

Stone-Cutting Industries Wastewater Recycling and Reuse by Using Hydrocyclone, an Economical Approach for Reducing Water Consumption

A. Naderi¹, M. Masoudian², M. Habibian³

1. PhD Student of Water Structure, Dept. of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
2. Assoc. Prof., Dept. of Water Structure, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
(Corresponding Author) masoudian@sanru.ac.ir
3. Assist. Prof., Dept of Petroleum Engineering, Chemistry and Chemical Engineering Research Center of Iran, Tehran, Iran

(Received May 11, 2019 Accepted Aug. 21, 2019)

To cite this article:

Naderi, A., Masoudian, M., Habibian, M. 2020. "Stone-cutting industries wastewater recycling and reuse by using hydrocyclone, an economical approach for reducing water consumption" Journal of Water and Wastewater, 31(3), 147-153. Doi: 10.22093/wwj.2019.185329.2862 (In Persian)

Abstract

Some problems exist regarding this industry such as high water consumption, wastewater treatment and recycling. In this study, stone-cutting industry recycling and reuse by using hydrocyclone in different operational conditions have been investigated. The effect of operational parameters such as pressure drop and suspension concentration on separation efficiency of two kinds of hydrocyclone with different geometries in experimental conditions has been investigated. Experiments were designed with response surface methodology (RSM), CCD model using Design Expert software. Travertine powder particles with particle size less than 200 μm were used and particles size was measured by Particle Size Analysis machine, and particle shapes were imaged by SEM analysis. By increasing input pressure, the passing flow rate of hydrocyclone increased and the maximum flow rate for hydrocyclones type 1 and 2 were 203 and 268 ml/s, respectively. The results showed that the separation efficiency increases by increasing of input pressure. Analysis of results demonstrated that the best separation efficiency for hydrocyclones type 1 and type 2 were 90% and 90.4%, respectively. According to a comparison between hydrocyclone method and the traditional method of water recycling, it is concluded that hydrocyclone method reduces the water and energy consumption in stone cutting industries and is an economical and optimum method for wastewater recycling and water reuse in stone cutting industry.

Keywords: Recycle, Wastewater, Separation, Hydrocyclone, Stone-cutting.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۱، شماره ۳، صفحه: ۱۵۳-۱۴۷

بازیافت و استفاده مجدد پساب کارخانه‌های سنگ‌بری به روش هیدروسیکلون، راهکاری اقتصادی برای کاهش مصرف آب

افشین نادری^۱، محسن مسعودیان^۲، محمود حبیبیان^۳

۱- دانشجوی دکترای سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
 ۲- دانشیار، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

(نویسنده مسئول) masoudian@sanru.ac.ir

۳- استادیار، گروه مهندسی شیمی، پژوهشگاه نفت، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، تهران، ایران

(دریافت ۹۸/۲/۲۱ پذیرش ۹۸/۵/۳۰)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

نادری، ا.، مسعودیان، م.، حبیبیان، م.، ۱۳۹۹، "بازیافت و استفاده مجدد پساب کارخانه‌های سنگ‌بری به روش هیدروسیکلون، راهکاری اقتصادی

برای کاهش مصرف آب" مجله آب و فاضلاب، ۳۱(۳)، ۱۵۳-۱۴۷. Doi: 10.22093/wwj.2019.185329.2862

چکیده

از مشکلات مهم صنعت سنگ‌بری، مصرف زیاد آب، تصفیه و بازیافت پساب این صنعت است. در این پژوهش، امکان بازیافت و استفاده مجدد از پساب صنعت سنگ‌بری با استفاده از روش جداسازی ذرات جامد از مایع در هیدروسیکلون در شرایط عملیاتی مختلف بررسی شد. تأثیر پارامترهای عملیاتی نظیر افت فشار و غلظت سوسپانسیون بر عملکرد جداسازی، توسط دو نوع هیدروسیکلون با هندسه‌های متفاوت در شرایط آزمایشگاهی بررسی شد. آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ RSM، مدل CCD با استفاده از نرم‌افزار Design Expert طراحی شد. قطر ذرات با استفاده از دستگاه Particles size analysis اندازه‌گیری شد و شکل ذرات با دستگاه SEM تصویربرداری شد. با افزایش فشار ورودی، شدت جریان عبوری از هیدروسیکلون افزایش یافت که برای هیدروسیکلون نوع اول بیشترین دبی، ۲۰۳ میلی‌لیتر در ثانیه و هیدروسیکلون نوع دوم، ۲۶۸ میلی‌لیتر در ثانیه به‌دست آمد. نتایج نشان داد که با افزایش فشار ورودی، بازده جداسازی افزایش می‌یابد. با تحلیل نتایج، بهترین بازده جداسازی برای هیدروسیکلون نوع اول ۹۰ درصد و برای هیدروسیکلون نوع دوم ۹۰/۴ درصد به‌دست آمد. با توجه به مقایسه روش هیدروسیکلون نسبت به روش‌های موجود می‌توان به این نتیجه رسید که روش هیدروسیکلون، یک روش کاملاً اقتصادی و بهینه برای بازیافت پساب و استفاده مجدد آب برای صنعت سنگ‌بری است.

واژه‌های کلیدی: بازیافت، پساب، جداسازی، هیدروسیکلون، سنگ‌بری

۱- مقدمه

تا ۱۰ درصد وزنی ذرات سنگ است (Ozyonar and Karagozoglu, 2012) بنابراین می‌توان با جداسازی ذرات جامد موجود، از پساب به‌عنوان منبع آب برای استفاده مجدد استفاده کرد. از مشکلات مهم صنعت سنگ‌بری، مصرف زیاد آب، تصفیه و بازیافت پساب کارخانه‌های این صنعت است (Fahiminia et al., 2013)

مصرف آب در صنعت سنگ‌بری، طی روند برش سنگ برای تسریع در فرایند تولید، خنک کردن دستگاه‌های برش و جلوگیری از ایجاد گرد و غبار، از اهمیت زیادی برخوردار است (Barros et al., 2009). در یک کارخانه سنگ‌بری به‌طور میانگین، روزانه ۵۰ تا ۱۵۰ متر مکعب آب مصرف می‌شود که پس از استفاده، پساب حاوی ۲



می‌یابد در حالی که افت فشار، سریع افزایش می‌یابد (Zhang et al., 2017).

فشار خوراک ورودی از دیگر پارامترهای مؤثر بر عملکرد جداسازی هیدروسیکلون‌ها است که با بازده جداسازی و مصرف انرژی متناسب است (Neesse et al., 2015).

هدف از انجام این پژوهش، استفاده از روش هیدروسیکلون برای جداسازی ذرات جامد از پساب صنعت سنگبری و بازگرداندن آب با کمترین ذرات بود.

۲- مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده در این پژوهش، پساب کارخانه سنگ تراورتن با دانسیته معادل برابر ۲۵۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب بود. نمودار دانه‌بندی ذرات در شکل ۱ نشان داده شده است. با استفاده از عکس‌برداری میکروسکوپی شکل ذرات پودر تراورتن به روش SEM تصویربرداری شد که در شکل ۲ نشان داده شده است.

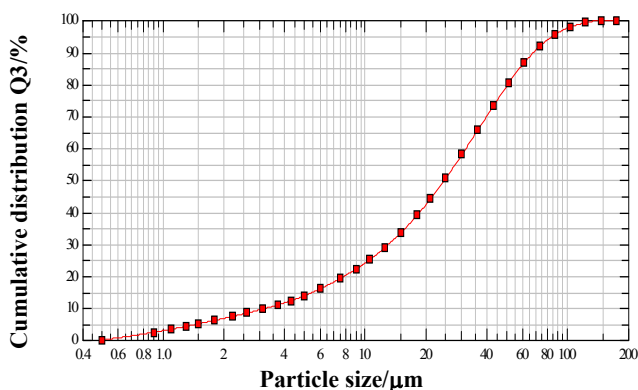
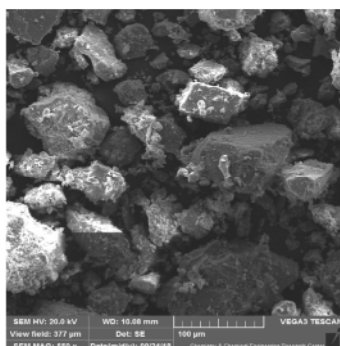


Fig. 1. Grain size distribution of travertine powder particles

شکل ۱- منحنی دانه‌بندی ذرات پودر تراورتن



روش‌های تصفیه پساب کارخانه‌های سنگبری در ایران به صورت سنتی، استفاده از حوضچه‌های ته‌نشینی و گاهی اوقات استفاده از دستگاه مدرن فیلتر پرس است.

در این پژوهش روش جداسازی ذرات جامد در پساب تولید شده با استفاده از هیدروسیکلون بررسی شد. رسوب‌گذاری گریز از مرکز، اساس جداسازی در هیدروسیکلون است. هیدروسیکلون‌ها دارای اجزای متحرکی نیستند و حرکت چرخشی لازم، توسط خود سیال انجام می‌شود (Tian et al., 2018).

مزیت استفاده از هیدروسیکلون، بازده جداسازی زیاد و اندازه برش کم، عدم وجود اجزای متحرک، مصرف انرژی کم، دامنه عملیاتی وسیع، حجم کم، قیمت مناسب، نصب و راه‌اندازی راحت، هزینه نگهداری کم و قابلیت انعطاف‌پذیری زیاد است (Ni et al., 2018).

پژوهشگران، بررسی بر روی جداسازی مخمر از تخمیر الکی در هیدروسیکلون‌هایی با قطرهای ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر، که قطرهای سرریز، ورودی، ته‌ریز و زاویه مخروطی متفاوت داشتند، انجام دادند و در نهایت به بازده جداسازی ۹۲/۱۲ درصد رسیدند (Xu et al., 2016).

صیفی مزرعه‌نو و همکاران در سال ۲۰۱۹ اثر فشار و غلظت بر عملکرد جداسازی مخمر در هیدروسیکلونی به قطر ۲۱ میلی‌متر و نتایج نسبت غلظت‌ها، ظرفیت و نیروی سانتریفیوژی در آن را بررسی کردند (Seyfi Mazraeno et al., 2019).

ژانگ و همکاران، هیدروسیکلون‌های مختلف با شدت جریان‌های ورودی متفاوت، با استفاده از سیال‌های مختلف را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش شدت جریان خوراک، هر دو فاکتور بازده جداسازی و نسبت تقسیم به آهستگی افزایش

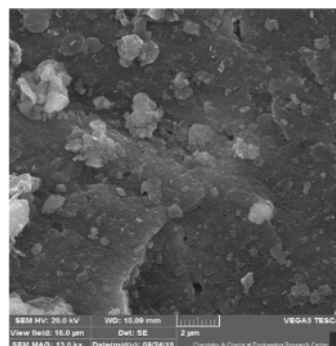


Fig. 2. Scanning electron microscopy images of powder particles travertine stone with scale 2 and 100 μm

شکل ۲- تصویر میکروسکوپی الکترونی ذرات پودری سنگ تراورتن با مقیاس ۲ و ۱۰۰ میکرون



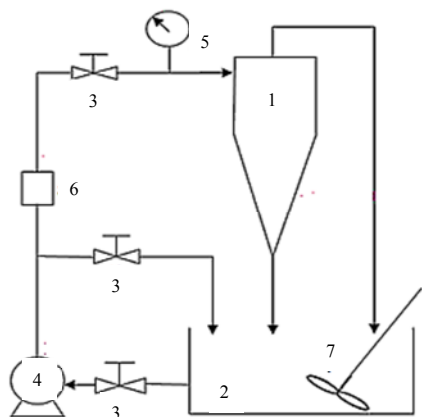


Fig. 3. Experimental setup: 1. Hydrocyclone 2. Tank
3. Control valve 4. Electro pump 5. Barometer
6. Flow meter 7. Agitator

شکل ۳- سامانه آزمایشگاهی: ۱- هیدروسیکلون ۲- مخزن ۳- شیر کنترل ۴- الکتروپمپ ۵- فشارسنج ۶- دبی سنج ۷- همزن

۳- نتایج و بحث

جداسازی ذرات جامد توسط هیدروسیکلون به عوامل زیادی از جمله افت فشار، اندازه ذرات، غلظت و هندسه هیدروسیکلون بستگی دارد. در این پژوهش دو نوع هیدروسیکلون با هندسه‌های مختلف، تحت تأثیر پارامترهای افت فشار (ΔP) و غلظت سوسپانسیون (C_w) بررسی شد. آزمایش‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ^۱ بر اساس روش طراحی مرکب مرکزی^۲ تجزیه و تحلیل شد.

۳-۱- معادله به‌دست آمده از طراحی آزمایش‌ها

نتایج حاصل از آزمایش‌ها در نرم‌افزار طراحی آزمایش با مدل معادلات درجه دوم برای پاسخ‌های بازده جداسازی (E) به‌دست آمد که به ترتیب برای هیدروسیکلون نوع اول و دوم در معادلات ۲ و ۳ گزارش شده است

(۲)

$$E = 86.912 + 3.81A - 1.01B + 0.098AB - 0.862A^2 + 0.045B^2$$

(۳)

$$E = 82.13 + 5.32A - 0.012B - 0.161AB - 0.746A^2 - 0.033B^2$$

¹ Response Surface Methodology (RSM)

² Central Composite Design (CCD)

۲-۱- ابعاد هیدروسیکلون‌ها

در این پژوهش از دو هیدروسیکلون با ویژگی‌های هندسی متفاوت استفاده شد. جنس هیدروسیکلون‌ها از شیشه به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر بود. هندسه هیدروسیکلون‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- ابعاد شماتیک هیدروسیکلون‌ها (میلی‌متر)

Table 1. Schematic dimensions of hydrocyclone (mm)

Variable	Hydrocyclone type	Hydrocyclone type
	1	2
dc	22	24
do	9	10
du	7	7
di	8	8
s	8	10
h	62	44
Θ	9	9

۲-۲- روش آزمایش

برای به‌دست آوردن عملکرد هیدروسیکلون، ابتدا محلول آب و ذرات سنگ با غلظت مشخص در مخزنی به حجم ۲۰ لیتر ساخته شد. بعد از مخلوط شدن کامل ذرات به‌طور یکنواخت در آب، محلول به هیدروسیکلون پمپاژ شد. با استفاده از شیر کنترل خروجی سیستم به مخزن، فشار ورودی تنظیم شد که پس از تثبیت جریان، به‌طور هم‌زمان از خروجی سرریز و ته‌ریز نمونه‌گیری انجام شد. مقدار جریان خروجی از بالا (سرریز) و خروجی از پایین (ته‌ریز) به‌صورت حجمی اندازه‌گیری شد. سوسپانسیون سرریز و ته‌ریز نمونه‌برداری شده هر آزمایش، به‌مدت ۲۴ ساعت در خشک‌کن خشک و اندازه‌گیری شد. شماتیک سامانه آزمایشگاهی استفاده شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

چندین معادله برای بازده هیدروسیکلون وجود دارد که ساده‌ترین و کاربردی‌ترین آن‌ها مطابق معادله ۱ در این پژوهش استفاده شد

$$E = \frac{M_u}{M} \times 100 \quad (1)$$

که در آن

E بازده هیدروسیکلون، M_u میزان بازیابی جرم در ته‌ریز و M شدت جریان جرمی خوراک ورودی است (Vega et al., 2018).



۳-۳- بررسی عملکرد جداسازی بر اساس d50

اثر پارامتر افت فشار بر روی اندازه برش d50 در غلظت سوسپانسیون ۳ درصد وزنی در دو نوع هیدروسیکلون بررسی شد. تغییرات d50 نمونه سرریز و ته‌ریز برای هیدروسیکلون نوع اول و نوع دوم به ترتیب در شکل (a-5 و b-5) نشان داده شده است. با توجه به نتایج هر دو نوع هیدروسیکلون، با افزایش فشار، اندازه برش d50 در نمونه ته‌ریز و سرریز کاهش یافت.

به عبارت دیگر با افزایش فشار، بازده جداسازی افزایش پیدا کرد و ذرات ریزدانه بیشتری در ته‌ریز جداسازی شد. به طوری که در نمونه ته‌ریز هیدروسیکلون نوع اول در فشار ۰/۵ بار d50 ذرات جداسازی شده برابر با ۴۴ میکرون بود که با افزایش فشار، به ۲۵ میکرون رسید و d50 نمونه سرریز از ۲۳ میکرون در فشار ۰/۵ بار به ۷ میکرون اندازه برش کاهش یافت که نشان‌دهنده افزایش عملکرد هیدروسیکلون نوع دوم، به همین صورت در نمونه ته‌ریز در فشار ۰/۵ بار، d50 ذرات جداسازی شده برابر با ۳۵ میکرون بود که با افزایش فشار، به ۲۴ میکرون رسید و d50 نمونه سرریز از ۱۸ میکرون در فشار ۰/۵ بار به ۶ میکرون اندازه برش کاهش یافت.

این معادلات به صورت کددار است که در آن پارامتر افت فشار و B غلظت سوسپانسیون است. همچنین AB برهم‌کنش بین پارامترهای اصلی است. ضریب تعیین $R^2 = 0/9684$ برای معادله ۲ و $R^2 = 0/9436$ برای معادله ۳ حاکی از مناسب و قابل اطمینان بودن برازش‌ها است.

۳-۲- تأثیر پارامترهای عملیاتی بر بازده جداسازی

تأثیر متغیرهای افت فشار و غلظت، بر جداسازی هر دو هیدروسیکلون به روش سطح پاسخ در ۱۱ آزمایش جداگانه بررسی شد. نتایج آزمایش‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده تأثیر پارامتر افت فشار بر عملکرد هر دو نوع هیدروسیکلون مثبت بود که با افزایش آن، بازده جداسازی افزایش یافت. پارامتر غلظت در هر دو نوع هیدروسیکلون تأثیر منفی بر روی بازده جداسازی داشت به طوری که با افزایش غلظت، بازده جداسازی کاهش یافت. البته پارامتر افت فشار نسبت به پارامتر غلظت، تأثیر معنی‌دارتری بر روی بازده جداسازی دارد. بیشترین بازده جداسازی در شرایط مختلف عملیاتی در هر دو نوع هیدروسیکلون در فشار ۲/۶۳ بار و غلظت ۱/۶ درصد وزنی و بازده ۹۰ درصد برای هیدروسیکلون نوع اول و بازده ۹۰/۴ درصد برای هیدروسیکلون نوع دوم به دست آمد (شکل ۴).

جدول ۲- نتایج آزمایش‌های پودر سنگ تراورتن

Table 2. Experimental results for the travertine stone powder

Row	Headloss (bar)	Concentration (%)	Hydrocyclone 1 flow intensity (ml/s)	Hydrocyclone 2 flow intensity (ml/s)	Hydrocyclone 1 separation efficiency (%)	Hydrocyclone 2 separation efficiency (%)
1	1.75	1	168	193	89.9	88.7
2	0.87	1.6	125	136	88.5	86.9
3	2.63	1.6	176	250	90	90.4
4	0.5	3	103	113	85.8	83.2
5	1.75	3	164	193	88.4	87.4
6	1.75	3	168	197	89	87.7
7	1.75	3	165	192	88.7	86.8
8	3	3	203	268	89.3	90.2
9	0.87	4.4	115	133	87.2	86.5
10	2.63	4.4	175	245	88.7	88.8
11	1.75	5	163	185	87.2	86.2



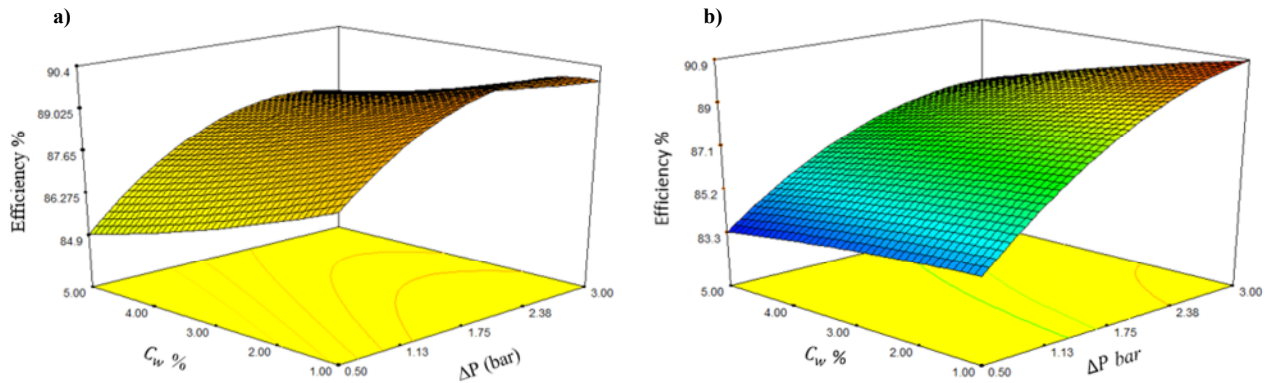


Fig. 4. Effect of operating parameters, pressure drop and concentration on separation efficiency

a) hydrocyclone type 1, b) hydrocyclone type 2

شکل ۴- اثر پارامترهای عملیاتی، افت فشار و غلظت سوسپانسیون بر بازده جداسازی

(a) هیدروسیکلون نوع اول، (b) هیدروسیکلون نوع دوم

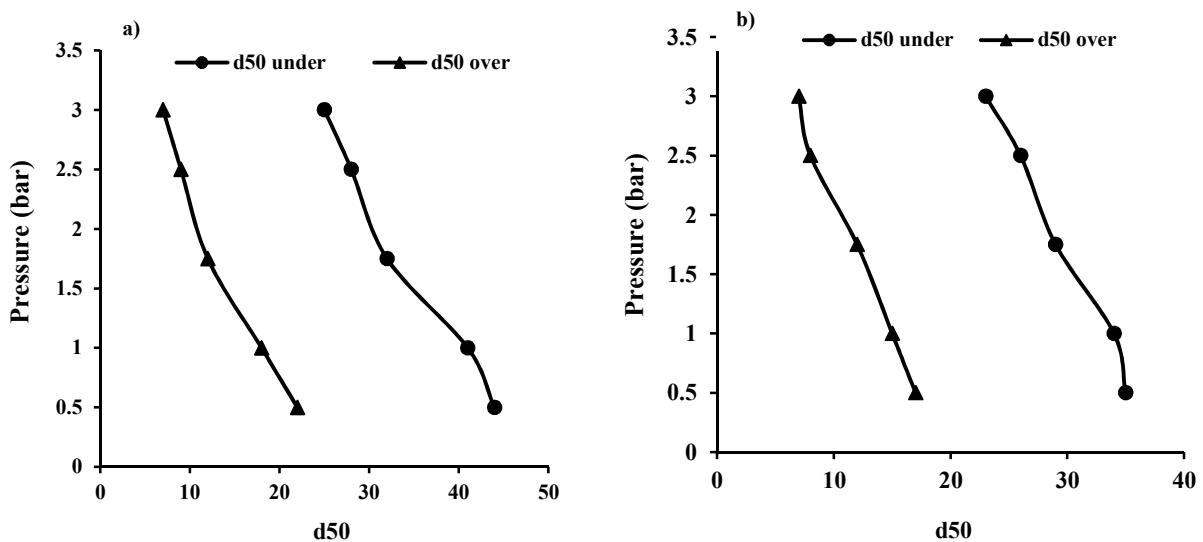


Fig. 5. Separation cut size d50- a) hydrocyclone type 1, b) hydrocyclone type 2

شکل ۵- جداسازی بر اساس d50 (a- هیدروسیکلون نوع اول، b) هیدروسیکلون نوع دوم

سیستم بسته و همیشه در جریان است، ته‌نشینی ذرات به صورت کامل انجام نمی‌شود و آب حاوی ذرات، به کارخانه بازگردانده می‌شود که باعث تأثیر منفی بر تولید سنگ، کاهش کارایی دستگاه‌های برش و افزایش استهلاک دستگاه‌ها می‌شود. معمولاً هر ۲ تا ۳ هفته یک بار به لایه‌روبی استخرها نیاز است که در روش سنتی این عملیات سخت و پرهزینه است. در روش جداسازی ذرات به روش هیدروسیکلون با توجه به نتایج این پژوهش، می‌توان ذرات ریز را با بازدهی تقریباً ۹۰ درصد جداسازی کرد. از لحاظ اقتصادی، با توجه به حذف حوضچه‌های ته‌نشینی و بهینه‌سازی

۴-۳- مقایسه روش هیدروسیکلون و روش‌های موجود

در روش سنتی با توجه به ظرفیت تولید هر کارخانه، نیاز به احداث چندین حوضچه (استخرهای بتنی) است. بعد از ته‌نشینی ذرات از آخرین حوضچه که مدت زمان ماند بیشتری برای ته‌نشینی ذرات دارد، آب به وسیله الکتروپمپ برای استفاده مجدد به کارخانه بازگردانده می‌شود. ساخت استخرهای ته‌نشینی در روش سنتی باعث اشغال زمین، تبخیر و هدر رفت آب می‌شود و نیازمند فضای زیادی برای خشک کردن لجن و دیو آن است که از نظر اقتصادی و مصرف آب مشکلات زیادی دارد. چون فرایند تصفیه به صورت



جداسازی است. بیشترین بازده جداسازی برای هر دو هیدروسیکلون نوع اول و نوع دوم در فشار ۲/۶۳ بار و غلظت سوسپانسیون ۱/۶ درصد وزنی به ترتیب ۹۰/۴ و ۹۰ درصد به دست آمد. افزایش افت فشار و شدت جریان در شرایط عملیاتی بررسی شده باعث افزایش بازده جداسازی در هر دو نوع هیدروسیکلون شد. نتایج آماری، معنی دار بودن متغیرها و اثرگذارتر بودن متغیر افت فشار نسبت به متغیر غلظت سوسپانسیون را نشان داد.

۵- قدرتدانی

این پژوهش، در پژوهشکده شیمی و مهندسی شیمی ایران در تهران انجام شد. به این وسیله از آن مرکز تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از آقایان مهندس علی ابوطالبی و دکتر محمد قادرزاده برای همکاری در به ثمر رساندن این پژوهش قدردانی می‌شود.

هزاران متر زمین، روش هیدروسیکلون هزینه اولیه و جاری بسیار کمتری نسبت به روش‌های دیگری دارد. روش مدرنی که برای بازیافت وجود دارد روش فیلتر پرس است که شامل دستگاه پرس و اجزای جانبی آن است که یک دستگاه وارداتی است و درصد کمی از کارخانه‌های صنعت سنگ‌بری به دلیل هزینه اولیه و جاری بسیار زیاد آن از فیلتر پرس استفاده می‌کنند و توجیه اقتصادی ندارد.

۴- نتیجه‌گیری

روش هیدروسیکلون برای جداسازی ذرات جامد از پساب در شرایط عملیاتی مختلف با روش آماری RSM طراحی شد. متغیرهای افت فشار، غلظت سوسپانسیون و اثرات متقابل آنها در دو هیدروسیکلون با هندسه‌های متفاوت بررسی شد. نتایج حاصل از تحلیل آزمایش‌ها بیانگر کارایی روش آماری سطح پاسخ در به دست آوردن بیشترین بازده

References

- Barros, R. J., Jesus, C., Martins, M. & Costa, M. C. 2009. Marble stone processing powder residue as chemical adjuvant for the biologic treatment of acid mine drainage. *Process Biochemistry*, 44, 477-480.
- Fahiminia, M., Ardani, R., Hashemi, S. & Alizadeh, M. 2013. Wastewater treatment of stone cutting industries by coagulation process. *Archives of Hygiene Sciences*, 2(1), 16-22.
- Neesse, T., Dueck, J., Schwemmer, H. & Farghaly, M. 2015. Using a high pressure hydrocyclone for solids classification in the submicron range. *Minerals Engineering*, 71, 85-88.
- Ni, L., Tian, J., Song, T., Jong, Y. & Zhao, J. 2018. Optimizing geometric parameters in hydrocyclones for enhanced separations: a review and perspective. *Separation and Purification Reviews*, 48, 30-51.
- Ozyonar, F. & Karagozoglu, B. 2012. Systematic assessment of electrocoagulation for the treatment of marble processing wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 9, 637-646.
- Seyfi Mazraeno, M., Fazlali, A. & Hosseini, S. N. 2019. Application of hydrocyclone for separation of *Pichia pastoris* produced r-HBsAg from fermentation culture: impact of concentration and pressure on hydrocyclone performance. *Preparative Biochemistry and Biotechnology*, 49(8), 813-821.
- Tian, J., Ni, L., Song, T., Olson, J. & Zhao, J. 2018. An overview of operating parameters and conditions in hydrocyclones for enhanced separations. *Separation and Purification Technology*, 206, 268-285.
- Vega, D., Brito-Parada, P. & Cilliers, J. 2018. Optimising small hydrocyclone design using 3D printing and CFD simulations. *Chemical Engineering Journal*, 350, 653-659.
- Xu, Y. X., Liu, Y., Zhang, Y. H., Yang, X. J. & Wang, H. L. 2016. Effect of shear stress on deoiling of oil-contaminated catalysts in a hydrocyclone. *Chemical Engineering and Technology*, 39, 567-575.
- Zhang, C., Cui, B., Wei, D., Zhao, Q., Luo, N. & Feng, Y. 2017. Predicting the optimum range of feed flow rate in a hydrocyclone using the method combined flow pattern and equation model. *Powder Technology*, 319, 279-288.

