



Research article

DOI: 10.22034/IJME.2025.2039035.2017

OPEN ACCESS

## Evaluating Optimal Operational Solutions For Heavy Intermediate Cyclone And Flotation Circuits Of Mamradco-Tabas Coal Washing Plant

Rahman Ahmadi<sup>1\*</sup>, Mehdi Alidokht<sup>2</sup>, Sajjad Jannesar Malakooti<sup>3</sup>, Saeed Zare<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Technical and Engineering Faculty, Department of Mining Engineering - Mineral Processing, Imam Khomeini International University (RA), Qazvin

<sup>2</sup> Head of Process Control Unit, Tabas Parvadeh Coal Company

<sup>3</sup> Tabas Coal Mines complex, Iranian Mines & Mining Industries Development & Renovation

<sup>4</sup> Master of Mineral Processing, Faculty of Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

### Article info

Received: 18 August 2024  
Revised: 18 February 2025  
Accepted: 22 April 2025

### Keywords

Heavy media cyclone  
Flotation  
Fine particles  
Mamradco  
Coal washing Plant

### \*corresponding author

Rahman Ahmadi  
[Ra.ahamdi@eng.ikiu.ac.ir](mailto:Ra.ahamdi@eng.ikiu.ac.ir)

### Abstract

In this article, the efficiency of the gravity circuits of the heavy intermediate cyclone and the flotation of the current coal-washing circuit of the Tabas Mamradco plant have been investigated, along with providing operational and corrective suggestions. In this regard, sampling of the 11 main streams of the factory, during three working days, and the performance of heavy intermediate cyclone circuits and flotation (rafter and cleaner) in different dimensional ranges, respectively, by performing analyses of release, sinking, and flotation on the representative feed sample. And its comparison with the actual condition of the device was monitored. Due to the wide dimensional range (0.5-0.5 mm) of the flotation feed and the presence of clay, the efficiency of flotation is low in dimensions below 75 microns, and the recovery and separation efficiency of this part of the particles is 30 and 23.8 percent, respectively. In addition, based on the results of sinking and flotation of different dimensional ranges of heavy intermediate cyclone products, the low  $E_p$  value of particles in the dimensional range of 0.5-1 and 0.5 mm, which are 0.17 and 0.21 respectively, shows The poor performance of the cyclone is the heavy intermediary in the separation of particles below 1 mm from the incoming feed. Based on the obtained results, limiting the dimensions of the flotation inlet to -150 microns makes it possible to increase the efficiency from 36 to 59%. On the other hand, gravity processes have a better performance than flotation in large dimensional ranges (0.15+ - 0.7 mm) due to the simplicity of the operation and the low separation error, with a 7% increase in efficiency in these dimensions with the gravity method. Compared to flotation can be achieved. Therefore, using equipment such as a spiral to enrich particles of +0.15-1 mm will lead to a 3% increase in the efficiency of the factory.

### How to cite this article

Ahmadi, R., Alidokht, M., Malakouti, S. Zare, S., 2025, Evaluating optimal operational solutions for heavy intermediate cyclone and flotation circuits of Mamradco-Tabas coal washing plant. *Journal of Mining Engineering*, 20(1): 27-45. (in Persian with English Abstract)  
<https://doi.org/10.22034/ijme.2025.2039035.2017>

©2025 The author(s). Published by [Iranian Society of Mining Engineering](#).

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



## EXTENDED ABSTRACT

### 1. Introduction

Considering the very effective role of coal ash for consumption in the steelmaking industry, the removal of impurities associated with coal, the correct design of a coal washing circuit with appropriate efficiency, and the optimization of the relevant process are very important. In coal washing plants, coal sizes smaller than 0.5 mm are usually graded by flotation, and sizes larger than 0.5 mm are graded by gravity methods such as heavy media cyclones [1]. Today, large diameter heavy media cyclones are less commonly used due to low efficiency, low recovery of media magnetite from fine coals (loss due to adhesion to coal fines), problems in providing inlet pressure, and relatively high cost for recovering coal particles smaller than 1 mm [2,3]. Although much research has been conducted on improving coal washing in the past twenty years, the efficiency of coal washing plants in dimensional ranges below 1 mm (coal fines) has received less attention in Iran, despite applied research in the world. This problem has been exacerbated in recent years with the increase in the amount of high ash fines due to increased mechanization and the use of continuous extraction machines and the extraction of ash-rich coal layers. Today, the increase in the separation efficiency of gravity methods in processing fine particles and the modification of the relevant circuits due to the simplicity of operation, low cost, and high efficiency of these methods compared to the flotation process have attracted the attention of most coal washing plants to these methods. On the other hand, despite the high probability of large particles (above 500 microns) hitting the bubbles in flotation, due to the high weight of these particles and the turbulence of the pulp environment, the probability of their separation from the bubbles is very high.

A significant part of the low efficiency of coal upgrading in coal washing plants is related to the processing of particles smaller than 1 to 2 millimetres. The use of self-media gravity separators (Auto media), which use the mineral pulp as a medium for separating particles based on density (water-only cyclone, rising and falling bed separator -TBS, etc.), is one of the most important solutions for the effective recovery of fine coal particles (smaller than 2000 microns) in the world [4].

By sampling three streams of feed, concentrate and cyclone tailings, in addition to performing a sieve analysis and determining the quality and quantity of different particle size ranges, the yield, recovery, separation efficiency and possible error ( $E_p$ ) of the device in these dimensions were calculated. By performing sinking and flotation analyses at densities of 1.4 and 1.8 g/cm<sup>3</sup> on a sample taken from the cyclone tailings stream, it was determined that approximately 5.4 and 27.5 percent of the particles in these two densities float and are wasted as concentrate and intermediate, respectively.

### 2. Methodology

Coal washability or washability analysis is the determination of the theoretical limits for the removal of impure minerals from coal by processing processes. This capability can be achieved by using sinking and flotation analyses for gravity separation and release or tree analysis for flotation. For sinking and flotation experiments, zinc chloride solution was used to prepare different densities. In the experiments, densities of 1.3 to 2 g/cm<sup>3</sup> are used. After sinking and flotation operations, the obtained samples are dried, weighed, and then ash-measured. To determine the ideal flotation feed efficiency, release or tree analysis tests are used in which the experimental conditions are close to the flotation process. In the release analysis method used, the aeration rate and rotor speed are important. The produced foam is recovered by changing the rotor speed and aeration speed and taking into account the time. Hydrophobic and hydrophilic materials are completely separated in the first stage, so that both poorly buoyant and fast-floating particles are included in the produced foam. The concentrate or foam produced in the first stage is subjected to a flotation process and five concentrates are floated at a specified rotor speed and time. The products are then chemically analyzed.

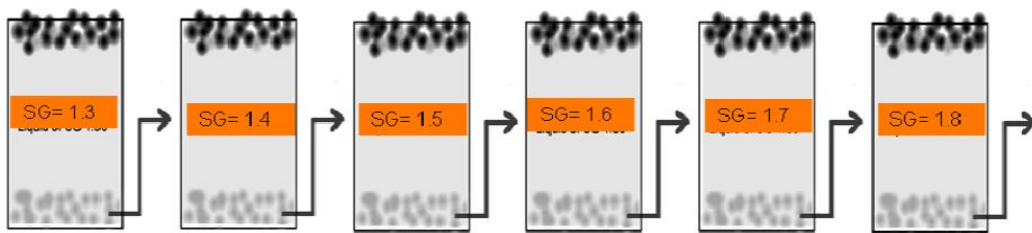


Fig 1. Containers used for sinking and floating experiments

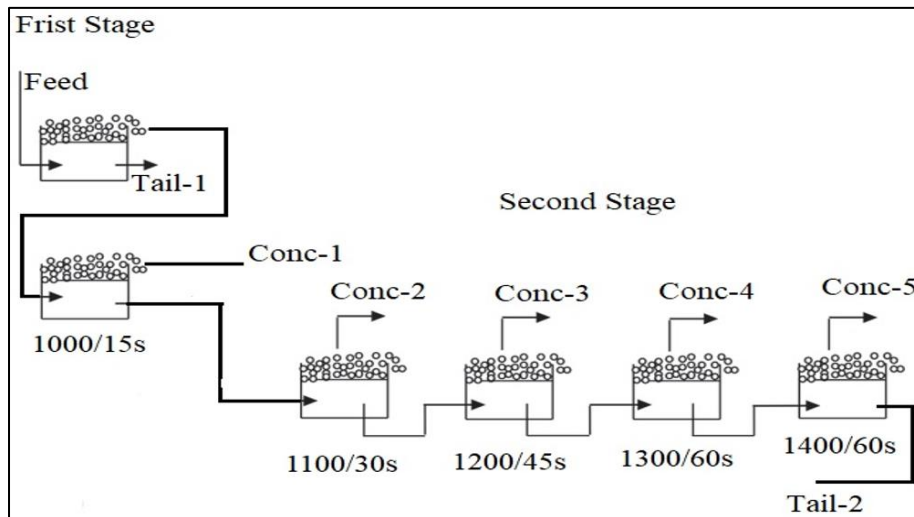


Fig 2. Release analysis on flotation feed sample (Guide: Operating conditions: Impeller speed (rpm)/foaming time (s))

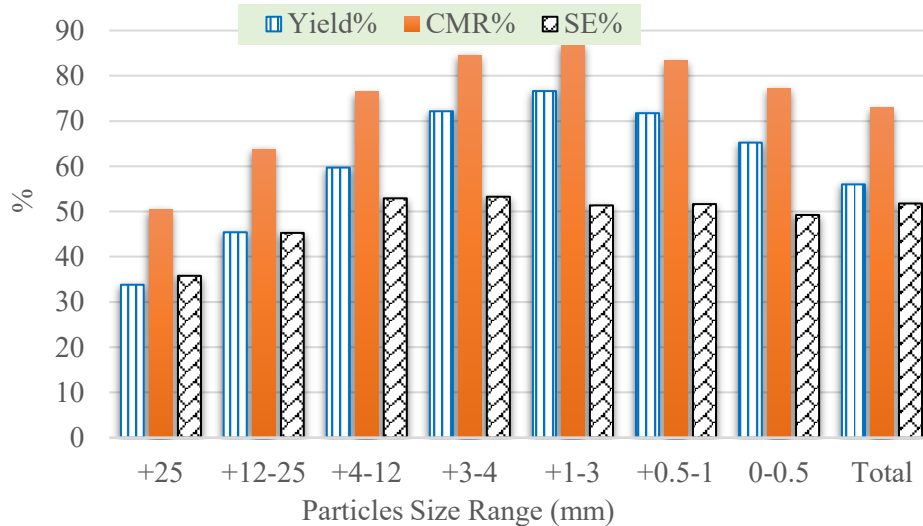
### 3. Findings and argument

By performing sinking and flotation analyses at densities of 1.4 and 1.8 g/cm<sup>3</sup> on a sample taken from the cyclone tailings flow, it was determined that approximately 5.4 and 27.5 percent of the particles at these two densities float and are lost as concentrate and intermediate, respectively. The ash percentages of these two flotation fractions were determined to be 9.1 and 40.3, respectively. Approximately 3 percent of the 5.4 percent of the lost fraction is related to dimensions below 1 mm in the flow, indicating the low efficiency of the heavy media cyclone in recovering these particles. In addition, the lowest ash in the lost fraction is concentrated in the dimension range of +0.5-1 mm in the flow.

Table 1. Results of the washability of the heavy intermediate cyclone waste stream

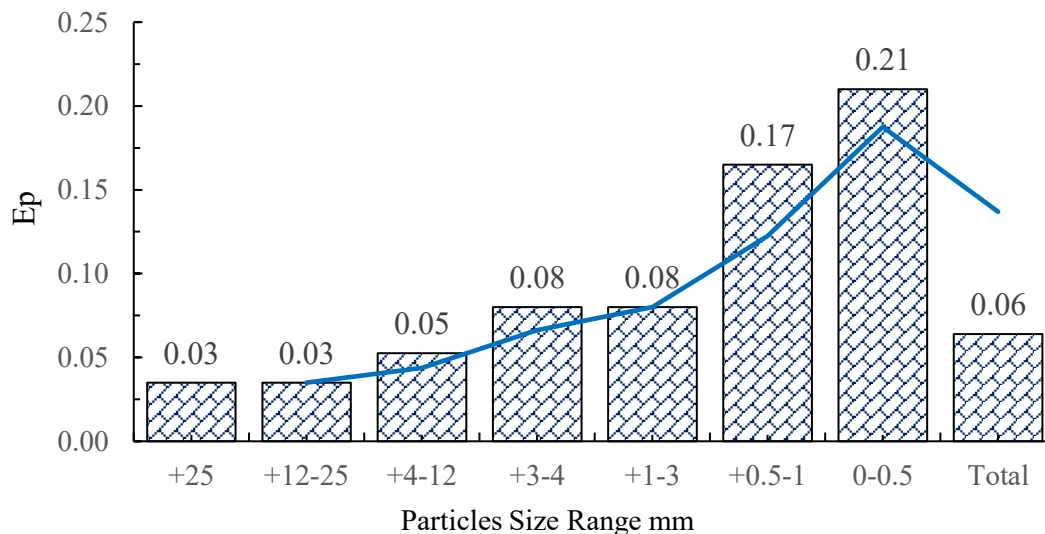
Size mm	Concentrate		Middle		Reject	
	W%	Ash %	W%	Ash %	W%	Ash %
+25	—	—	5.1	41.6	10.2	69.6
+12-25	0.1	9.2	9.7	41.4	22.5	69.0
+4-12	0.4	10.7	4.2	39.5	12.7	68.7
+3-4	1.3	9.1	4.0	41.2	8.2	73.2
+1-3	0.7	7.4	1.5	37.8	4.1	71.3
+0.5-1	1.9	7.1	2.2	33.5	7.5	72.3
0-0.5+	0.9	13.5	0.8	41.5	1.9	72.7
Total	5.4	9.1	27.5	40.3	67.2	70.2
Density g/cm <sup>3</sup>	Float 1.4		Float 1.8		Sink 1.8	

Fig 3 shows the yield, recovery and separation efficiency of different size ranges of the heavy media cyclone. As is clear from the results, due to the locking of coal and tailings particles in the coarse size range (size range +12 mm), the yield, recovery and separation efficiency of this size range are low. That is, this part of the particles has a higher density or specific gravity than the coal density and remains submerged. In order to float these particles, a higher separation density is required, which leads to the production of a product with higher ash (middling). Due to the single density of the heavy media cyclone, its performance in separating intermediate particles (close to the separation density) is poor.



**Fig 3. Yield, recovery and separation efficiency of different particle size ranges in a heavy media cyclone**

Based on the results obtained, the overall probability error of the device was measured and determined to be about 0.06. According to the available information, the  $E_p$  value in the range of 0.02 to 0.08 is desirable. The  $E_p$  values of the heavy media cyclone device in different dimensional ranges. Based on the results obtained, the performance of the device in two dimensional ranges below 0.5 and +0.5-1 mm was poor due to the incorrect division of coal and tailings particles, and the separation probability error in these two dimensional ranges was determined to be 0.21 and 0.17, respectively, which is between 2 and 3 times the maximum allowable error ( $E_p=0.08$ ).



**Fig 4. Separation error probability ( $E_p$ ) of heavy intermediate cyclone in different size ranges**

#### 4. Conclusions

The probable error ( $E_p$ ) in the size ranges of +0.5-1 and -0.5 mm is 0.17 and 0.21, respectively, indicating the poor performance of the heavy media cyclone in the enrichment of particles below 1 mm. By examining and monitoring the flotation performance in different size ranges of the feed, the low recovery and separation efficiency of flotation in the size range below 75 microns due to the presence of clay particles is evident and is equal to 30 and 23.8 percent, respectively. By limiting the size range of the flotation feed to less than 150 microns and applying optimal operating parameters, it is possible to increase the efficiency of this part of the flotation feed from 36 to 59 percent. On the other hand, gravity processes, due to their simplicity of operation and low separation error, have better performance than flotation in coarse size ranges (+0.15 mm), and in the comparison made for the size range of +0.7-+0.15 mm, a 7% increase in efficiency is evident. Therefore, the use of equipment such as spiral, teetered bed separator (TBS), reflux classifier (RC), and heavy media cyclone with a small diameter for the concentration of +0.1-15 mm feed particles will lead to a 3% increase in plant efficiency. By adding a third circuit, the plant flexibility to produce a product with higher quality and recovery is possible.

#### 5. References

- [1] M. Ito, Recent developments in advanced coal cleaning, *J. MMIJ* 124 (2) (2008) 865–870, <https://doi.org/10.2473/JOURNALOFMMIJ.124.865>.
- [2] D. Dou, J. Yang, J. Liu, H. Zhang, A novel distribution rate predicting method of dense medium cyclone in the Taixi coal preparation plant, *Int. J. Miner.Process.* 142 (2015) 51–55, <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.04.015>.
- [3] I. Plessis, Processing strategy for different coal types, *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* 110 (2010) 663–669.
- [4] Burt, R.O., 1984, *Gravity Concentration Technology*, Elsevier. Amsterdam, pp. 261-287.



OPEN ACCESS

DOI: 10.22034/IJME.2025.2039035.2017

مقاله پژوهشی

## ارائه راهکارهای بهینه عملیاتی مدارهای سیکلون واسطه سنگین و فلوتاسیون کارخانه زغالشویی ممرادکو- طبس

رحمان احمدی<sup>۱\*</sup>، مهدی علیدخت<sup>۲</sup>، سجاد جان نثار ملکوتی<sup>۳</sup>، سعید زارع<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی معدن- فرآوری مواد معدنی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین

<sup>۲</sup>سرپرست واحد کنترل فرآیند کارخانه زغالشویی، شرکت زغال سنگ پروده طبس

<sup>۳</sup>مجتمع معادن زغالسنگ طبس، سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو)

<sup>۴</sup>کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
در این مقاله کارایی مدارهای ثقلی سیکلون واسطه سنگین و همچنین فلوتاسیون مدار فعلی زغالشویی کارخانه ممرادکوی طبس به همراه ارائه پیشنهادات عملیاتی و اصلاحی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، نمونه برداری از ۱۱ جریان اصلی کارخانه، طی سه روز کاری انجام و عملکرد مدارهای سیکلون واسطه سنگین و فلوتاسیون (رافر و کلینر) در بازه‌های ابعادی مختلف به ترتیب با انجام آنالیزهای رهایی و غرق و شناورسازی بر روی نمونه معرف بار ورودی و مقایسه آن با شرایط واقعی دستگاه پایش شد. به دلیل گسترده بودن بازه ابعادی (صفر تا ۰/۵ میلی‌متر) بار ورودی فلوتاسیون و وجود رس، کارایی فلوتاسیون در ابعاد زیر ۷۵ میکرون پایین بوده و بازیابی و کارایی جدایش این بخش از ذرات به ترتیب ۳۰ و ۲۳/۸ درصد است. علاوه بر این، بر مبنای نتایج غرق و شناورسازی بازه‌های ابعادی مختلف محصولات سیکلون واسطه سنگین، مقدار خطای جدایش احتمالی (Ep) پایین ذرات در محدوده ابعادی ۰/۵ تا ۱ و ۰/۵- میلی‌متر که به ترتیب ۰/۱۷ و ۰/۲۱ است، نشان‌دهنده عملکرد ضعیف سیکلون واسطه سنگین در جدایش ذرات کوچکتر از ۱ میلی‌متر بار ورودی است. بر اساس نتایج بدست آمده، با محدود کردن ابعاد ورودی فلوتاسیون به ۱۵۰- میکرون، امکان افزایش راندمان از ۳۶ به ۵۹ درصد امکانپذیر است. از طرفی، فرآیندهای ثقلی به دلیل سادگی عملیات و پایین بودن خطای جدایش، عملکرد مطلوب تری نسبت به فلوتاسیون در بازه‌های ابعادی درشت (۰/۱۵+ - ۰/۷ - میلی‌متر) دارند که افزایش ۷ درصدی راندمان در این ابعاد با روش ثقلی نسبت به فلوتاسیون قابل دستیابی است. بنابراین، استفاده از تجهیزاتی مانند اسپیرال برای پرمیاسازی ذرات ۰/۱۵+ تا ۱ میلی‌متر، منجر به افزایش ۳ درصدی راندمان کارخانه می‌شود.	<p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲</p> <p><b>واژه‌های کلیدی</b></p> <p>زغالشویی ممرادکو</p> <p>سیکلون واسطه سنگین</p> <p>فلوتاسیون</p> <p>ذرات نرمه</p> <p><b>*نویسنده مسئول</b></p> <p>رحمان احمدی</p> <p><a href="mailto:Ra.ahmadi@eng.ikiu.ac.ir">Ra.ahmadi@eng.ikiu.ac.ir</a></p>

استناد به این مقاله:

احمدی، رحمان؛ علیدخت، مهدی؛ ملکوتی، سجاد جان نثار و زارع، سعید؛ ۱۴۰۴. ارائه راهکارهای بهینه عملیاتی مدارهای سیکلون واسطه سنگین و فلوتاسیون کارخانه زغالشویی ممرادکو- طبس. نشریه مهندسی معدن. ۲۰(۱): ۲۷-۴۵. <https://doi.org/10.22034/ijme.2025.2039035.2017>

## ۱- مقدمه

آزادی با ریزتر شدن ذرات، فرصت بازیابی بخش اعظم این ذرات با کیفیت مناسب را فراهم می‌آورد که تاثیر قابل توجهی بر افزایش راندمان مدار کارخانه دارد. هرچند ریزتر شدن ذرات، کاهش کارایی تجهیزات پرعیارسازی ثقیلی مانند سیکلون واسطه سنگین را به همراه دارد. در این ارتباط، تحقیقات مختلفی توسط محققان انجام شده است.

مطالعاتی در مورد ارزیابی عملکرد واحد واسطه‌سنگین کارخانه زغالشویی زرنده انجام شده است [۶]. مدار واحد جدایش واسطه سنگین کارخانه زرنده از دو جداکننده سری تشکیل شده است. مقایسه خطای احتمال بدست آمده برای این جداکننده‌ها با خطای احتمال در نظر گرفته شده در طرح کارخانه (۰/۰۴ و ۰/۰۵) نشان می‌دهد که کارایی این جداکننده‌ها با توجه به درشت بودن ذرات زغال (۱۰ تا ۴۰ میلی‌متر)، بالا است. نتایج تحقیقی دیگر [۷]، با عنوان بررسی پارامترهای موثر بر کارایی مدار هیدروسیکلون-مارپیچ کارخانه زغالشویی اینترکربن، نشان داد که در محدوده‌های ابعادی بالای ۱۵۰ میکرون، بیشینه کارایی جدایش (۴۴/۲۰ درصد) و بازیابی وزنی (۸۲/۸۰ درصد) قابل دستیابی است.

استفاده از جداکننده‌های ثقیلی خود واسطه<sup>۱</sup> که از پالپ ماده معدنی به عنوان واسطه برای جدایش ذرات بر اساس چگالی استفاده می‌کنند (سیکلون فقط با آب، جداکننده با بستر بالا و پایین شونده -TBS و نظایر آن)، یکی از مهم‌ترین راهکارها برای بازیابی موثر ذرات ریزدانه زغال سنگ (کوچکتر از ۲۰۰۰ میکرون) در دنیا است. بهینه‌سازی سیکلون فقط آب برای پرعیارسازی زغال‌های نرمه کوچکتر از ۱ میلی‌متر توسط محققان [۸] مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیقات نشان داد که دستگاه یاد شده، یک پیش تغلیظ-کننده مناسب برای مدارهای مارپیچ و فلوتاسیون است.

اصلاح مدار کارخانه زغالشویی طبس از طریق نصب مدار سیکلون-تیتربد<sup>۲</sup> - اسپیرال نیز توسط محققان دیگر مورد مطالعه قرار گرفته است [۹]. در این کارخانه، ذرات زغال-سنگ در محدوده ابعادی ۵ تا ۵۰ میلی‌متر با روش واسطه-سنگین به وسیله سه دستگاه تریفلو و ذرات صفر تا ۰/۵ میلی‌متر با کمک ۶ سلول فلوتاسیون ستونی پرعیارسازی می‌شوند. به دلیل کارایی جدایش پایین دستگاه تریفلو در تغلیظ ذرات ۱- میلی‌متر و همچنین توانایی ضعیف حباب-

با توجه به نقش بسیار موثر خاکستر زغال برای مصرف در صنعت فولادسازی، حذف ناخالصی‌های همراه زغال، طراحی صحیح مدار زغالشویی با کارایی مناسب و بهینه-سازی فرآیند مربوطه بسیار مهم است. اگرچه تحقیقات زیادی در رابطه با بهبود شستشوی زغال سنگ در بیست سال گذشته انجام شده است ولی در ارتباط با میزان کارایی کارخانجات زغالشویی در محدوده‌های ابعادی کوچکتر از ۱ میلی‌متر (نرمه‌های زغال) با وجود تحقیقات کاربردی در دنیا، در ایران کمتر مورد توجه واقع شده است. این مشکل در سال‌های اخیر با افزایش میزان نرمه‌ها با درصد خاکستر بالا به دلیل افزایش مکانیزاسیون و استفاده از ماشین‌های استخراج پیوسته و استخراج لایه‌های زغال سنگ با خاکستر بالا، تشدید شده است. امروزه افزایش کارایی جدایش روش-های ثقیلی در فرآوری ذرات ریزدانه و اصلاح مدارهای مربوطه به دلیل سادگی کار، هزینه کم و راندمان بالای این روش‌ها نسبت به فرآیند فلوتاسیون، موجب شده است تا توجه اکثر کارخانه‌های زغالشویی به این روش‌ها جلب شود. از طرفی، با وجود احتمال برخورد بیشتر ذرات درشت (بزرگتر از ۵۰۰ میکرون) به حباب‌ها در فلوتاسیون، به دلیل وزن زیاد این ذرات و اغتشاش محیط پالپ، احتمال جدا شدن آن‌ها از حباب‌ها، بسیار زیاد است.

در کارخانه‌های زغالشویی عموماً ابعاد کوچکتر از ۰/۵ میلی‌متر زغال معمولاً با روش فلوتاسیون و ابعاد درشت‌تر از ۰/۵ میلی‌متر با روش ثقیلی مانند سیکلون واسطه سنگین پرعیارسازی می‌شوند [۱]. امروزه سیکلون‌های واسطه سنگین با قطر بزرگ بواسطه کارایی پایین، بازیابی پایین مگنتیت واسطه از زغال‌های ریزدانه (هدر روی بواسطه چسبیدن به نرمه زغال)، مشکلات تامین فشار ورودی و هزینه نسبتاً بالا برای بازیابی ذرات کوچکتر از ۱ میلی‌متر زغال، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲،۳]. فلوتاسیون یک روش جداسازی مبتنی بر سطح است که زغال سنگ آبریز را از کانی‌های باطله آبدوست با تفاوت ترشوندگی سطح جدا می‌کند [۴،۵]. بخش قابل توجهی از کارایی پایین پرعیارسازی زغال در کارخانه‌های زغالشویی، مربوط به فرآوری ذرات کوچکتر از ۱ تا ۲ میلی‌متر است. افزایش درجه

<sup>۱</sup> - Automedia

<sup>۲</sup> - Teeter Bed Separator (TBS)

های هوا در حمل و بازیابی ذرات ۱۵۰+ میکرون در ستون- های فلوتاسیون، حدود ۱۵ تن بر ساعت ذرات زغال به ابعاد ۱۵۰ تا ۱۰۰۰ میکرون هدر می‌رود. با اصلاح مدار و نصب

پیش تغلیظ‌کننده، راندمان زغالشویی از ۳۰ به ۳۵ درصد و امکان افزایش ظرفیت کارخانه از ۳۰۰ به ۳۶۰ تن بر ساعت فراهم شد. برای ذرات زیر ۱۰۰ میکرون زغال (۱۵ درصد بار ورودی) کومونچ و همکاران [۱۰] اسپیرال‌های نرمة به همراه جداکننده تیتربد (TBS) را پیشنهاد داده‌اند. اما بطور کلی بر اساس نظر هوناگر و همکاران [۱۱]، اسپیرال‌ها برای پرعیارسازی محدوده ابعادی کمتر از ۱ میلی‌متر بکار می‌روند. ابعاد کمتر از ۱ میلی‌متر پس از نرمة‌گیری با هیدروسیکلون (جدایش زیر ۱۵۰ میکرون) وارد اسپیرال می‌شوند. بخش فوق نرمة<sup>۱</sup> به واحد فلوتاسیون ارسال می‌شود. بر اساس نظر برت [۱۲]، پالوویچ [۱۳]، کاپور و ملوی [۱۴]، اسپیرال‌ها یک جداکننده مناسب برای پرعیارسازی زغال نرمة در محدوده ابعادی ۲-۳ میلی‌متر و ۰/۱ میلی- مترند. در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۴ بر اساس تجارب تولید سالیانه و تلاش‌های توسعه‌ای توسط لوترل [۱۵] و بتل [۱۶]، اسپیرال یکی از موثرترین تجهیزات برای پرعیارسازی ذرات در محدوده ابعادی ۱ تا ۰/۱ میلی‌متر معرفی شد. در سال ۲۰۰۱ یک واحد پالوت با ظرفیت ۲۵ تن بر ساعت سیکلون واسطه‌سنگین در آفریقای جنوبی در طرح تحقیقاتی Coaltech research Program ساخته شد [۱۷]. هدف این واحد، پرعیارسازی زغال‌های نرمة با استفاده از دو سیکلون واسطه‌سنگین بصورت سری در مدار بوده است. تحقیقات مربوطه به مدت ۵ سال ادامه یافت و اطلاعات ارزشمندی بدست آمد. بر اساس نتایج این برنامه تحقیقاتی، در کارخانه Leeuwpan Colliery از سیکلون واسطه سنگین استفاده شد. در سال‌های اخیر تعدادی از کارخانجات در چین از روش شستشو تا ابعاد صفر<sup>۲</sup> برای پرعیارسازی زغالی‌های درشت و ریز بطور همزمان و بدون استفاده از تجهیزات اضافی پرعیارسازی زغال نرمة استفاده کرده‌اند [۱۸]. در این کارخانجات، بار ورودی زغال خام بدون نرمة‌گیری به سیکلون‌های واسطه‌سنگین سه محصوله<sup>۳</sup> با قطرهای بزرگ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر باردهی می‌شود. محصول ۰/۲۵ میلی‌متر، میانی و باطله از سرندهای شستشو بدست می‌آید. مراحل شستشوی بیشتر محصولات در سیکلون‌های با قطر کوچکتر

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد

نمونه مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها با نمونه‌گیر اتوماتیک نصب شده بر روی نوار بار ورودی به کارخانه (استخراج شده از معدن زغال‌سنگ شرکت معدنچو- لایه C1) به مقدار ۳۵۰ کیلوگرم برداشت و آماده‌سازی شد. در آزمایش‌های غرق و شناورسازی از ابعاد ۰/۵+ تا ۳۰ و در فلوتاسیون از ابعاد ۰/۵- میلی‌متر و آب شیر با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد برای پالپ‌سازی استفاده شد. برای انجام آزمایش‌های غرق و شناورسازی، از مایع سنگین ترکیب آب و نمک کلریدروی (ZnCl<sub>2</sub>) با وزن مخصوص ۲/۹۰۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب، استفاده شد. علاوه بر این، در آزمایش‌های فلوتاسیون مکانیکی از گازوییل و Methyl Isobutyl Carbinol (MIBC) ساخت شرکت کوپلیمر اصفهان به ترتیب به عنوان کلکتور و کفساز استفاده شد. اندازه‌گیری مقدار pH، با پی‌اچ متر پرتابل مدل pH200i ساخت کمپانی کلین انجام شد. pH پالپ در حالت طبیعی برابر ۸ بوده است.

<sup>1</sup>- Ultra-fines

<sup>2</sup>- Wash-To-Zero

<sup>3</sup>- Three-Product dense - medium cyclones

## ۲-۲-۲- روش ها

## ۲-۲-۱- عملیات نمونه برداری و آماده سازی

عملیات نمونه برداری از جریان های بار ورودی، کنسانتره و باطله کلی کارخانه به وسیله نمونه گیر مکانیکی اتوماتیک انجام شد. نمونه ها از جریان های مختلف (تعداد ۱۱ جریان اصلی کارخانه) طی سه روز کاری کارخانه و در زمان باردی زغال شرکت معدن جو برداشت و عملکرد مدارهای واسطه سنگین و فلوتاسیون (رافر و کلینر) در بازه های ابعادی مختلف، کنترل و پایش شد. برای انجام محاسبات متالورژیکی، نمونه های زغال با استاندارد ASTM-D3174، خاکسترسنجی شدند.

## ۲-۲-۲- آزمایش های غرق و شناورسازی و آنالیز

## رهایی

شستشوی پذیری یا آنالیز قابلیت شستشوی زغال سنگ به معنای تعیین حدود تئوریک برای حذف کانی های ناخالص از زغال سنگ با فرآیندهای فرآوری است. این قابلیت با استفاده از آنالیزهای غرق و شناورسازی<sup>۱</sup> برای جدایش ثقلی و آنالیز رهایی<sup>۲</sup> یا درختی<sup>۳</sup> برای فلوتاسیون قابل دستیابی است. برای انجام آزمایش غرق و شناورسازی، از محلول کلرید روی برای تهیه چگالی های مختلف استفاده شد. بعد از انجام عملیات غرق و شناورسازی، نمونه های حاصل، خشک، توزین و سپس خاکسترسنجی شدند. برای تعیین راندمان ایده آل بار ورودی فلوتاسیون از آزمایش آنالیز رهایی یا آنالیز درختی که در آن شرایط آزمایش به فرآیند فلوتاسیون نزدیک است، استفاده می شود.

## ۲-۲-۳- پایش عملکرد زغالشویی سیکلون واسطه

## سنگین

با نمونه برداری از سه جریان بار ورودی، کنسانتره و باطله سیکلون واسطه، علاوه بر انجام آنالیز سردی و مشخص شدن کیفیت و کمیت بازه های ابعادی مختلف ذرات، راندمان<sup>۴</sup>، بازیابی<sup>۵</sup>، کارایی جدایش<sup>۶</sup> و خطای احتمالی<sup>۷</sup> دستگاه در این

ابعاد محاسبه شد. خطای احتمالی یا اصطلاحاً  $E_p$ ، شیب منحنی پارتیشن را در مرکز چگالی جدایش ( $D_{50}$ ) یا نقطه برش<sup>۸</sup> توصیف می کند و با نصف چگالی نسبی تفاضلی ذرات با احتمال ۷۵ و ۲۵ درصد برای انتقال به جریان محصول (کنسانتره یا باطله) تعیین می شود (رابطه ۱).

$$E_p = \frac{d_{75} - d_{25}}{2} \quad (1)$$

در سیکلون واسطه سنگین، خطای احتمال جدایش دستگاه ( $E_p$ ) بصورت کلی و همچنین در بازه های ابعادی مختلف تعیین شد. برای تعیین میزان هدرروی زغال و مواد میانی راه یافته به جریان باطله، از آزمایش غرق و شناورسازی<sup>۹</sup> استفاده شد. در این آزمایش، مواد شناور شده در مایع سنگین با دانسیته ۱/۴ و ۱/۸ گرم بر سانتی متر مکعب به ترتیب کنسانتره، میانی و بخش غوطه ور به عنوان ریجکت یا باطله در نظر گرفته شدند.

## ۲-۲-۴- پایش عملکرد زغالشویی بخش فلوتاسیون

بار ورودی به کارخانه پس از دانه بندی به دو بازه ابعادی ۰/۵+ و ۰/۵- میلی متر تقسیم می شود. ابعاد ۰/۵- میلی متر که حاوی مقدار زیادی آب است در مخزن زیر سرند جمع-آوری و به مخزن آماده سازی قبل از سلول های رافر فلوتاسیون پمپ می شود (شکل ۱). با توجه به نوع پنل سرند استفاده شده (پلی یورتان با روزنه شکافی)، وجود ذرات درشت بالاتر از ۰/۵ میلی متر در جریان زیرسردی اجتناب ناپذیر است. علاوه بر جریان زیرسردی، باطله مرحله کلینر فلوتاسیون نیز به صورت بار در گردش به این جریان اضافه می شود. در مخزن آماده سازی، مواد شیمیایی مورد نیاز فرآیند فلوتاسیون (کلکتور گازوییل و کف ساز MIBC) متناسب با تناژ جامد و شدت جریان پالپ اضافه می شود. با نمونه گیری از جریان های اطراف مدار فلوتاسیون و انجام آنالیز سردی و خاکسترسنجی نمونه ها، راندمان، بازیابی و کارایی جدایش کلی مدار و بخش های رافر و کلینر به صورت جداگانه محاسبه شد.

5- Recovery

6- Separation Efficiency

7- Ecart probable

8- Cut Point

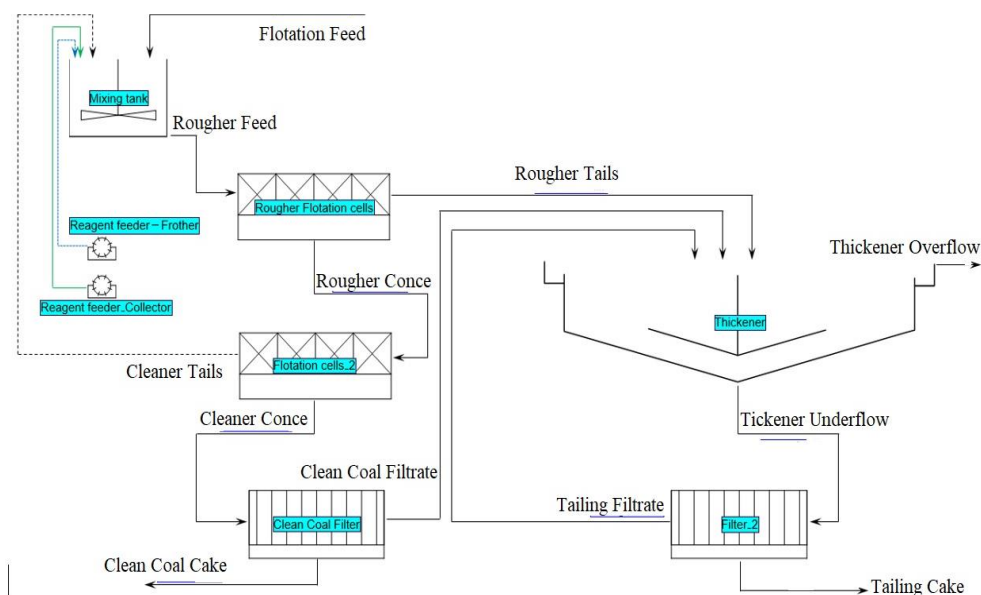
9- Sink &amp; Float

1- Sink and Float

2- Release Analysis

3- Tree analysis

4- Yield



شکل ۱- مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی ممرادکو

در ابعاد بالای ۱۲ میلی‌متر، میزان خاکستر بار ورودی و کنسانتره بین حدوداً ۱/۵ تا ۲ برابر سایر محدوده‌های دانه‌بندی است. بالا بودن درصد خاکستر ذرات درشت جریان کنسانتره (۱۲+ میلی‌متر)، به دلیل قفل‌شدگی ذرات پیش‌بینی می‌شود. کمترین درصد خاکستر بار ورودی مربوط به ذرات ریز است. با توجه به درجه آزادی بالای این ذرات، پیش‌بینی می‌شود که بیشترین بازیابی و کارایی جدایش مربوط به این بخش از بار ورودی باشد. اما، خاکستر نسبتاً پایین بازه‌های ابعادی ریزدانه جریان باطله بویژه ذرات کوچکتر از ۱ میلی‌متر، دلیلی بر کارایی پایین دستگاه در جدایش این بخش از بار ورودی است که با نتایج تحقیقات سایر محققان سال ۲۰۰۸ مطابقت دارد [۱۹].

۲-۳- هدر روی زغال در باطله سیکلون واسطه سنگین  
با انجام آنالیزهای غرق و شناورسازی در چگالی‌های ۱/۴ و ۱/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب بر روی نمونه گرفته شده از جریان باطله سیکلون مشخص شد که به ترتیب حدود ۵/۴ و ۲۷/۵ درصد از ذرات در این دو چگالی یاد شده، شناور و به ترتیب به صورت کنسانتره و میانی هدر می‌روند. درصد خاکستر این دو بخش شناور شده به ترتیب ۹/۱ و ۴۰/۳ تعیین شد. حدود ۳ درصد از ۵/۴ درصد بخش هدر شده، مربوط به ابعاد کمتر از ۱ میلی‌متر جریان است که نشان‌دهنده کارایی پایین سیکلون واسطه سنگین در بازیابی این ذرات است. علاوه بر این، کمترین خاکستر بخش هدر رفته،

### ۵-۲-۲- مقایسه راندمان تئوریک و واقعی عملکرد

#### سیکلون واسطه سنگین

با انجام آزمایش شستشوپذیری روی نمونه گرفته شده از جریان بار ورودی به سیکلون واسطه سنگین، قابلیت شستشوی آن تعیین شد. بطوری که پس از انجام آنالیز، راندمان در کیفیت مختلف محصول محاسبه شد. بنابراین، با داشتن راندمان واقعی سیکلون صنعتی (حاصل از نمونه‌گیری و خاکسترسنجی جریان‌های ورودی و خروجی به دستگاه)، امکان مقایسه آن با حالت تئوریک (حاصل از شستشوپذیری نمونه بار ورودی دستگاه) وجود دارد. معمولاً دستیابی به ۹۰ درصد از راندمان تئوریک در صنعت، حاکی از عملکرد مطلوب دستگاه است.

### ۶-۲-۲- مقایسه راندمان تئوریک و واقعی ابعاد ۰/۵-

#### میلی‌متر (بار ورودی فلوتاسیون)

آنالیز رهایی، یک روش جداسازی ایده‌آل و به عنوان مرجعی برای فلوتاسیون Batch یا پیوسته استفاده می‌شود. در واقع، پاسخ فلوتاسیون ایده‌آل زغال سنگ را می‌توان با آنالیز رهایی مشخص کرد. با انجام آنالیز رهایی روی نمونه معرف برداشت شده از بار ورودی به سلول‌های فلوتاسیون، قابلیت شستشوی نمونه تعیین شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- پایش عملکرد و کارایی سیکلون واسطه سنگین

بیشترین درصد خاکستر بار ورودی به سیکلون واسطه سنگین در بازه ابعادی درشت متمرکز شده است (جدول ۱).

جریان بار ورودی اضافه می‌شود. این در صورتی که است که فقط حدود ۱۵ درصد ذرات این جریان بعنوان ذرات میانی واقعی‌اند. جدول شماره ۲ نتایج بدست آمده از این بررسی را نشان می‌دهد.

در محدوده ابعادی ۰٫۵+ تا ۱ میلی‌متر جریان متمرکز شده است. بر مبنای فلوشیت کارخانه زغالشویی ممرادکو، ابعاد ۱۰+ میلی‌متر باطله، بعنوان محصول میانی است. اگر شرایط عملیاتی طبق طرح در نظر گرفته شود و ابعاد درشت باطله سیکلون واسطه سنگین خرد و به جریان بار ورودی اضافه شود، حدود ۳۳ درصد از ذرات با خاکستر زیاد به

جدول ۱- درصد وزنی و خاکستر محدوده‌های ابعادی مختلف بارورودی، کنسانتره و باطله سیکلون واسطه سنگین

Reject		Concentrate		Feed		Size (mm)
Ash %	W %	Ash %	W %	Ash %	W %	
60.3	15.3	20.4	5.3	46.8	14.0	+25
60.6	32.2	16.6	12.9	40.6	18.7	+12-25
60.3	17.3	12.6	38.6	31.8	37.5	+4-12
57.5	13.5	10.1	16.9	23.3	12.9	+3-4
55.9	6.4	9.5	8.2	20.4	7.8	+1-3
54.3	11.6	9.9	12.3	22.5	6.3	+0.5-1
50.8	3.6	10.6	5.8	24.6	2.8	+0-0.5
58.7	100.0	12.4	100.0	32.8	100.0	Total
4.3		4.4		4.4		Moisture %

جدول ۲- نتایج شستشوی پذیری جریان باطله سیکلون واسطه سنگین

Size mm	Concentrate		Middle		Reject	
	W%	Ash %	W%	Ash %	W%	Ash %
+25	—	—	5.1	41.6	10.2	69.6
+12-25	0.1	9.2	9.7	41.4	22.5	69.0
+4-12	0.4	10.7	4.2	39.5	12.7	68.7
+3-4	1.3	9.1	4.0	41.2	8.2	73.2
+1-3	0.7	7.4	1.5	37.8	4.1	71.3
+0.5-1	1.9	7.1	2.2	33.5	7.5	72.3
0-0.5+	0.9	13.5	0.8	41.5	1.9	72.7
Total	5.4	9.1	27.5	40.3	67.2	70.2
Density (g/cm <sup>3</sup> )	Float 1.4		Float 1.8		Sink 1.8	

و غوطه‌ور باقی می‌مانند. برای شناورسازی این ذرات، نیاز به چگالی جدایش بالاتر است که منجر به تولید یک محصول با خاکستر بالاتر (میانی) می‌شود. با توجه به تک چگالی بودن سیکلون واسطه سنگین، عملکرد آن در جدایش ذرات میانی (نزدیک به چگالی جدایش) ضعیف است. در ابعاد کمتر از ۱ میلی‌متر با وجود آزاد بودن ذرات باطله و زغال، کارایی دستگاه پایین است و هدرروی از این بخش محرز و با نتایج محققان قبلی، مطابقت دارد [۲۱، ۲۰]. با توجه به گسترده بودن بازه ابعادی بار ورودی به بخش واسطه‌سنگین (۰٫۵+ تا ۳۰ میلی‌متر)، پرمیاری سازی ذرات کوچکتر از ۱ میلی‌متر با تجهیزات دیگر مانند تیتربد، ریفلاکس کلاسیفایر و اسپیرال کمک زیادی در جهت افزایش بازایی زغال است.

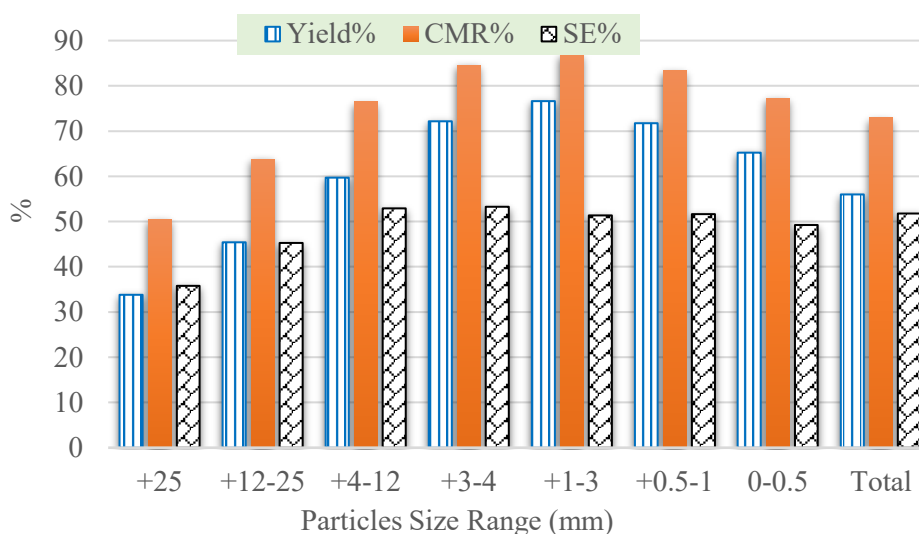
### ۳-۳- راندمان<sup>۱</sup>، بازیابی<sup>۲</sup> (CMR) و کارایی جدایش<sup>۳</sup> (SE) سیکلون واسطه‌سنگین

در اکثر کانی‌ها، بازیابی شاخص اصلی برای تحلیل نتایج است اما در زغال سنگ و چند نوع ماده معدنی دیگر که مواد معدنی با ارزش قسمت عمده بار ورودی را تشکیل می‌دهند، از راندمان به عنوان شاخص ارزیابی استفاده می‌شود. شکل ۲، راندمان، بازیابی و کارایی جدایش بازه‌های ابعادی مختلف سیکلون واسطه‌سنگین را نشان می‌دهد. همانطور که از نتایج مشخص است به دلیل قفل‌شدگی ذرات زغال و باطله در ابعاد درشت (بازه ابعادی ۱۲+ میلی‌متر)، راندمان، بازیابی و کارایی جدایش این بخش ابعادی پایین است. یعنی این بخش از ذرات، چگالی یا وزن مخصوص بالاتری از چگالی زغال دارند

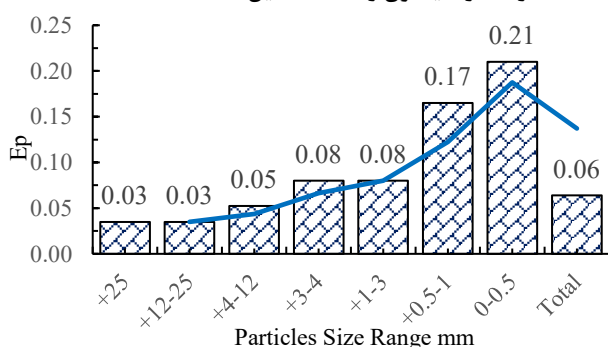
<sup>1</sup>- Yield

<sup>2</sup>- Cumulative Material Recovery

<sup>3</sup>- Separation Efficiency



شکل ۲- راندمان، بازیابی و کارایی جدایش بازه‌های ابعادی مختلف ذرات در سیکلون واسطه سنگین



شکل ۳- خطای احتمالی جدایش (Ep) سیکلون واسطه سنگین در بازه‌های ابعادی مختلف

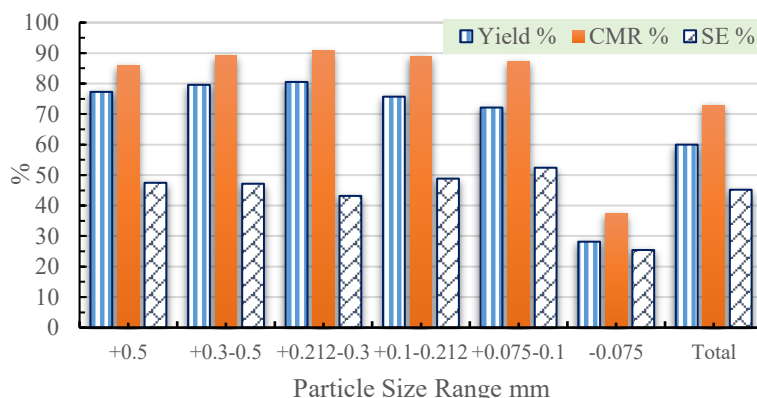
### ۳-۵- بررسی عملکرد زغالشویی واحد سلول‌های فلوتاسیون رافر

در این سلول‌ها، خاکستر بار ورودی، کنسانتره و باطله به ترتیب ۲۸/۷، ۱۳/۳ و ۵۱/۹ درصد تعیین شد. راندمان، بازیابی و کارایی جدایش کلی در این مرحله از فلوتاسیون به ترتیب معادل ۶۰، ۷۳ و ۴۵/۲ درصد بدست آمد که در شکل شماره ۴ قابل مشاهده است. بر اساس نتایج بدست آمده در جدول ۳، بخش ابعادی ریز بار ورودی فلوتاسیون به ویژه ابعاد ۷۵- میکرون، بیشترین میزان خاکستر را دارد. همچنین، مشاهده می‌شود که بیش از ۴۰ درصد از بار ورودی به مدار فلوتاسیون را بازه ابعادی کمتر از ۷۵ میکرون تشکیل می‌دهد. راندمان، بازیابی و کارایی جدایش این ذرات در مرحله رافر به مراتب پایین‌تر از ذرات درشت‌تر و به ترتیب برابر ۲۸/۲، ۳۷/۴ و ۲۵/۵ درصد است.

### ۳-۴- خطای احتمال جدایش (Ep) ابعادی سیکلون واسطه

با انجام آنالیزهای مختلف شستشوپذیری بر روی نمونه‌های گرفته شده از محصولات سیکلون واسطه سنگین، خطای احتمال جدایش کلی و بازه‌های ابعادی مختلف دستگاه محاسبه شد. بر اساس نتایج بدست آمده، خطای جدایش کلی دستگاه حدود ۰/۰۶ اندازه‌گیری و تعیین شد. مطابق اطلاعات موجود، مقدار Ep در محدوده ۰/۰۲ تا ۰/۰۸ مطلوب است. شکل ۳ مقادیر Ep دستگاه سیکلون واسطه سنگین را در محدوده‌های ابعادی مختلف نشان می‌دهد. بر اساس نتایج بدست آمده، عملکرد دستگاه در دو بازه ابعادی زیر ۰/۵ و ۰/۱-۵ میلی‌متر به علت به اشتباه تقسیم شدن ذرات زغال و باطله، ضعیف بوده و خطای احتمال جدایش در این دو محدوده ابعادی به ترتیب ۰/۲۱ و ۰/۱۷ تعیین شد که بین ۲ تا ۳ برابر حداکثر میزان مجاز این خطا ( $Ep=0.08$ ) است. خطای احتمال جدایش ذرات کوچکتر از ۱ میلی‌متر در سیکلون‌های واسطه سنگین با قطر زیاد، بالا است و با نتایج دانیل در سال ۲۰۰۰ مطابقت دارد [۲۲]. با کاهش و محدود کردن بازه ابعادی ذرات بار ورودی به دستگاه می‌توان تا حدی این خطای جدایش را کاهش داد؛ اما، همانگونه که عنوان شد، راه حل مطلوب، جدا کردن ذرات نرمه از ذرات درشت بار ورودی و پرعیارسازی آن‌ها با تجهیزات ثقلی دیگر مانند تیتربند سپراتور، ریفلاکس کلاسیفایر و اسپیرال است.

<sup>۱</sup>- Error Probable



شکل ۴- راندمان، بازیابی و کارایی جدایش بازه‌های ابعادی مختلف ذرات در مدار رافر فلوتاسیون

جدول ۳- راندمان، بازیابی و کارایی جدایش بازه‌های ابعادی مختلف در سلول‌های رافر

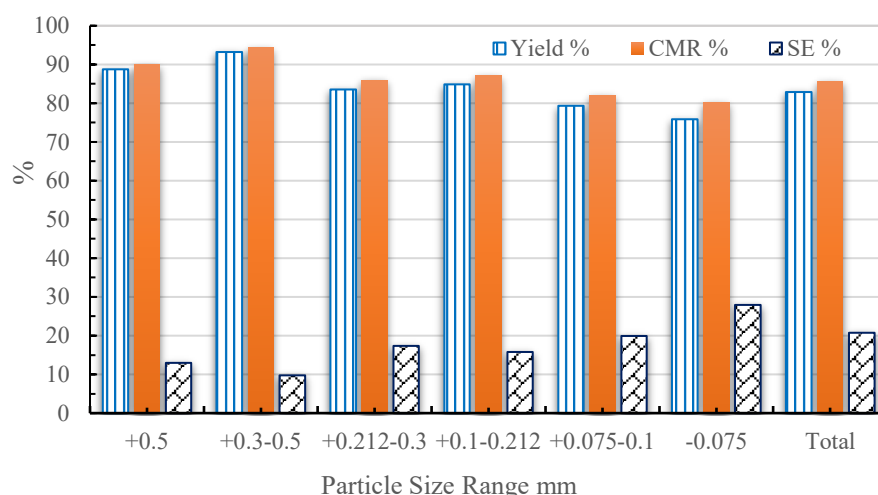
Size (mm)	Feed		Concentrate		Tailing		Yield %	CMR %	SE %
	weight %	ash %	weight %	ash %	weight %	ash %			
+0.5	11.2	18.1	13.2	9.0	16.5	49.1	77.3	85.9	47.5
+0.3-0.5	12.1	20.3	15.1	10.7	11.4	57.6	79.5	89.1	47.2
+0.212-0.3	13.2	23.7	25.3	14	14.0	63.8	80.5	90.8	43.2
+0.1-0.212	15.7	27.3	11.0	14.5	6.7	67.1	75.7	89.0	48.8
+0.075-0.1	6.7	28.8	5.4	13.9	4.0	67.4	72.1	87.2	52.4
-0.075	41.1	36.3	29.9	15.4	47.5	44.5	28.2	37.4	25.5
<b>Total</b>	100.0	28.7	100.0	13.3	100.0	51.9	60.0	73.0	45.2
<b>Solid %</b>	4.9		35.9		2.6		Rougher Flotation		

می‌شود که قابلیت پرعیارسازی آن با فرایندهای ثقلی میسر نباشد. با پیشرفت تکنولوژی و استفاده از روش‌ها و تجهیزات ثقلی جانبی برای بازه ابعادی بالاتر از ۰/۱۵ میلی‌متر زغال-سنگ، امکان افزایش راندمان و بازیابی بیشتر زغال وجود دارد.

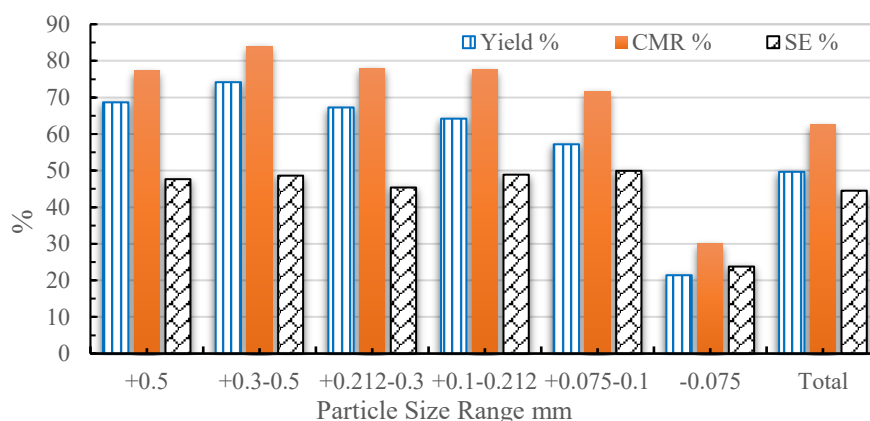
#### ۳-۶- سلول‌های فلوتاسیون کلینر

برای افزایش کیفیت کنسانتره تولیدی مرحله رافر، کنسانتره مرحله اول (رافر) به سلول‌های کلینر فلوتاسیون منتقل و مجدداً تحت عملیات پرعیارسازی قرار می‌گیرد. محتوی خاکستر بار ورودی، کنسانتره و باطله سلول‌های کلینر به ترتیب حدود ۱۳/۳، ۱۰/۴ و ۲۷/۳ درصد است. با هدف مشخص شدن عملکرد سلول‌های کلینر در پرعیارسازی بازه‌های ابعادی مختلف ذرات، نمونه‌ها دانه‌بندی و خاکسترسنجی شدند. بر اساس نتایج بدست آمده، راندمان، بازیابی و کارایی جدایش کلی بخش کلینر به ترتیب ۸۲/۹، ۸۵/۶ و ۲۰/۸ درصد محاسبه شد (شکل ۵). عملکرد کلی مدار فلوتاسیون حاصل عملکرد سلول‌های رافر و کلینر است. راندمان، بازیابی و کارایی جدایش کلی مدار فلوتاسیون (رافر و کلینر) مطابق شکل ۶ به ترتیب ۴۹/۷، ۶۲/۵ و ۴۴/۵ درصد است که راندمان کمتر از ۵۰ درصد را نشان می‌دهد.

اگرچه فلوتاسیون مکانیکی عملکرد بهتری را در بازیابی ذرات درشت دارد؛ اما گسترده بوده محدود ابعادی ذرات (صفر تا ۰/۵ میلی‌متر) و وجود رس در جریان بار ورودی فلوتاسیون منجر به عملکرد نامناسب این تجهیزات در پرعیارسازی ابعاد ریز ذرات شده است. درصد خاکستر نسبتاً بالای کنسانتره بخش ابعادی کمتر از ۷۵ میکرون و همچنین پایین بودن درصد خاکستر جریان باطله این بخش ابعادی، کاملاً حاکی از عملکرد ضعیف فلوتاسیون مکانیکی در بازه ابعادی ریز است که موید نتایج تحقیقات میکاییل و همکاران در سال ۲۰۱۶ نیز است [۲۳]. بر مبنای نظر محققان، بازیابی ضعیف ذرات ریز به فرکانس برخورد هیدرودینامیکی پایین بین ذرات بسیار کوچک با اندازه میکرون و حباب‌های نسبتاً بزرگ میلی‌متری نسبت داده شده است [۲۴]. فلوتاسیون ذرات ریز همچنین به دلیل نسبت بالای سطح به جرم، چالش برانگیز است که می‌تواند ظرفیت حمل حباب سیستم‌های فلوتاسیون صنعتی را تحت تاثیر قرار دهد [۲۵]. این موضوع نیز می‌تواند تاثیر نامطلوبی بر فعل و انفعالات شیمیایی سطحی که برای اثر کلکتور ضروری است، داشته باشد [۲۶]. در فرآوری زغال، بر خلاف سایر مواد معدنی، فرآیند فلوتاسیون برای محدوده‌های ابعادی در نظر گرفته



شکل ۵- راندمان، بازیابی و کارایی جدایش بازه‌های ابعادی ذرات در مدار کلینر فلوتاسیون



شکل ۶- راندمان، بازیابی و کارایی جدایش کلی مدار فلوتاسیون

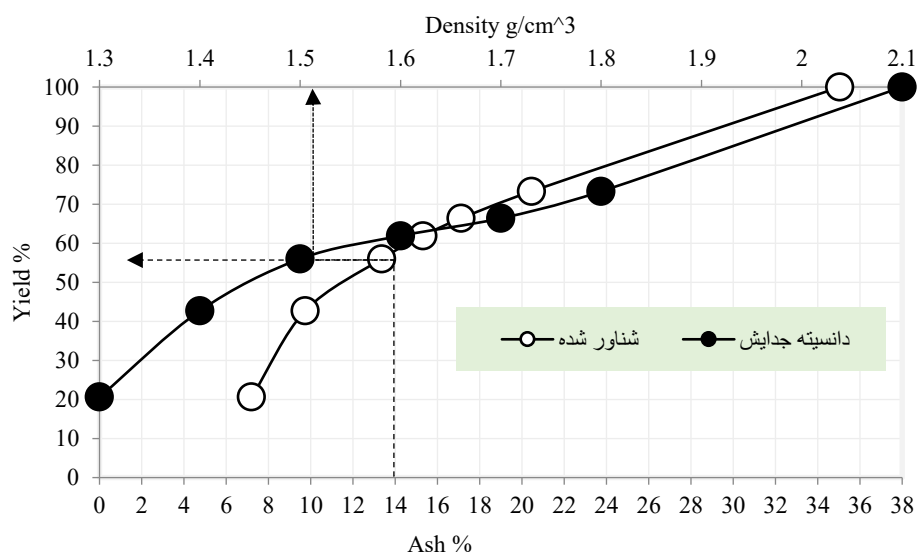
واقعی دستگاه (بدون لحاظ کردن رطوبت) در این کیفیت محصول، ۵۰/۶ درصد است. راندمان تئوریک ذرات بار ورودی به سیکلون برای تولید خاکستر محصول مشابه (یعنی ۱۳/۲ درصد)، ۵۵/۵ درصد است (شکل ۷). بنابراین، عملکرد کلی سیکلون واسطه مناسب بوده و بیش از ۹۰ درصد (۹۱/۱ درصد) راندمان تئوریک، در صنعت محقق شده است. چگالی واسطه ارسالی به سیکلون در شرایط عملیاتی ۱/۵۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب ثبت شده است. با توجه به تاثیر نیروی گریز از مرکز داخل سیکلون واسطه سنگین، چگالی جدایش پایین‌تر از چگالی ارسالی واسطه است. مطابق با اطلاعات شستشوپذیری انجام شده، چگالی جدایش برای تولید محصولی با خاکستر ۱۳/۲ درصد، ۱/۴۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب است.

همانطور که از نتایج استنباط می‌شود، راندمان و بازیابی سلول‌های کلینر به دلیل پایین بودن خاکستر پالپ بار ورودی تقریباً بالا است. پایین بودن کارایی جدایش این سلول‌ها نیز ناشی از وجود بخش زیاد ذرات زغال در جریان باطله است که علاوه بر احتمال هدرروی، باعث پر کردن ظرفیت سلول‌های بخش رافر (به دلیل برگشت جریان باطله سلول‌های کلینر به خوراک سلول‌های رافر) می‌شود.

### ۳-۷- مقایسه راندمان تئوریک و واقعی سیکلون

#### واسطه سنگین

در بررسی عملکرد سیکلون واسطه سنگین، خاکستر سه جریان بار ورودی، کنسانتره و باطله این دستگاه به ترتیب ۳۵/۱، ۱۳/۲ و ۵۷/۵ درصد بدست آمد. بنابراین، راندمان



شکل ۷- راندمان تئوریک بار ورودی به سیکلون واسطه سنگین

در بررسی عملکرد سلول‌های فلوتاسیون، درصد خاکستر سه جریان بار ورودی، کنسانتره و باطله این بخش به ترتیب ۲۵/۷، ۱۰/۵ و ۵۲/۰ بدست آمده است. راندمان واقعی مدار فلوتاسیون با این کیفیت محصول، ۶۳/۴ درصد است. راندمان واقعی مدار فلوتاسیون با این کیفیت محصول، ۶۳/۴ درصد است. راندمان تئوری ذرات بار ورودی به سلول‌های فلوتاسیون برای تولید خاکستر محصول مشابه (یعنی ۱۰/۵ درصد)، ۶۷/۶ درصد است. در این صورت، عملکرد کلی مدار فلوتاسیون مناسب بوده و ۹۳/۸ درصد از راندمان تئوریک، در صنعت محقق شده است. اگر چه راندمان مدار فلوتاسیون نسبت به راندمان بدست آمده از آنالیز رهایی تفاوت فاحشی ندارد؛ اما، افزایش راندمان و کارایی جدایش روش‌های ثقلی در فرآوری ذرات ریز و مزایای بیشتر این روش‌ها نسبت به فرایند فلوتاسیون (شامل: سادگی عملیات و بدون استفاده از مواد شیمیایی و سیستم هوادهی، کاهش گوگرد پیریتی، شرایط بهتر زیست محیطی، کم بودن پارامترهای عملیاتی و نظایر آن، موجب توجه اکثر کارخانه‌های زغالشویی به این روش‌ها شده است.

### ۳-۹- مقایسه راندمان محدوده ابعادی ۰/۷-۰/۱۵+

میلی‌متر ذرات به دو روش فلوتاسیون و روش ثقلی

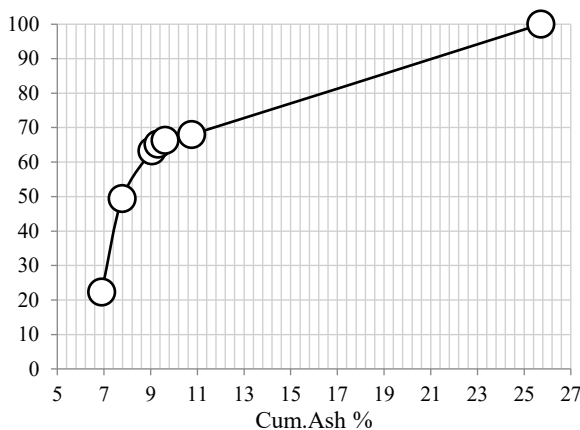
برای مشخص شدن اختلاف راندمان روش‌های ثقلی و فلوتاسیون، محدوده ابعادی ۱۵۰+ میکرون بار ورودی مدار فلوتاسیون (به دو روش شستشوی پذیر، آنالیز غرق و شناورسازی و آنالیز رهایی) پرعیارسازی شد. همانطور که از نتایج مشخص است؛ اختلاف راندمان در تولید محصولی با

به دلیل گستردگی بازه ابعادی بار ورودی به سیکلون واسطه سنگین و همچنین بالا بودن قطر دستگاه (۹۵ سانتی-متر)، خطای احتمال جدایش (Ep) برای بازه ابعادی زیر ۱ میلی‌متر بالا و حدود ۰/۱۸ است. در این شرایط، بنظر می‌رسد با بکارگیری مدار جدید برای فرآوری بازه ابعادی ۱۵/۷-۰/۱۰+ میلی‌متر بار ورودی کارخانه، بازیابی و انعطاف‌پذیری مدار پرعیارسازی، بهبود قابل توجهی داشته باشد.

### ۸-۳- راندمان تئوریک و واقعی جدایش در ابعاد ۰/۵-

میلی‌متر (بار ورودی فلوتاسیون)

پس از انجام آنالیز رهایی، کیفیت محصول (درصد خاکستر) و درصد راندمان آن محاسبه شد. جزییات مربوط به شستشوی نمونه بار ورودی فلوتاسیون در شکل ۸ آمده است.



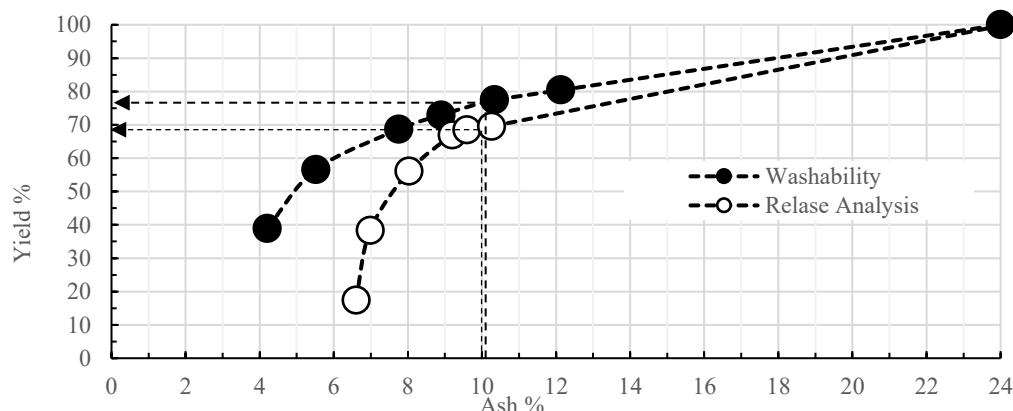
شکل ۸- نمودار آنالیز رهایی نمونه بار ورودی فلوتاسیون (شناور شده در کف)

ابعادی از بار ورودی کارخانه نیز مشخص شد. با توجه به عملکرد ضعیف سلول‌های مکانیکی برای بازه‌های ابعادی ریزدانه در شرایط فعلی (به دلیل وجود ذرات رس) و انجام شناورسازی همزمان ذرات ریز و درشت (تا ۷۰۰ میکرون)، محدود کردن دانه‌بندی بار ورودی فلوتاسیون (تا حداکثر ۲۰۰ میکرون)، باعث افزایش بازیابی این بخش از بار ورودی کارخانه می‌شود. به دلیل وجود ذرات رسی در بار ورودی فلوتاسیون و به برای جلوگیری از افزایش خاکستر محصول، نیاز است تمهیدات لازم شامل افزایش ارتفاع کف، کاهش نرخ هوادهی، کاهش مصرف مواد شیمیایی بررسی و بهینه شود. نتایج آنالیز رهایی بازه ابعادی ۰/۱۵ میلی‌متر بار ورودی، تاییدکننده افزایش راندمان این ذرات در فرآیند فلوتاسیون است. راندمان این ذرات در کیفیت مشابه قبل (درصد خاکستر ۱۰/۵)، حدود ۵۹ درصد پیش‌بینی می‌شود؛ که نتایج آن در جدول شماره ۴ و شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.

خاکستر ۱۰ درصد بیشتر از ۷ درصد است (شکل ۹). راندمان روش‌های ثقی و فلوتاسیون به ترتیب ۷۶/۴ و ۶۹ درصد بدست آمد. این اختلاف راندمان در تولید کنسانتره با کیفیت کمتر از ۱۰ درصد به مراتب بالاتر است. بنابراین، استفاده از روش پرعیارسازی ثقی (به جای فلوتاسیون) برای تغلیظ ذرات نرمه بالاتر از ۱۵۰ میکرون باعث افزایش راندمان کارخانه می‌شود. در این ارتباط، استفاده از جداکننده‌های ثقی مانند اسپیرال، TBS<sup>۱</sup>، RC<sup>۲</sup> و سیکلون واسطه سنگین با قطر کم، قابل بررسی است.

### ۳-۱۰- آنالیز رهایی ذرات زیر ۰/۱۵ میلی‌متر فلوتاسیون

با پیش‌بینی تغییر محدوده دانه‌بندی مدارهای مختلف کارخانه زغالشویی و در نظر گرفتن مدار جدید برای محدوده ابعادی ۰/۷ تا ۰/۱۵ میلی‌متر، نیاز است تا وضعیت و عملکرد فلوتاسیون در بازه ابعادی زیر ۰/۱۵ میلی‌متر نیز مشخص شود. با جدا کردن این بخش از ذرات بار ورودی فلوتاسیون و انجام آنالیز رهایی، راندمان تئوریک و ایده‌آل این بازه



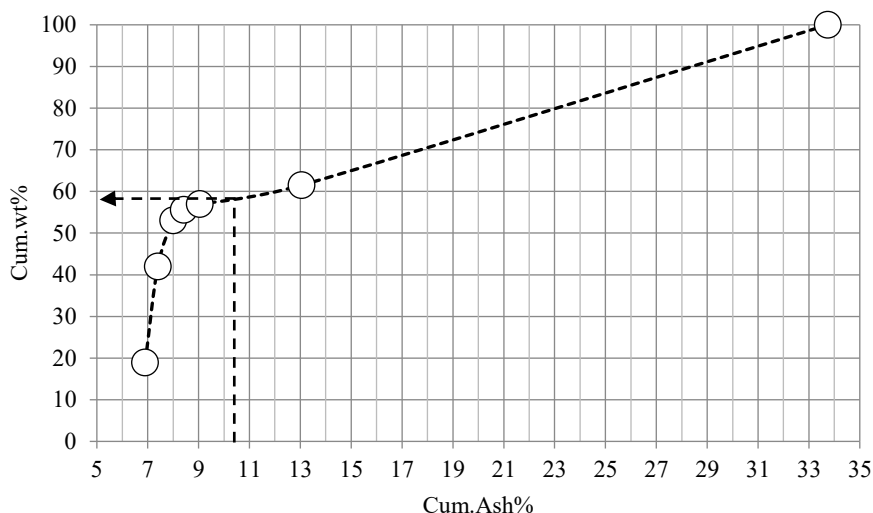
شکل ۹- راندمان زغالشویی در بازه ابعادی ۷۰۰-۱۵۰ میکرون با دو روش فلوتاسیون و ثقی

جدول ۴- نتایج آنالیز رهایی ذرات زیر ۰/۱۵ میلی‌متر

Time (s)	W %	Ash %	Cumulative wt%	Cumulative ash%
15	18.9	6.9	18.9	6.90
30	23.1	7.8	41.9	7.39
45	11.1	10.3	53.0	8.00
60-اول	2.5	17.3	55.5	8.42
60-دوم	1.4	33.7	57.0	9.05
tail-مرحله دوم	4.5	63.2	61.5	13.05
tail-مرحله اول	38.5	66.8	100	33.74

<sup>1</sup>- Teetered Bed Separator

<sup>2</sup>- Reflux classifier



شکل ۱۰- نتایج آنالیز رهایی ذرات زیر ۱۵۰ میکرون

### ۱۱-۳- افزایش راندمان ناشی از اصلاح مدار

مطابق با نتایج حاصل، تغییر روش پرعیارسازی ذرات ۰/۷ تا +۰/۱۵ میلی‌متر بار ورودی کارخانه به یکی از روش‌های ثقلی مانند اسپیرال، تیتربد، ریفلاکس کلاسیفایر و یا سیکلون واسطه سنگین با قطر کوچک (در صورت امکان تامین مگنتیت با ابعاد بسیار ریز کمتر از ۱۰ میکرون)، راندمان این بخش از ذرات تا بیش از ۷ درصد افزایش می‌یابد. در شرایط فعلی فلوتاسیون که ذرات ریز و درشت با هم تحت یک فرآیند پرعیارسازی‌اند، راندمان ذرات ریز به دلیل وجود ذرات رسی بطور قابل توجهی پایین‌تر از ذرات درشت است.

بنابراین، با محدود شدن ذرات به کمتر از محدوده ابعادی ۱۵۰ میکرون در روش فلوتاسیون و اعمال پارامترهای عملیاتی بهینه، افزایش کیفیت جدایش و راندمان حاصل خواهد شد. همانطور که از نتایج آنالیز رهایی ذرات زیر ۱۵۰ میکرون نیز مشخص است، در یک کیفیت محصول مشابه، راندمان ذرات ریز مورد نظر حدود ۲۳ درصد افزایش یافته است. اگر سهم و راندمان بازه‌های ابعادی مورد نظر در دو حالت یاد شده مقایسه شود، راندمان کلی کارخانه حدود ۳ درصد افزایش می‌یابد. نتایج مقایسه در جدول ۵ قابل مشاهده است.

جدول ۵- مقایسه راندمان کارخانه با تغلیظ ثقلی ذرات در محدوده ابعادی ۰/۷ تا +۰/۱۵ میلی‌متر

Yield%	Ash %	W%	Size mm
56	33.8	80.8	+0.707
70	24.6	9.6	+0.15-0.707
36	34	9.6	-0.15
55.4	32.9	100.0	Total

راندمان کارخانه در شرایط فعلی

Yield%	Ash %	W%	Size mm
56	33.8	80.8	+0.707
76	24.6	9.6	+0.15-0.707
59	34	9.6	-0.15
58.2	32.9	100.0	Total

راندمان کارخانه با اصلاح مدار

### ۴- نتیجه‌گیری

در بررسی و پایش انجام شده، کارایی جدایش سیکلون واسطه سنگین در بازه‌های ابعادی درشت (۱۲+ میلی‌متر) به دلیل قفل شدگی ذرات و در بازه‌های ابعادی زیر ۱ میلی‌متر نیز به دلایل: قابل توجه نبودن اختلاف وزن مخصوص ذرات باطله و زغال در ابعاد ریز، گستردگی بازه ابعادی ذرات

بار ورودی (۰.۵-۳۰+ میلی‌متر) و بالا بودن قطر سیکلون (۹۵ سانتی‌متر) و تاثیر کم نیروی گریز از مرکز بر روی ذرات ریز، پایین است. خطای احتمالی (Ep) در بازه‌های ابعادی ۵-۰/۱+ و ۰/۵- میلی‌متر به ترتیب ۰/۱۷ و ۰/۲۱ است که حاکی از عملکرد ضعیف سیکلون واسطه سنگین در پرعیارسازی ذرات زیر ۱ میلی‌متر است. با بررسی و پایش

[4] Jameson, G. J. 2010. New directions in flotation machine design. *Minerals Engineering* 23 (11-13):835-41. doi:10.1016/j.mineng.2010.04.001.

[5] Jena, M. S., S. K. Biswal, S. P. Das, and P. Reddy. 2008. Comparative study of the performance of conventional and column flotation when treating coking coal fines. *Fuel Processing Technology* 89:1409-15. doi:10.1016/j.fuproc.2008.06.012.

[۶] لورک آقا، غلام عباس، بنیسی، صمد، حاجی امین شیرازی، حسن، یوسف الهی، مهدی " ارزیابی عملکرد واحد واسطه سنگین کارخانه زغالشویی زرنده، کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۸۳.

[۷] اسماعیلی، محمدجواد و صلحی، سیدمحمد و بنیسی، صمد، ۱۳۸۷، مدلسازی عملکرد هیدروسیکلون کارخانه زغالشویی اینترکربن (زرنده) بر اساس مدل‌های پلیت و ناکسوارا راتو، دومین کنفرانس مهندسی معدن

[۸] امین آقایی، صبا و مظفری، پرویز و قاسمی، علی، ۱۳۹۳، طراحی، ساخت و بهینه‌سازی سیکلون فقط آب، دومین کنگره ملی زغال سنگ ایران، کرمان، <https://civilica.com/doc/331120>

[۹] علی دخت، مهدی، معاونت فنی و مهندسی، اصلاح مدار تغلیظ کارخانه زغالشویی طیس از طریق نصب مدار سیکلون - تیتربد - اسپیرال، شرکت زغال سنگ پروده طیس، ۱۳۹۵.

[10] Kohmuench, J.N., Mankosa, M.J., Honaker, R.Q., Bratton, R.C. (2006) Applications of the CrossFlow teeter-bed separator in the U.S. coal industry, *Minerals and Metallurgical Processing*, 23(4), 187-195.

[11] Honaker, R. Q., Jain, M., Parekh, B. K., and Saracoglu, M., 2007, "Ultrafine coal cleaning using spiral concentrators", *Minerals Engineering*, Vol. 20, No.14, pp. 1315- 1319.

[12] Burt, R.O., 1984, *Gravity Concentration Technology*, Elsevier. Amsterdam, pp. 261-287.

[13] Palowitch, E.R., Deurbrouck, A.W., Parsons, T.H. 1991, *Wet fine particle concentration*, Section 2, Hydraulic

عملکرد فلوتاسیون در بازه‌های ابعادی مختلف بار ورودی، بازیابی و کارایی جدایش پایین فلوتاسیون در محدوده ابعادی زیر ۷۵ میکرون به دلیل وجود ذرات رسی محرز و به ترتیب برابر ۳۰ و ۲۳/۸ درصد است. با محدود کردن محدوده ابعادی بار ورودی فلوتاسیون به کمتر از ۱۵۰ میکرون و اعمال پارامترهای عملیاتی بهینه، امکان افزایش راندمان این بخش از بار ورودی فلوتاسیون از ۳۶ به ۵۹ درصد امکان پذیر است. از طرفی فرآیندهای ثقلی به دلیل سادگی عملیات و پایین بودن خطای جدایش، عملکرد بهتری نسبت به فلوتاسیون در بازه‌های ابعادی درشت (۰/۱۵+ میلی‌متر) دارند و در مقایسه انجام شده برای بازه ابعادی ۰/۷ تا ۰/۱۵ میلی‌متر، افزایش ۷ درصدی راندمان محرز است. بنابراین، استفاده از تجهیزاتی مانند اسپیرال، تیتربد (TBS)، ریفلاکس کلاسیفایر (RC)، سیکلون واسطه سنگین با قطر کم برای تغلیظ ذرات ۱-۰/۱۵ میلی-متر بار ورودی، منجر به افزایش ۳ درصدی راندمان کارخانه می‌شود. با اضافه شدن مدار سوم، انعطاف پذیری کارخانه برای تولید محصولی با کیفیت و بازیابی بالاتر، امکان پذیر می‌شود.

#### ۵- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشد.

#### ۶- قدردانی

از داوران محترم برای نظرهای دقیق و بازخوردهای سازنده‌ای که به بهبود و ارتقاء کیفی این مقاله کمک شایانی کردند، صمیمانه تشکر میکنیم. همچنین از سردبیر محترم به خاطر حمایت‌ها و راهنمایی‌های مفیدی که در طول فرایند بازبینی انجام دادند، سپاسگزاریم.

#### ۷- منابع

[1] M. Ito, Recent developments in advanced coal cleaning, *J. MMIJ* 124 (2) (2008) 865-870,

<https://doi.org/10.2473/JOURNALOFMMIJ.124.865>.

[2] D. Dou, J. Yang, J. Liu, H. Zhang, A novel distribution rate predicting method of dense medium cyclone in the Taixi coal preparation plant, *Int. J. Miner.Process.* 142 (2015) 51-55, <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.04.015>.

[3] I. Plessis, Processing strategy for different coal types, *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* 110 (2010) 663-669.

- the Physical Processes", DOI:<https://doi.org/10.26190/unsworks/18389>
- [23] Michael J. Mankosa<sup>1</sup>, Jaisen N. Kohmuench<sup>1</sup>, Gerald H. Luttrell<sup>2</sup>, John A. Herbst<sup>3</sup> and Aaron Noble<sup>3</sup>, 2016, "SPLIT-FEED CIRCUIT DESIGN FOR PRIMARY SULFIDE RECOVERY", 2Department of Mining & Minerals Engineering 100 Holden Hall, Virginia Tech Blacksburg, Virginia USA 24061
- [24] Trahar, W.J., & Warren, L.J. (1976). The floatability of very fine particles – A review. *International Journal of Mineral Processing*, 3(2), 103–131.
- [25] Yianatos, J.B., Finch, J.A., & Laplante, A.R. (1988). Selectivity in column flotation froths. *International Journal of Mineral Processing*, 15(2), 279–292.
- [26] Laskowski, J. (1989). *Frothing in Flotation*, Gordon and Breach
- Concentration, in: *Coal Preparation*, Leonard, J.W. (Ed.), SME, Littleton, CO, 435-449.
- [14] Kapur, P. C., and Meloy, T. P., 1998, "Industrial modeling of spirals for optimal configuration and design: spiral geometry, fluid flow and forces on particles", *Powder Technology*, Vol. 102, No.3, pp. 244-252.
- [15] Luttrell, G. H., and Honaker, R. Q., 2003, "OPERATING GUIDELINES for COAL SPIRAL CIRCUITS", *Coal Age*, Vol. 108, No.8, pp. 26.
- [16] Bethell, P. J., and Arnold, B. J., 2003, "Comparing a two-stage spiral to two stages of spirals for fine coal preparation", *Advances in Gravity Concentration*, by Honaker, R. Q., and Forrest, W. R. (Ed), SME, Littleton, CO, pp. 107-114.
- [17] DE KORTE, G.J.. Coal preparation research in South Africa. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* online. 2010, vol.110, n.7, pp.361-364. ISSN 2411-9717.
- [18] Yusuf Enes Pural, Ayhan Ali Sirkeci & Feridun Boylu (2022) Simulation and Performance Evaluation of Three Product Dense Medium Cyclone, *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, DOI: 10.1080/19392699.2022.2110085
- [19] V. Hornn, M. Ito, H. Shimada, C.B. Tabelin, S. Jeon, I. Park, N. Hiroyoshi, Agglomeration–flotation of finely ground chalcopyrite using emulsified oil stabilized by emulsifiers: implications for porphyry copper ore flotation, *Metals* 10 (2020) 912, <https://doi.org/10.3390/met10070912>.
- [20] Driessen, H.H., 1975, "Stamicarbons Heavy Medium Cyclone Process for the Separation of Minerals and Coal", Internal Stamicarbon/DSM Publication.
- [21] Driessen, M.G. 1948, "The Use of Hydraulic Cyclones as Thickeners and Washers in Modern Coal Preparation", *Trans. AIME*, Vol.177, pp.240-261.
- [22] DANIEL JOSE SUASNABAR, 2000, "Dense Medium Cyclone Performance Enhancement Via Computational Modelling of