Archive of SID

نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"

Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME)

دوره چهارم، شماره هشتم، سال 8355، صفحه 33 تا 33

Vol. 4, No. 8, 2009, pp.23-30

بررسی کارآیی هیدروسیکلون با اندازه‌گیری زاویه چتر خروجی ته‌ریز آن با استفاده از پردازش تصویر

؛ علی باده‌نوش[3*] محسن کریمی[8]؛ علی دهقانی[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد. Email: karimimp@gmail.com

2- استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد. Email: a.dehghani@yazduni.ac.ir

3- دانشکده مهندسی، گروه نساجی، دانشگاه یزد.

(دریافت 83 اردیبهشت 8355 ، پذیرش 81 دی 8355)

چکیده

هیدروسیکلون یکی از موثرترین وسایل دانه بندی در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی است. این دستگاه نسبت به تغییرات پارامترهای عملیاتی بسیار حساس است. با توجه به زمان ماند کوتاه مواد در هیدروسیکلون، پایش (Monitoring) آن می‌تواند نقش چشمگیری در بهبود کارآیی آن داشته باشد. معمولاً از معیارهای حد جدایش، دقت جدایش و میزان بازیابی آب به ته‌ریز، به عنوان عوامل ارزیابی کارآیی هیدروسیکلون استفاده می‌شود. از زاویه چتر ته‌ریز نیز می‌توان کارکرد هیدروسیکلون را بررسی کرد. در این تحقیق با استفاده از شیوه پردازش تصویر، به اندازه‌گیری زاویه چتر در ته‌ریز هیدروسیکلون پرداخته شده است. سپس با کمک روش‌های آماری، پارامترهای موثر بر این زاویه مشخص شدند و با برازش توابع مناسب، ارتباط بین زاویه چتر، حد جدایش، دقت جدایش و بازیابی آب به ته‌ریز مشخص گردید. نتایج نشان دادند که می‌توان از شیوه پردازش تصویر به عنوان روشی قابل اطمینان در بررسی کار هیدروسیکلون استفاده کرد.

کلمات کلیدی

هیدروسیکلون، زاویه چتر ته‌ریز، پردازش تصویر، حد جدایش، بازیابی آب به ته‌ریز، دقت جدایش

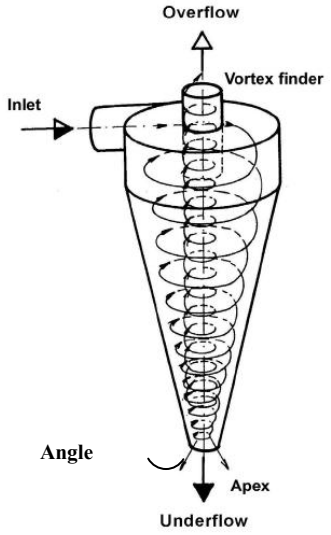
* عهده‌دار مکاتبات

www.SID.ir

Archive of SID

8- مقدمه

هیدروسیکلون یکی از کارآمدترین وسایل طبقه‌بندی است که کاربرد وسیعی در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی پیدا کرده است. هیدروسیکلون‌ها با وجود ظرفیت زیاد، حجم کمی را اشغال می‌کنند، و دارای راندمان جدایش خوبی هستند. این دستگاه‌ها با استفاده از نیروی گریز از مرکز، در یک محیط سیال، ذرات را بر اساس اندازه (یا چگالی) طبقه‌بندی می‌کنند. ویژگی‌های اصلی هیدروسیکلون در شکل 1 نشان داده شده است [1].



شکل 8. اجزای اصلی هیدروسیکلون و چگونگی عملکرد آن [8]

پالپ خوراک، که با فشار و به صورت مماسی وارد بخش استوانه‌ای هیدروسیکلون می‌شود، تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز و مقاومت سیال قرار می‌گیرد. ذرات ریز یا سبک و میزان زیادی آب با کمک ستون هوایی که در بخش مرکزی تشکیل می‌شود، به سمت محور حرکت می‌کنند و از سرریز خارج می‌شوند. ذرات درشت یا چگال به سمت کناره‌ها حرکت می‌کنند و همراه با مقداری آب، از جریان رو به پایین ته‌ریز، خارج می‌شوند. اندازه ذراتی که احتمال یکسان برای حضور در سرریز یا ته‌ریز دارند، معادل حد جدایش هیدروسیکلون در نظر گرفته می شود [2].

یکی از پارامترهایی که می‌تواند جهت بررسی کارآیی هیدروسیکلون مورد استفاده قرا گیرد، زاویه چتر تشکیل شده در حین خروج مواد از ته‌ریز است. چنانکه عملکرد هیدروسیکلون به صورت صحیح انجام شود، این چتر به صورت یک مخروط تو خالی در می‌آید [3]. هنگامی که میزان مواد خروجی ته‌ریز بیش از حد مجاز شود، این چتر از بین رفته و هیدروسیکلون در وضعیت تخلیه طنابی کار خواهد کرد. در این حالت امکان انتقال ذرات درشت به سرریز بیشتر می‌شود [4].

وان دونتر[1] و همکاران [5] با استفاده از آنالیز زاویه چتر به بررسی نحوه کار هیدروسیکلون پرداخته‌اند. آنها با تصویربرداری از ته‌ریز، سرعت پالپ خروجی را پیش بینی کرده‌اند، و از سرعت محاسبه شده، برای تخمین دبی ته‌ریز استفاده کرده‌اند. هدف اصلی کار آنها توضیح ریاضی زاویه چتر با استفاده از تصویربرداری بوده است.

دونسکوی[2] و همکاران [6] از شیوه جدیدی برای مدل‌سازی هیدروسیکلون استفاده کرده‌اند. آنها با کاربرد روش پردازش تصویر، که بر مبنای شناخت بافت کانی‌ها می‌باشد، به شناسایی کانی‌های با چگالی یکسان در هر اندازه مشخص پرداخته‌اند. در این شیوه، خوراک ورودی به هیدروسیکلون شبیه سازی شده است. آنها به منظور اعتبار سنجی کار خویش، از آزمایش‌هایی در مقیاس نیمه صنعتی، در شرایط مختلف فشار و درصد جامد، استفاده کرده‌اند. از پردازش تصویر در صنایع معدنی، در مطالعات آماری مقاطع نازک، تعیین دانه‌بندی ذرات، بررسی درجه آزادی و تعیین عیار استفاده می‌شود. در حال حاضر در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی از اندازه‌گیری زاویه چتر به عنوان یک پارامتر برای بررسی عملکرد هیدروسیکلون استفاده نمی‌شود. در حالیکه اندازه‌گیری این زاویه با استفاده از روش پردازش تصویر، دارای این مزیت است که علاوه بر پایش عملکرد این دستگاه، خطاهای انسانی و آزمایشگاهی (خطاهای حین نمونه‌گیری، تجزیه‌سرندی به خصوص در اندازه‌های کوچک) که در حین بررسی کارآیی هیدروسیکلون به وجود می‌آید، به حداقل ممکن خواهد رسید. همچنین استفاده از این روش از لحاظ عملی آسان‌تر بوده و با سرمایه‌گذاری اندک، تنها با نصب دوربین مناسب و تهیه نرم‌افزار مربوطه قابل انجام است.

در این پژوهش با تغییر پارامترهای هندسی و عملیاتی هیدروسیکلون، به تصویربرداری از چتر ته‌ریز هیدروسیکلون در شرائط مختلف پرداخته شد. سپس با استفاده از پردازش تصاویر، زاویه چتر در هر آزمایش محاسبه گردید. آنگاه رابطه بین زاویه چتر ته‌ریز و دیگر پاسخ‌های سیستم تعیین شد.

3- انجام آزمایش ها

پارامترهای موثر بر عملکرد هیدروسیکلون را می‌توان به دو دسته پارامترهای طراحی و پارامترهای عملیاتی تقسیم بندی کرد. در این پژوهش با توجه به امکانات آزمایشگاهی موجود،

www.SID.ir

Archive of SID

تاثیر پارامترهای عملیاتی شامل، افت فشار و درصد جامد، و پارامترهای هندسی شامل، قطر سرریز و قطر ته‌ریز، در دو سطح بررسی شدند. دو سطح انتخاب شده برای هر پارامتر سطوح حداقل و حداکثر این پارامترها با توجه به تجهیزات آزمایشگاهی موجود است. از هیدروسیکلون استاندارد موزلی با قطر 75 میلیمتر و از یک نمونه بوکسیت (d_{80} برابر 121 میکرون) به عنوان خوراک ورودی برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. طراحی آزمایش‌های مورد نظر، همراه با مقادیر اندازه‌گیری شده حد جدایش، دقت جدایش، بازیابی آب به ته‌ریز و زاویه چتر، برای هر آزمایش در جدول 1 نشان داده شده است.

چگونگی انجام آزمایش‌ها در شکل 2 نمایش داده شده است. در ابتدا 75 لیتر پالپ با درصد جامد مشخص در مخزن مورد نظر تهیه شد. سپس برای رسیدن به شرایط پایدار، هیدروسیکلون به مدت 5 دقیقه در شرایط مشابه آزمایش کار می‌کرد. بعد از گذشت 5 دقیقه پس از عکس برداری از چتر ته‌ریز، به مدت 31 ثانیه از سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون نمونه برداری شد. برای عکس برداری از دوربینی با دقت 3/2 مگاپیکسل با قابلیت تنظیم خودکار و بزرگنمایی سه برابر استفاده شد.

پس از انجام هر آزمایش، نمونه‌های گرفته شده فیلتر، خشک و وزن شدند و به منظور مطالعه ابعادی هر کدام از این جریان‌ها، نمونه‌های فوق با روش آنالیز لیزری بررسی شدند. بعد از تعیین توزیع ابعادی نمونه‌های سرریز و ته‌ریز، منحنی‌های جدایش هر آزمایش رسم شد و حد جدایش برای هر آزمایش تعیین شد.

3- تعیین زاویه راس چتر ته‌ریز

در این تحقیق برای تعیین ابعاد چتر هیدروسیکلون و محاسبه زاویه راس چتر، از روش پردازش تصویر استفاده شده است. به این منظور با استفاده از یک دوربین تصویربرداری دیجیتال، از چتر در هنگام آزمایش و در شرایط مختلف عکس برداری شد. برای تشخیص چتر از تصویر زمینه، نیاز به تمایز بارز رنگ چتر با محیط اطراف وجود دارد. بنابراین شرایط نوری در هنگام تصویر برداری باید به نحوی انتخاب شوند که کنتراست بالایی بین چتر و محیط زمینه در تصویر مورد نظر وجود داشته باشد. با استفاده از چنین تصویری امکان مجزا کردن چتر از بقیه تصویر به وسیله تعیین عدد دروازه‌ای[3] در نرم افزار MATLAB بوجود می‌آید.

در این مرحله ابعاد چتر در تصویر باینری (دو دویی) ایجاد گردید. آنگاه با در نظر گرفتن پیکسل‌های تصویر به عنوان واحد طول، و شمارش آنها توسط برنامه نوشته شده، ابعاد تصویر محاسبه و اندازه‌گیری می‌گردد. در شکل 3 تصویر تهیه شده از آزمایش شماره 7 به همراه تصویر باینری آن با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به در نظر گرفتن هر پیکسل به عنوان واحد اندازه دقت، اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در این روش در حد پیکسل تصویر مورد نظر، خواهد بود. با استفاده از این روش، زاویه راس چتر در حالت‌های مختلف محاسبه شده است، که نتایج آن در جدول 1 نشان داده شده است.

1- تحلیل نتایج

در اکثر فرآیندهای مهندسی پارامترهای زیادی موثرند. شناخت تعداد و میزان تاثیر هر یک از این پارامترها می‌تواند در طراحی بهینه و اقتصادی فرآیند، مورد استفاده قرار گیرد. تعیین پارامترهای موثر و میزان تاثیر آنها نیازمند شناخت فرآیند و استفاده از روش‌های دقیق آماری برای تحلیل آزمایش‌ها است[7].

در این پژوهش، پارامترهای افت فشار، درصد جامد، قطر سرریز و قطر ته‌ریز به عنوان فاکتورهای تاثیر گذار بر زاویه چتر انتخاب شده‌اند. به منظور بررسی چگونگی تاثیر هر یک از این پارامترها بر زاویه چتر تشکیل شده در ته‌ریز هیدروسیکلون، از نرم افزار Minitab 14 استفاده شد.

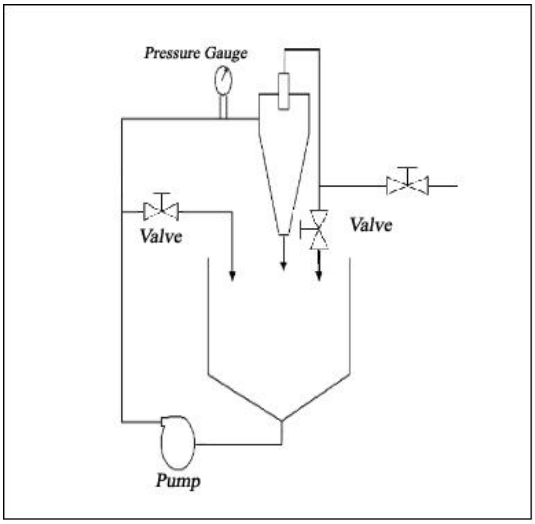
در شکل 4 تاثیر پارامترهای اصلی بر زاویه چتر مشخص شده است؛ همانگونه که از این شکل مشخص است، افزایش فشار و افزایش قطر ته‌ریز باعث افزایش زاویه چتر شده‌اند، در حالیکه افزایش درصد جامد و افزایش قطر سرریز باعث کاهش زاویه چتر شده‌اند. به عنوان مثال در صورتی که قطر سرریز از 13 میلیمتر به 25 میلیمتر افزایش پیدا کند، زاویه چتر از 72 به 58 درجه کاهش پیدا خواهد کرد. همچنین با افزایش درصد جامد به میزان 8٪ زاویه راس چتر تشکیل شده در ته‌ریز هیدروسیکلون از 75 به 55 درجه کاهش پیدا خواهد کرد. به منظور بررسی دقیق‌تر اثر همزمان پارامترها بر زاویه چتر، در شکل 5 تاثیر متقابل پارامترها بر پاسخ نشان داده شده است.

www.SID.ir

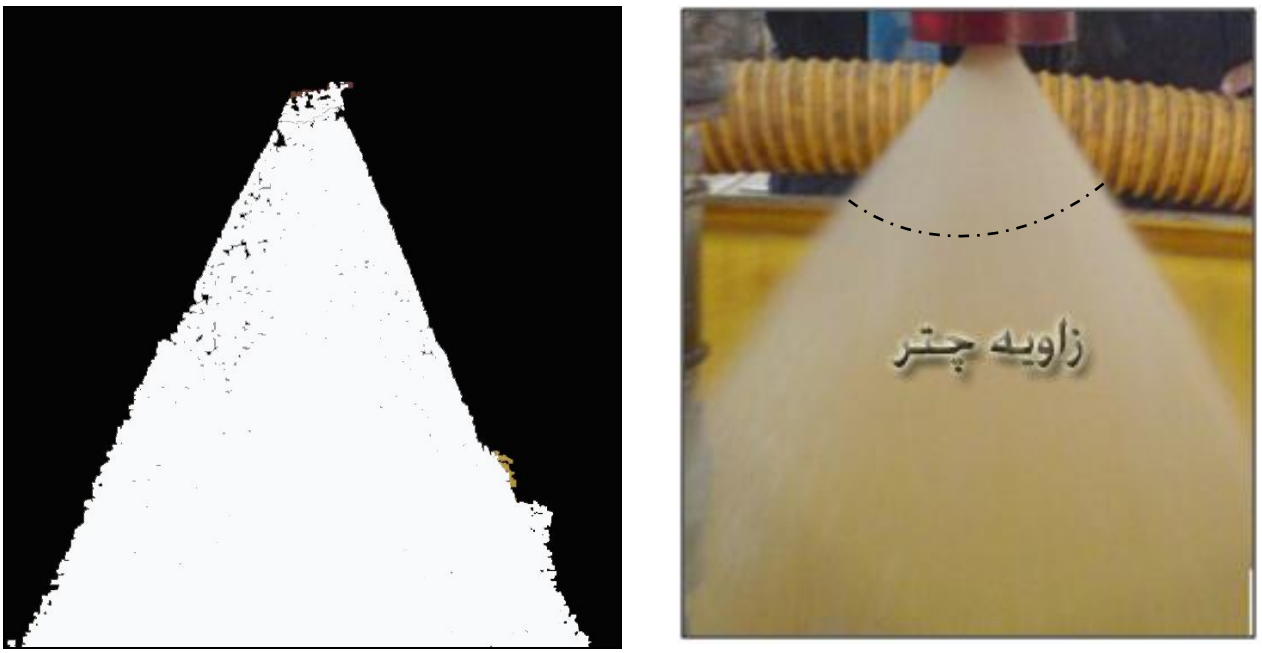
Archive of SID

جدول 8: طرح انجام آزمایش‌ها به همراه پاسخ‌های سیستم

ردیف	افت فشار (psi)	درصد جامد	قطر سرریز (mm)	قطر ته‌ریز (mm)	زاویه چتر (درجه)	حد جدایش (µm)	بازیابی آب به ته‌ریز	دقت جدایش
1	15	8	13	21	76/47	5/43	1/438	1/32
2	21	8	25	12/5	61/63	12/52	1/866	3/64
3	15	4	13	21	73/79	3/24	1/671	1/54
4	21	4	25	21	86/26	8/56	1/414	1/88
5	21	4	13	12/5	71/72	2/68	1/541	1/67
6	15	8	25	12/5	24/74	13/33	1/111	2/78
7	15	4	13	12/5	67/14	7/92	1/567	1/97



شکل 3: شیوه انجام آزمایش‌ها

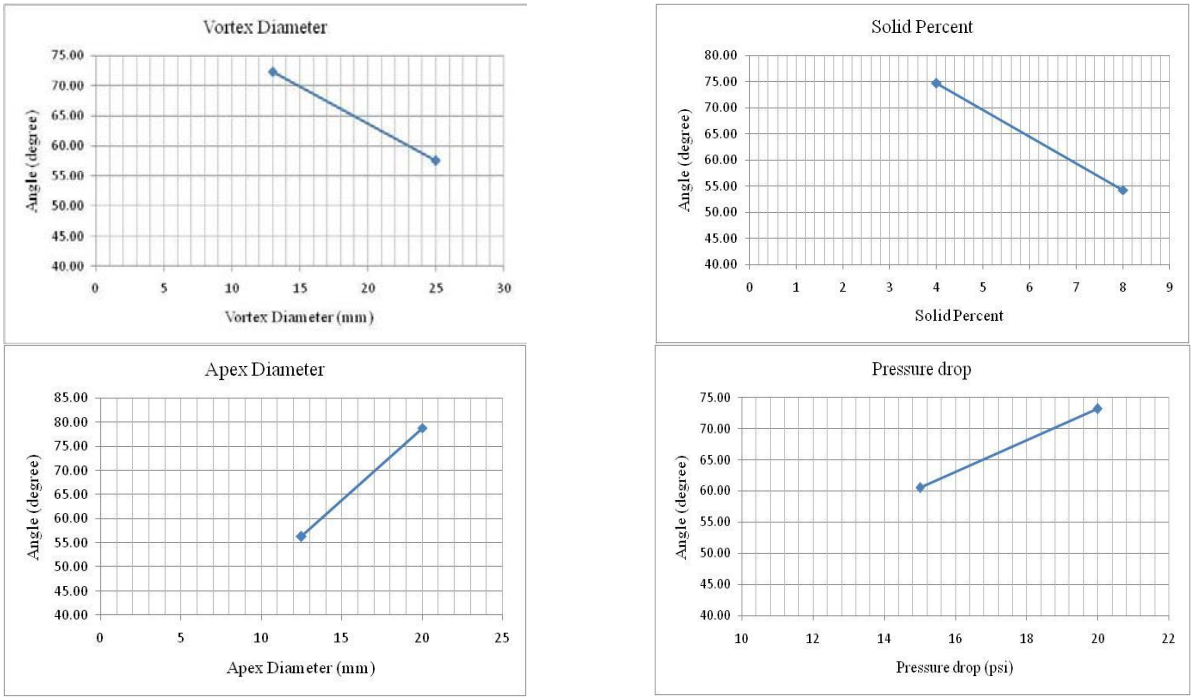


شکل 3: مقایسه تصویر باینری و حقیقی برای آزمایش

www.SID.ir

Archive of SID

همانگونه که از این شکل مشاهده می‌شود، پارامترهای هندسی قطر سرریز و قطر تەریز بر زاویه چتر تاثیر متقابل دارند. به عبارت دیگر، در مقادیر بالای قطر سرریز، با افزایش قطر تەریز، زاویه چتر افزایش پیدا می‌کند، در حالیکه در مقادیر پائین قطر سرریز، با افزایش قطر تەریز، در زاویه چتر تغییر چندانی مشاهده نمی‌شود. درصد جامد و قطر سرریز نیز بر پاسخ سیستم تاثیر متقابل دارند، یعنی در حالتی که در صد جامد 8٪ است با افزایش قطر سرریز زاویه کاهش پیدا می‌کند در حالیکه در درصد جامد 4٪ با افزایش قطر سرریز زاویه چتر تشکیل شده افزایش پیدا خواهد کرد. که به نظر می‌رسد در درصد جامد بیشتر با توجه به نزدیک شدن به شرایط تخلیه طنابی زاویه چتر تەریز نیز کاهش پیدا می‌کند. در ادامه، با توجه به اینکه معمولاً از سه پاسخ "بازیابی آب به تەریز"، "حد جدایش" و "دقت جدایش" به عنوان معیارهای بررسی کارآیی هیدروسیکلون‌ها استفاده می‌شود، در این قسمت ارتباط میان زاویه چتر و معیارهای فوق، بررسی شده است. به منظور تعیین ارتباط بین این پارامترها، توابع مختلفی بر روی آنها برازش شد و با توجه به ضریب همبستگی (R^2)، بهترین توابع انتخاب شدند. توابع انتخاب شده، مقادیر ثابت و ضریب همبستگی آنها در جدول 2 آمده است. در شکل‌های 6، 7 و 8 با برازش این توابع، نحوه ارتباط بین زاویه چتر تەریز و پاسخ‌های فوق نشان داده شده است.



شکل 1: تاثیر پارامترهای اصلی بر زاویه چتر هیدروسیکلون

در ادامه، با توجه به اینکه معمولاً از سه پاسخ "بازیابی آب به تەریز"، "حد جدایش" و "دقت جدایش" به عنوان معیارهای بررسی کارآیی هیدروسیکلون‌ها استفاده می‌شود، در این قسمت ارتباط میان زاویه چتر و معیارهای فوق، بررسی شده است. به منظور تعیین ارتباط بین این پارامترها، توابع مختلفی بر روی آنها برازش شد و با توجه به ضریب همبستگی (R^2)، بهترین توابع انتخاب شدند. توابع انتخاب شده، مقادیر ثابت و ضریب همبستگی آنها در جدول 2 آمده است. در شکل‌های 6، 7 و 8 با برازش این توابع، نحوه ارتباط بین زاویه چتر تەریز و پاسخ‌های فوق نشان داده شده است. شکل 6 ارتباط بین دو پارامتر زاویه چتر و حد جدایش را به صورت تابع نمائی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در دامنه وسیعی از تغییرات حد جدایش (ریزتر از 9 میکرون)، زاویه چتر بین حدود 71 تا 81 درجه متغیر است، .به عبارت دیگر تقریبا ثابت است. ولی در مقادیر بالا تر حد جدایش (بیش از 11 میکرون) زاویه چتر شدیدا کاهش می‌یابد. بنابراین در شرایط این آزمایش، با توجه به توزیع ابعاد بار ورودی، در صورتیکه زاویه چتر سیکلون حدود 71 تا 81 درجه باشد، امکان دستیابی به محصولی با ابعاد ریزتر از 11 میکرون وجود دارد. در صورت کاهش زاویه چتر، ذرات بیشتری به سرریز منتقل می‌شوند و در نتیجه حد جدایش افزایش می‌یابد. در صورتیکه خروج تەریز به حالت تخلیه طنابی نزدیک شود (زاویه چتر 24 درجه در آزمایش 6،

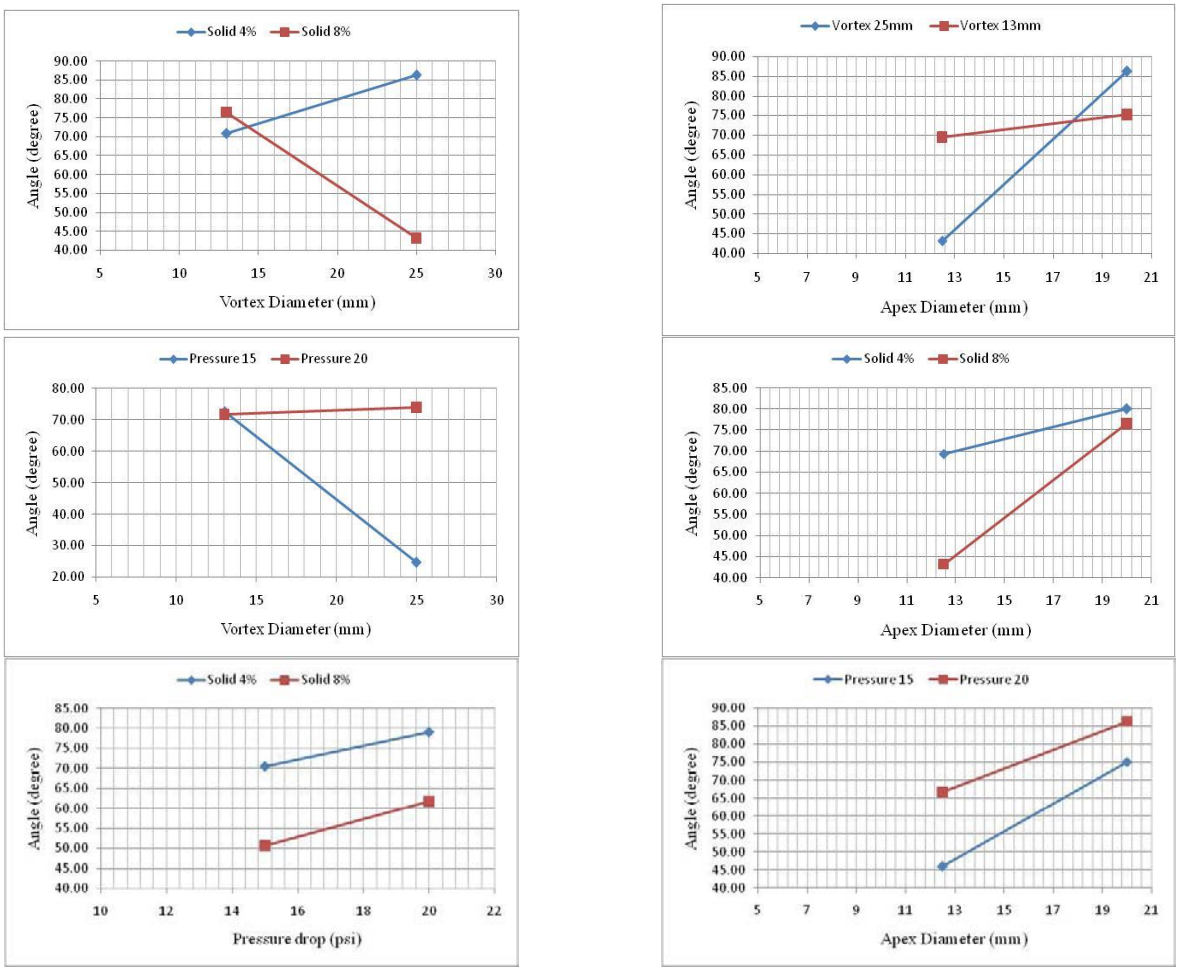
www.SID.ir

Archive of SID

جدول 1)، غلظت جامد در ته ریز و حد جدایش به بیشترین مقدار خود خواهند رسید.

ارتباط زاویه چتر و میزان بازیابی آب به تەریز در شکل 7 آمده است. چنانکه مشاهده می‌شود، شرایط تخلیه طنابی کمترین میزان زاویه چتر را نشان می‌دهد. همچنین بازیابی آب به تەریز، در محدوده 1/41 تا 1/65، با زاویه چتر حدود 75 درجه قابل دستیابی است. این محدوده نزدیک به شرایط کارکرد قابل قبول (یعنی بازیابی آب به ته ریز، حدود 1/31 تا 1/41)، در کارآیی هیدروسیکلون است [8]. تاثیر متقابل درصد جامد خوراک ورودی به هیدروسیکلون با پارامترهای دیگر (شکل 5) تعیین ارتباط بین زاویه چتر و بازیابی آب، به تەریز را مشکل کرده است.

در شکل 8 رابطه بین دقت جدایش و زاویه چتر نمایش داده شده است. همانگونه که از این شکل مشخص است، در شرایط تخلیه طنابی دقت جدایش بیش از 2/5 است. با لاترین دقت جدایش در حالتی است که زاویه چتر در حدود 61 درجه است که در این حالت بیشترین بازیابی آب به تەریز را نیز داریم. دقت جدایش نسبت به دو پاسخ دیگر دارای تغییرات بیشتری با زاویه چتر است و به همین دلیل ضریب همبستگی این معادله در مقایسه با دو معادله دیگر دارای مقدار کمتری است.



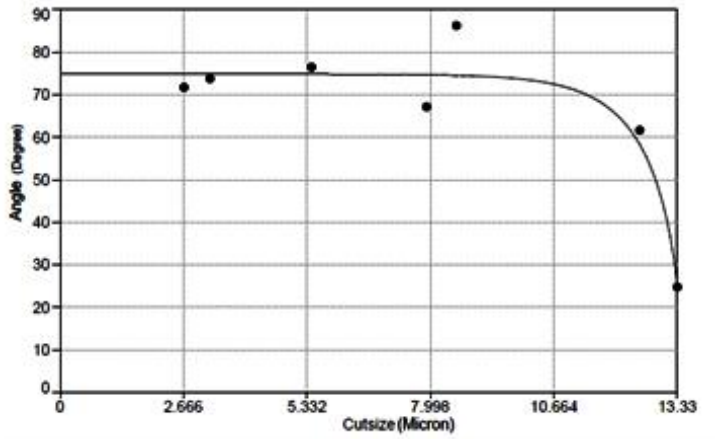
شکل 2: تاثیر متقابل پارامترهای تاثیر گذار بر زاویه چتر

جدول3: روابط بین سه پاسخ زاویه چتر، حد جدایش و بازیابی آب به تەریز

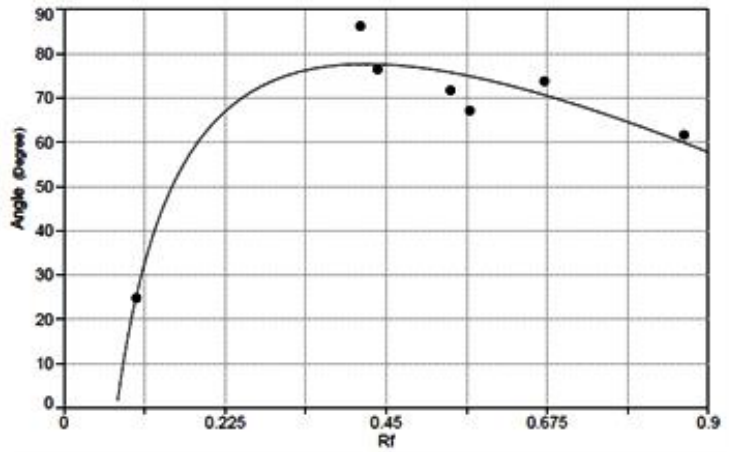
پاسخ‌ها	معادله	ثابت‌ها				R^2
		a	b	c	d	
حد جدایش - زاویه چتر	$y^2 = a$	5599/12	-1/118	-	-	1/91
بازیابی آب به تەریز - زاویه چتر	$y = a + bx +$	196/41	-93/86	-51/39	-	1/93
دقت جدایش - زاویه چتر	$y = a + bx^{2.5} + ce^x +$	91/29	-19/85	12/45	-15/61	1/78

www.SID.ir

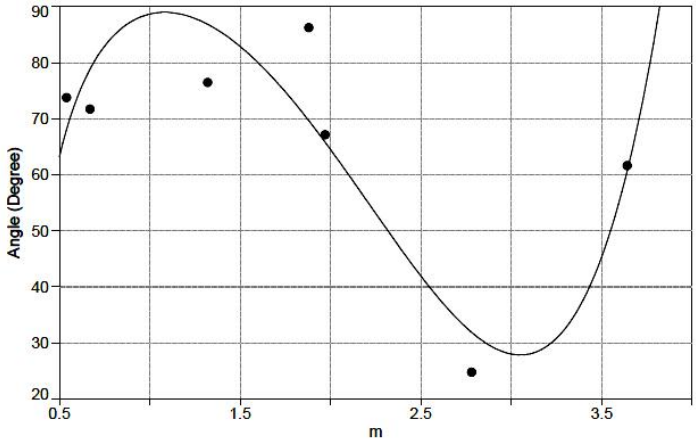
Archive of SID



شکل3. رابطه‌ی حد جدایش و زاویه چتر



شکل4. رابطه بین بازیابی آب به‌دست‌آمده و زاویه چتر



شکل5. رابطه‌ی بازیابی دقت جدایش و زاویه چتر

2- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت بررسی سیستم‌های فرآوری مواد معدنی، استفاده از روش‌های آسان و کم هزینه مورد توجه می‌باشد. در این پژوهش، امکان استفاده از پردازش تصویر به منظور پایش عملکرد هیدروسیکلون، بررسی شده است. زاویه چتر ته ریز هیدروسیکلون در شرایط مختلف، با تصویربرداری، اندازه‌گیری شده است. بررسی عوامل موثر بر این زاویه نشان داد که، افزایش درصد جامد و قطر سرریز موجب کاهش زاویه چتر، و افزایش قطر ته‌ریز و افت فشار باعث افزایش آن می‌شود. آنگاه با برازش توابع مناسب، ارتباط بین زاویه چتر با "حد جدایش"، "بازیابی آب به ته‌ریز" و "دقت جدایش" مشخص گردیده است. مشاهده شد که برای بدست آوردن حد جدایش ریزتر از 11 میکرون، درشرایط آزمایش‌های فوق، زاویه چتر باید بین 71 تا

www.SID.ir

Archive of SID

81 درجه باشد. در صورتیکه اگر زاویه چتر کاهش یابد، حد جدایش افزایش می‌یابد. در صورت کاهش میزان بازیابی آب به ته‌ریز زاویه چتر کاهش پیدا خواهد کرد. در شرایط آزمایش‌های فوق، میزان بازیابی آب قابل قبول به ته‌ریز زمانی به دست می‌آید که زاویه چتر در حدود 75 درجه باشد. می‌توان با تعیین زاویه بحرانی، از این پارامتر به عنوان یک فاکتور کنترلی برای عدم ایجاد شرایط تخلیه طنابی استفاده کرد. با توجه به نتایج این تحقیق استفاده از روش پردازش تصویر در بررسی کارآیی هیدروسیکلون امکان پذیر است. نگارندگان این مقاله بر این اعتقاد هستند که می‌توان با توسعه این روش و استفاده از تجهیزات دقیق‌تر برای عکس‌برداری، از این روش برای پایش در خط مدارهای شامل هیدروسیکلون در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی استفاده کرد. استفاده از این روش ساده و کم هزینه، می‌تواند موجب افزایش کارآیی مدار هیدروسیکلون گردد.

منابع

[1] Bergstrom, J.; 2006; "*Flow Field and Fibre Fraction Studies in Hydrocyclones*", Stockholm, Sweden, Royal Institute of Technology.

[2] Wills, Barry A.; 1997; "*Mineral Processing Technology, An Introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral processing*", Butterworth Heinemann.

[3] نعمت‌اللهی، حسین؛ "**کانه آرایی**"، تهران، انتشارات دانشگاه تهران. جلد 1.

[4] فرزانگان، اکبر؛ 1382؛ "**کنترل و مدلسازی فرآیندهای فرآوری مواد معدنی**"، جزوه درسی، ص 43- 48.

[5] Van Deventera, J.S.J.; Fenga, D.; Petersenb, K.R.P.; Aldrich, C.; 2003; "*Modelling of hydrocyclone performance based on spray profile analysis*پ, International Journal of Mineral Processing, Vol. 70, pp. 183-203.

[6] Donskoi, E.; Suthers, S.P.; Campbell, J.J.; Raynlyn, T.; 2008; "*Modelling and optimization of hydrocyclone for iron ore fines beneficiation using optical image analysis and iron ore texture classification*" International Journal of Mineral Processing, Vol. 87, pp. 106-119.

[7] شفائی، سیدضیاالدین؛ 1383؛ "**استفاده از طراحی آماری آزمایش‌ها در تحقیقات مهندسی**".

[8] Napier-Munn, T.J.; Morrell, S.; Morrison, R.D.; Kojovic, T.; 1996; "*Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimization*", Ausralia, JKMRC.

پی‌نوشت‌ها

[1] Van Deventer
[2] Donskoi
[3] Threshold value:عدد حدی برای باینری کردن تصویر

www.SID.ir