o, D_u, D_i, h$  سانتیمتر،  $Q$  (دبی حجمی خوراک) لیتر بر دقیقه،  $\varphi$  (درصد حجمی جامد خوراک) درصد،  $d_{50c}$  میکرون،  $\rho_s$  (دانسیته جامد) گرم بر سانتیمتر مکعب و  $P$  کیلو پاسکال می باشد. ضرایب  $F_1, F_2, F_3$  و  $F_4$  ضرایب کالیبراسیون هستند که از داده های در دسترس محاسبه می شوند. علاوه بر چهار معادله بالا می توان معادله ای هم برای تعیین میزان بازیابی آب خوراک به ته ریز به صورت زیر بیان نمود:

$$R_f = \frac{S - \frac{R_s \times \varphi}{100}}{1 - \frac{\varphi}{100}} \quad (6-1)$$

که در آن  $R_s$  بازیابی ذرات به ته ریز،  $S$  دبی حجمی ته ریز به دبی حجمی سرریز،  $\varphi$  درصد حجمی جامد خوراک می باشد.

#### ۱-۵-۲- روابط مدل Rao برای مدل سازی عملکرد هیدروسیکلون [۴ و ۹]

یکی دیگر از مدل های رایج هیدروسیکلون، مدل راتو (Rao) می باشد که در سال ۱۹۷۸ میلادی ارائه شده است. مدل راتو دارای متغیرهای وابسته و مستقل می باشد.

❖ متغیرهای وابسته

$$1- \text{ عدد اویلر (EV) } \frac{Q}{D_c^2 \sqrt{\frac{P}{\rho_p}}}$$

$$2- \text{ حد جدایش بدون بعد } \frac{D_{50c}}{D_c}$$

$$3- \text{ بازیابی آب به ته ریز } R_f$$

$$4- \text{ بازیابی حجمی پالپ خوراک به ته ریز } R_v$$

❖ متغیرهای عملیاتی و طراحی (مستقل)

۱- برای در نظر گرفتن نیروی گریز از مرکز حاصل ضرب عدد اویلر و عدد فروید

$$\left( \frac{P}{\rho_p g D_c} \right)$$

عامل مناسب تشخیص داده شد.

۲- فاکتور ته نشینی با مانع  $\lambda$  (نسبت  $\frac{V_H}{V_T}$ : نسبت سرعت حدی با مانع و آزاد) برای در نظر

گرفتن تاثیر درصد جامد خوراک بر  $d_{50c}$  انتخاب شد.

$$3- \text{ قطر سیکلون (} D_c \text{)}$$

۴- قطر پیداکننده گرداب بدون بدون بعد  $\left(\frac{D_o}{D_c}\right)$

۵- قطر ته ریز بدون بعد  $\left(\frac{D_u}{D_c}\right)$

۶- قطر ورودی بدون بعد  $\left(\frac{D_i}{D_c}\right)$

۷- طول بدون بعد بخش استوانه ای  $\left(\frac{L_c}{D_c}\right)$

۸- زاویه مخروط  $\theta$  (درجه)

برای در نظر گرفتن الگوی جریان پیچیده داخل سیکلون به واسطه درصد جامد بالای مواد، فاکتور ته نشینی با مانع ( $\lambda$ ) که با درصد حجمی جامد خوراک ( $C_v$ ) مربوط است، با رابطه ساده شده زیر

$$\lambda = \frac{C_v}{(1 - C_v)^3} \quad \text{مورد استفاده قرار گرفت.} \quad (7-1)$$

شکل ساده شده معادله ۷-۱ که مناسب برای درصد جامدهای پایین می باشد به صورت زیر است.

$$\lambda = \frac{10^{1.82C_v}}{8.05[1 - C_v]^2} \quad (8-1)$$

چهار معادله اصلی این مدل عبارتند از:

$$\frac{Q}{D_c^2 \sqrt{\frac{P}{\rho_p}}} = K_{Q_o} (D_c^{-0.1}) \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{0.68} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0.45} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0.2} \theta^{-0.1} \quad (9-1)$$

$$\frac{D_{50c}}{D_c} = K_{d_o} (D_c^{-0.65}) \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{0.52} \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{-0.47} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-0.5} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0.2} \theta^{0.15} \left(\frac{P}{\rho_p g D_c}\right)^{-0.22} \lambda^{0.93} \quad (10-1)$$

$$R_f = K_{W_o} \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{-1.19} \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{2.40} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-0.5} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0.22} \theta^{-0.24} \left(\frac{P}{\rho_p g D_c}\right)^{-0.53} \lambda^{0.27} \quad (11-1)$$

$$R_v = K_{V_o} \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{-0.94} \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{1.83} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-0.25} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0.22} \theta^{-0.24} \left(\frac{P}{\rho_p g D_c}\right)^{-0.31} \quad (12-1)$$