

## بهینه‌سازی متغیرهای عملیاتی جداکننده‌های مارپیچی رافر در فرآوری هماتیت گل‌گهر با استفاده از منحنی جدایش آهن در مقیاس پیشاهنگ

محسن رضانی زاده<sup>۱</sup>؛ محمدرضا خالصی<sup>۲\*</sup>؛ امیر حاجی زاده<sup>۳</sup>؛ محمود عبداللّهی<sup>۴</sup>

۱- کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، mohsen.ramezani@modares.ac.ir  
۲- استادیار گروه فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، mrkhalesi@modares.ac.ir  
۳- کارشناس ارشد پژوهشکده سنگ آهن و فولاد، شرکت گل‌گهر، ahajizade@gisri.ir  
۴- استاد گروه فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، minmabd@modares.ac.ir

(دریافت ۶ تیر ۱۳۹۴، پذیرش ۳ اسفند ۱۳۹۵)

### چکیده

در این تحقیق چهار متغیر عملیاتی مهم جداکننده‌های مارپیچی کانه‌های آهن‌دار هماتیتی یعنی، دبی بار ورودی ( $m^3/h$ )، چگالی پالپ بار ورودی (درصد جامد)، محل دریچه تخلیه (فاصله شعاعی از محور مرکزی بر حسب cm) و توزیع ابعادی بار ورودی بررسی شد. تمامی آزمایش‌ها در مقیاس پیشاهنگ (نیمه صنعتی) و با یک مارپیچ، مشابه مارپیچ‌های موجود در کارخانه بازیابی هماتیت گل‌گهر انجام شده است. در این تحقیق با ساخت دریچه تخلیه شبکه‌ای از یک روش ابتکاری استفاده شد تا علاوه بر بررسی اثر محل دریچه تخلیه، تعداد آزمایش‌ها، هزینه و زمان اجرای آن‌ها کاهش پیدا کند. در این راستا، یک دریچه تخلیه شبکه‌ای طراحی و در قسمت انتهایی مارپیچ مورد تحقیق نصب شد. با این دریچه، مقطع خروجی مارپیچ به هفت قسمت مساوی تقسیم شد. بنابراین با اجرای آزمایش‌های منظم فاکتوریال کامل، دو متغیر دبی و درصد جامد بار ورودی در چهار سطح تغییر کرد. با نتایج آزمایش‌های این تحقیق می‌توان در شرایط مختلف متغیرهای عملیاتی، محل مناسب دریچه تخلیه را انتخاب کرد. نتایج آزمایش‌ها و ترسیم منحنی جدایش نشان داد که بهترین شرایط متغیرهای عملیاتی مارپیچ‌های رافر کارخانه بازیابی هماتیت گل‌گهر عبارت است از: درصد جامد ۲۵٪، دبی ۶ متر مکعب بر ساعت، محل دریچه تخلیه در شبکه ششم (فاصله ۱۸ سانتی‌متر از مرکز مارپیچ)، محدوده ابعادی ۸۰ میکرون تا ۱ میلی‌متر. در شرایط مذکور و بدون تغییر محدوده ابعادی بار ورودی، از بار ورودی با عیار ۴۱/۸٪ آهن، کنسانتره‌ای با عیار ۵۳/۳٪ و بازیابی ۸۷/۳٪ تولید شد که نسبت به کارخانه بازیابی هماتیت گل‌گهر، عیار و بازیابی آهن کنسانتره به ترتیب، ۴/۴٪ و ۴/۳٪ بیشتر است. نتایج بررسی اثر دبی و درصد جامد نشان داد که بهترین وضعیت برای دستیابی به بازیابی مناسب در درصد جامد کم، دبی بالا و در درصد جامد بالا، دبی کم است.

### کلمات کلیدی

مارپیچ، بهینه‌سازی، دریچه تخلیه شبکه‌ای، گل‌گهر، هماتیت

جدول ۱: مشخصات عملکرد فعلی مدار مارپیچی

کل مدار	ری کلینر	کلینر	رافر	
۷۸	۹۵	۹۳	۸۳	بازیابی %
۴۰	۸/۴	۲۰/۲	۳۱/۳	کارایی جدایش %
۵۴/۴	۵۴/۴	۵۳/۴	۴۸/۹	عیار کنسانتره %
-	۵۶	۴۲	۴۵	درصد جامد %
-	۶/۷	۶/۱	۵/۹	دبی $m^3/h$

مجموعاً ۱۵۶ حلقه مارپیچ در این مدار وجود دارد که تمام آن‌ها از نوع SC-20 ساخت شرکت مولتوتک<sup>۴</sup> است و توسط گروه سماگ<sup>۳</sup> تهیه و نصب شده‌اند. در ساخت این مارپیچ‌ها از فیبرهای شیشه‌ای مقاوم، رزین، پلی‌یورتان، پلی‌وینیل کلراید و اجزای لاستیکی استفاده شده است. پوشش پلی‌یورتان روی سطح داخلی مارپیچ باعث مقاومت بالای آن در مقابل سایش می‌شود [۴].

در این تحقیق با استفاده از یک روش ابتکاری و ساخت درجه تخلیه شبکه‌ای، تأثیر متغیرهای عملیاتی بار ورودی بر عملکرد جداکننده‌های مارپیچی کارخانه بازیابی هماتیت گل‌گهر بررسی شده است. در این راستا، پس از راه اندازی مدار پیوسته همزن-پمپ-مارپیچ، آزمایش‌های لازم برای تعیین محدوده بهینه هر کدام از متغیرهای مذکور انجام شد. در نهایت، آزمایش‌های تکمیلی برای بررسی تکرارپذیری این نتایج انجام شد. در بخش‌های بعدی نتایج این آزمایش‌ها به‌طور کامل مورد بحث قرار گرفته و مقدار بهینه این متغیرها گزارش شده است.

#### ۱-۱- مبانی جدایش در مارپیچ

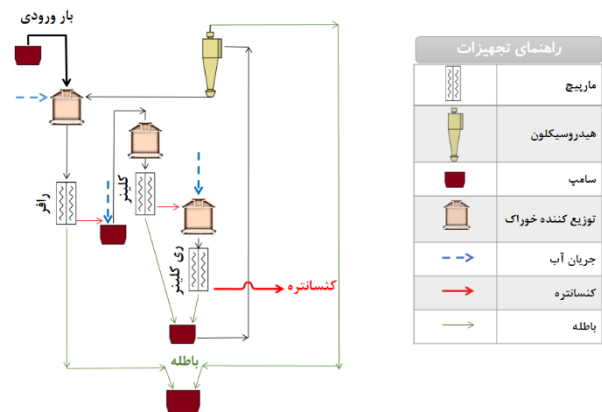
هنگام پائین رفتن پالپ در طول تشتک<sup>۴</sup> مارپیچ نیروهای زیادی روی ذرات تأثیر گذارند که در نهایت برآیند این نیروها مکان هر ذره را تعیین می‌کند و باعث جداسازی ذرات سنگین و درشت از ذرات سبک و ریز در طول مسیر جداکننده‌ی مارپیچی می‌شود. در شکل ۲ مقطعی از خروجی یک مارپیچ نمایش داده شده است. عموماً ذرات درشت و سنگین به محدوده نزدیک محور مارپیچ منتقل می‌شوند؛ در حالی که ذرات ریز و سبک در نزدیکی محور بیرونی مارپیچ و ذرات میانی بین این دو ناحیه قرار می‌گیرند [۵].

در مورد جداکننده مارپیچی عقیده بر این است که در این تجهیز، جدایش بر اساس اندازه و چگالی ذرات اتفاق می‌افتد و ذرات درشت و سنگین باید به کنسانتره منتقل شوند؛ با این-حال، محققین راه‌یابی ذرات درشت به بخش‌های بیرونی مارپیچ

#### ۱- مقدمه

امروزه استفاده از پرعیارسازهای ثقیل به دلیل هزینه‌های کم عملیاتی و عملیات ساده آن‌ها، دوباره رواج پیدا کرده است. جداکننده‌های مارپیچی از کلیدی‌ترین تجهیزات ثقیل است که به‌صورت گسترده‌ای برای پرعیارسازی کانسنگ‌های مختلف استفاده می‌شود [۱]. از زمان اختراع مارپیچ‌ها در قرن ۱۹ و توسعه تجاری آن‌ها در اندازه‌های بزرگ توسط شرکت همفری، این دستگاه‌ها به‌صورت وسیعی به‌عنوان یک تجهیز جداکننده ثقیل به‌خصوص در جداسازی کانی‌های سنگین استفاده شده است [۲]. در سراسر جهان تعداد زیادی مارپیچ برای پرعیارسازی کانسنگ کم عیار آهن به‌خصوص هماتیت به‌کار گرفته شده است. به‌عنوان مثال، در معدن مونت رایت کانادا حدود ۴۳۰۰ دستگاه مارپیچ دو حلقه‌ای برای پرعیارسازی ۶۹۰۰ تن بر ساعت کانسنگ هماتیتی با بازیابی ۸۶٪ استفاده می‌شود [۳].

خط فرآوری باطله‌های خشک<sup>۱</sup> در کارخانه بازیابی هماتیت شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر، دارای سه مرحله (رافر، کلینر و ری کلینر) جداکننده‌های مارپیچی است. مدار جداکننده‌های مارپیچی این خط به همراه سایر تجهیزات موجود در این مدار در شکل ۱ قابل مشاهده است. در این مدار، باطله‌های مرحله‌ی کلینر و ری کلینر به یک هیدروسیکلون می‌روند و ذرات درشت آن به‌صورت بار برگشتی به جداکننده مارپیچی رافر بازمی‌گردند. باطله مرحله رافر به‌همراه سرریز هیدروسیکلون به تیکنر باطله کارخانه منتقل می‌شود.



شکل ۱: مدار جداکننده‌های مارپیچی خط فرآوری باطله‌های خشک گل‌گهر

در جدول ۱ اطلاعات مدار فعلی مدار جداکننده‌های مارپیچی

گل‌گهر مشخص شده است.

## ۲-۱- منحنی جدایش

کارایی جداکننده‌های ثقلی اغلب با میزان جدایش ذرات جریان بار ورودی به جریان کنسانتره مشخص می‌شود. مطابق رابطه ۱، ضریب جدایش<sup>۱۴</sup> یک گونه خاص در اندازه  $i$  و چگالی (یا کانی)  $m$  برابر است با:

$$Y_{i;m} = \frac{W_C g_{C;i} x_{C;i;m}}{W_F g_{F;i} x_{F;i;m}} \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $W$  نشان‌دهنده مقدار نرخ جامد،  $g$  وزن ذرات در یک محدوده ابعادی و  $x$  مقدار گونه خاص در این محدوده ابعادی است. اندیس  $F$  و  $C$  به ترتیب به جریان بار ورودی و کنسانتره دلالت دارند. مقدار متغیرهای ذکر شده از طریق نمونه‌برداری و سازگارسازی داده‌ها و کالیبراسیون مدل قابل محاسبه هستند [۷].

رسم ضرایب جدایش به‌عنوان تابعی از اندازه ذرات، منحنی جدایش<sup>۱۵</sup> نامیده می‌شود. درواقع منحنی جدایش نشان‌دهنده نسبت مقدار یک نوع کانی در یک محدوده ابعادی از بار ورودی به مقدار متناظر در یک جریان خروجی جداکننده ثقلی است [۱۰].

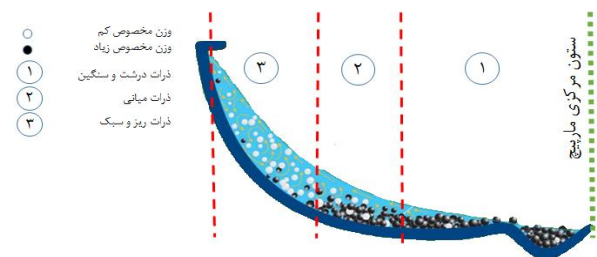
## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- بار ورودی آزمایش‌ها

نمونه یک تنی مورد استفاده در آزمایش‌های این تحقیق، در ۱۰ شیف‌ت کاری از بار ورودی به جداکننده‌های مارپیچی رافر کارخانه بازیابی هماتیت گل‌گهر تهیه شد. حداقل نمونه معرف مورد نیاز برای خواص سنجی شامل آنالیز سرندی و آنالیز عیاری از روابط جی محاسبه شد. بنابراین، پس از خشک کردن و همگن سازی، با استفاده از تقسیم چهار قسمتی و نمونه‌گیر مجرایبی، یک نمونه معرف کلی تهیه شد. نتایج خواص سنجی این نمونه در جدول ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است، عیار آهن از روش تیتراسیون اسیدی، عیار گوگرد با دستگاه اشترولاین<sup>۱۶</sup> و چگالی با دستگاه پیکنومتر اندازه‌گیری شده است؛ همچنین سایر آنالیزهای شیمیایی با روش XRF انجام شده است.

را گزارش کرده‌اند. بزن<sup>۵</sup> (۲۰۱۴)، داس<sup>۶</sup> (۲۰۰۷) و هیما<sup>۷</sup> (۱۹۸۹) این مسئله را به نیروی بگنولد نسبت داده‌اند که به صورت انتخابی ذرات درشت را به باطله مارپیچ منتقل می‌کند [۳، ۶، ۷].

تشخیص و اندازه‌گیری اکثر نیروهای وارد بر ذرات داخل مارپیچ کار آسانی نیست، اما کاپور و ملوی (۱۹۸۸) و داس و همکاران (۲۰۰۷) معتقدند، عموماً شش نیروی اصلی ثقل<sup>۸</sup>، گریز از مرکز<sup>۹</sup>، هیدرودینامیکی کشش سیال<sup>۱۰</sup>، بگنولد<sup>۱۱</sup>، بالابرنده<sup>۱۲</sup> و نیروی اصطکاک<sup>۱۳</sup> در جدایش ذرات درون یک مارپیچ حضور دارند [۶، ۸].



شکل ۲: تصویر مقطع عرضی از خروجی یک مارپیچ [۹]

به‌طور کلی دو دسته از متغیرهای یک مارپیچ تعیین‌کننده مقدار پنج نیروی ذکر شده هستند، الف- متغیرهای دستگاهی (هندسه مارپیچ) ب- متغیرهای عملیاتی (ویژگی‌های بار ورودی و دریچه تخلیه).

متغیرهای دستگاهی اغلب به هندسه مارپیچ مربوط هستند. قطر تشتک (قطر داخلی و خارجی)، شیب طولی (فاصله دو پیچ متوالی)، شیب عرضی (پروفیل تشتک)، تعداد پیچ‌ها (طول تشتک، ارتفاع دستگاه) از جمله مهم‌ترین آن‌ها هستند. علاوه بر این، نوع دستگاه از لحاظ آب شستشو، از دیگر عواملی است که می‌تواند باعث عملکرد متفاوت این دستگاه باشد. درصد جامد و دبی بار ورودی، محل دریچه تخلیه، توزیع ابعادی و حداکثر اندازه ذرات بار ورودی، از جمله مهم‌ترین متغیرهای عملیاتی مارپیچ‌ها هستند. [۴].

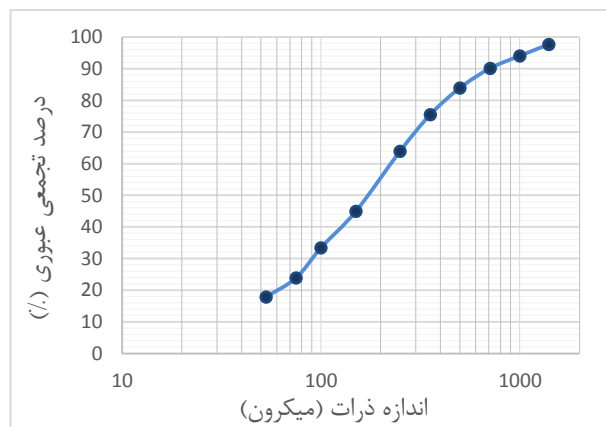
پس از انتخاب نوع مارپیچ، موفقیت عملیات پریارسازی با جداکننده‌های مارپیچی به انتخاب مناسب متغیرهای عملیاتی بستگی دارد؛ به عبارتی، متغیرهای عملیاتی باید به گونه‌ای انتخاب شوند که باعث کارایی بالای این جداکننده‌ها شوند [۱].

جدول ۲: نتایج خواص سنجی نمونه آزمایش‌ها

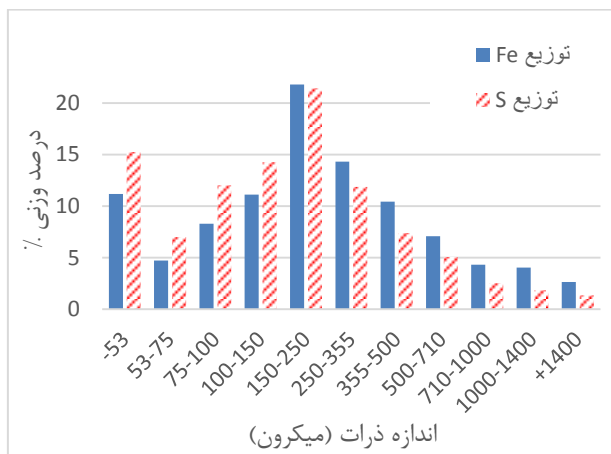
عنصر	درصد	عنصر	درصد
Fe	۴۱/۸	CaO	۶/۶
S	۱/۱	MgO	۴/۷
FeO	۱/۰۷	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲/۷
SiO <sub>2</sub>	۱۳/۵۵	P	۰/۲۶
۴۳۲ μ = d <sub>80</sub>		چگالی = ۳/۷۶ gr/cm <sup>3</sup>	

مطالعات کانی‌شناسی نشان داده است، هماتیت به‌عنوان کانی اصلی نمونه به همراه گوتیت و مگنتیت، کانی‌های آهن‌دار مفید این نمونه هستند. پیریت کانی آهن‌دار غیر مفید این نمونه است و بیش از ۹۵٪ از کل گوگرد موجود در باطله‌های گل‌گهر در فاز پیریت هستند. علاوه بر کانی‌های آهن‌دار، کانی‌های دیگر غیر فلزی شامل؛ کلسیت، کوارتز، موسکوویت و کانی‌های رسی در نمونه حضور دارند [۱۱، ۱۲].

پس از آنالیز ابعادی، عیار آهن و گوگرد طبقات مختلف این نمونه اندازه‌گیری شد. نمودار توزیع ابعادی بار ورودی آزمایش‌ها در شکل ۳ قابل مشاهده است. همچنین با در نظر گرفتن عیار و وزن طبقه‌های ابعادی مختلف، نمودار توزیع آهن و گوگرد بار ورودی آزمایش‌ها در شکل ۴ نمایش داده شده است.



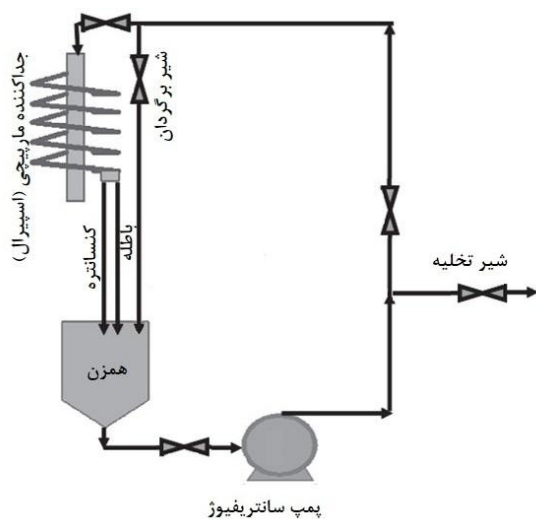
شکل ۳: نمودار توزیع ابعادی بار ورودی آزمایش‌ها



شکل ۴: توزیع آهن و گوگرد بار ورودی آزمایش‌ها

## ۲-۲- روش اجرای آزمایش‌ها

برای اجرای آزمایش‌ها، یکی از ماریپج‌های موجود در مدار جداکننده‌های ماریپچی کارخانه بازیابی هماتیت گل‌گهر باز شد و به واحد پیشاهنگ<sup>۱۷</sup> این شرکت منتقل شد. چرخه طراحی‌شده برای اجرای آزمایش‌ها دارای یک همزن، پمپ دور متغیر و یک ماریپج مشابه ماریپج‌های کارخانه است. این چرخه که در شکل ۵ مشخص است به‌صورت مدار بسته پیوسته کار می‌کند؛ بدین ترتیب، مقدار بار ورودی لازم برای هر آزمایش کاهش چشمگیری دارد. خروجی ماریپج چرخه (کنسانتره و باطله) دوباره وارد همزن می‌شود و پس از رسیدن به پایداری چرخه، نمونه‌گیری از خروجی‌های ماریپج انجام می‌شود.

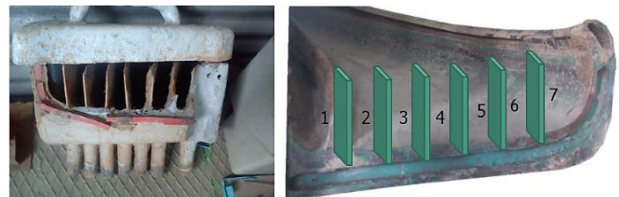


شکل ۵: تصویر شماتیک چرخه همزن-پمپ-ماریپج

### ۳-۲- دریچه تخلیه شبکه‌ای

در بخش قبل توضیح داده شد که محل دریچه تخلیه از جمله مهم‌ترین متغیرهای عملیاتی یک ماریچ است؛ به نحوی که در اکثر تحقیق‌های بهینه‌سازی متغیرهای ماریچ، تأثیر محل دریچه به‌عنوان یکی از متغیرها بررسی شده است. در این تحقیق با ساخت یک دریچه تخلیه شبکه‌ای از یک روش ابتکاری استفاده شد تا علاوه بر بررسی اثر این متغیر، تعداد آزمایش‌ها حداقل شود و در هزینه و زمان صرفه‌جویی شود.

دریچه تخلیه شبکه‌ای سطح مقطع خروجی ماریچ را به چند قسمت تقسیم می‌کند و می‌توان از هر کدام از این خروجی‌ها نمونه‌برداری کرد. در این تحقیق پس از تهیه این نمونه‌ها عیار آهن و گوگرد هر کدام از شبکه‌ها و توزیع وزنی مواد بین شبکه‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. شکل الف- این دریچه را نشان می‌دهد. بنابراین سطح مقطع خروجی ماریچ به هفت شبکه مساوی تقسیم شد که طول هر کدام ۳ سانتی‌متر است. این شبکه‌ها به صورتی که در شکل ب قابل مشاهده است، از محور مرکزی ماریچ به سمت بیرونی شماره‌گذاری شده‌اند؛ در نتیجه شبکه شماره ۱، نزدیک‌ترین شبکه به ستون ماریچ و شبکه شماره ۷، آخرین شبکه است.



(الف)

(ب)

شکل ۶: الف دریچه تخلیه شبکه‌ای، ب شماره‌گذاری شبکه‌ها

### ۴-۲- طراحی و انتخاب سطوح آزمایش‌ها

پس از نصب دریچه تخلیه شبکه‌ای در خروجی ماریچ، محل قرارگیری این دریچه (مرز جدایش کنسانتره و باطله) از متغیرهای آزمایشی حذف شد. همچنین برای محاسبه محدوده ابعدی بهینه از منحنی‌های جدایش استفاده شد؛ بنابراین، تنها دو متغیر درصد جامد و دبی بار ورودی در طراحی آزمایش‌ها دخیل هستند.

در انتخاب سطوح متغیرهای درصد جامد و دبی بار ورودی، از مطالعات قبلی و اطلاعات کتابچه راهنمای ماریچ استفاده شد.

هر کدام از این دو متغیر در چهار سطح در نظر گرفته شدند که در جدول ۳ مشخص شده‌اند.

جدول ۳ سطوح انتخابی آزمایش‌ها برای دو متغیر درصد جامد و دبی بار ورودی

درصد جامد %	۲۵	۳۵	۴۵	۵۵
دبی $m^3/h$	۳	۴	۵	۶

برای تعیین وضعیت بهینه متغیرهای درصد جامد، دبی بار ورودی و محل دریچه تخلیه، از روش فاکتوریل کامل با ۱۶ آزمایش استفاده شد. هر کدام از این آزمایش‌ها با یک شماره سه‌بخشی نام‌گذاری شدند که شماره سمت چپ درصد جامد، شماره وسط دبی بار ورودی و شماره سمت راست محل دریچه تخلیه شبکه‌ای را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال آزمایش (۶-۶-۲۵) نشان دهنده آزمایشی است که در درصد جامد ۲۵٪، دبی ۶ متر مکعب بر ساعت و قرار گرفتن تیغه جداکننده در محل شبکه شماره ۶ دریچه تخلیه شبکه‌ای است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بار ورودی آزمایش‌ها

نتایج خواص سنجی بار ورودی به آزمایش‌ها در جدول ۲ نشان می‌دهد که این نمونه از لحاظ آهن، تقریباً پرعیار، پر گوگرد و پرفسفر محسوب می‌شود. در نتیجه، به دلیل وزن مخصوص بالای پیریت، نباید انتظار جداسازی این کانی با جداکننده‌های ماریچی را داشت. باطله‌های سیلیکاته، کلسیتی و منیزیتی عمده باطله‌های همراه این نمونه را تشکیل می‌دهند که خوشبختانه از لحاظ وزن مخصوص بسیار سبک‌تر از کانی‌های آهن‌دار هماتیت، گوتیت و مگنتیت هستند؛ بنابراین انتظار می‌رود که جداکننده‌های ماریچی در جداسازی این باطله‌ها موفقیت‌آمیز عمل کند. مطابق نمودار شکل ۴، بیشترین آهن و گوگرد این نمونه در محدوده ۲۵۰-۱۵۰ میکرون متمرکز شده است.

#### ۳-۲- تأثیر محل دریچه تخلیه

برای هر کدام از آزمایش‌ها یک نمودار عیار-بازیابی رسم شده است؛ بدین ترتیب در هر شرایط آزمایشی (دبی، درصد جامد و

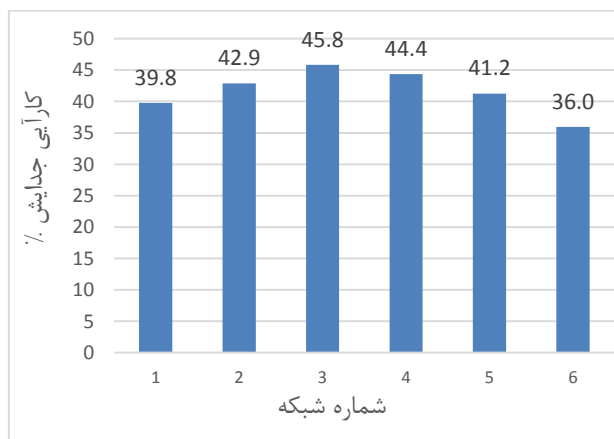
عیار آهن کنسانتره تولیدی و بازیابی آهن این آزمایش به ترتیب، ۴/۴٪ و ۴/۳٪ بیشتر است.

علاوه بر نمودارهای عیار بازیابی، نمودار کارایی جدایش هر آزمایش نیز ترسیم شد. برای محاسبه کارایی جدایش از رابطه (۲) استفاده شده است.

$$R = \frac{c(f-t)(c-f)(100-t)}{f(c-t)^2(100-f)} \times 100 \quad (2)$$

شکل ( کارایی جدایش آهن برای آزمایش (۶-۲۵) در هر کدام از شبکه‌ها را نشان می‌دهد. با فرض قرارگیری در پیچه تخلیه در محل شبکه ششم این آزمایش، کارایی جدایش ۳۶٪ خواهد بود.

همان‌طور که مشخص است بیشترین کارایی جدایش این آزمایش در شبکه سوم به دست آمده است، اما با تنظیم در پیچه در این شبکه بازیابی آهن ۷۶٪ (از شکل) حاصل می‌شود که این مقدار نسبتاً پایین است؛ بنابراین کارایی جدایش معیار مناسبی برای انتخاب محل در پیچه تخلیه ماریچ از مرحله رافر نیست.



شکل ۸: نمودار کارایی جدایش آهن در آزمایش (۶-۲۵)

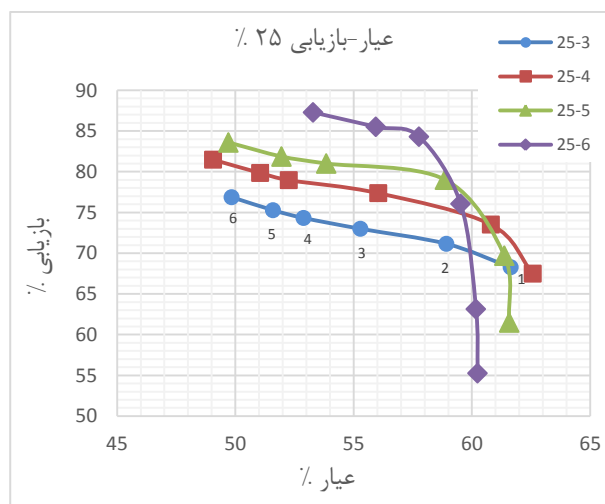
### ۳-۳- تأثیر درصد جامد و دبی بار ورودی

#### ۳-۳-۱- عیار و بازیابی کنسانتره

در این بخش برای بررسی تأثیر دو متغیر درصد جامد و دبی بار ورودی فرض شده است که در تمام آزمایش‌ها، در پیچه تخلیه در محل شبکه ششم قرار گرفته است (چراکه بهترین نتایج در

شماره شبکه مشخص)، مقدار عیار و بازیابی آهن کنسانتره ماریچ مشخص شده است. شکل ۷، نمودار عیار-بازیابی تجمعی آزمایش‌هایی که در درصد جامد ۲۵٪ و دبی‌های ۳ تا ۶ متر مکعب انجام شده‌اند را به نمایش می‌گذارد. عدد روی منحنی‌ها نشان دهنده شماره شبکه در پیچه تخلیه است؛ بنابراین اگر محل در پیچه تخلیه در محل هر کدام از این شبکه‌ها تنظیم شود، عیار و بازیابی آهن کنسانتره ماریچ از روی این نمودار قابل تشخیص است.

مطابق انتظار، افزایش شماره شبکه یا به عبارت دیگر دور کردن در پیچه تخلیه از محور مرکزی ماریچ باعث افزایش بازیابی و کاهش عیار شده است. اما در درصد جامد ۲۵٪ افزایش دبی باعث افزایش شیب این منحنی‌ها شده است. علاوه بر این، افزایش دبی، این منحنی‌ها را در امتداد محور عرضی (بازیابی) بالاتر برده است.



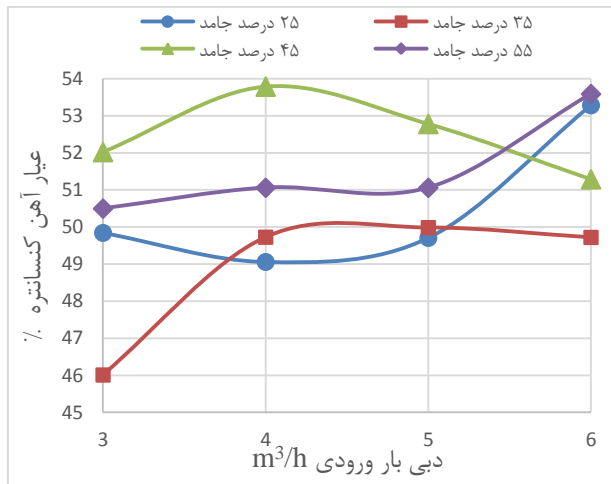
شکل ۷: نمودار عیار-بازیابی آزمایش درصد جامد ۲۵٪

نمودارهای عیار-بازیابی سایر آزمایش‌ها (درصد جامدهای ۳۵٪، ۴۵٪ و ۵۵٪) در شکل ۱۴، ۱۵ و ۱۶ نمایش داده شده است.

بهترین نتایج در شرایط (۶-۶-۲۵) (درصد جامد ۲۵، دبی ۶ و شبکه ششم) به دست آمد. در این شرایط عیار آهن کنسانتره تولیدی برابر با ۵۳/۳٪ و بازیابی آهن ۸۷/۳٪ شد؛ قابل ذکر است، نسبت به ماریچ رافر کارخانه بازیابی هماتیت گل‌گهر،

کمتری به باطله منتقل می‌شوند؛ این‌گونه افزایش دبی در درصد جامد پایین موجب افزایش بازیابی می‌شود.

با توجه به شکل ۱۰، برای اثر درصد جامد و دبی بر عیار کنسانتره نمی‌توان روند خاصی در نظر گرفت. اما به‌طور کلی در درصد جامدهای بالا (۵۵٪) و پایین (۲۵٪) افزایش دبی باعث افزایش عیار کنسانتره می‌شود.



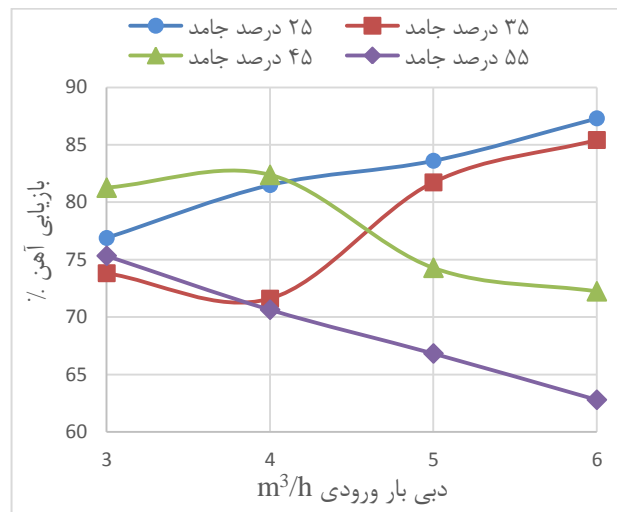
شکل ۱۰: تأثیر دبی در درصد جامدهای مختلف بر عیار کنسانتره ماریچ

### ۳-۳-۲ - توزیع آهن در خروجی ماریچ

درصد جامد و دبی بر توزیع آهن در خروجی ماریچ تأثیرگذارند و این‌گونه باعث تغییر بازیابی و عیار کنسانتره می‌شوند. (شکل ۱۱) تأثیر دبی‌های مختلف بر توزیع آهن در شبکه‌ها را برای درصد جامد ۲۵٪ نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۱۱، افزایش دبی، مقدار آهن شبکه‌های ۲ تا ۶ را افزایش داده است. اما در شبکه‌های ۱ و ۷ می‌توان گفت با افزایش دبی، مقدار آهن کاهش می‌یابد. در رابطه با شبکه اول، روند معمول تغییرات مقدار آهن به همین منوال است؛ بدین معنی که با افزایش دبی، نیروی گریز از مرکز بیشتر شده، مواد کمتری در پیچ‌های میانی جدا می‌شوند و در نتیجه درصد وزنی مواد موجود در شبکه اول کاهش می‌یابد و باعث کاهش مقدار آهن این شبکه می‌شود. بنابراین بدیهی است که این مواد به شبکه‌های میانی می‌روند و چون در دبی‌های بالا درصد وزنی مواد شبکه اول کمتر است، در شبکه‌های میانی این مقدار بیشتر از دبی‌های پایین است.

شبکه ششم به دست آمد). در شکل ۹ تأثیر دبی در درصد جامدهای مختلف بر بازیابی مشخص شده است.



شکل ۹: تأثیر دبی در درصد جامدهای مختلف بر بازیابی آهن به کنسانتره ماریچ

بر اساس شکل ۹ به‌طور کلی در درصد جامدهای پایین (۲۵٪) و (۳۵٪) با افزایش دبی، بازیابی آهن روند صعودی دارد؛ اما در درصد جامدهای بالا (۴۵٪ و ۵۵٪) این روند به‌صورت نزولی می‌شود.

نیروی گریز از مرکز وارد بر یک ذره با مربع سرعت آن ذره رابطه مستقیم دارد؛ بنابراین، بدیهی است که افزایش دبی باعث افزایش نیروی گریز از مرکز ذرات می‌شود. چون در درصد جامدهای بالا، اثر سقوط با مانع تشدید شده، در نتیجه ذرات با ارزش سنگین نیاز به زمان بیشتری دارند تا لایه‌بندی قائم تشکیل شود. پس پیش‌بینی می‌شود که با افزایش دبی، این ذرات قبل از قرار گرفتن در کف ماریچ، تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز بیشتری قرار گرفته و به باطله منتقل شده‌اند و بدین ترتیب افزایش دبی در درصد جامدهای بالا باعث کاهش بازیابی شده است. به همین ترتیب، در درصد جامد پایین، اثر سقوط با مانع کمتر شده و قبل از اینکه نیروی گریز از مرکز از تشکیل لایه‌بندی جلوگیری کند، این لایه‌بندی قائم تشکیل می‌شود. بدین ترتیب، پس از تشکیل لایه‌بندی قائم، افزایش دبی و متعاقباً افزایش نیروی گریز از مرکز باعث مؤثر شدن جریان ثانویه در جدایش ذرات می‌شود و ذرات سنگین با ارزش



اکثر دستگاه‌های ثقلی افت بازیابی ذرات درشت اتفاق نمی‌افتد. همچنین بازیابی برای ذرات ریز کوچک‌تر از ۸۰ میکرون، کم‌تر از ۷۰٪ است. روند منحنی جدایش این تحقیق کاملاً با روند مشاهده شده توسط بزن و همکاران (۲۰۱۴) یکسان است [۷]. شکل ۱۳ توزیع ذرات بزرگ‌تر از ۱ و ۱/۴ میلی‌متر در هر کدام از شبکه‌های دريچه تخلیه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳: توزیع ذرات بزرگ‌تر از ۱ و ۱/۴ میلی‌متر در خروجی مارپیچ

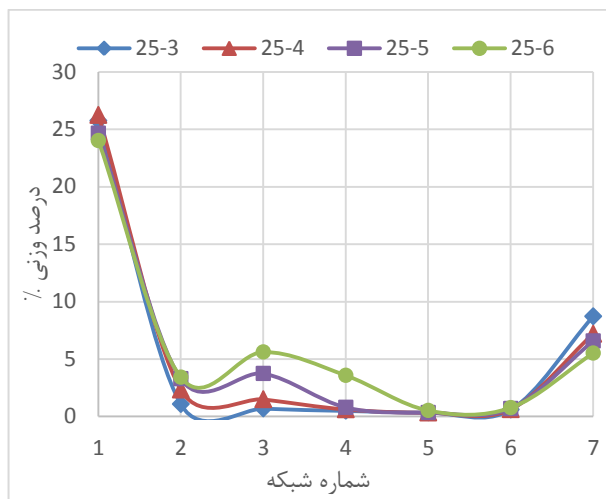
همان‌طور که در شکل ۱۳ مشخص است، ۷۰٪ از ذرات بزرگ‌تر از ۱/۴ میلی‌متر و حدود ۶۰٪ از ذرات بزرگ‌تر از ۱ میلی‌متر در شبکه انتهایی دريچه تخلیه یعنی شبکه هفتم حضور دارند.

طبق مباحث بخش اول، راه‌یابی ذرات درشت و سنگین به بخش‌های بیرونی مارپیچ در کار سایر محققین نیز مشاهده شده است [۳، ۶، ۷]. این پدیده به نیروی بگنولد نسبت داده می‌شود. همچنین مطابق شکل ۱۲ این ذرات درشت باعث ایجاد پدیده دنباله‌روی ذرات ریز و سنگین شده‌اند و بازیابی این ذرات نیز کاهش یافته است. بنابراین بهترین بهترین محدوده ابعادی حدود ۸۰ میکرون تا ۱ میلی‌متر پیشنهاد می‌شود.

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر متغیرهای دبی، درصد جامد، محل دريچه تخلیه و محدوده ابعادی بار ورودی به مارپیچ‌های کارخانه بازیابی هماتیت گل‌گهر بررسی شد. با نتایج آزمایش‌های این تحقیق می‌توان در شرایط مختلف متغیرهای عملیاتی، محل مناسب دريچه تخلیه را انتخاب کرد. بدین منظور نمودارهای

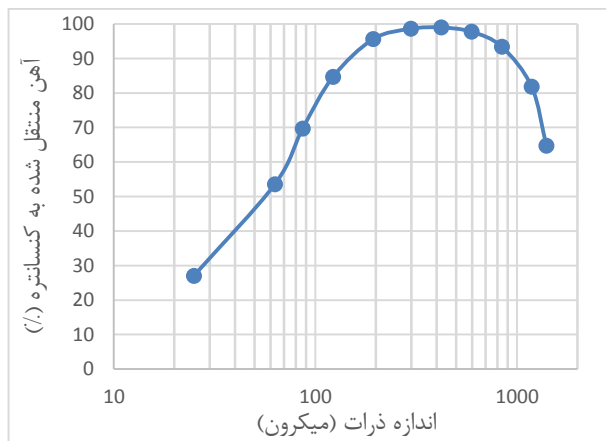
در رابطه با شبکه هفتم، دلیل کاهش مقدار آهن در مقابل افزایش دبی، عدم راه‌یابی ذرات درشت سنگین به این شبکه است؛ چنانچه در بخش قبل، برای این درصد جامد افزایش بازیابی با افزایش دبی مورد تأیید قرار گرفت.



شکل ۱۱: تأثیر دبی بر توزیع آهن در شبکه‌های مختلف برای درصد جامد ۲۵٪

#### ۳-۴- محدوده ابعادی بهینه بار ورودی

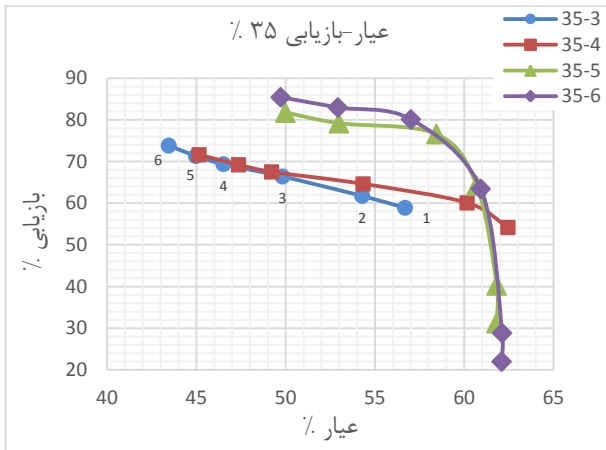
برای تشخیص محدوده ابعادی که بیشترین بازیابی را دارد، از نمودار منحنی جدایش مارپیچ استفاده شد. در این راستا، عیار طبقه‌های مختلف کنسانتره آزمایش (۶-۳۵) اندازه‌گیری شد و با در نظر گرفتن عیار طبقه‌های متناظر بار ورودی، فاکتور جدایش به‌عنوان تابعی از اندازه ذرات در شکل ۱۲ رسم شده است.



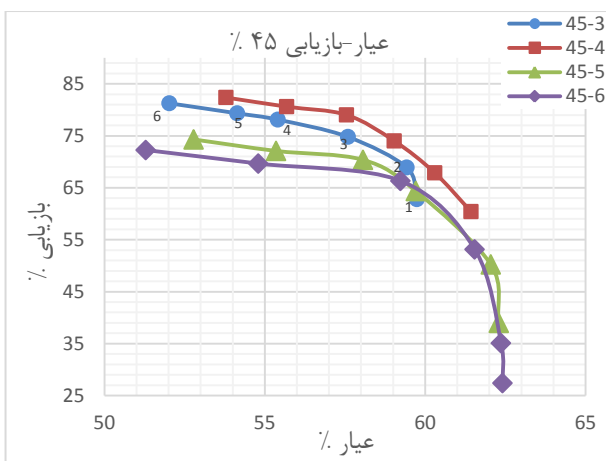
شکل ۱۲: منحنی جدایش مارپیچ

در شکل ۱۲، افت بازیابی ذرات بزرگ‌تر از ۵۰۰ میکرون کاملاً مشهود است؛ درحالی‌که به‌طور معمول، در منحنی جدایش

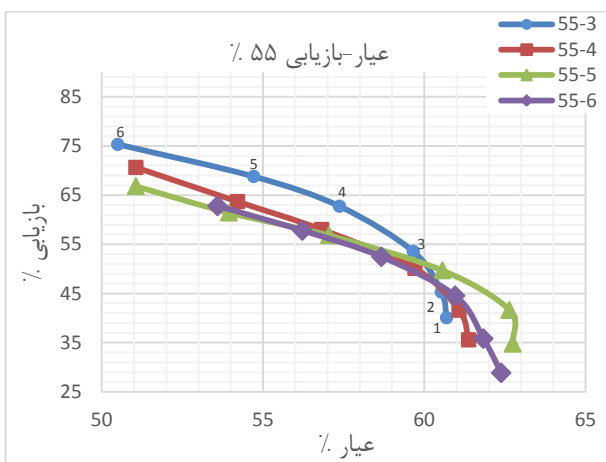




شکل ۱۴: نمودار عیار-بازیابی آزمایش درصد جامد ۳۵٪



شکل ۱۵: نمودار عیار-بازیابی آزمایش درصد جامد ۴۵٪



شکل ۱۶: نمودار عیار-بازیابی آزمایش درصد جامد ۵۵٪

عیار-بازیابی آزمایش‌های مختلف ارائه شده است. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد، کارآیی جدایش معیار مناسبی برای انتخاب محل دریاچه تخلیه ماریچی رافر نیست.

بهترین شرایط متغیرهای عملیاتی ماریچی‌های کارخانه بازیابی هماتیت گل‌گهر عبارت است از: درصد جامد ۲۵٪، دبی ۶ متر مکعب بر ساعت، محل دریاچه تخلیه در شبکه ششم (فاصله ۱۸ سانتی‌متر از مرکز ماریچی)، محدوده ابعادی ۸۰ میکرون تا ۱ میلی‌متر. در شرایط مذکور و بدون تغییر محدوده ابعادی بار ورودی، از باری با عیار ۴۱/۸٪ آهن، کنسانتره‌ای با عیار ۵۳/۳٪ و بازیابی ۸۷/۳٪ تولید شد که نسبت به ماریچی رافر کارخانه بازیابی هماتیت گل‌گهر، عیار آهن کنسانتره تولیدی و بازیابی آهن این آزمایش به ترتیب، ۴/۴٪ و ۴/۳٪ بیشتر است.

تغییر دبی به صورت تک عاملی (ثابت بودن سایر متغیرهای عملیاتی) نشان داد که در درصد جامدهای پایین (۲۵٪ و ۳۵٪) افزایش دبی از ۳ تا ۶ متر مکعب بر ساعت باعث افزایش ۱۰٪ بازیابی می‌شود؛ در درصد جامدهای بالا (۴۵٪ و ۵۵٪)، افزایش دبی از ۳ تا ۶ متر مکعب بر ساعت، بازیابی را حدود ۱۰٪ کاهش داده است؛ به صورت خلاصه، بهترین وضعیت برای دستیابی به بازیابی مناسب عبارت است از: درصد جامد کم، دبی بالا و یا درصد جامد بالا، دبی کم.

منحنی جدایش ماریچی مورد تحقیق، به خوبی نمایان‌گر اثر مخرب نیروی بگنولد است به نحوی که افت بازیابی ذرات بزرگ‌تر از ۵۰۰ میکرون قابل تشخیص است. همچنین راه‌یابی این ذرات درشت به بخش بیرونی ماریچی باعث دنباله‌روی ذرات ریزتر از ۸۰ میکرون شده است.

لازم به ذکر است که نتایج این تحقیق صرفاً متعلق به اسپیرال استفاده شده و شرایط آزمایشی مشخص این تحقیق است و تعمیم "همه" نتایج آن به سایر اسپیرال‌ها صحیح نیست.

## مراجع

- [1]. Tripathy, S.K. and Y. Rama Murthy; 2012; "Modeling and optimization of spiral concentrator for separation of ultrafine chromite" Powder Technology, 221(0): p. 387-394.
- [2]. Holtham, P.N.; 1990; "Flow visualisation of secondary currents on spiral separators" Minerals Engineering, 3(3-4): p. 279-286.
- [3]. Hyma, D.B. and J.A. Meech; 1989; "Preliminary tests to improve the iron recovery from the -212 micron fraction of new spiral feed at quebec cartier mining company" Minerals Engineering, 2(4): p. 481-488.
- [4]. رضانی، محسن؛ خالصی، محمدرضا؛ حاجی زاده، امیر؛ عبداللہی، محمود؛ ۱۳۹۳؛ "عیب یابی مدار جداکننده مارپیچی کارخانه هماتیت شرکت معدنی و صنعتی گل گهر"، پنجمین کنفرانس مهندسی معدن؛ مصلی-تهران.
- [5]. رضانی، محسن؛ خالصی، محمدرضا؛ حاجی زاده، امیر؛ عبداللہی، محمود؛ ۱۳۹۳؛ "بهبودسازی مدار جداکننده مارپیچی خط یک کارخانه هماتیت گل گهر". پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی معدن گرایش فرآوری مواد معدنی؛ دانشگاه تربیت مدرس.
- [6]. Das, S.K., et al.; 2007; "Mathematical modeling of separation characteristics of a coal-washing spiral" International Journal of Mineral Processing, 84(1-4): p. 118-132.
- [7]. Bazin, C., et al.; 2014; "Simulation of an iron ore concentration circuit using mineral size recovery curves of industrial spirals" CMP, 46th Annual Canadian Mineral Processors Operators Conference.
- [8]. Kapur, P.C. and T.P. Meloy; 1999; "Industrial modeling of spirals for optimal configuration and design: spiral geometry, fluid flow and forces on particles" Powder Technology, 102(3): p. 244-252.
- [9]. Benson, S.; 2006; "Mining Spiralling in control" Filtration & Separation; 43(2): p. 25-27.
- [10]. Bazin, C., et al.; 2012; "The use of simulation for process diagnosis: Application to a gravity separator" International Journal of Mineral Processing, 104(0): p.11-16.
- [11]. Co, S.F.E.S; 2003; Report of Golgohar Hemmatite Recovery from Dry and Wet Tailings.
- [12]. پناهی، ابراهیم؛ عبدالله زاده، علی اکبر؛ سام، عباس؛ ۱۳۸۹؛ "پیش فرآوری باطله های خشک جدید کارخانه فرآوری گل گهر توسط پرعبارساز مارپیچ همفری"، سمپوزیوم فولاد.

- 1 Dry tailing process
- 2 Multotec
- 3 CEMAG
- 4 Trough
- 5 Bazin
- 6 Das
- 7 Hyma
- 8 Gravity
- 9 Centrifugal
- 10 Drag
- 11 Bagnold
- 12 Lift
- 13 Friction
- 14 Partition factor
- 15 Partition curve
- 16 Ashtrvlayn
- 17 pilot