

# Investigating The Effect of Operational Parameters of a Semi-Industrial Hydro-Cyclone on the Efficiency of Granite and Marble Stones Wastewater Treatment

Azam Ahmadighadikolaei<sup>1</sup>, Mohsen Masoudian<sup>2\*</sup>, Davood Kalantari<sup>2</sup>, Omolbani Mohammadrezapour<sup>3</sup>

1-Ph.D. Candidate, Faculty of Agricultural Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran.

2-Associate Professor, Faculty of Agricultural Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran.

3-Associate Professor, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

\* [mohsen\\_masoudian@yahoo.com](mailto:mohsen_masoudian@yahoo.com)

Received: 18 July 2023

Accepted: 25 October 2023

Discussion: 22 September 2024



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** The use of modern methods of recycling effluent with high treatment efficiency compared to the traditional methods (the use of sedimentation ponds) is of great importance. One of the modern methods of treating these effluents is the use of filter presses. A newer method is using hydrocyclones as a result of centrifugal hydrodynamic forces for separating solid particles from the effluent, for example, stone powder in the current research, (Naderi et al.2019). In this regard, many researches have been done in the field of separation of two different phases of fluid using hydro cyclone in different hydraulic conditions and geometric parameters.

## Materials and methods:

### 1. Materials used in research

The materials used in this research were solid particles in the wastewater of the stone cutting factory of Mahmoudabad industrial town of Isfahan. The resulting slurry was collected in the factory and after drying and separation was used for the experiments. In this study, Granite and Marble stone powder with a density of 2750 and 3020 kgm<sup>-3</sup> and a particle diameter distribution less than 600µm was used. Also, the effect of hydraulic parameters such as flow division ratio (under flow discharge to inlet flow discharge), wastewater weight concentration and inlet pressure on hydro cyclone performance with a cyclone diameter of 140 mm in the separation of Granite and Marble powder stone from wastewater was investigated.

### 2. Design of experiments

Experiments were designed using Design Expert.10 software employing response level method (RSM Initially, a solution containing Granite and Marble powder at concentrations ranging from 0.64% to 7.36% by weight was prepared in a 20-liter tank. This solution was

then circulated to the hydrocyclone using a centrifugal pump.

During each experiment, inlet pressure and overflow pressure were recorded using pressure gauges and the volumetric flow rate of both overflow and underflow were measured. Samples from the overflow and underflow were collected in specified volumes, subsequently stored, and dried in an oven at 105°C for 24 hours. The mass of residual dry matter was then measured from these samples, and the efficiency of solid particle separation was calculated using Eq. (1):

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

In this Equation,  $M_u$  is mass per unit volume of Granite and Marble stone powder inside the underflow ( $\text{grl}^{-1}$ );  $M$  is total mass per unit volume of examined Granite and Marble stone powder in hydro cyclone inlet (total overflow and underflow;  $\text{grl}^{-1}$ ) and  $E$  is the efficiency of separation of solid particles from the feed.

**3. Results and discussion:** Influence of operating parameters of weight concentration of the feed ( $C_w$ ), inlet pressure of the hydro cyclone ( $P_i$ ), and the Ratio of outlet flow (under flow) from the discharge to inlet flow to the hydro cyclone ( $R_f$ ) on the efficiency of the examined hydro cyclone is given in the form of Eq. (2) for Marble powder stone and Eq. (3) for Granite powder stone.

$$\text{Efficiency} = 116.26 - 2.11R_f - 9.12C_w + 6.22P_i + 0.11R_f C_w + 0.17R_f P_i + 1.22C_w P_i + 5.54E - 0.03R_f^2 + 0.12C_w^2 - 2.55P_i^2 \quad (2)$$

$$\text{Efficiency} = 93.16 - 1.01R_f - 4.36C_w + 10.01P_i + 0.04R_f C_w - 0.04R_f P_i + 0.96C_w P_i + 8.12E - 0.03R_f^2 - 0.08C_w^2 - 2.41P_i^2 \quad (3)$$

In order to validate the obtained model, two normal probability diagrams comparing the predicted data of the model with the real values were used. The results showed that with decreasing flow distribution ratio, particle separation efficiency increases, also separation efficiency decreased with increasing inlet pressure, and with increasing effluent concentration.

**Conclusion:** In this study, the impact of hydraulic parameters—including flow separation ratio, inlet pressure, and feed concentration—on the performance of a semi-industrial hydrocyclone was investigated. The analysis of the results using Response Surface Methodology (RSM) demonstrated the effectiveness of this statistical method in obtaining the optimum operational conditions for the examined hydrocyclone. According to the RSM analysis, the highest separation efficiencies achieved were 86% for Granite and 88% for Marble powder stone, respectively.

**Key words :** Flow ratio, Hydro cyclone, Wastewater treatment, Separation efficiency.



© 2024 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# بررسی تاثیر پارامترهای عملکردی یک هیدروسیکلون نیمه صنعتی بر بازده تصفیه پساب سنگبری گرانیات و مرمریت

اعظم احمدی قادیکلانی<sup>۱</sup>، محسن مسعودیان<sup>۲\*</sup>، داوود کلانتری<sup>۲</sup>، ام‌البنی محمدرضاپور<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

\* mohsen\_masoudian@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۳، نقد و بررسی: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** هیدروسیکلون دستگاهی است که با استفاده از نیروی گریز از مرکز به جداسازی فاز جامد از فاز مایع پرداخته و به علت سهولت بهره‌برداری و ارزان بودن، در صنایع مختلف کاربرد دارد. اخیراً استفاده از هیدروسیکلون‌ها جهت تصفیه پساب کارخانه‌های سنگبری که اکثراً در مناطق خشک و کویری کشور واقع‌اند، رو به افزایش است. لذا شناخت عوامل موثر بر افزایش بازده تصفیه آن (جداسازی ذرات جامد پودر سنگ از پساب کارخانه سنگبری) از اهمیت بالایی برخوردار است. در مطالعه حاضر تاثیر پارامترهای هیدرولیکی نظیر نسبت تقسیم جریان (درصد دبی ته‌ریز به دبی ورودی)، غلظت وزنی پساب و فشار ورودی، بر عملکرد هیدروسیکلونی به قطر ۱۴۰ میلی‌متر در جداسازی پودر سنگ‌های گرانیات و مرمریت با چگالی ۲۷۵۰ و ۳۰۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب مورد بررسی قرار گرفت. منحنی دانه‌بندی ذرات پودر سنگ به روش هیدرومتری و الک در آزمایشگاه محاسبه شد. شکل ذرات پودر سنگ مورد آزمایش با استفاده از استریو میکروسکوپ الیمپوس تصویربرداری شد. آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ توسط نرم‌افزار طراحی شدند، بازده جداسازی ذرات پودر سنگ از پساب به‌عنوان پاسخ و پارامترهای فشار ورودی، غلظت وزنی پساب و نسبت تقسیم جریان، به‌عنوان متغیر انتخاب شدند. سپس تحت شرایط آزمایشگاهی تاثیر افزایش فشار ورودی از ۳ تا ۴/۶ بار، افزایش غلظت وزنی پساب از ۱ تا ۷ درصد و افزایش نسبت تقسیم جریان از ۵ تا ۵۸ درصد، بر عملکرد هیدروسیکلون مورد بررسی قرار گرفتند. در هر آزمایش با اندازه‌گیری غلظت ته‌ریز و سرریز، بازده جداسازی محاسبه شد. در نهایت نتایج آزمایشگاهی تحت روش طراحی مرکب مرکزی مورد تحلیل آماری قرار گرفتند. نتایج نشان داد بازده جداسازی با نسبت تقسیم جریان، فشار ورودی و غلظت وزنی پساب، تحت شرایط مورد آزمایش، نسبت عکس دارد و کاهش نسبت تقسیم جریان تاثیر بسزایی در بهبود عملکرد هیدروسیکلون در تصفیه پساب به دنبال خواهد داشت. بیشترین بازده جداسازی ذرات، برای پساب پودر سنگ گرانیات ۸۶ درصد و برای پساب پودر سنگ مرمریت ۸۸ درصد، در نسبت تقسیم جریان کمتر از ۱۰ درصد به‌دست آمد.

**کلید واژگان:** بازده جداسازی، تصفیه پساب، نسبت تقسیم جریان، هیدروسیکلون.

## ۱- مقدمه

قطعه‌های متحرک، قابل کاربرد در بخش‌های مختلف صنعت می‌باشند. از آنجایی که جداسازی ذرات ریزتر با روش ته‌نشینی ثقلی امکان‌پذیر نیست استفاده از هیدروسیکلون‌ها برای جداسازی ذرات جامد از مایع گسترش بیشتری پیدا کرده است (Marthinssen et al., 2014). هیدروسیکلون‌ها به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلف برای طبقه‌بندی، جداسازی و مرتب‌سازی ذرات در

در واحدهای صنعتی سنگ‌بری به‌طور میانگین روزانه ۵۰ تا ۱۵۰ مترمکعب آب مصرف می‌شود که پساب ناشی از آن دارای ۲ تا ۱۰ درصد ذرات پودر سنگ می‌باشند (Ozyonar and Karagozoglu., 2012). کاربرد هیدروسیکلون‌ها در جداسازی حالت جامد از مایع به دلیل آسانی ساخت مقرون به صرفه بوده و به دلیل نداشتن

مناسبی برای تصفیه پساب صنعت سنگبری می‌باشد. در تحقیق تصفیه پساب سنگبری با هیدروسیکلون، تاثیر شدت جریان ورودی با مقادیرهای ۱۰۰ تا ۲۴۰ میلی‌متر در ثانیه بر بازده جداسازی ذرات پودر سنگ تراورتن بررسی شد، نتایج نشان داد با افزایش شدت جریان، بازده جداسازی افزایش می‌یابد و بهترین بازده برابر با ۹۱/۷ درصد در بیشترین شدت جریان به دست آمد (Naderi et al., 2019a). (Naderi et al., 2019c). در پژوهشی جداسازی پودر سنگ‌های گرانیت و تراورتن با ذراتی به قطر کوچکتر از ۲۰۰ میکرون از پساب سنگبری را تحت افت فشارهای کمتر از ۳ بار، بررسی آزمایشگاهی کردند. نتایج نشان داد بازده جداسازی با افت فشار متناسب بوده و با افزایش افت فشار از ۰/۸۷ تا ۲/۶۳ بار، بازده جداسازی ذرات از ۸۷/۲ تا ۸۸/۷ درصد، افزایش می‌یابد. صرفه‌جویی و بهینه‌سازی مصرف آب در کارخانه‌های سنگبری در ایران که در منطقه‌های خشک و کویری کشور واقع‌اند دارای اهمیت بالایی است. لذا بهینه‌سازی عملکرد هیدروسیکلون که اخیراً جهت تصفیه پساب این واحدهای صنعتی توصیه شده است ضروری به نظر می‌رسد. به دلیل نبود بررسی‌های لازم در زمینه تاثیر فراسنجه هیدرولیکی نسبت تقسیم جریان (درصد نسبت جریان ته‌ریز به دبی جریان ورودی) بر عملکرد هیدروسیکلون و همچنین نبود بررسی کافی در زمینه تاثیر فشارهای بالاتر از ۳ بار بر عملکرد آن، در این تحقیق به بررسی عامل‌های هیدرولیکی بالا پرداخته شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

هیدروسیکلون دستگاهی است که با کمک نیروی گریز از مرکز (که در معادله ۱ نشان داده شده است)، ذرات با چگالی مختلف را از یک مایع جدا می‌کند.

$$F_C = \rho_p \frac{\pi d^3 c}{6} r \omega^2 \quad (1)$$

هیدروسیکلون برای عملکرد مناسب نیاز به افت فشار مشخصی دارد که وابسته به ساختار و ظرفیت آن است. با افزایش فشار ورودی هیدروسیکلون، سرعت سیال در مجرای ورودی آن افزایش یافته، لذا سرعت چرخش سیال

دروایه‌های مایع استفاده می‌شوند و دستگاه اصلی بسیاری از تصفیه خانه‌های صنعتی و آب را تشکیل می‌دهند (Aryal et al., 2019). اگرچه اصول حاکم بر رفتار سیکلون‌ها تغییری نداشته، اما کاربردهای صنعتی مختلف باعث شده است که بهبود اساسی در طراحی آن‌ها به وجود آید لذا پیدا کردن شرایط بهینه که قادر باشد با کاهش مصرف انرژی و کمینه کردن هزینه، کارایی جداسازی ذرات ریز توسط سیکلون‌ها را افزایش دهد دارای اهمیت است (Jamshidyfard et al., 2019). در پژوهشی تاثیر افت فشار و غلظت را به عنوان مهم‌ترین فراسنجه‌های موثر در کنترل جداسازی ذرات ریز (کوچک‌تر از ۳۵ میکرون) در هیدروسیکلونی به قطر ۲ اینچ را بررسی کرد، نتایج نشان داد شرایط بهینه برای حذف این ذرات، در فشار ۵ پوند بر اینچ مربع و با غلظت ۲۰ درصد رخ می‌دهد (Irannejad and Arbabian, 2004).

در پژوهشی با هدف افزایش بازده جداسازی هیدروسیکلون تصفیه‌کننده‌ی آب شهری، فراسنجه عملیاتی افت فشار را مورد بررسی قرار داد نتایج نشان داد افزایش نرخ جریان حجمی از یک سو افزایش بازده جداسازی و از سوی دیگر افت فشار بالایی را در سامانه به دنبال خواهد داشت (Salehifar and Moghiman., 2013). در بررسی تاثیر سرعت جریان ورودی و اندازه قطر ذرات جامد، بر بازده جداسازی هیدروسیکلون‌های مورد استفاده در میکروآبیاری مشخص شد با افزایش سرعت ورودی از ۰/۵ تا ۱/۵ متر بر ثانیه و همچنین با افزایش قطر ذرات از ۰/۵ تا ۲/۵ میلی‌متر، بازده جداسازی افزایش می‌یابد (Gencoglan et al., 2023). در بررسی تاثیر اعمال افزایش فشار برگشتی در سرریز از ۱/۱ تا ۲/۳ بار در هیدروسیکلونی به قطر ۱۴۰ میلی‌متر با ذرات جامد به قطر کمتر از ۴۵ میکرون، بازده جداسازی ذرات به مقدار ۹/۵۳ درصد افزایش یافت (Liu et al., 2023). (Naderi et al., 2019b) در ارزیابی‌های آزمایشگاهی خود تاثیر فراسنجه غلظت پساب ورودی را بر بهبود عملکرد و افزایش بازدهی هیدروسیکلون تصفیه پساب سنگبری بررسی شدند، نتایج گویای آن بود که بازده جداسازی با غلظت رابطه عکس دارد، در این تحقیق مشخص شد هیدروسیکلون پیشنهاد

مولکول‌های سیال پیوسته و ذرات جامد معلق در سیال می‌باشد و از رابطه ۶ قابل محاسبه می‌باشد ( Gue et al; 2017).

$$U_{sl} = 1.89 \sqrt{\frac{d_p}{f_p} \left( \frac{\rho_p - \rho_f}{7.48 \rho_f} \right)} \quad (6)$$

برابر معادله ۶ با افزایش قطر و چگالی نسبی ذره نسبت به سیال، سرعت لغزشی بین ذره و سیال پیوسته افزایش یافته و حرکت ذره نسبت به حرکت سیال کندتر خواهد بود.

در معادله‌های بالا  $\rho_p$  چگالی ذره جامد،  $\rho_f$  چگالی سیال،  $\omega$  سرعت زاویه‌ای سیال،  $u_p$  سرعت ذره جامد،  $u_f$  سرعت سیال،  $d_p$  قطر ذره جامد،  $\mu$  لزوجت سیال پایه و  $f_p$  ضریب اصطکاک بین ذره و سیال می‌باشند.

### ۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

مواد مورد استفاده در این تحقیق شامل ذرات جامد گرانیت و مرمریت موجود در پساب کارخانه سنگبری شهرک صنعتی محمود آباد اصفهان می‌باشد. دوغاب ناشی از کارخانه پس از گردآوری، خشک و سپس برای (جداسازی ذرات ریزتر از ۵۰ میکرون) از الک نمبر ۳۵ رد شدند، چگالی پودر سنگ‌های یاد شده در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد و به ترتیب مقادیر ۲۷۵۰ و ۳۰۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای گرانیت و مرمریت به‌دست آمد. نگاره‌های میکروسکوپی از پودر سنگ‌ها با استفاده از استریو میکروسکوپ الیمپوس و منحنی دانه‌بندی آن‌ها (برای ذرات درشت‌تر از روش الک و برای ذرات ریزتر از روش هیدرومتری) در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌است. شکل ۳ نمای کلی از سامانه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

و ذرات معلق در آن افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت چرخش سیال و ذرات معلق در آن باعث بیشتر شدن نیروی گریز از مرکز شده و ذرات به سمت بیرون و در نتیجه جداره فولادی درون هیدروسیکلون منتقل می‌شوند که با چندین بار چرخش در درون هیدروسیکلون (به طور معمول ۵ بار چرخش در هیدروسیکلون های استاندارد) به سمت ته ریز هیدروسیکلون منتقل می‌شوند. البته در مقابل نیروی گریز از مرکز وارد بر ذره، نیروی پسا (درگ) نیز به ذره وارد می‌شود که مقدار این نیرو به ابعاد ذره و سرعت خطی گریز از مرکز ذره (سرعت حرکت ذره به سمت جداره‌های هیدروسیکلون) وابسته است که در معادله ۲ بیان شده است.

$$F_d = C_d \pi d_c^2 \quad (2)$$

با توجه به اینکه نیروی گریز از مرکز با توان ۳ قطر ذره ( $d_c$ ) و در مقابل نیروی پسا (درگ) با مجذور قطر ذره متناسب است لذا ذرات بزرگتر شناور در سیال راحت‌تر به سمت بیرون منتقل شده و از سیال جدا می‌شوند. در معادلات بالا  $C_d$  (ضریب درگ) بوده و با توجه به بزرگی عدد رینولدز  $Re$  از معادله‌های ۳ و ۴ به‌دست می‌آید.

$$C_d = \frac{24}{Re} \left( 1 + \frac{1}{6} Re^2 \right) \quad Re < 1000 \quad (3)$$

$$C_d = 0.424 \quad Re > 1000 \quad (4)$$

عدد رینولدز در معادله‌های بالا، در درون هیدروسیکلون از رابطه ۵ به‌دست می‌آید:

$$Re = \frac{\rho d_p |u_f - u_p|}{\mu} \quad (5)$$

عبارت  $u_f - u_p = u_{sl}$ ، مربوط به اختلاف سرعت بین



Fig. 1 Microscopic image from sample of Granite and Marble stone powder the scale: A) Marble, B) Granite

شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه پودر سنگ (A) مرمریت و (B) گرانیت

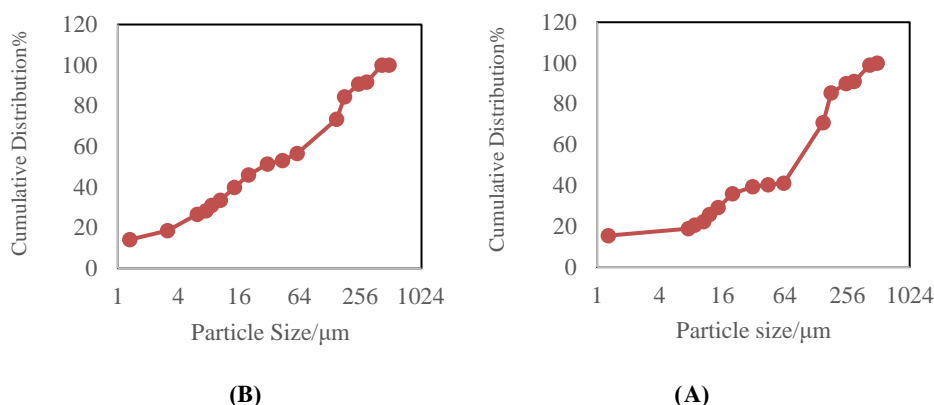


Fig. 2 Gran size distribution of: A) Marble, B) Granite, powder particles

شکل ۲ منحنی دانه‌بندی ذرات پودرسنگ (A) مرمریت و (B) گرانیت

جدول ۱ اندازه بخش‌های مختلف هیدروسیکلون  
Table 1. Values of different parts of hydro cyclone

Parameters	Value(mm)
Body diameter (D3)	140
Overflow diameter (D2)	35
Underflow diameter (D4)	35
Input diameter (D1)	35
Cylindrical section Height (h1)	110
(Conical section height (h2)	440

## ۲-۲- طراحی آزمایش‌ها

از نرم‌افزار Design Expert نسخه ۱۰ برای طراحی اولیه آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ (RSM) استفاده شد. به طوری که فراسنجه بازده جداسازی (Efficiency) به‌عنوان پاسخ و فراسنجه‌های درصد غلظت وزنی پساب ( $C_w$ )، درصد نسبت تقسیم جریان ( $R_f$ ) و فشار ورودی سیستم ( $P_i$ ) بر حسب بار، به‌عنوان عامل‌های متغیر در نظر گرفته شدند، ویژگی‌های آزمایش‌های طراحی شده در جدول ۲ و تحلیل آماری مدل انتخابی، در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. در آغاز پس از تزریق مخلوط آب و پودرسنگ‌های مورد آزمایش با غلظت‌های مورد نظر توسط پمپ سانتریفیوژ با فشار به سمت هیدروسیکلون، هر مرحله از آزمایش در فشار ورودی، نسبت تقسیم جریان و غلظت وزنی منحصر به فردی مطابق با شرایط آزمایشگاهی ارائه شده توسط نرم‌افزار در جدول ۲، انجام شد، برای تنظیم فشار مورد نظر از شیرهای گازی تعبیه شده بر سامانه آزمایشگاهی استفاده شد، برای افزایش دقت اندازه‌گیری، هر آزمایش با سه تکرار انجام شد. در آغاز فشار ورودی و فشار سرریز ثبت و دبی حجمی

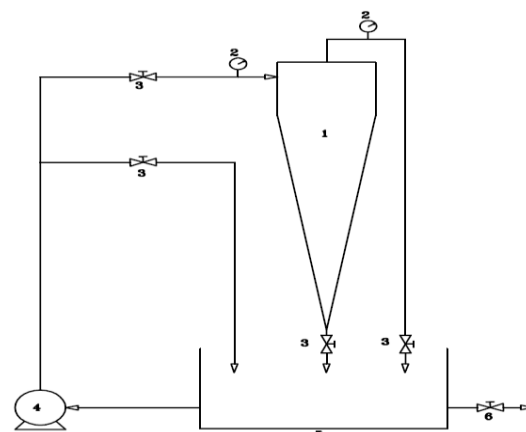


Fig. 3 Experimental setup: 1. Hydrocyclone 2. Barometer 3. Control valve 4. Electro pump 5. Tank 6. Discharge valve

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

هیدروسیکلون مورد استفاده در این تحقیق از جنس فولاد می‌باشد که در شکل ۴ نشان داده شده‌است. درواپه خوراک با غلظت همانند با پساب کارخانه سنگبری (در محل آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری) با غلظت وزنی ۱ الی ۷ درصد (مخلوط آب با پودر سنگ گرانیت و مرمریت) به حجم ۲۰ لیتر تهیه شد و سپس در مخزن موجود تخلیه و توسط پمپ سانتریفیوژ وارد مدار هیدروسیکلون شد، از شیرآلات برای تنظیم فشار ۳ الی ۴/۶ بار و تقسیم جریان ۵ الی ۵۸/۳ درصد استفاده شد. برای اندازه‌گیری فشار ورودی و سرریز، فشارسنج‌ها در محل مربوطه نصب شدند. مشخصات هندسی هیدروسیکلون مورد آزمایش در جدول ۱ درج شده‌است.

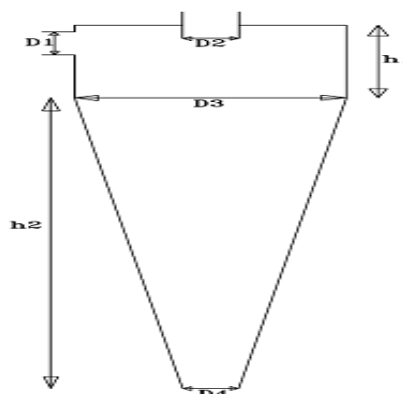


Fig. 4 Image of the hydro cyclone under test  
 شکل ۴ تصویری از هیدروسیکلون مورد آزمون

جدول ۲ ویژگی‌های آزمایش‌های طراحی شده توسط نرم افزار (A Design Expert.10) گرانیت، (B) مرمریت  
 Table 2 Specifications of experiments designed by Design Expert.10 software. A) Granite, B) Marble

Run	A:%Rf	B:%Cw	C:Pi(bar)
1	5	2	4.2
2	5	6	3
3	5	2	3
4	5	6	4.2
5	25	4	3.6
6	25	1	3.6
7	25	7	3.6
8	25	4	4.6
9	45	2	3
10	45	6	3
11	45	6	4.2
12	45	2	4.2
13	58	4	3.6

Run	A:%Rf	B:%Cw	C:Pi(bar)
1	5	3	4.2
2	5	3	3.2
3	5	6	3.2
4	5	6	4.2
5	25	4.5	3.7
6	25	4.5	4.5
7	25	2	3.7
8	25	7	3.7
9	25	4.5	3
10	45	6	3.2
11	45	6	4.2
12	45	3	4.2
13	58	4.5	3.7

پارامترهای مورد آزمایش بر بازده جداسازی هیدروسیکلون مورد بحث قرار می‌گیرد (شکل ۶). سپس تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی توسط نرم‌افزار Design Expert، در شکل‌های ۷ الی ۹ ارائه می‌شود.

### ۳-۱- تاثیر پارامترهای عملکردی بر بازده جداسازی هیدروسیکلون در تصفیه پساب

نسبت غلظت پسابی که از بخش ته‌ریز هیدروسیکلون خارج می‌شود به غلظت پسابی که از بخش ورودی آن وارد می‌شود، بازده جداسازی نام دارد. بازده جداسازی یکی از جمله مهم‌ترین فراسنجه‌ها برای برآورد عملکرد هیدروسیکلون می‌باشد. تاثیر پارامترهای هیدرولیکی مانند فشار ورودی، درصد غلظت وزنی پساب و درصد نسبت تقسیم جریان، بر بازده جداسازی ذرات توسط هیدروسیکلون، با انجام ۲۶ آزمایش جداگانه و سه تکرار متوالی برای هر آزمایش بررسی

خروجی از سرریز و ته‌ریز اندازه‌گیری شد و نمونه‌های گرفته شده با حجم مشخص از ته‌ریز و سرریز به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس نگهداری و خشک شدند سپس جرم ماده خشک باقی‌مانده اندازه‌گیری و بازده جداسازی ذرات در هر آزمایش از رابطه ۷ به‌دست آمد:

$$E = \frac{M_u}{M} \times 100 \quad (7)$$

در این رابطه  $M_u$  جرم پودر سنگ داخل ته‌ریز بر واحد حجم  $M$  جرم پودر سنگ در محلول ورودی به هیدروسیکلون (مجموع سرریز و ته‌ریز) بر واحد حجم و  $E_f$  بازده جداسازی ذرات توسط هیدروسیکلون می‌باشند.

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا تحلیل نتایج آزمایش‌ها و تاثیر

شد و نتایج در نمودارهای شکل ۵، نشان داده شده است.

در این نمودارها هر نقطه بیانگر میانگین نتایج یک سری از آزمایش‌ها در شرایط تعیین شده توسط نرم‌افزار Design Expert می‌باشد. هر نمودار به بررسی تاثیر تنها یک عامل در دامنه کاری تعریف شده می‌پردازد.

### ۳-۱-۱- تاثیر فراسنجه درصد نسبت تقسیم جریان (Rf)

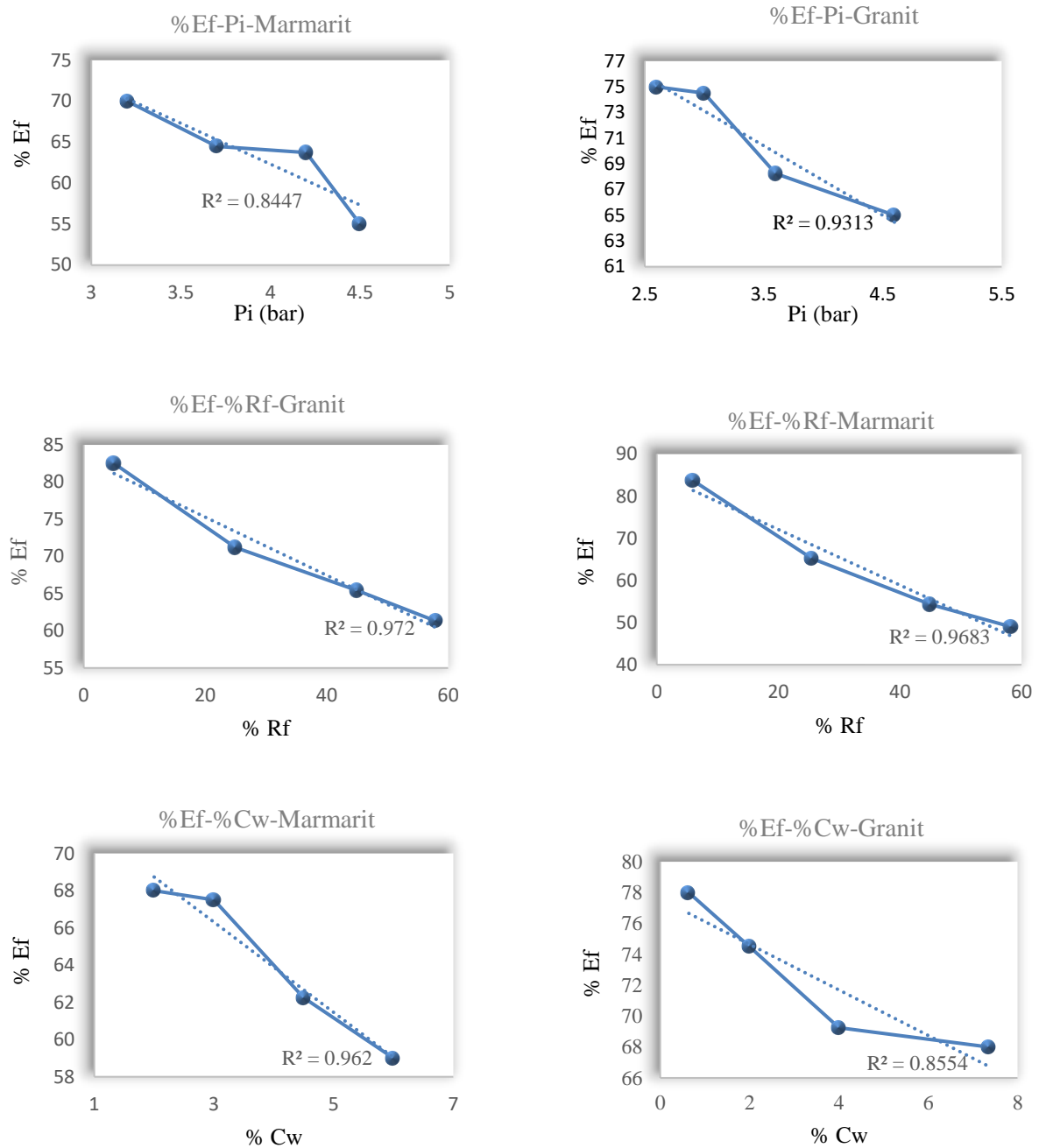
نتایج بررسی تاثیر درصد نسبت دبی ته‌ریز به دبی ورودی هیدروسیکلون با مقادیر ۵، ۲۵، ۴۵ و ۵۸ درصد برای پودر سنگ گرانیت و مرمیت، بر بازده جداسازی آن در نمودارهای %Ef-%Rf شکل ۵، نشان داده شد. در نمودارها

بیشترین بازده جداسازی در نسبت‌های تقسیم جریان کمتر از ۱۰ درصد رخ داده است. زیرا با افزایش دبی ته‌ریز، جریان پایین‌رو افزایش و تخلیه سیال درون هیدروسیکلون در اثر نیروی ثقل راحت‌تر صورت گرفته و جریان چرخشی درون هیدروسیکلون کاهش می‌یابد. به همین دلیل نیروی گریز از مرکز وارد بر ذرات معلق در سیال که برابر معادله ۱، به سرعت چرخشی جریان وابسته می‌باشد، کاهش یافته و ذرات به سمت دیواره بیرونی با شدت کمتری حرکت می‌کنند. در نتیجه با افزایش جریان ته‌ریز، بازده جداسازی کاهش می‌یابد. البته باید مد نظر داشت که بر خلاف سیکلون‌های هوا که

جدول ۳ تحلیل آماری آزمایش‌ها (ANOVA) توسط نرم افزار 10 Design Expert (A گرانیت، B مرمیت)

Table 3 Statistical analysis of experiments by Design Expert.10 software. A) Granite B) Marble

(A)						
ANOVA for Response Surface Quadratic model						
Std. Dev=0.94 , R-Square= 0.9918						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	P-Value F<Probe	
Model	642.14	9	71.35	80.83	< 0.0001	significant
A-R <sub>f</sub>	182.33	1	182.33	206.56	< 0.0001	
B-C <sub>w</sub>	9.68	1	9.68	10.97	0.0162	
C-P	45.37	1	45.37	51.40	0.0004	
AB	2.72	1	2.72	3.08	0.1297	
AC	0.91	1	0.91	1.03	0.03503	
BC	3.54	1	3.54	4.02	0.0919	
A <sup>2</sup>	30.48	1	30.48	34.53	0.0011	
B <sup>2</sup>	1.49	1	1.49	1.69	0.2414	
C <sup>2</sup>	9.87	1	9.87	11.18	0.0156	
Residual	5.30	6	0.88			
Lack of Fit	5.30	1	5.30			
Pure Error	0.000	5	0.000			
Cor Total	647.44	15				
(B)						
ANOVA for Response Surface Quadratic model						
Std. Dev = 0.54 , R-Square = 0.9989						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	P-Value F<Probe	
Model	1669.99	9	185.55	632.64	< 0.0001	significant
A-R <sub>f</sub>	902.22	1	902.22	3.76.06	< 0.0001	
B-C <sub>w</sub>	6.39	1	6.39	21.78	0.0034	
C-P	8.64	1	8.64	29.46	0.0016	
AB	44.57	1	44.57	151.95	0.0001	
AC	11.27	1	11.27	38.43	0.0008	
BC	3.40	1	3.40	11.60	0.0144	
A <sup>2</sup>	31.81	1	31.81	108.44	0.0001	
B <sup>2</sup>	0.96	1	0.96	3.29	0.1198	
C <sup>2</sup>	2.05	1	2.05	6.98	0.0348	
Residual	1.76	6	0.29			
Lack of Fit	1.76	1	1.76			
Pure Error	0.000	5	0.000			
Cor Total	1671.75	15				



**Fig. 5** Graphs of efficiency (%EF) of hydro cyclone performance in terms of weight concentrations of feed (%CW), different flow division ratios (%RF) and inlet pressures (PI) (Bar) for Marble and Granite powder

شکل ۵ نمودارهای بازده جداسازی هیدروسیکلون (%EF) بر حسب غلظت‌های وزنی خوراک (%CW)، نسبت‌های تقسیم جریان (%RF) و فشارهای ورودی مختلف (PI) بر حسب بار برای پودر سنگ مرمریت و گرانیت

یک کمینه قابل قبول ثابت نگه می‌داریم. این مقدار جریان ته‌ریز کمینه‌ای (بین ۵ تا ۱۰ درصد)، بر مبنای همه آزمون‌های انجام شده در تحقیق بستگی به مقدار ذرات معلق پساب ورودی به داخل هیدروسیکلون خواهد داشت. با توجه به این نتیجه بدون افزایش مصرف انرژی، در یک فشار و

برای جداسازی ذرات معلق در هوای ورودی به سیکلون مورد استفاده می‌شود، نمی‌توان جریان ته‌ریز هیدروسیکلون‌های مربوط به پساب‌های صنعتی را به صفر رساند، چرا که خیلی زود مسدود خواهند شد. برای این منظور و بنابر نتایج به دست آمده در این تحقیق، به صورت تجربی دبی ته‌ریز را در

غلظت ثابت، تنها با کاهش جریان ته‌ریز می‌توان بازده جداسازی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد.

تقسیم جریان ثابت، کاهش بازده جداسازی را به دنبال خواهد داشت، زیرا هر چه شمار ذرات جامد در پساب بیشتر باشد، احتمال برخورد بین ذرات افزایش یافته که با افزایش ضریب مقاومت ذرات بنابر معادله ۶، سرعت لغزشی بین ذرات و سیال کاهش و در نتیجه بنابر معادله ۵ عدد رینولدز کاهش می‌یابد که افزایش نیروی درگ و در نتیجه کاهش نیروی گریز از مرکز را در پی خواهد داشت. که این نتیجه با نتایج تحقیقات (Naderi et al. (2019a)، Endres et al. (2012)، Cilliers and Harrison (2019) و Feng et al. (2016) همخوانی دارد.

### ۳-۲-۲- تحلیل نتایج آزمایش‌ها توسط نرم‌افزار Design Expert.10

رابطه ریاضی حاکم بر بازده جداسازی به صورت تابعی از فراسنجه‌های ورودی شامل درصد غلظت خوراک (%Cw) نسبت تقسیم جریان (%Rf) و فشار ورودی (Pi) توسط نرم افزار به دست آمد. معادله‌های ۸ و ۹ به ترتیب مربوط به آزمایش‌های پودرسنگ مرمریت و گرانیت می‌باشند.

$$\begin{aligned} \text{Efficiency} = & 116.26 - 2.11R_f - 9.13C_w + 6.22P_i \\ & + 0.11R_f C_w + 0.17R_f P_i + 1.22C_w P_i + 5.54E \\ & - 0.03 * R_f^2 + 0.12C_w^2 - 2.55P_i^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{Efficiency} = & 93.16 - 1.01R_f - 4.36C_w + 10.01P_i \\ & + 0.04R_f C_w - 0.04R_f P_i + 0.96C_w P_i \\ & + 8.12E - 0.03 * R_f^2 - 0.08C_w^2 - 2.41P_i^2 \end{aligned} \quad (9)$$

از این رابطه‌ها می‌توان برای پیش‌بینی بازده جداسازی در سطح‌های مورد نظر استفاده کرد.

### ۳-۳- صحت سنجی مدل

برای اعتبارسنجی مدل‌های برازش شده، از نمودار مقایسه داده‌های پیش‌بینی شده، با مقدارهای واقعی استفاده شد که در شکل ۶ نشان داده شده‌است. توزیع یکنواخت داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های واقعی در این شکل‌ها، نشان دهنده مناسب بودن مدل‌های انتخابی نرم‌افزار می‌باشد.

غلظت ثابت، تنها با کاهش جریان ته‌ریز می‌توان بازده جداسازی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد.

### ۳-۱-۲- تاثیر فراسنجه فشار ورودی (Pi)

نتایج بررسی تاثیر فشار ورودی هیدروسیکلون با مقدارهای ۳، ۳/۶، ۴/۲ و ۴/۶ بار برای پودر سنگ گرانیت و مقادیر ۳، ۳/۲، ۳/۷، ۴/۲ و ۴/۵ بار برای پودرسنگ مرمریت بر بازده جداسازی ذرات توسط آن در نمودارهای Ef-Pi % شکل ۵ نشان داده شد، در نمودارها با افزایش فشار ورودی به علت افزایش اغتشاشات و کاهش نیروی گریز از مرکز، بازده جداسازی کاهش می‌یابد. این نتیجه با نتایج آزمایش‌های (Naderi et al., 2019c) که در افت فشارهای کمتر از ۳ بار انجام شدند مغایرتی ندارد. افزایش مقدار نیروی درگ وارد بر ذرات (در معادله ۲) که با کاهش نیروی گریز از مرکز، کاهش بازده جداسازی را به دنبال دارند، تحت تاثیر مقدار عدد رینولدز جریان درون هیدروسیکلون بنابر معادله‌های ۳ و ۴ افزایش یا کاهش می‌یابند. مقدار عدد رینولدز بنابر معادله ۵ بستگی به اختلاف سرعت بین ذرات جامد و سیال دارد. در فشارهای بالاتر از ۳ بار که جریان کمتری از هیدروسیکلون خارج می‌شود و اغتشاشات داخل آن بیشتر است، اصطکاک بین ذرات جامد با سیال بیشتر بوده و در نتیجه بنابر معادله ۶، سرعت لغزشی بین ذرات و سیال کاهش و در نتیجه عدد رینولدز بنابر معادله ۵ کاهش می‌یابد که با افزایش ضریب درگ Cd و به دنبال آن با کاهش نیروی گریز از مرکز همراه است. در واقع مقدار فشار داخل هیدروسیکلون تعیین کننده مرز عدد رینولدز برای افزایش یا کاهش نیروی درگ وارد بر ذرات می‌باشد.

### ۳-۱-۳- تاثیر فراسنجه درصد غلظت وزنی پساب (Cw)

نتایج بررسی تاثیر درصد غلظت وزنی پساب ورودی به هیدروسیکلون با مقادیر ۱، ۲، ۴، ۶ و ۷ درصد برای پودر سنگ گرانیت و مقادیر ۲، ۳، ۴/۵، ۶ و ۷ درصد برای پودرسنگ مرمریت بر بازده جداسازی ذرات توسط آن در نمودارهای Ef-Cw % شکل ۵، نشان داده شد. نمودارها نشان می‌دهند افزایش غلظت وزنی در یک فشار و نسبت

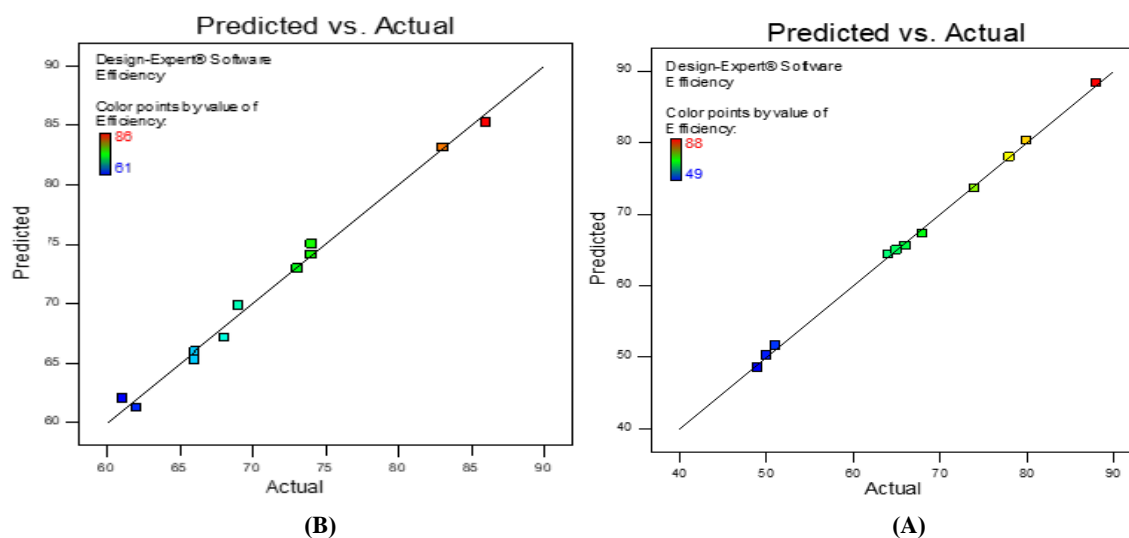


Fig. 6 Normal probability diagram: A Granite, B Marble

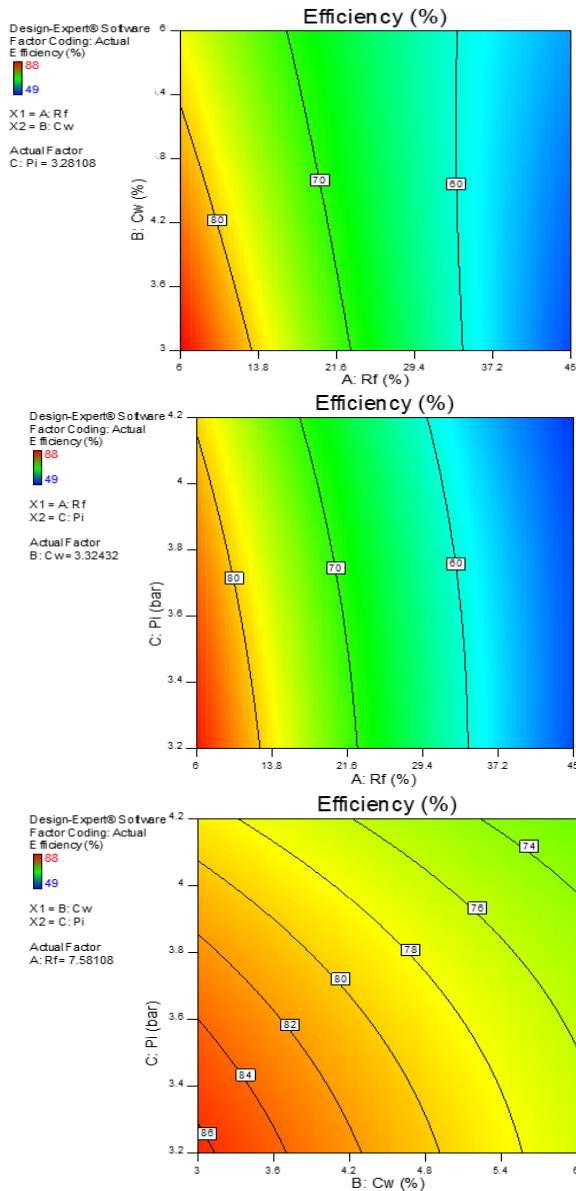
شکل ۶ نمودار احتمال نرمال: (a) مرمریت، (b) گرانیت

فشار ورودی و غلظت وزنی پساب بر عملکرد هیدروسیکلون در پالایش پساب سنگبری با دو نمونه پودرسنگ گرانیت و مرمریت، بررسی شد و نتایج نشان داد در یک غلظت وزنی و نسبت تقسیم جریان ثابت، افزایش فشار ورودی ( از ۳ تا ۴/۶ بار)، به علت ایجاد تنش‌ها در جریان و در نتیجه کاهش سرعت چرخشی سیال، کاهش بازده جداسازی را در پی دارد به طوری که کاهش ۱/۲ بار فشار ورودی هیدروسیکلون، کاهش ۵ درصدی در بازده جداسازی ذرات گرانیت و کاهش ۲ درصدی بازده جداسازی ذرات مرمریت را در نسبت تقسیم جریان و غلظت وزنی به ترتیب ۴۵ و ۶ درصد به دنبال داشت. همچنین در اثر افزایش غلظت وزنی پساب ( از ۱ تا ۷ درصد) به علت بالا رفتن نیروی درگ، نیروی گریز از مرکز کاهش و در نتیجه بازده جداسازی کاهش می‌یابد به طوری که افزایش ۳ درصدی غلظت وزنی با کاهش به ترتیب ۷ و ۳ درصدی بازده جداسازی برای ذرات گرانیت و مرمریت، در نسبت تقسیم جریان و فشار ورودی ثابت به ترتیب ۲۵ درصد و ۳۵ بار همراه بود. بررسی تاثیر عامل نسبت تقسیم جریان (از ۵ الی ۵۸ درصد) بر روی بازده جداسازی نشان داد کاهش مقدار این عامل که با افزایش نیروی گریز از مرکز همراه است، تاثیر معنی‌داری در افزایش بازده جداسازی دارد. به طوری که با ۴۰ درصد کاهش این نسبت، بازده جداسازی به ترتیب ۳۵ درصد برای پودر سنگ گرانیت و ۳۰ درصد برای پودر سنگ مرمریت افزایش یافت

در نمودارهای شکل‌های ۷ و ۸ خطوط تراز بازده جداسازی نسبت به فراسنجه‌های عملکردی مورد آزمایش برای پودرسنگ‌های گرانیت و مرمریت رسم شده‌اند. نمودارها نشان می‌دهند تاثیر فراسنجه نسبت تقسیم جریان بر بازده جداسازی بیشتر از دو فراسنجه غلظت وزنی و فشار ورودی می‌باشد. به طوری که در یک نسبت تقسیم جریان ثابت، در دامنه گسترده‌ای از غلظت وزنی و فشار ورودی، بازده جداسازی یکسان می‌باشد در صورتی که در یک فشار ورودی ثابت و یا غلظت ثابت، با نسبت‌های تقسیم جریان متفاوت، بازده‌های جداسازی مربوط به آن‌ها اختلاف معنی داری با هم دارند. در این نمودارها، بیشترین بازده جداسازی در کمترین فشار ورودی، کمترین غلظت وزنی و کمترین نسبت تقسیم جریان رخ داده است که با نتایج به دست آمده از مدل آزمایشگاهی همخوانی دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت مسئله بازیافت پساب صنعت سنگبری و مطرح شدن استفاده از هیدروسیکلون به عنوان یک روش اقتصادی برای تصفیه پساب این واحدهای صنعتی، بررسی و ارزیابی بیشتر و همه جانبه عوامل موثر بر افزایش بازده عملکرد هیدروسیکلون ضروری به نظر می‌رسد. بر این مبنا در این تحقیق اثر عوامل عملکردی مانند نسبت تقسیم جریان،

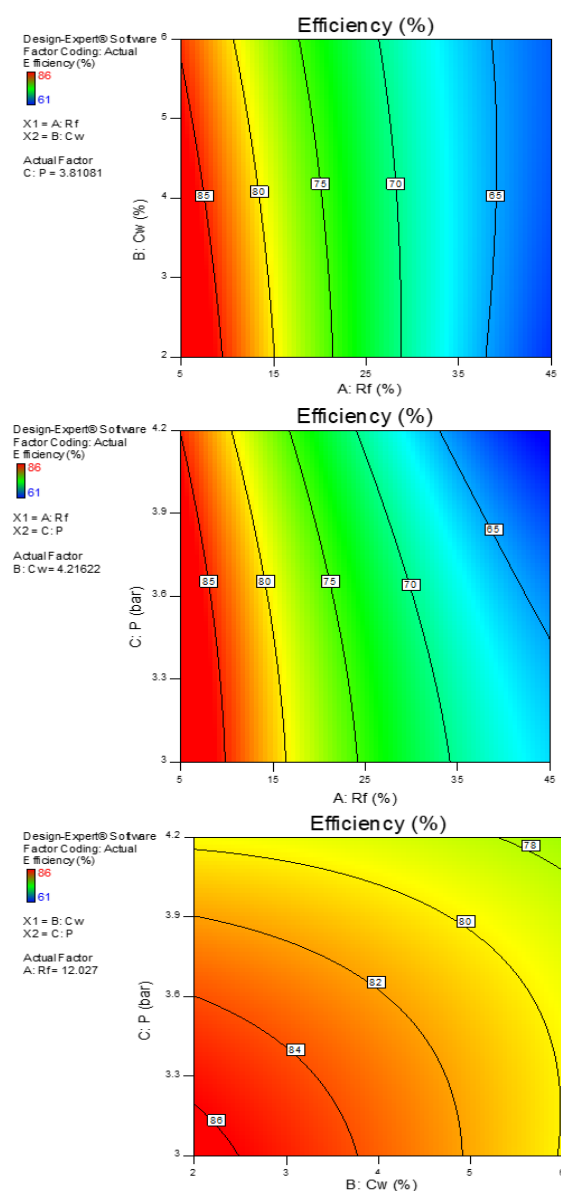


**Fig. 8** Line graphs of separation efficiency in relation to the hydraulic parameters of input pressure, feed concentration and flow ratio (Marble)

شکل ۸ نمودارهای خطوط تراز بازده جداسازی نسبت به فراسنجه‌های هیدرولیکی فشار ورودی، غلظت وزنی پساب و نسبت تقسیم جریان (مرمریت)

است. با توجه به نتایج به دست آمده از نمودارهای سطح پاسخ ترسیم شده در این تحقیق، بیشترین بازده جداسازی برای آزمایش‌های مربوط به پساب گرانیته و مرمریت به ترتیب ۸۶ و ۸۸ درصد در نسبت تقسیم جریان زیر ۱۰ درصد به دست آمد.

در این تحقیق مشخص شد که افزایش فشار بیشتر از ۳ بار که با افزایش مصرف انرژی همراه است تاثیر منفی بر روی بازده جداسازی هیدروسیکلون به دنبال خواهد داشت که



**Fig. 7** Line graphs of separation efficiency in relation to the hydraulic parameters of input pressure, feed concentration and flow ratio (Granite)

شکل ۷ نمودارهای خطوط تراز راندمان جداسازی نسبت به فراسنجه‌های هیدرولیکی فشار ورودی، غلظت وزنی پساب و نسبت تقسیم جریان (گرانیت)

لذا کاربرد این نتیجه که به آسانی و به صورت دستی، به وسیله تنظیم شیر کنترل دبی ته‌ریز و بدون افزایش مصرف انرژی انجام می‌شود، با توجه به مستقر بودن این کارخانه‌ها در منطقه‌های خشک و کویری ایران و ارزش بالای آب در این منطقه‌ها، اکیدا توصیه می‌گردد.

طراحی اولیه آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج توسط نرم افزار Design Expert، بیانگر اثربخشی روش آماری سطح پاسخ (RSM) در به دست آوردن بالاترین بازده جداسازی

Gue, B., Liu, X. & Tan, X. (2017). Petroleum production engineering, 2<sup>th</sup> Edition, Gulf Professional, 780 p.

Jamshidifrd, S., Shirvani, M., Kasiri Bidhendi, N. & Movahedirad, S. (2019). Experimental and Numerical Study of Effective Parameters on Helical One-channel Dust-concentrator Performance for Separation of Black Powder of Gas Pipeline. *J. Modares Mechanical Engineering*, 19(5), 1167-1176. (In Persian)

Irannejad, M. & Arbabian, M.A. (2004). Effective Parameters in softening granitic sand by hydro cyclone, Iranian Mining Engineer Conference, Tarbiat Modares University, Iran. (In Persian)

Liu, P., Wang, H., Jiang, L., Zhang, Y., Li, X., Zhang, Y. & Li, Z. (2023). Experimental Study on the Separation Performance of an Intermittent Discharge Concentrated Hydrocyclone. *J. Separations 2023*, 10, 161, <https://doi.org/10.3390/separations10030161>.

Marthinssen, S.A., Chang, Y.F., Balakin, B. & Hoffmann, A.C. (2014). Removal of Particles from highly viscous liquids with hydrocyclones. *Chemical Engineering Science*, 108, 169-175.

Naderi, A., Masoudian, M. & Habibian, M. (2019a). Evaluation and application of hydro cyclone in separation of rock-solid particles from industrial stone effluent, 4<sup>th</sup> National Congress of Mechanical Engineering and Chemical Engineering, Iran. (In Persian)

Naderi, A., Seifi Mazraeh No, M., Masoudian, M. & Habibian, M. (2019b). Separation of fine particles due to granite rock cutting in the effluent of stone cutting industry, by hydro cyclone, 16<sup>th</sup> National Congress of Chemical Engineering of Iran, Amirkabir University of Technology, Faculty of Chemical Engineering, Tehran, Iran. (In Persian)

Naderi, A., Masoudian, M. & Habibian, M. (2019c). Recycling and reuse of waste water from stone cutting using the hydro cyclone method, an economic solution to reduce water consumption, *Journal of Water and Wastewater*, 31(3), 153-167. (In Persian)

Ozyonar, F. & Karagozoglou, B. (2012). Systematic Assessment of electrocoagulation for the treatment of marble Processing wastewater. *J. Environmental Science and Technology*, 9, 637- 646.

Salehifar, A. & Moghiman, M. (2013). Simulation and increase of efficiency of drinking water treatment hydro cyclones, 9<sup>th</sup> Iranian Conference on Mining Engineering., Birjand, Iran. (In Persian)

با نتایج تحقیق دیگر محققان که تاثیر فشارهای کمتر از ۳ بار را مورد بررسی قرار دادند مغایر است. لذا ضرورت دارد در ادامه تاثیر فشارهای کمتر از ۳ بار، برای دستیابی به فشار ورودی بهینه، به منظور صرفه جویی در مصرف انرژی بررسی و ارزیابی جامع تری صورت گیرد.

## ۵- فهرست نشانه‌ها

$C_d$	ضریب درگ
$d_p$	قطر معادل ذرات جامد (m)
$F_c$	نیروی گریز از مرکز (N)
$F_d$	نیروی درگ (N)
$r$	شعاع چرخش سیال (m)
$Re$	عدد رینولدز
$U_f$	سرعت سیال ( $ms^{-1}$ )
$U_{st}$	سرعت لغزشی بین ذره و سیال ( $ms^{-1}$ )
$u_p$	سرعت ذرات جامد ( $ms^{-1}$ )
$\rho_p$	چگالی ذرات جامد ( $Kgm^{-3}$ )
$\rho_f$	چگالی سیال ( $Kgm^{-3}$ )
$\mu$	لزوجة دینامیکی سیال ( $Kgm^{-1}s^{-1}$ )
$\omega$	سرعت زاویه‌ای ( $s^{-1}$ )

## ۶- منبع‌ها

Aryal, B., Gurung, P., Paradhan, S.S. & Shrestha, R. (2019). Design, Fabrication and Testing of Hydro cyclone Separator as Sediment Separation System. KEC Conference 2019, Kantipur Engineering College. Dhapakhel Lalitpur.

Cilliers, J.J. & Harrison, S.T.L. (2019). Yeast Flocculation Aids the Performance of Yeast Dewatering Using Mini-Hydro cyclones, *Sep. Purify. Technol*, 209, 159-163.

Endres, E., Dueck, J. & Neesse, T.H. (2012). Hydro cyclone classification of particles in the micron range, *Mineral. Engineering*, 31, 42-45.

Feng, J., Tang, X., Wang, W., Ying, R & Zhang, T. (2016). A Combined Method in Parameters Optimization of Hydro cyclone. *Mathematical problem in Engineering*, 2016, 1-13.

Gencoglan, C., Sahan, H. & Gencoglan, S. (2023). Determination of separation Efficiency of Hydrocyclone Used Per-Filter in Mikro Irrigation at Different Inlet Velocities and Diameters. *J. Agricultural Sciences*, 29(1), 60-67.

