

# بررسی عملکرد هیدروسیکلون در فرایند جداسازی ذره‌های جامد در پساب صنعت سنگ‌بری

افشین نادری، محسن مسعودیان\*

گروه سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

محمود حبیبیان

گروه مهندسی نفت، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، تهران، ایران

**چکیده:** در حال حاضر تصفیه و بازیافت پساب صنعت سنگ‌بری به روش سنتی حوضچه ته‌نشینی و روش قیلتر پرس انجام می‌شود که به دلیل مصرف زیاد آب و هدر رفت آن در این پژوهش روش جدید جداسازی ذره‌های جامد سنگ به روش هیدرولیکی نیروی گریز از مرکز با استفاده از هیدروسیکلون مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر پارامترهای عملیاتی نظیر فشار، غلظت و نوع نمونه ذره‌ها بر روی عملکرد هیدروسیکلونی به قطر ۲۴ mm بررسی شد. آزمایش‌ها توسط نرم‌افزار Design Expert و به روش سطح پاسخ (RSM) طراحی شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌های تجربی به روش طراحی مرکزی مرکب (CCD) انجام گرفت. آزمایش‌ها در ۲۲ سری با شرایط گوناگون بررسی شد. مواد مورد استفاده در این پژوهش ذره‌های پودر سنگ جمع‌آوری شده از پساب کارخانه‌های سنگ‌بری در دو نمونه پودر سنگ‌های گرانیت و تراورتن با چگالی به ترتیب ۲۷۲۰ و ۲۵۵۰ kg/m<sup>3</sup> با اندازه ذره‌های کمتر از ۲۰۰ میکرومتر استفاده شد. که اندازه ذره‌ها از آنالیز اندازه ذره‌های اندازه‌گیری و شکل ذره‌ها با دستگاه تصویربرداری الکترونی (SEM) مشخص شد. نتیجه‌ها نشان داد بازده جداسازی در هر دو نوع پودر پساب با افزایش فشار رابطه مستقیم دارد و با افزایش فشار ورودی، بازده جداسازی افزایش می‌یابد. در حالی که افزایش غلظت باعث کاهش بازده جداسازی می‌شود. با توجه به نتیجه‌ها، شدت جریان با افزایش فشار به‌طور مستقیم افزایش می‌یابد ولی غلظت در بازه بررسی شده تأثیر معنی‌داری بر شدت جریان ندارد. بهترین بازده جداسازی در فشار ۲/۶۳ بار و غلظت ۱/۶ درصد وزنی برای نمونه سنگ تراورتن ۹۰/۳۱ درصد جداسازی به دست آمد و برای نمونه گرانیت در فشار ۳ بار و غلظت ۳ درصد وزنی ۹۱/۴۵ درصد بازده جداسازی به دست آمد.

**واژگان کلیدی:** سنگ‌بری، پساب، پودر سنگ، جداسازی، هیدروسیکلون

**KEYWORDS:** Cutting-stone, wastewater, Stone powder, Separation, Hydrocyclone

## مقدمه

مناطق مرکزی ایران در شهرهای بزرگ و صنعتی احداث شده است که دچار کمبود منابع آبی شدیدی هستند. مشکل کمبود و بحران

با افزایش گرمایش زمین و شرایط دمایی ایران که در ناحیه خشک و نیمه خشک قرار دارد، متأسفانه بیش‌تر صنایع گوناگون در

\*Email: masoudian@sanru.ac.ir

\*عهده‌دار مکاتبات

تله اندازی می گردند. جریان در این روش تصفیه همیشه در گردش می باشد و پساب ورودی در طول فعالیت کارخانه تولید می شود و آب مصرفی در حوضچه آخر که ذره ها در آن ته نشین شده به سامانه آبرسانی کارخانه بازگردانده می شود. و این کار تا زمانی که حوضچه ها پر شوند با توجه به میزان برش و تولید هر کارخانه ادامه پیدا می کند. در روش سنتی معایب زیادی به خصوص هدر رفت آب از لحاظ تبخیر از سطح حوضچه ها مخصوصا در فصل گرم و بخشی از آب که در هنگام خشک شدن لجن هدر می رود و بلا استفاده ماندن فضای زیادی از زمین کارخانه که برای احداث حوضچه و خشک کردن لجن می بایست اختصاص داد که باعث هزینه های جانبی اضافی در کارخانه و تبعات منفی زیست محیطی می شود.

در این پژوهش جداسازی ذره های جامد در پساب تولید شده با استفاده از روش هیدرولیکی با استفاده از هیدروسیکلون مطالعه و بررسی شده است. سیکلون ها دستگاه های مکانیکی ثابت هستند که کاربردهای گسترده ای، بر اساس نیروی گریز از مرکز برای جداسازی یا طبقه بندی در صنایع گوناگون دارد. به طور کلی سیکلون ها به دودسته تقسیم می شوند [۳]. دسته اول سیکلون هایی که برای مایع ها طراحی شده باشند که به عنوان هیدروسیکلون شناخته می شوند مانند سیکلون های هیدرولیکی، سیکلون های جامد-مایع و سیکلون های مایع-مایع. دسته دوم سیکلون های دیگری که به عنوان سیکلون های گازی شناخته می شود شامل جداکننده های سیکلونی، سیکلون های جمع آوری گرد و خاک، سیکلون های گاز-مایع و سیکلون های گاز-جامد است. ساخت اولین نمونه هیدروسیکلون برای جدایش ذره های ریزدانه شن از آب توسط برتنی به بیش از صد سال پیش می رسد [۴]. هیدروسیکلون ها برای جداسازی جامد-مایع، مایع-مایع و جامد-گاز در انواع محیطها طبقه بندی کرد. رسوب گذاری گریز از مرکز اساس جداسازی در هیدروسیکلون است. یعنی ذره ها تحت شتاب گریز از مرکز قرار می گیرند تا از سیال جدا شود. برخلاف سانتریفیوژها که از همان اصل پیروی می کنند، هیدروسیکلون ها دارای اجزا متحرکی نیستند و حرکت چرخشی لازم توسط خود سیال انجام می شود [۵]. اگر ذره ها چگالی بیش تری نسبت به مایع داشته باشند، به سمت دیوار هیدروسیکلون حرکت می کنند، که به سمت لوله خروجی ته ریز تخلیه می شود. مایع تمیز شده همراه با برخی از ذره های ریزدانه از روش گرداب یاب تخلیه می شود که به عنوان یک لوله خروجی سرریز عمل می کند. یک هیدروسیکلون معمولی شامل یک بخش استوانه ای در قسمت بالا و یک بخش

آب یک مسئله غیر قابل اجتناب است. مطالعه ها و برنامه های متعددی برای گسترش منابع آب از روش طرح های گوناگون انتقال آب بین حوضه های و شیرین سازی آب وجود دارد. بنابراین، بیش تر این طرح ها پرهزینه و دارای موانع مرزی استانی و کشوری دشواری می باشند. صرفه جویی در آب و مدیریت منابع آبی در بسیاری از موارد روش مناسب و اقتصادی است. بنابراین، حفاظت و استفاده بهینه از منابع آبی موجود یک مسئله ضروری است. مصرف آب در صنعت سنگبری، طی روند برش سنگ برای تسریع در فرایند تولید، خنک کردن دستگاه های برش و جلوگیری از ایجاد گرد و خاک از اهمیت بالایی برخوردار است. از مشکل های مهم صنعت سنگبری مصرف زیاد آب، تصفیه و بازیافت پساب کارخانه های این صنعت است. در هر مرحله از برش آب مصرفی از روش کانال در کف کارخانه توسط نیروی ثقل به سمت حوضچه های ته نشینی هدایت شده و پس از ته نشین شدن ذره های سنگ، برای استفاده مجدد به سامانه آبرسانی کارخانه بازگردانده می شود [۱]. پساب خروجی صنایع سنگبری شامل دو فاز جامد (پودر سنگ) و مایع (آب) می باشد. مطالعه ها نشان می دهد که ۹۶ درصد پساب تولید شده از فرایند برش سنگ از آب و فقط ۴ درصد آن شامل ذره های جامد است. بنابراین می توان با جداسازی ذره های جامد موجود در آب از آن به عنوان منبع آب برای فراوری مجدد و جلوگیری از هدررفت استفاده کرد. ضایعات جامد جداسازی شده که به طور بیش تر پودر سنگ است می تواند در قالب های گوناگون فرآورده های مصالح ساختمانی مورد استفاده قرار گیرد. از دوغاب (پساب کارخانه) می توان برای تولید آجر استفاده کرد، بنابراین نیاز به آب برای تولید آجر و نیاز به دفع لجن (پودر سنگ) از بین می رود [۲].

روش های موجود تصفیه و بازیافت پساب کارخانه سنگبری در ایران، روش سنتی حوضچه های ته نشینی و روش مدرن فیلتر پرس می باشد که بیش از ۹۵ درصد کارخانه ها از روش سنتی حوضچه ته نشینی استفاده می کنند. بیش تر کارخانه های سنگبری که در ایران فعالیت دارند به خصوص کارخانه های کوچک، از روش رایج ته نشینی ذره ها تحت نیروی ثقل در حوضچه های ته نشینی برای بازیافت و استفاده مجدد از آب مصرفی استفاده می کنند. این روش که از سالیان پیش در صنعت سنگبری مورد استفاده بوده، روشی سنتی می باشد. در این روش پساب در حوضچه هایی که به صورت استخرهای همجوار که به یکدیگر جریان دارند جمع آوری می شود. در حوضچه های اولیه چون سرعت آب نسبتا زیاد است ذره های درشت دانه ته نشین می شود و ذره های ریزدانه در حوضچه های آخر

می‌باشد [۲۱]، که با بازده جداسازی و مصرف انرژی متناسب می‌باشد. سیلوا در پژوهشی که در سال ۲۰۱۵ میلادی انجام داد قطر ورودی را تابعی از قطر بدنه هیدروسیکلون، شدت جریان و نیز راندمان مورد نیاز برای جداسازی دانسته و اعلام کرد که این قطر باید به‌عنوان یک متغیر مورد بررسی قرار گیرد. این قطر در تعیین حد یا قطر جدایش نیز نقش چشمگیری دارد و در نتیجه انتخاب مناسب آن، از اهمیت زیادی برخوردار است [۲۲]. در پژوهشی که توسط مارتینز و همکاران انجام شد، بررسی جامعی بر روی طول بخشی از شبکه میانی که در هیدروسیکلون فرو رفته، به‌عمل آمده‌است و سرانجام طول بهینه معادل ۰/۱ ارتفاع کل هیدروسیکلون برای کاهش جریان مدار کوتاه تعیین شده‌است [۲۳]. هدف از انجام این پژوهش، استفاده از روش هیدروسیکلون به‌منظور جداسازی ذره‌های جامد از پساب صنعت سنگ‌بری است. به عبارتی دیگر ایده حذف پودر سنگ از پساب کارخانه‌های سنگ‌بری و بازگرداندن آب با کم‌ترین ذره‌ها به سامانه آب‌رسانی کارخانه برای استفاده مجدد هدف اصلی پژوهش پیش‌رو می‌باشد. با وجود معایب متعدد در رابطه با روش‌های موجود در تصفیه پساب سنگ‌بری از جمله زمانبر بودن، تلفات زیاد آب، فضای زیاد اختصاصی و هزینه‌های بالا باعث شده که پژوهش‌هایی برای استفاده از روش هیدروسیکلون انجام گیرد که نوآوری این پژوهش می‌باشد.

### بخش تجربی

#### مواد به کار رفته در پژوهش

مواد مورد استفاده در این پژوهش، مواد جامد در پساب کارخانه برش سنگ‌های گرانیت و تراورتن در شهرک صنعتی محمود آباد اصفهان است که پس از جمع‌آوری و خشک کردن، ذره‌های کم‌تر از ۲۰۰ میکرون جداسازی شد. دانسیته ذره‌های پودر سنگ‌های گرانیت و تراورتن به ترتیب برابر با ۲۷۲۰ و  $2550 \text{ kg/m}^3$  توسط پیکنومتر به‌دست آمد. دانه‌بندی ذره‌های گرانیت و تراورتن توسط آنالیز توزیع اندازه ذره‌های شکل ۱ با استفاده از دستگاه آنالیز اندازه ذره‌ها و شکل آن‌ها با دستگاه تصویربرداری میکروسکوپی اندازه‌گیری شد (شکل ۲).

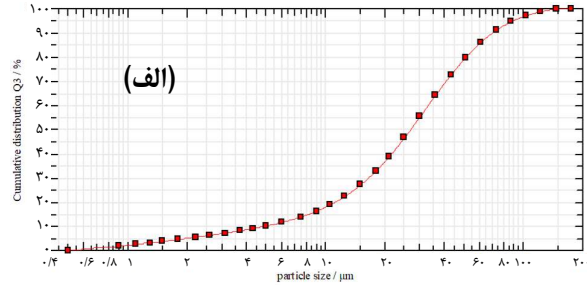
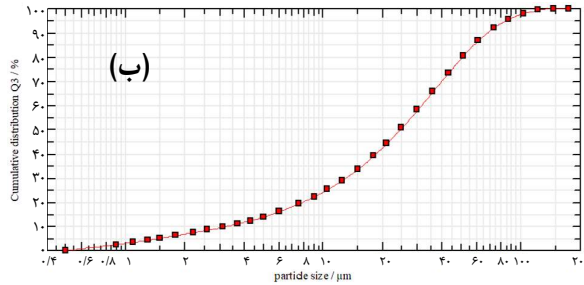
#### اندازه‌های هیدروسیکلون

هیدروسیکلون مورد استفاده در این پژوهش از جنس شیشه به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر است. هندسه هیدروسیکلون با قطر استوانه ۲۴ میلی‌متر، قطر سرریز ۱۰ میلی‌متر، قطر ته‌ریز ۷ میلی‌متر، قطر ورودی ۸ میلی‌متر، طول گرداب‌یاب ۱۰ میلی‌متر

مخروطی شکل در پایین می‌باشد. این قطعه‌ها به هم متصل می‌شوند و محلول ذره‌ها و مایع در قسمت فوقانی به صورت مماسی از روش دهانه ورودی تزریق می‌شود. از آن جایی که محلول به صورت مماسی وارد می‌شود، یک جریان چرخشی قوی در هیدروسیکلون ایجاد می‌شود. این اقدام به توسعه نیروهای اینرسی کمک می‌کند که طبقه‌بندی ذره‌ها درون هیدروسیکلون امکان‌پذیر باشد. در مقایسه با سایر فناوری‌های جداسازی مانند سانتریفیوژها و تجهیزات فیلترینگ، برتری استفاده از هیدروسیکلون، بازده جداسازی بالا و اندازه برش پایین (در حد میکرون)، عدم وجود اجزا متحرک، مصرف انرژی پایین، دامنه عملیاتی وسیع، حجم کم، قیمت مناسب، نصب و راه‌اندازی راحت، هزینه نگهداری پایین و قابلیت انعطاف‌پذیری بالا است [۶].

بنابراین هیدروسیکلون‌ها در زمینه‌های گوناگون مانند صنایع معدنی [۷]، شیمیایی [۸]، ذغال‌سنگ [۹]، نفت [۱۰]، کاغذسازی [۱۱]، حفاظت محیط‌زیست [۱۲]، مدیریت پساب [۱۳]، کشاورزی [۱۴]، صنایع غذایی [۱۵]، آبی‌پروری، بیوتکنولوژی [۱۶]، فناوری نانو، فناوری علم مواد و انرژی گرمایی [۱۷]، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند بر اساس هر یک از کاربردهای ذکر شده طراحی و بهینه‌سازی هیدروسیکلون مورد نیاز است. مطالعه‌های گوناگونی توسط پژوهشگران در زمینه‌های مطالعه‌های آزمایشگاهی " مطالعه‌ها در مقیاس آزمایشگاهی در شرایط شبیه کاربردهای صنعتی واقعی " انجام گرفته است [۱۸]. دینامیک سیالات محاسبه‌های CFD، مطالعه‌های تئوری برای توسعه مدل‌های کاربردی به‌وسیله بهینه‌سازی پارامترهای متغیر مانند پارامترهای عملیاتی، پارامترهای هندسی، پارامترهای مواد-خوراک، ترکیب‌های چندگانه هیدروسیکلون و انواع ساختار آن انجام گرفته و نتیجه آن، هیدروسیکلون‌های مرسوم امروزی است که به‌طور خاص توسعه‌یافته است. نتیجه‌های نهایی گزارش شده توسط پژوهشگران به دلیل طراحی و عملکردهای متفاوت هیدروسیکلون‌هایی که استفاده شده متفاوت بوده و مکانیسم جداسازی به‌طور دقیق به دلیل پدیده‌های پیچیده داخلی زیاد شناخته نشده است [۱۹].

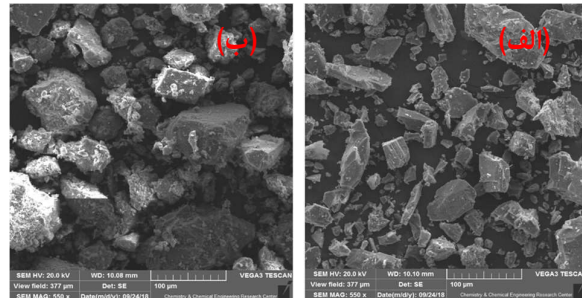
برخی پژوهشگران، هیدروسیکلون‌های با شدت جریان‌های ورودی متفاوت با استفاده از سیال‌های گوناگون را بررسی کردند. نتیجه‌ها نشان داد که با افزایش شدت جریان خوراک، هر دو فاکتور بازده جداسازی و نسبت تقسیم به‌تدریج افزایش می‌یابد در حالی که افت فشار به‌طور سریع افزایش می‌یابد [۲۰]. فشار خوراک ورودی از دیگر پارامترهای مؤثر بر عملکرد جداسازی هیدروسیکلون‌ها



شکل ۱ - منحنی دانه‌بندی پودر ذره‌های الف) گرانیت و ب) تراورتن

جدول ۱ - سطح و بازه پارامترهای عملیاتی بررسی شده

پارامترهای عملیاتی	نماد	سطح و بازه		
		$-\alpha$	۰ (متوسط)	$+\alpha$ (بالا)
فشار (بار)	$\Delta P$	۰/۵	۱/۷۵	۲/۶
غلظت (%)	$C_w$	۱	۳	۴/۴
نوع پودر سنگ	M	تراورتن، گرانیت		



شکل ۲ - تصویر SEM ذره‌های پودر سنگ الف) گرانیت و ب) تراورتن

با نرم‌افزار Design Expert با تعریف دو فاکتور پیوسته (فشار و غلظت) و یک فاکتور گسسته (نوع نمونه پودر سنگ)، داده‌های تجربی به روش CCD تجزیه و تحلیل شد. پارامترهای بازده جداسازی و شدت جریان به‌عنوان پارامترهای پاسخ معرفی شد. سطح و بازه فاکتورهای عملیاتی بررسی شده در جدول ۱ نشان داده شده است. نتیجه‌های آزمایش‌ها با دو تکرار در نقطه مرکزی در جدول ۲ ارائه شده است.

### روش آزمایش

برای به‌دست آوردن عملکرد هیدروسیکلون ابتدا محلول آب و ذره‌ها با توجه به غلظت هر آزمایش، در مخزنی به حجم ۲۰ لیتر ساخته شد. برای همگن‌سازی خوراک ورودی از همزن مکانیکی استفاده شد و پس از مخلوط شدن کامل ذره‌ها به‌طور یکنواخت در آب، توسط پمپ به سامانه تزریق شد. از شیر کنترل خروجی سامانه به مخزن، برای تنظیم افت فشار در هر آزمایش استفاده شد که پس از تثبیت جریان، به‌طور هم‌زمان از خروجی سرریز و ته‌ریز نمونه‌گیری انجام گرفت. مقدار شدت جریان خروجی از بالا (سرریز) و خروجی از پایین (ته‌ریز) به‌صورت حجمی با استوانه مدرج، اندازه‌گیری شد. جریان سرریز و ته‌ریز نمونه‌برداری شده هر آزمایش به مدت ۲۴ ساعت در خشک‌کن با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به‌طور کامل خشک شد و مقدار ذره‌های جامد خشک‌شده نمونه‌های سرریز و ته‌ریز هر آزمایش وزن شد. برای انجام آزمایش‌ها از سامانه آزمایشگاهی که شامل مخزن به حجم ۲۰ لیتر، پمپ سانتریفیوژ به توان ۱ اسب بخار با بیش‌ترین شدت جریان ۵۰ لیتر در دقیقه، شیرآلات کنترل جریان،



شکل ۳ - دستگاه جداکننده تجربی استفاده در پژوهش

و زاویه مخروطی ۹ درجه است. دستگاه تجربی استفاده شده در این پژوهش در شکل ۳ نشان داده شده است.

### طراحی آزمایش‌ها

به‌منظور بررسی اثرهای پارامترهای فشار، غلظت و نوع نمونه پودر سنگ، بر عملکرد هیدروسیکلون با استفاده از روش سطح پاسخ

فشارسنج دیجیتالی، همزن مکانیکی و هیدروسیکلون استفاده شد که شماتیک آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

کارایی هیدروسیکلون جداسازی و بازیابی جامدها در تهریز است طوری که جریان شفاف و زلال تر از سرریز داشته باشیم. چندین معادله برای بازده هیدروسیکلون وجود دارد که ساده‌ترین و کاربردی‌ترین آن‌ها طبق معادله (۱) به دست می‌آید.

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

که  $M_u$  و  $M$  به ترتیب میزان بازیابی جرم در تهریز و شدت جریان جرمی خوراک ورودی است. شدت جریان ورودی هیدروسیکلون با خواندن مستقیم از شدت جریان سنسج اندازه‌گیری شد.

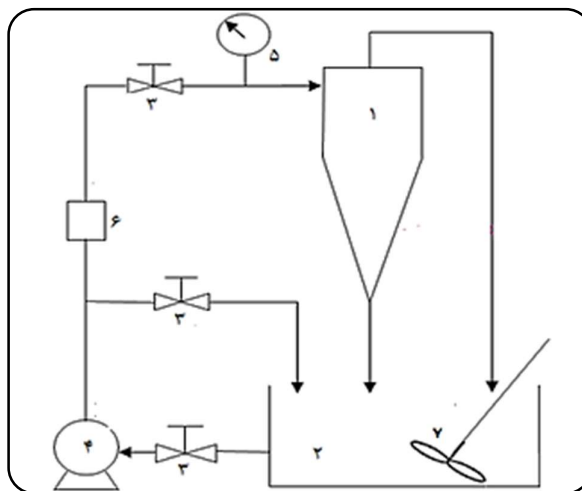
### نتیجه‌ها و بحث

جداسازی ذره‌های جامد توسط هیدروسیکلون بستگی به عامل‌های زیادی از جمله فشار، اندازه ذره‌ها، غلظت و هندسه هیدروسیکلون دارد. که با ثابت در نظر گرفتن هندسه هیدروسیکلون در این پژوهش، تأثیر پارامترهای فشار و غلظت جریان مواد بر عملکرد هیدروسیکلون با دو نمونه پودر سنگ با چگالی‌های متفاوت و اندازه ذره‌های گوناگون ارزیابی شد. اندازه و شکل ذره‌های مواد با آنالیز میکروسکوپ الکترونی تصویر (SEM) مشخص شد. عملکرد هیدروسیکلون و شدت جریان به‌عنوان پارامترهای پاسخ و سه پارامتر مؤثر فشار (P)، غلظت ( $C_w$ ) و نوع پودر سنگ‌های گرانیت و تراورتن به‌عنوان پارامترهای مستقل انتخاب شد. نتیجه‌های آزمایش‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ  $RSM^1$  داده‌های آزمایشگاهی بر اساس روش  $CCD^2$  تجزیه و تحلیل شد. معادله‌های برازشی درجه دوم پارامترهای مؤثر به‌منظور بررسی تاثیرهای آن‌ها بر پارامترهای پاسخ به دست آمد. تأثیر هر پارامتر توسط مقدار احتمالی (P-Value) ارزیابی شد که در سطح اطمینان ۹۵٪ مقدارهای کمتر از ۰/۰۵ نشان‌دهنده معنی‌داری آن پارامترها است. نتیجه‌های روش آنالیز پراکنندگی (ANOVA) برای پاسخ‌های بازده جداسازی و شدت جریان به ترتیب در جدول ۳ و ۴ نشان داده شده است.

درواقع با توجه به P-value پارامترهای مؤثر مدل در سطح بالایی معنی‌دار است. و معنی‌دار نبودن آماری کمبود در برازش، عدم انطباق LOF در آزمایش‌ها مناسب است که به معنی تکرارپذیر بودن آزمایش‌ها است. بنابراین معادله‌های تجربی بین پارامترهای مستقل و پاسخ‌ها به‌طور کامل مناسب است.

جدول ۲ - طراحی آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ

شماره آزمایش	فشار (بار)	غلظت (%)	نمونه پودر سنگ	شدت جریان (ml/s)	بازده جداسازی (%)
۱	۱/۷۵	۱	تراورتن	۱۹۳	۸۸/۷۸
۲	۰/۸۷	۱/۶	تراورتن	۱۳۶	۸۶/۹۲
۳	۲/۶۳	۱/۶	تراورتن	۲۵۰	۹۰/۳۱
۴	۰/۵	۳	تراورتن	۱۱۳	۸۴/۸۹
۵	۱/۷۵	۳	تراورتن	۱۹۳	۸۸/۰۲
۶	۱/۷۵	۳	تراورتن	۱۹۷	۸۷/۳۵
۷	۱/۷۵	۳	تراورتن	۱۹۲	۸۷/۶۸
۸	۳	۳	تراورتن	۲۶۸	۹۰/۲۲
۹	۰/۸۷	۴/۴	تراورتن	۱۳۳	۸۵/۸۹
۱۰	۲/۶۳	۴/۴	تراورتن	۲۴۵	۸۸/۷۸
۱۱	۱/۷۵	۵	تراورتن	۱۸۵	۸۶/۱۲
۱۲	۱/۷۵	۱	گرانیت	۱۸۰	۹۰/۶۸
۱۳	۰/۸۷	۱/۶	گرانیت	۱۲۸	۸۷/۸۲
۱۴	۲/۶۳	۱/۶	گرانیت	۲۳۳	۹۱/۱۲
۱۵	۰/۵	۳	گرانیت	۱۰۸	۸۵/۶۳
۱۶	۱/۷۵	۳	گرانیت	۱۹۹	۸۹/۷۵
۱۷	۱/۷۵	۳	گرانیت	۱۹۶	۹۰/۲۳
۱۸	۱/۷۵	۳	گرانیت	۱۹۳	۹۰/۰۳
۱۹	۳	۳	گرانیت	۲۵۴	۹۱/۴۵
۲۰	۰/۸۷	۴/۴	گرانیت	۱۳۶	۸۶/۹۱
۲۱	۲/۶۳	۴/۴	گرانیت	۲۳۲	۸۹/۳۶
۲۲	۱/۷۵	۵	گرانیت	۲۰۰	۸۸/۵۴



شکل ۴ - شماتیک سامانه آزمایشگاهی شامل ۱- هیدروسیکلون ۲- مخزن ۳- شیر کنترل ۴- پمپ ۵- فشارسنج ۶- شدت جریان سنسج ۷- همزن

(۱) Response Surface Methodology

(۲) Central Composite Design

جدول ۳ - آنالیز پراکنده‌گی آزمایش‌ها (ANOVA) برای پاسخ بازده جداسازی

P-value	F-value	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مدل
$< .0001$	۲۷/۳۱	۹/۹۰	۸	۷۹/۱۸	مدل
$< .0001$	۱۴۷/۱۳	۵۳/۳۲	۱	۵۳/۳۲	فشار (A)
$< .0002$	۲۴/۹۱	۹/۰۳	۱	۹/۰۳	غلظت (B)
$< .0001$	۳۸/۶۶	۱۴/۰۱	۱	۱۴/۰۱	نمونه (C)
۰/۴۴۱	۰/۶۳	۰/۲۳	۱	۰/۲۳	AB
۰/۶۱۳۲	۰/۲۷	۰/۰۹۷	۱	۰/۰۹۷	AC
۰/۷۹۹۲	۰/۰۶۷	۰/۰۲۴	۱	۰/۰۲۴	BC
۰/۰۲۱۹	۶/۷۸	۲/۴۶	۱	۲/۴۶	A <sup>2</sup>
۰/۵۸۴۲	۰/۳۱	۰/۱۱	۱	۰/۱۱	B <sup>2</sup>
		۰/۳۶	۱۳	۴/۷۱	Residual
۰/۰۵۴۵	۵/۷۰	۰/۴۹	۹	۴/۳۷	Lock of fit
		۰/۰۸۵	۴	۰/۳۴	Pure Error
			۲۱	۸۳/۸۹	total
	۰/۹۰۹۳	Adj. R <sup>2</sup>		۰/۹۴۳۸	R <sup>2</sup>

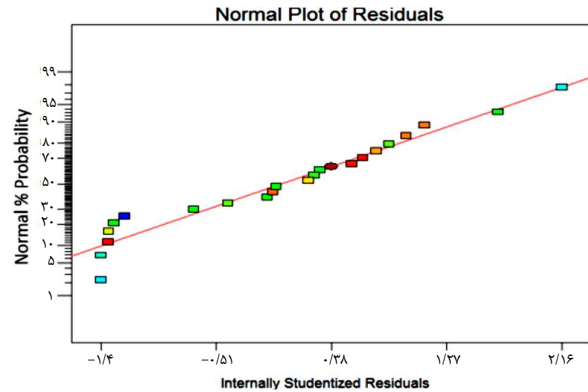
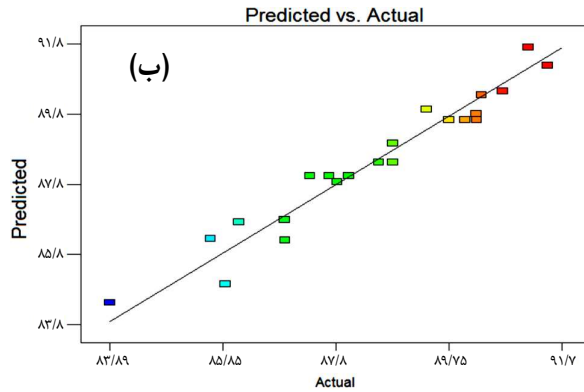
جدول ۴ - آنالیز پراکنده‌گی آزمایش‌ها (ANOVA) برای پاسخ شدت جریان

P-value	F-value	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مدل
$< .0001$	۲۸۴/۱۹	۵۷۶۷/۸۲	۸	۴۶۱۴۲	مدل
$< .0001$	۲۲۳۸/۹۹	۴۵۴۴۱/۳۲	۱	۴۵۴۴۱	فشار (A)
۰/۳۹۱۶	۰/۷۹	۱۵/۹۴	۱	۱۵/۹۴	غلظت (B)
۰/۰۴۸۵	۴/۷۴	۹۶/۱۸	۱	۹۶/۱۸	نمونه (C)
۰/۴۰۳۶	۰/۷۵	۱۵/۱۳	۱	۱۵/۱۳	AB
۰/۰۵۶۵	۴/۳۸	۸۸/۹۶	۱	۸۸/۹۶	AC
۰/۰۰۹۷	۹/۱۸	۱۸۶/۳۱	۱	۱۸۶/۳۱	BC
۰/۰۰۳۰	۱۳/۲۳	۲۶۸/۴۱	۱	۲۶۸/۴۱	A <sup>2</sup>
۰/۰۴۳۴	۵/۰۱	۱۰۱/۶۵	۱	۱۰۱/۶۵	B <sup>2</sup>
		۲۰/۳۰	۱۳	۲۶۳/۸۴	Residual
۰/۱۳۶۱	۳/۲۲	۲۵/۷۶	۹	۲۳۱/۸۴	Lock of fit
		۸	۴	۳۲	Pure Error
			۲۱	۴۶۴۰۶	total
	۰/۹۹۰۸	Adj. R <sup>2</sup>		۰/۹۹۴۳	R <sup>2</sup>

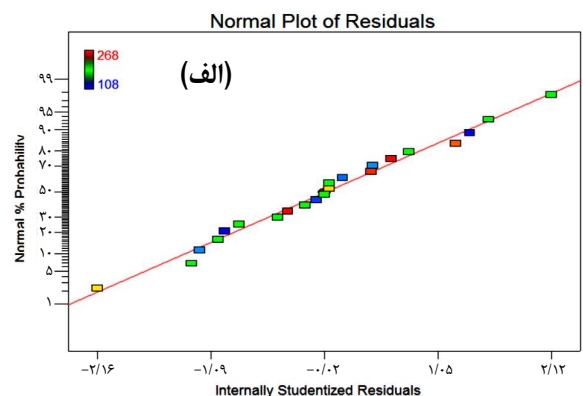
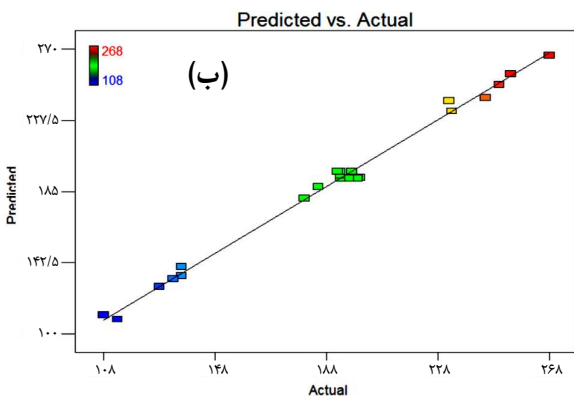
## اعتبارسنجی مدل

حاکمی از مناسب و قابل اطمینان بودن برازش‌ها است. نمودار احتمال نرمال نشان می‌دهد که مانده‌ها چگونه از یک توزیع نرمال پیروی می‌کنند. حتی با وجود داده‌های طبیعی انتظار برخی پراکنش‌های متوسط وجود دارد. الگوهای منحنی شکل مشخصی مانند "S شکل" نشان می‌دهد که با انجام یک تابع انتقال بر روی متغیر وابسته یا پاسخ مدل، تجزیه و تحلیل بهتری به دست خواهد آمد. نمودار مقادیر واقعی در مقابل مقادیرهای پیش‌بینی شده رابطه و میزان همبستگی

برای اعتبارسنجی مدل‌های برازش داده‌شده با بررسی نمودار احتمال نرمال و مقایسه نمودار داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل در مقابل مقادیرهای حقیقی استفاده شد. که در شکل ۵ برای پاسخ بازده جداسازی و شکل ۶ برای پاسخ شدت جریان نشان داده شده است. با توجه به مقایسه مقادیرهای داده‌ها و R<sup>2</sup> ضریب همبستگی ۰/۹۴۳۸ و ۰/۹۹۴۳ به ترتیب برای پاسخ‌های بازده جداسازی و شدت جریان



شکل ۵ - نمودار (الف) نمودار احتمال نرمال داده‌ها و (ب) نمودار مقایسه مقادیرهای حقیقی و مقادیرهای پیش‌بینی شده برای پاسخ بازده جداسازی



شکل ۶ - نمودار (الف) نمودار احتمال نرمال داده‌ها و (ب) نمودار مقایسه مقادیرهای حقیقی و مقادیرهای پیش‌بینی شده برای پاسخ شدت جریان

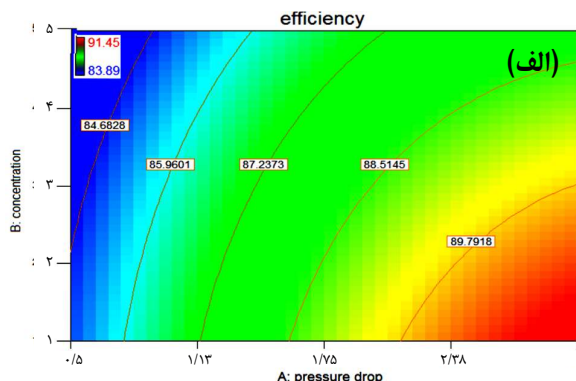
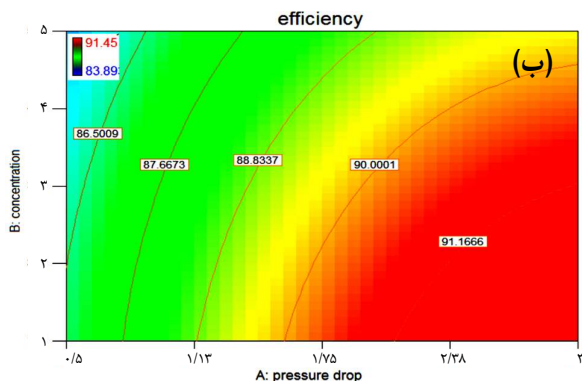
پارامتری از F-value مدل بیش‌تر باشد نشان دهنده این است که پارامتر مورد نظر با اطمینان ۹۵ درصدی تأثیر معنی‌داری بر مدل دارد [۲۵]. به‌علاوه، P-value اهمیت پارامتر را نشان می‌دهد به‌طوری که اگر P-value هر پارامتر کم‌تر از مقدار ۰/۰۵ باشد پارامتر مؤثر بر مدل می‌باشد. بر اساس جدول ۳ F-value پارامترهای فشار و نوع پودر سنگ بیش‌تر از F-value مدل می‌باشد و P-value سه پارامتر اصلی (فشار، غلظت و نوع پودر سنگ) و همچنین بر همکنش  $A^2$  کم‌تر از ۰/۰۵ است که با درصد بالایی در مدل معنی‌دار هستند. در شکل ۷ اثر پارامترهای عملیاتی بر بازده جداسازی را به‌صورت برداری برای نمونه سنگ تراورتن و گرانیت نشان داده شده است. در شکل ۸ نمودارهای سه بعدی اثر ترکیبی پارامترهای بررسی شده بر بازده جداسازی نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۸ تأثیر پارامتر فشار بر پارامتر پاسخ بازده جداسازی، مثبت بوده است که با افزایش آن در هر دو نمونه پودر سنگ تراورتن و گرانیت بازده جداسازی به‌تدریج افزایش یافته است. بیش‌ترین بازده جداسازی در بیش‌ترین فشار به‌دست آمده است.

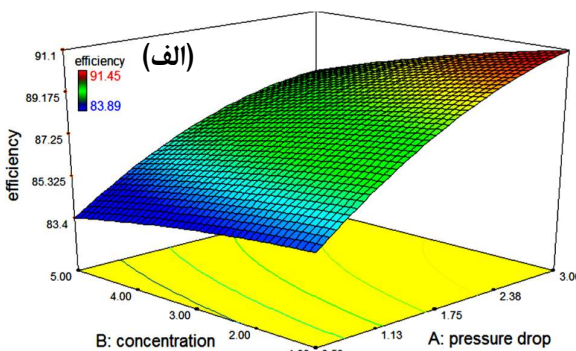
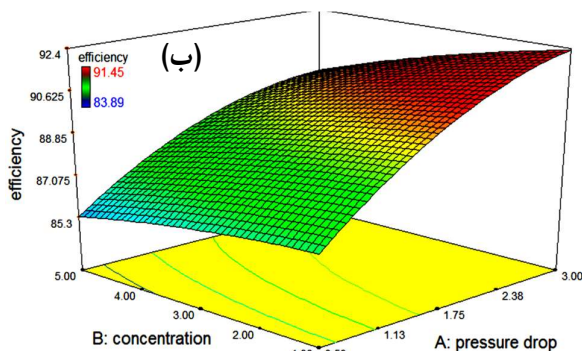
مقادیرهای پیش‌بینی شده مدل و مقادیرهای حقیقی داده‌های تجربی بازده جداسازی کلی را نشان می‌دهد که توزیعی به نسبت خطی دارد که بیانگر مطابقت به نسبت خوب مدل و داده‌های تجربی است.

### بازده جداسازی

جدول ۳ آنالیز پراکندگی آزمایش‌ها (ANOVA) برای پاسخ بازده جداسازی را نشان می‌دهد. بازده جداسازی از نسبت مقدار جرم بازیابی شده از ته‌ریز به مقدار جرم ورودی به هیدروسیکلون وابسته می‌باشد. بازه غلظت از ۵ تا ۱۵٪ وزنی و فشار ورودی از ۰/۵ تا ۳ بار برای هر دو نمونه پودر سنگ بررسی شد. کارایی هیدروسیکلون به جداسازی ذره‌ها از پساب در صنعت سنگ‌بری مربوط می‌باشد که پارامتر بازده جداسازی یکی از مهم‌ترین پارامترهای ارزیابی عملکرد هیدروسیکلون می‌باشد [۲۴]. تأثیر پارامترهای فشار، غلظت و نوع پودر سنگ، بر بازده جداسازی بررسی شد که پارامتر فشار بیش‌ترین تأثیر مثبت بر بازده جداسازی را دارد. اهمیت هر پارامتر با توجه به F-value و P-value تعیین شد. در صورتی که F-value



شکل ۷ - نمودار برداری اثر پارامترها بر بازده جداسازی (الف) پودر سنگ تراورتن و (ب) پودر سنگ گرانیته



شکل ۸ - نمودار سه بعدی اثر ترکیبی پارامترها بر بازده جداسازی (الف) پودر سنگ تراورتن و (ب) پودر سنگ گرانیته

که بازده جداسازی،  $P$  فشار و  $C$  غلظت می‌باشد. که برهمکنش پارامترهای مؤثر، تأثیر پارامترها به صورت تکی و اثر ترکیبی پارامترها نمودارهای سه بعدی در شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده شد.

### شدت جریان

جدول ۴ آنالیز پراکندگی آزمایش‌ها (ANOVA) برای پاسخ شدت جریان را نشان می‌دهد. شدت جریان ورودی به هیدروسیکلون ظرفیت یک هیدروسیکلون را تعیین می‌کند و فاکتور مهمی برای ارزیابی عملکرد هیدروسیکلون است. با توجه به جدول ۱ بازه فشار و غلظت بررسی شده شدت جریان برای نمونه پودر سنگ تراورتن (۱۱۳ تا ۲۶۸ ml/s) و برای نمونه پودر سنگ گرانیته (۱۰۸ تا ۲۵۴ ml/s) به دست آمد. در شکل ۹ نمودارهای سه بعدی اثر ترکیبی پارامترهای بررسی شده بر شدت جریان نشان داده شده است.

با افزایش فشار ورودی هیدروسیکلون، پارامتر شدت جریان افزایش می‌یابد و پارامتر فشار اثر مثبتی بر شدت جریان دارد [۳۶]. با توجه به نتیجه‌ها و شکل ۹ با افزایش فشار، شدت جریان همواره

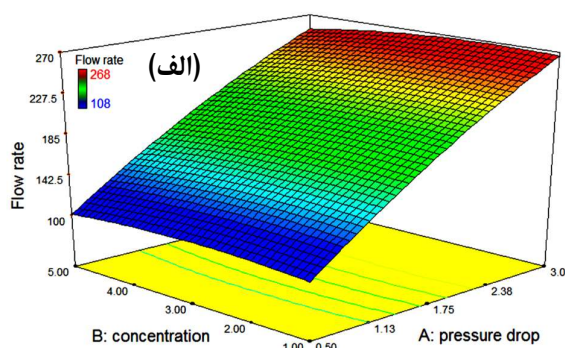
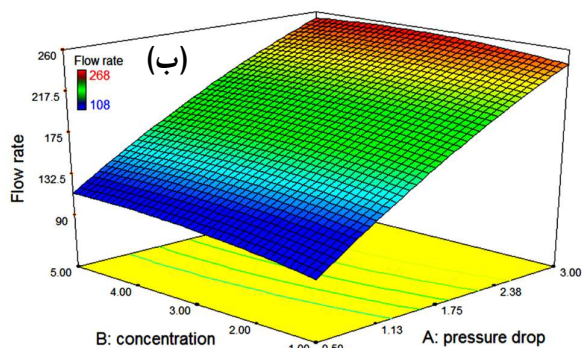
بنابراین با افزایش فشار ورودی هیدروسیکلون، سرعت ورودی افزایش یافته که موجب افزایش نیروی سانتریفیوژ می‌شود. در نتیجه بازده جداسازی افزایش می‌یابد. پارامتر غلظت تأثیر منفی بر روی بازده جداسازی دارد به طوری که با افزایش غلظت، بازده جداسازی کاهش یافته است. البته پارامتر فشار نسبت به غلظت، تأثیر معنی‌دارتری بر پارامتر بازده جداسازی داشته است. طبق نتیجه‌ها آزمایش‌ها بیش‌ترین بازده جداسازی در فشار ۲/۶۳ بار و غلظت ۱/۶ درصد وزنی ۹۰/۳۱ درصد برای نمونه پودر سنگ تراورتن و در فشار ۳ بار و غلظت ۳ درصد وزنی ۹۱/۴۵ درصد برای پودر سنگ گرانیته به دست آمد.

بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی، پارامتر پاسخ بازده جداسازی با معادله برازشی چند جمله‌ای درجه دوم کددار معادله (۲) برای نمونه پودر سنگ تراورتن و معادله (۳) برای نمونه پودر سنگ گرانیته مرتبط است.

$$E = +82.908 + 4.685 P - 0.017 C - 0.136 PC - 0.602 P^2 - 0.0507 C^2 \quad (2)$$

$$E = +84.648 + 4.507 P + 0.038 C - 0.136 PC - 0.602 P^2 - 0.0507 C^2 \quad (3)$$





شکل ۹ - نمودار سه بعدی اثر ترکیبی پارامترها بر شدت جریان (الف) نمونه پودر سنگ تراورتن و (ب) نمونه پودر سنگ گرانیت

دیگر روش سنتی می‌توان به تبخیر آب از سطح استخرها مخصوصاً در فصل گرم، نیاز به زمان ماند بیش‌تر از ۲۴ ساعت برای ته‌نشینی ذره‌ها، استفاده از مواد شیمیایی انعقادکننده‌ها و چون فرایند تصفیه به صورت سامانه بسته می‌باشد و همیشه در جریان است ته‌نشینی ذره‌ها به صورت کامل انجام نمی‌گیرد و آب دارای ذره‌ها به کارخانه بازگردانده می‌شود که باعث تاثیرهای منفی بر تولید سنگ، پایین آمدن کارایی دستگاه‌های برش و افزایش استهلاک دستگاه‌ها می‌شود. معمولاً هر ۲ تا ۳ هفته یک بار نیاز به لایه روبی استخرها می‌باشد که در روش سنتی این عملیات بسیار سخت و پرهزینه است. در روش جداسازی ذره‌ها به روش هیدروسیکلون با توجه به نتیجه‌های این پژوهش، می‌توان ذره‌ها ریز را با بازدهی تقریباً ۹۰ درصد جداسازی کرد و از نظر اقتصادی با حذف حوضچه‌های ته‌نشینی و عدم نیاز به فضای بیش‌تر برای خشک کردن لجن تولید شده نیاز به زمین‌های خالی نمی‌باشد. مشکل‌های هدر رفت آب و تبخیر که در روش سنتی وجود داشت در روش هیدروسیکلون به‌طور کامل برطرف می‌شود. با توجه به برتری‌های هیدروسیکلون می‌توان از این دستگاه با توجه به شرایط عملیاتی مناسب هر کارخانه طراحی و برای بازیافت آب از پساب بدون نیاز به زمان ماند در صنعت سنگبری استفاده کرد.

### نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه بررسی جداسازی ذره‌های جامد سنگ از پساب سنگبری به روش جدید جداسازی هیدرولیکی گریز از مرکز با استفاده از هیدروسیکلون به‌عنوان جایگزینی برای روش سنتی حوضچه ته‌نشینی بود. اثر پارامترهای فشار، غلظت و نمونه پودر سنگ بر عملکرد هیدروسیکلون (بازده جداسازی و شدت جریان به عنوان متغیرهای پاسخ) بررسی شد. نتیجه‌ها نشان داد که:

افزایش یافته است که مطابقت خوبی با نتیجه‌های دیگر پژوهشگران دارد. افزایش غلظت اثر ناچیز بر شدت جریان دارد. که نتیجه‌ها در مقایسه با پژوهش‌های پیشین مطابقت خوبی دارد [۲۷]. بیش‌ترین شدت جریان در بیش‌ترین فشار (۳ بار) به مقدار ۲۶۸ ml/s برای نمونه پودر سنگ تراورتن و ۲۵۴ ml/s برای نمونه پودر سنگ گرانیت به‌دست آمده است.

بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی، پارامتر پاسخ شدت جریان با معادله برآزشی چند جمله‌ای درجه دوم کد دار معادله (۴) برای نمونه پودر سنگ تراورتن و معادله (۵) برای نمونه پودر سنگ گرانیت مرتبط است.

$$Q = +52.3498 + 88.6338 P + 9.3533 C - 1.1099 PC - 6.290 P^2 - 1.5151 C^2 \quad (۴)$$

$$Q = +42.9707 + 83.2768 P + 14.2034 C - 1.1099 PC - 6.290 P^2 - 1.5151 C^2 \quad (۵)$$

که Q شدت جریان، P فشار و C غلظت می‌باشد.

### مقایسه بازیافت پساب به روش هیدروسیکلون و روش سنتی حوضچه ته‌نشینی

در روش سنتی برای انجام عملیات جمع‌آوری و تصفیه پساب کارخانه سنگبری با توجه به ظرفیت تولید هر کارخانه، نیاز به احداث چندین حوضچه ته‌نشینی (استخرهای بتنی) است که به صورت سری به یکدیگر راه دارند. پس از ته‌نشینی ذره‌ها از آخرین حوضچه که مدت زمان ماند بیش‌تری برای ته‌نشینی ذره‌ها دارد آب به‌وسیله الکتروپمپ برای استفاده مجدد به کارخانه بازگردانده می‌شود. در این روش ساخت استخرهای ته‌نشینی علاوه بر اشغال زمین، هزینه اولیه زیادی دارد. و لجن تولید شده هم پس از ته‌نشینی با استفاده از لجن‌کش به زمین‌های اطراف تخلیه می‌شود. در این روش علاوه بر هدر رفت آب، نیاز به فضای زیادی می‌باشد که از نظر اقتصادی و هدر رفت مشکل‌های زیادی دارد. از معایب

۵- نتیجه‌های آماری بیانگر معنی‌دار بودن هر سه پارامتر (فشار، غلظت و نمونه پودر سنگ) است که پارامتر فشار بیش‌ترین تأثیر بر عملکرد هیدروسیکلون داشت.

۶- اختلاف چگالی بین دو فاز جامد و مایع در عملکرد هیدروسیکلون تأثیرگذار می‌باشد که هر چه اختلاف چگالی بیش‌تر باشد جداسازی بهتر انجام می‌شود که جداسازی نمونه پودر سنگ گرانتیت بهتر از نمونه پودر سنگ تراورتن به‌دست آمد.

۱- نتیجه‌های به‌دست آمده از تحلیل آزمایش‌ها بیانگر کارایی روش آماری سطح پاسخ در به‌دست آوردن بالاترین بازده جداسازی است. بیش‌ترین بازده جداسازی برای نمونه پودر سنگ‌های گرانتیت و تراورتن در فشار ۲/۶۳ بار و غلظت ۱/۶ درصد وزنی به ترتیب ۹۱/۴۵ و ۹۰/۳۱ درصد به‌دست آمد.

۲- افزایش فشار ورودی موجب افزایش سرعت و در نتیجه افزایش نیروی سانتریفیوژ است که باعث افزایش بازده جداسازی در هر دو نمونه پودر سنگ‌ها شد.

۳- پارامتر غلظت در هر دو نمونه پودر سنگ‌ها با بازده جداسازی رابطه عکس دارد که با افزایش غلظت، بازده جداسازی کاهش یافت.

۴- پارامتر غلظت تأثیر چندانی بر شدت جریان در هر دو نمونه پودر سنگ‌ها نداشت.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۲

## مراجع

- [1] Fahiminia M., Ardani R., Hashemi S., Alizadeh M., [Wastewater Treatment of Stone Cutting Industries by Coagulation Process](#), *Archives of Hygiene Sciences*, **2(1)**: 16-22 (2013).
- [2] Nasseridine K., Mimi Z., Bevan B., Elian B., [Environmental Management of the Stone Cutting Industry](#), *Journal of Environmental Management*, **90(1)**: 466-470 (2009).
- [3] Svarovsky L., "Solid-Liquid Separation", Elsevier, (2000).
- [4] Sheng H.P., [Separation of Liquids in a Conventional Hydrocyclone](#), *Separation and Purification Methods*, **6**: 89-127 (1977).
- [5] Tian J., Ni L., Song T., Olson J., Zhao J., [An Overview of Operating Parameters and Conditions in Hydrocyclones for Enhanced Separations](#), *Separation and Purification Technology*, **206**: 268-285 (2018).
- [6] Ni L., Tian J., Song T., Jong Y., Zhao J., [Optimizing Geometric Parameters in Hydrocyclones for Enhanced Separations: A Review and Perspective](#), *Separation & Purification Reviews*, **48**: 30-51 (2018).
- [7] Narasimha M., Mainza A., Holtham P.N., Powell M., Brennan M.S., [A Semi-Mechanistic Model of Hydrocyclones Developed from Industrial Data and Inputs from CFD](#), *International Journal of Mineral Processing*, **133**: 1-12 (2014).
- [8] Xu Y.X., Liu Y., Zhang Y.H., Yang X.J., Wang H.L., [Effect of Shear Stress on Deoiling of Oil-Contaminated Catalysts in a Hydrocyclone](#), *Chemical Engineering & Technology*, **39**: 567-575 (2016).
- [9] Chu K., Chen J., Yu A., Williams R.A., [Numerical Studies of Multiphase Flow and Separation Performance of Natural Medium Cyclones for Recovering Waste Coal](#), *Powder Technology*, **314**: 532-541 (2017).

- [10] Mognon J., Da Silva J., Bicalho I., Ataíde C., Duarte C., [Modular Mini-Hydrocyclone Desilter Type of 30 mm: An Experimental and Optimization Study](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **129**: 145-152 (2015).
- [11] Burt M., Thomas P., [Analysis of the Hydrocyclone Stock Cleaning Process for Wasted Fibre in a Paper Mill](#), *Journal of cleaner production*, **10**: 573-579 (2002).
- [12] Bayo J., López-Castellanos J., Martínez-García R., Alcolea A., Lardín C., [Hydrocyclone as a Cleaning Device for Anaerobic Sludge Digesters in a Wastewater Treatment Plant](#), *Journal of Cleaner Production*, **87**: 550-557 (2015).
- [13] Yu J.F., Fu J., Cheng H., Cui Z., [Recycling of Rare Earth Particle by Mini-Hydrocyclones](#), *Waste Management*, **61**: 362-371 (2017).
- [14] Yurdem H., Demir V., Degirmencioglu A., [Development of a Mathematical Model to Predict Clean Water Head Losses in Hydrocyclone Filters in Drip Irrigation Systems using Dimensional Analysis](#), *Biosystems engineering*, **105**: 495-506 (2010).
- [15] Altieri G., Genovese F., Tauriello A., Di Renzo G.C., [Innovative Plant for the Separation of High Quality Virgin Olive Oil \(VOO\) at Industrial Scale](#), *Journal of Food Engineering*, **166**: 325-334 (2015).
- [16] Romero-Güiza M., Peces M., Astals S., Benavent J., Valls J., Mata-Alvarez J., [Implementation of a Prototypal Optical Sorter as Core of the New Pre-Treatment Configuration of a Mechanical-Biological Treatment Plant Treating OFMSW through Anaerobic Digestion](#), *Applied energy*, **135**: 63-70 (2014).
- [17] Fan P.P., Peng H.T., Fan M.Q., [Using a Permanent Magnetic Field to Manipulate the Separation Effect of a Dense Medium Cyclone](#), *Separation Science and Technology*, **51**: 1913-1923 (2016).
- [18] Flintoff B., Plitt L., Turak A., [Cyclone Modeling-A Review of Present Technology](#), *Canadian Institute of Mining and Metallurgy*, **80(905)**: 39-50 (1987).
- [19] Lee J., [Separation of Fine Organic Particles by a Low-Pressure Hydrocyclone \(LPH\)](#), *Aquacultural engineering*, **63**: 32-38 (2014).
- [20] Zhang C., Cui B., Wei D., Zhao Q., Luo N., Feng Y., [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 (2017).
- [21] Nesses T., Dueck J., Schwemmer H., Farghaly M., [Using a High Pressure Hydrocyclone for Solids Classification in the Submicron Range](#), *Minerals Engineering*, **71**: 85-88 (2015).
- [22] Silva N.K.G., Silva D.O., Vieira L.G.M., Barrozo M.A.S., [Effects of Underflow Diameter and Vortex Finder Length on the Performance of a Newly Designed Filtering Hydrocyclone](#), *Powder Technology*, **286**: 305-310 (2015).
- [23] Martinez L.F., Lavin A.G., Mahamud M.M., Bueno J.L., [Vortex Finder Optimum Length in Hydrocyclone Separation](#), *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **47**: 192-199 (2008).

- [24] Cilliers J., Harrison S., [Yeast Flocculation Aids the Performance of Yeast Dewatering Using Mini-Hydrocyclones](#), *Sep. Purif. Technol.*, **209**: 159–163 (2019).
- [25] Montgomery D.C., “[Design and Analysis of Experiments](#)”, John Wiley & Sons, New York, (2017).
- [26] Narasimha M., Sripriya R., Banerjee P., [CFD Modelling of Hydrocyclone Prediction of Cut Size](#), *Int. J. Mineral Proces*, **75(1-2)**: 53–68 (2005).
- [27] Bicalho I.C., Mognon J.L., Shimoyama J., Ataide C.H., Duarte C.R., [Effects of Operating Variables on the Yeast Separation Process in a Hydrocyclone](#), *Sep. Sci. Technol.*, **48**: 915–922 (2013).