



## بررسی کارایی مدارهای جدایش مغناطیسی واحدهای ۲ و ۶ مجتمع سنگ آهن سنگان

اسماعیل خفاجه<sup>۱</sup>، علی بهنامفرد<sup>۲\*</sup>، محمد مسینایی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه بیرجند و سرپرست سنگ شکن دانه بندی مجتمع سنگ آهن سنگان

۲- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

(دریافت ۱۳۹۵/۰۱/۱۶، پذیرش ۱۳۹۵/۱۱/۰۳)

### چکیده

ارزیابی یک مدار جدایش مغناطیسی می‌تواند در تعیین کارایی آن و تدوین استراتژی‌های مورد نیاز به منظور بهبود عملکرد آتی آن مفید باشد. هدف از این مقاله، ارزیابی عملکرد مدارهای جدایش مغناطیسی واحدهای ۲ و ۶ مجتمع سنگان است. در هر دو واحد، کانسنگ استخراجی از معدن پس از سنگ-شکنی به دو بخش ابعادی ریزدانه (۱۰-۰mm) و درشت‌دانه (۳۰-۱۰mm) تقسیم می‌شود و سپس هر کدام وارد یک مدار پرعیارسازی مغناطیسی خشک شدت پایین می‌شود. بطور کلی، ۲۷۰ نمونه از این ۴ مدار جدایش مغناطیسی برداشت شد و مورد آنالیز مقدار آهن کل، اکسید آهن (FeO) و گوگرد قرار گرفتند. نتایج به دست آمده نشان داد عیار آهن محصول تمامی مدارهای پرعیارسازی مغناطیسی بیشتر از ۵۷ درصد است. متوسط بازیابی آهن در مدارهای پرعیارسازی مغناطیسی ریزدانه و درشت‌دانه واحد ۶ به ترتیب برابر ۹۲/۲۹ و ۷۸/۹۳ درصد و برای واحد ۲ به ترتیب برابر ۶۹/۲۵ و ۵۵/۳۶ درصد بود. بازیابی مدارهای پرعیارسازی مغناطیسی درشت‌دانه کمتر از مدارهای ریزدانه است که علت آن شدت میدان مغناطیسی کمتر جداکننده‌ها در این مدارها برای حفظ عیار مطلوب کنسانتره‌ها علی‌رغم درجه آزادی کمتر خوراک است. بازیابی آهن مدارهای جدایش مغناطیسی واحد ۲ نسبت به واحد ۶ کمتر است که دلیل آن خوراک‌دهی و شرایط عملیاتی نامناسب جداکننده‌های مغناطیسی در این واحد بود.

### کلمات کلیدی

مجتمع سنگان، جداکننده مغناطیسی، ارزیابی عملکرد، عیار و بازیابی.

## ۱- مقدمه

پارامترهای قابل اهمیت در راندمان جداسازی جداکننده-های مغناطیسی نوع استوانه‌ای شامل سرعت چرخش استوانه، جنس، تعداد و چیدمان مگنت‌ها، رطوبت نمونه و ضخامت لایه مواد روی استوانه است [۳-۶].

هدف از انجام این تحقیق، بررسی کارایی جداکننده‌های مغناطیسی واحدهای ۲ و ۶ تولید سنگ آهن دانه‌بندی مجتمع سنگ آهن سنگان است. به این منظور از خوراک کنسانتره و باطله هر مدار جدایش مغناطیسی روزانه و به مدت ۳ ماه متوالی نمونه‌برداری انجام شده و پس از انجام آنالیزهای آهن کل، اکسید آهن و گوگرد، نتایج آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- نمونه برداری

به منظور بررسی کارایی جداکننده‌های مغناطیسی واحدهای ۲ و ۶ تولید سنگ آهن دانه‌بندی شده مجتمع سنگ آهن سنگان، عملیات نمونه‌برداری از خوراک، کنسانتره و باطله هر یک از مدارهای جدایش مغناطیسی انجام گرفت. با توجه به اینکه هر واحد دارای دو مدار جدایش مغناطیسی است، در نهایت در هر نوبت نمونه‌گیری ۶ نمونه برداشت شد. نمونه‌های جریان خوراک بوسیله نمونه برداری از روی نوار نقاله و نمونه‌های جریان‌های کنسانتره و باطله به روش نمونه‌برداری از توده مواد برداشت شد. عملیات نمونه‌برداری به مدت ۳ ماه ادامه یافت و در مجموع ۲۷۰ نمونه برداشت شد.

با استفاده از فرمول جی، حداقل وزن نمونه مورد نیاز برای بخش با ابعاد ۳۰-۱۰ میلی‌متر حدود ۱۵ کیلوگرم و برای بخش با ابعاد ۱۰-۰ میلی‌متر حدود ۷ کیلوگرم تعیین و در عملیات نمونه‌برداری لحاظ شد.

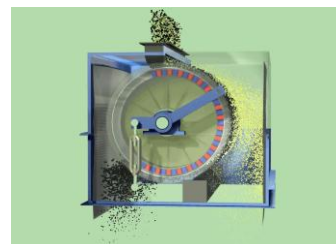
## ۲-۲- روش‌های آنالیز

## ۲-۲-۱- تعیین مقدار آهن کل نمونه‌های کانسنگ آهن‌دار

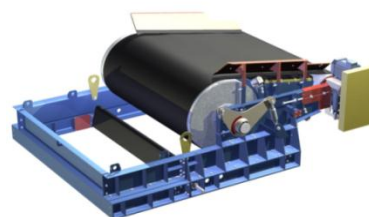
مقدار آهن کل نمونه‌های کانسنگ آهن‌دار به روش تیتراسیون به وسیله آزمایشگاه مجتمع سنگان به انجام رسید. برای این منظور مقدار  $0.02 \pm 0.25$  گرم پودر نمونه را درون ارلن  $250^{cc}$  ریخته،  $20^{cc}$  اسید کلریدریک به آن افزوده می‌شود. درب ارلن را با شیشه ساعت پوشانده برای یک ساعت بر روی اجاق قرار داده و سپس شیشه ساعت و دیواره

معدن سنگ آهن سنگان با ذخیره زمین‌شناسی ۱/۲ میلیارد تن یکی از بزرگترین ذخایر سنگ آهن کشور به شمار می‌آید که در ۱۶ کیلومتری شهر سنگان از توابع شهرستان خواف در استان خراسان رضوی واقع شده است. این معدن در محدوده‌ای به طول حدود ۲۶ کیلومتر و عرض تقریبی ۸ کیلومتر واقع شده است و به سه ناحیه معدنی غربی، مرکزی و شرقی تقسیم می‌شود. در حال حاضر عمده استخراج از توده‌های B و C شمالی واقع در ناحیه معدنی غربی و همچنین از معدن فرعی باغک، دردوی ۱ و ۲ در ناحیه معدنی مرکزی انجام می‌گیرد. کانی با ارزش این معدن، منیتیت و به مقدار خیلی کمتر هماتیت است [۱].

در حال حاضر بخش فرآوری مجتمع سنگ آهن سنگان شامل دو بخش تولید سنگ آهن دانه‌بندی و کارخانه تولید کنسانتره سنگ آهن به ظرفیت ۲/۶ میلیون تن در سال می‌شود. بخش تولید سنگ آهن دانه‌بندی شامل هفت واحد مجزا به ظرفیت کل سالیانه ۴/۸۴ میلیون تن است که در تمامی این ۷ واحد کانسنگ استخراجی از معدن پس از طی مدار خردایش، به دو بخش با اندازه ابعادی ۱۰-۰ mm (بخش ریزدانه) و ۳۰-۱۰ mm (بخش درشت‌دانه) تقسیم می‌شود. سپس هر بخش برای پری‌عیارسازی وارد یک مدار جدایش مغناطیسی خشک شدت پایین می‌شود. بخش پری‌عیار هر مدار جدایش مغناطیسی به عنوان محصول به بازار عرضه می‌شود. جداکننده‌های موجود در مدارهای جدایش مغناطیسی خشک شدت پایین از نوع استوانه‌ای و یا نواری هستند. شکل ۱ تصاویر شماتیک این دو جداکننده را نشان می‌دهد [۲].



(الف)



(ب)

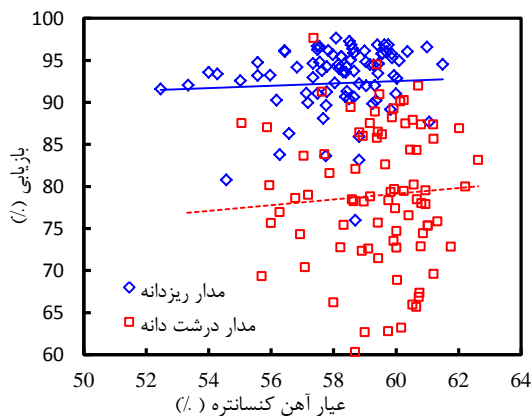
شکل ۱: تصاویر شماتیک جداکننده مغناطیسی خشک شدت پایین نوع (الف) استوانه‌ای، (ب) نواری [۲]

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی عملکرد مدارهای جدایش مغناطیسی واحدهای ۲ و ۶ از لحاظ عیار و بازیابی آهن

در واحد ۶ تولید سنگ آهن دانه بندی شده مجتمع سنگ آهن سنگان، از یک جداکننده مغناطیسی خشک از نوع استوانه‌ای ساخت شرکت اکسا مگنت ترکیه با شدت میدان ۱۲۰۰ گوس برای پرعیارسازی خوراک ریزدانه (با اندازه ابعادی ۱۰-۰) استفاده می‌شود. همچنین برای پرعیارسازی خوراک درشت‌دانه (با اندازه ابعادی ۳۰-۱۰) از یک جداکننده مغناطیسی خشک از نوع استوانه‌ای ساخت شرکت اکسا مگنت ترکیه با شدت میدان ۹۰۰ گوس استفاده می‌گردد.

شکل ۲ تغییرات عیار- بازیابی برای ۸۴ سری نمونه برداری در طی بازه زمانی ۳ ماهه را برای دو جداکننده مغناطیسی واحد ۶ تولید سنگ آهن دانه بندی شده مجتمع سنگ آهن سنگان نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود مقدار عیار آهن کنسانتره هر دو مدار در بازه ۵۸ تا ۶۲ درصد قرار دارد. مقدار متوسط عیار کنسانتره مدار ریزدانه برابر با ۵۸/۱۵ درصد و برای مدار درشت‌دانه برابر با ۵۹/۳۶ درصد است بنابراین مشاهده می‌شود که جداکننده‌های مغناطیسی هر دو مدار قادر هستند تا عیار مطلوب برای کنسانتره که بیشتر از ۵۷ درصد است را تامین کنند.



شکل ۲: تغییرات عیار/ بازیابی آهن در مدارهای جدایش مغناطیسی ریزدانه و درشت‌دانه واحد ۶ تولید سنگ آهن دانه بندی شده مجتمع سنگان برای ۸۴ سری نمونه برداری در طی بازه زمانی ۳ ماهه

شکل ۲ همچنین نشان می‌دهد مقادیر بازیابی به دست آمده توسط جداکننده مغناطیسی مدار ریزدانه در محدوده ۷۰ تا ۹۸ درصد و عمدتاً در بازه ۹۰ تا ۹۸ درصد قرار دارد.

ارلن را با مقدار کمی آب مقطر شستشو می‌دهند. به محتوی ارنل قطره قطره محلول کلرید قلع اضافه کرده تا محلول کاملاً بی‌رنگ شود. سپس درب ارنل با شیشه ساعت پوشانده شده و ارنل را بر روی اجاق گذاشته تا به جوش آید. پس از جوشیدن محتویات ارنل به مدت ۵ دقیقه، با آب مقطر به حجم  $100^{\circ}\text{C}$  رسانده می‌شود و  $10^{\circ}\text{C}$  اسید سولفوریک به محلول اضافه می‌شود. پس از سرد شدن محلول،  $5^{\circ}\text{C}$  کلرید جیوه به محلول اضافه می‌شود تا کلرید قلع اضافی رسوب کند. سپس ۱۰ تا ۱۵ قطره دی‌فنیل آمین به عنوان شناساگر و  $10^{\circ}\text{C}$  اسید فسفریک به ارنل اضافه می‌شود و سپس محلول را با پتاسیم دی‌کرومات استاندارد تا تغییر رنگ محلول و ثابت شدن رنگ بنفش تیره، تیترو می‌کنند.

#### ۲-۲-۲- تعیین مقدار اکسید آهن (II) نمونه‌های کانسنگ آهن‌دار

مقدار اکسید آهن (II) نمونه‌ها نیز به روش تیتراسیون به وسیله آزمایشگاه مجتمع سنگان به انجام رسید. برای این منظور مقدار  $0.002 \pm 0.005$  گرم نمونه پودری را وزن کرده در ارنل  $250^{\circ}\text{C}$  ریخته می‌شود. به نمونه پودری حدود ۱ گرم بی‌کربنات سدیم افزوده می‌شود. سپس  $30^{\circ}\text{C}$  اسید کلریدریک به ارنل اضافه کرده و درب ارنل بسته شده و آنرا به مدت ۱۵ دقیقه روی اجاق گذاشته تا به آرامی بجوشد. در ادامه محتویات ارنل را تا حجم حدود  $150^{\circ}\text{C}$  با آب مقطر رقیق می‌کنند. پس از سرد شدن محلول،  $10^{\circ}\text{C}$  اسید فسفریک و ۱۰ قطره دی‌فنیل آمین به ارنل افزوده و بلافاصله با دی-کرومات پتاسیم تا ثابت شدن رنگ بنفش تیره، تیترو می‌کنند.

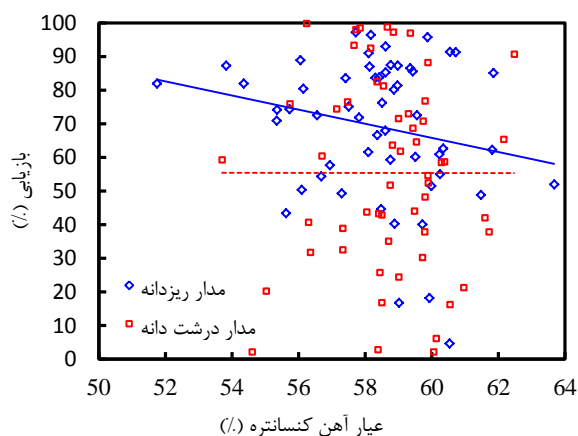
#### ۲-۲-۳- تعیین شدت میدان مغناطیسی جداکننده‌های مغناطیسی خشک

از گوس‌متر مدل TM701 ساخت کشور ژاپن برای اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی جداکننده‌های مغناطیسی استفاده شد. این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی در گستره صفر تا ۳ تسلا را از میدان‌های مغناطیسی دایم و متناوب (AC, DC) دارد.

#### ۲-۲-۴- تعیین مقدار گوگرد نمونه

آنالیز کل گوگرد نمونه‌های سنگ آهن به وسیله دستگاه لکو مدل CS230 در آزمایشگاه مجتمع سنگان انجام گرفت.

در طی بازه زمانی ۳ ماهه را برای دو مدار جدایش مغناطیسی واحد ۲ تولید سنگ آهن دانه بندی شده مجتمع سنگ آهن سنگان نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود مقدار عیار آهن کنسانتره هر دو مدار جدایش مغناطیسی عمدتاً در بازه ۵۸ تا ۶۰ درصد قرار دارد. مقدار متوسط عیار کنسانتره برای مدار جدایش مغناطیسی ریزدانه و درشت دانه به ترتیب برابر با ۵۸٫۳۵ و ۵۸٫۷۱ درصد است بنابراین مشاهده می شود که هر دو مدار جدایش مغناطیسی قادر هستند تا عیار آهن مطلوب برای کنسانتره را تامین نمایند. شکل ۳ همچنین نشان می دهد که مقادیر بازیابی آهن به دست آمده در مدار جدایش مغناطیسی ریزدانه در محدوده ۴ تا ۹۸ درصد قرار دارد و مقدار متوسط آن ۶۹٫۲۵ درصد است. این در حالی است که مقادیر بازیابی آهن به دست آمده در مدار جدایش مغناطیسی درشت دانه دارای پراکندگی زیاد بوده و در محدوده ۲ تا ۱۰۰ درصد قرار دارد و مقدار متوسط آن برابر ۵۵٫۳۶ درصد است بنابراین مقادیر بازیابی آهن به دست آمده در مدار جدایش مغناطیسی ریزدانه بیشتر از مدار جدایش مغناطیسی درشت دانه است. دلیل این موضوع نیز کوچکتر بودن اندازه ابعادی خوراک مدار جدایش مغناطیسی ریزدانه نسبت به مدار جدایش مغناطیسی درشت دانه و در نتیجه داشتن درجه آزادی بیشتر است. همچنین شدت میدان جدا کننده مغناطیسی مدار ریزدانه بیشتر از مدار درشت دانه است.



شکل ۳: تغییرات عیار/ بازیابی آهن برای مدارهای جدایش مغناطیسی ریزدانه و درشت دانه واحد ۲ تولید سنگ آهن دانه بندی شده سنگان برای ۵۵ سری نمونه برداری در طی بازه زمانی ۳ ماهه

مقایسه عملکرد مدارهای جدایش مغناطیسی ریزدانه واحدهای ۲ و ۶ که ابعاد خوراک ورودی به آن ها کوچکتر از ۱۰mm است مشخص می کند که میانگین عیار آهن محصول تولیدی مدار جدایش مغناطیسی ریزدانه واحد ۲ و ۶ به

مقدار متوسط بازیابی به وسیله این جداکننده برابر با ۹۲٫۲۹ درصد است. این درحالی است که مقادیر بازیابی به دست آمده به وسیله جداکننده مغناطیسی مدار درشت دانه در محدوده ۶۰ تا ۹۸ درصد و عمدتاً در بازه ۷۰ تا ۹۰ درصد قرار دارد و مقدار متوسط بازیابی توسط این جداکننده برابر با ۷۸٫۹۳ درصد است. با مقایسه نتایج بازیابی این دو مدار مشخص می شود که بازیابی آهن در مدار ریزدانه بیشتر از مدار درشت دانه است. دلیل موضوع را می توان به اندازه ابعادی خوراک این دو جداکننده مربوط دانست زیرا ابعاد خوراک مدار ریزدانه و درشت دانه به ترتیب در محدوده ۰-۱۰mm و ۳۰-۱۰۰mm قرار دارد. واضح است که با کاهش اندازه ابعادی خوراک، احتمال رسیدن تعداد بیشتری از کانی های مگنتیت به درجه آزادی وجود دارد. علاوه بر این، شدت میدان مغناطیسی جداکننده مدار ریزدانه و درشت دانه به ترتیب برابر با ۱۲۰۰ و ۹۰۰ گوس است. به عبارت دیگر خوراک با اندازه ابعادی کوچکتر وارد جداکننده مغناطیسی با شدت میدان بیشتر می شود و برعکس تا عیار آهن کنسانتره در هر دو اندازه ابعادی در حد مجاز قرار گیرد که این موضوع نیز منجر به افت بازیابی می شود.

در واحد ۲ تولید سنگ آهن دانه بندی شده مجتمع سنگ آهن سنگان هر یک از مدارهای پرعیارسازی مغناطیسی خوراک ریزدانه و درشت دانه دارای دو جداکننده مغناطیسی خشک شدت پایین هستند. در مدار پرعیارسازی خوراک ریزدانه (با اندازه ابعادی ۰-۱۰mm) پرعیارسازی اولیه با استفاده از جداکننده مغناطیسی شدت پایین خشک از نوع استوانه ای ساخت شرکت ابزار مگنت گستر ایران (ماگ) با شدت میدان ۱۲۰۰ گوس انجام شده و سپس کنسانتره آن وارد جداکننده مغناطیسی خشک مرحله دوم از نوع استوانه ای با شدت میدان ۹۰۰ گوس ساخت شرکت جهان سنگ شکن اصفهان می شود. در مدار پرعیارسازی خوراک درشت دانه (با اندازه ابعادی ۱۰-۳۰mm) پرعیارسازی اولیه با استفاده از جداکننده مغناطیسی خشک از نوع نواری ساخت شرکت ابزار مگنت گستر ایران (ماگ) با شدت میدان ۱۲۰۰ گوس انجام شده و سپس کنسانتره آن وارد جداکننده مغناطیسی خشک مرحله دوم از نوع استوانه ای با شدت میدان ۷۰۰ گوس ساخت شرکت جهان سنگ شکن اصفهان می شود. خوراک دهی در کلیه مدارهای جدایش به شکل پیوسته انجام می گیرد.

شکل ۳ تغییرات عیار-بازیابی برای ۵۵ سری نمونه برداری



شکل ۴: تصویر جداکننده‌های مغناطیسی مدار درشت دانه (الف) واحد ۲ و (ب) واحد ۶

از جمله هماتیت، کربنات‌ها و سولفات‌های آهن در نمونه خوراک باشد، در نتیجه تعیین مقدار کانی منیتیت در نمونه خوراک نتایج ارزشمندی در طراحی و ارزیابی مدار ارایه می‌دهد. مقدار منیتیت موجود در کانسنگ با توجه به معلوم بودن مقدار FeO از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$\%Fe_3O_4 = \frac{232}{72} \times \%FeO \quad (1)$$

بر اساس فرمول فوق بالاترین مقدار FeO قابل اندازه‌گیری در کانسنگ آهن‌دار ۳۱٫۴ درصد است.

شکل ۵ نمودار عیار منیتیت خوراک، کنسانتره و باطله جداکننده‌های مغناطیسی موجود در دو مدار ریزدانه و درشت‌دانه واحد ۶ در طی چندین سری نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود برای هر دو مدار ریزدانه و درشت‌دانه، رابطه مستقیمی بین عیار منیتیت خوراک و کنسانتره وجود دارد به نحوی که با افزایش عیار منیتیت خوراک، عیار منیتیت کنسانتره افزایش می‌یابد و برعکس. دلیل این موضوع را می‌توان به بهبود خصوصیات آزادسازی کانی منیتیت با افزایش عیار این کانی در نمونه خوراک مرتبط دانست. همچنین متوسط عیار منیتیت در کنسانتره مدار ریزدانه و درشت‌دانه به ترتیب برابر ۷۵٫۹۴ و ۷۷٫۴۷ درصد است که نشان می‌دهد حدود ۲۵ درصد کانی‌های آهن‌دار غیرمنیتیتی در کنسانتره حضور دارند.

ترتیب برابر با ۵۸٫۳۵ و ۵۸٫۱۵ درصد است که تقریباً برابر و تفاوت معناداری را نشان نمی‌دهند. بازیابی آهن مدار جدایش مغناطیسی ریزدانه واحد ۲ و ۶ نیز به ترتیب برابر ۶۹٫۲۵ و ۹۲٫۲۹ درصد است. بنابراین مشاهده می‌شود که مدار جدایش مغناطیسی ریزدانه واحد ۶ عملکرد بسیار بهتری را در این مورد دارد.

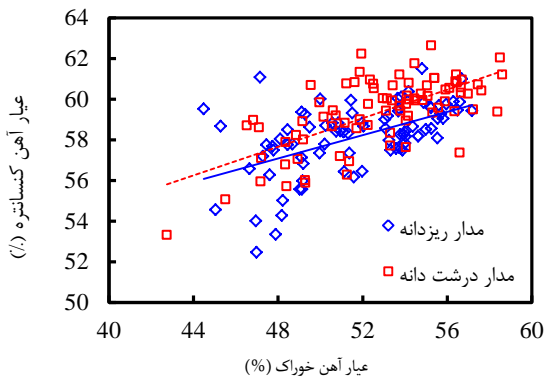
با مقایسه عملکرد مدار جدایش مغناطیسی درشت‌دانه واحدهای ۲ و ۶ که محدوده ابعاد خوراک ورودی به آن‌ها در گستره ۱۰ تا ۳۰mm است مشخص می‌نماید که میانگین عیار آهن کنسانتره تولیدی مدار جدایش مغناطیسی درشت‌دانه واحدهای ۲ و ۶ به ترتیب برابر با ۵۸٫۷۱ و ۵۹٫۳۶ درصد است که هر دو مقدار تقریباً برابر و تفاوت معناداری را نشان نمی‌دهند. مقدار متوسط بازیابی آهن مدار جدایش مغناطیسی درشت‌دانه واحدهای ۲ و ۶ نیز به ترتیب برابر با ۵۵٫۳۶ و ۷۸٫۹۳ درصد است که نشان می‌دهد مدار جدایش مغناطیسی درشت‌دانه واحد ۶ عملکرد بسیار بهتری نسبت به واحد ۲ دارد.

از مطالب فوق می‌توان دریافت که هر دو مدار جدایش مغناطیسی واحد ۶ نسبت به واحد ۲ عملکرد بهتری را نشان می‌دهند. با بررسی پارامترهای مهم در عملکرد جداکننده‌های مغناطیسی مدارهای جدایش مغناطیسی واحد ۶ و واحد ۲ مشخص شد که دلایل اصلی در مورد راندمان پایین‌تر مدار ۲ نسبت به مدار ۶ شامل نحوه خوراک‌دهی و همچنین نوع المان‌های مگنت، جنس مگنت درام، تعداد قطب‌ها، چیدمان مگنت‌ها و فاصله بین مگنت‌ها است. شکل ۴ الف و ب نحوه خوراک‌دهی به ترتیب به جداکننده مغناطیسی مدار درشت‌دانه واحدهای ۲ و ۶ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در واحد ۲ تغذیه کننده اصلی از مدار خارج و خوراک‌دهی به وسیله یک شوت انجام می‌شود و در نتیجه خوراک به صورت غیریکنواخت بر سطح جداکننده توزیع می‌شود ولی در مدار ۶ بار به صورت یکنواخت به وسیله تغذیه کننده بر روی سطح جداکننده ریخته می‌شود.

### ۳-۲- بررسی عملکرد جداکننده‌های مغناطیسی واحد ۶ از لحاظ عیار کانی منیتیت

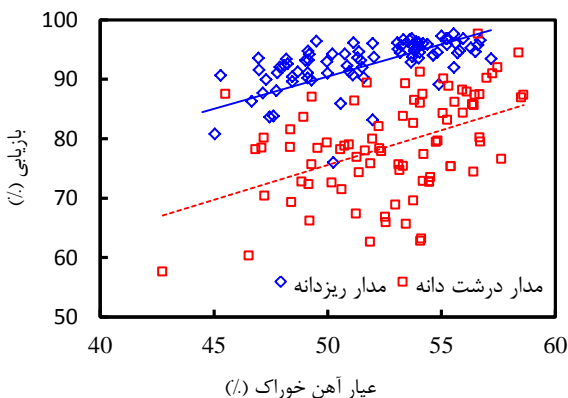
با توجه به اینکه بازیابی آهن بر اساس نتایج آنالیز کل آهن کنسانتره، باطله و خوراک انجام می‌شود بنابراین بخشی از افت بازیابی می‌تواند به واسطه وجود سایر کانی‌های آهن‌دار

خوراک برای مدارهای جدایش مغناطیسی واحد ۶ تولید سنگ آهن دانه‌بندی سنگان نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود برای هر دو مدار ریزدانه و درشت‌دانه رابطه مستقیمی بین عیار آهن خوراک و کنسانتره وجود دارد. به عبارت دیگر با افزایش عیار آهن خوراک عیار آهن کنسانتره افزایش می‌یابد.



شکل ۶: وابستگی عیار آهن کنسانتره/خوراک برای مدارهای جدایش مغناطیسی واحد ۶ تولید سنگ آهن دانه‌بندی مجتمع سنگان در طی چندین سری نمونه‌برداری

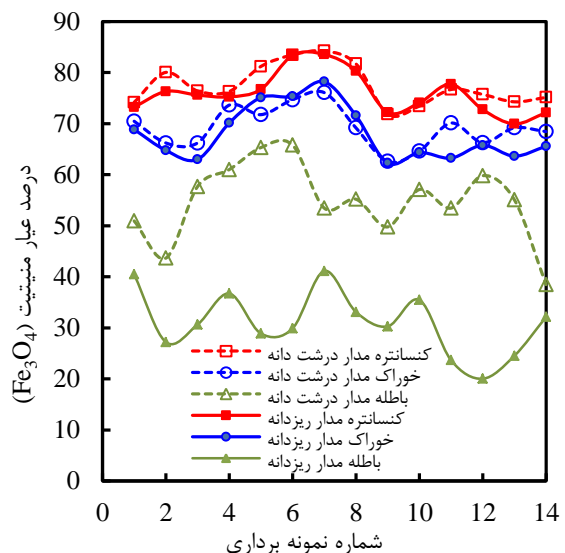
شکل ۷ نمودار درصد بازیابی آهن را نسبت به عیار آهن خوراک برای مدارهای جدایش مغناطیسی واحد ۶ تولید سنگ آهن دانه‌بندی سنگان نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود رابطه مستقیمی بین عیار آهن خوراک و بازیابی آهن در هر دو مدار جدایش مغناطیسی ریزدانه و درشت‌دانه وجود دارد بطوریکه با افزایش عیار آهن خوراک بازیابی آهن نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۷: وابستگی بازیابی آهن کنسانتره/عیار آهن خوراک برای مدارهای جدایش مغناطیسی واحد ۶ تولید سنگ آهن دانه‌بندی مجتمع سنگان در طی چندین سری نمونه‌برداری

شکل ۵ همچنین نشان می‌دهد که عیار منیتیت در باطله مدار ریزدانه به میزان قابل توجهی کمتر از مدار درشت‌دانه است که خود بیان‌کننده بازیابی بیشتر منیتیت در مدار ریزدانه نسبت به درشت‌دانه است. این امر آشکار می‌سازد که با کاهش اندازه ابعادی خوراک و در نتیجه افزایش درجه آزادی می‌توان عیار منیتیت را در باطله کاهش داد.

در حال حاضر میانگین عیار منیتیت در باطله مدار ریزدانه و درشت‌دانه واحد ۶ تولید سنگ آهن دانه‌بندی شده سنگان به ترتیب برابر با ۳۱/۰۲ و ۵۴/۷۷ درصد است که نشان می‌دهد مقدار قابل توجهی از کانی منیتیت در باطله مدار ریزدانه و به ویژه مدار درشت‌دانه واحد ۶ تولید سنگ آهن دانه‌بندی شده سنگان وجود دارد که می‌توان با کاهش بیشتر اندازه ابعادی خوراک و افزایش درجه آزادی این کانی، بازیابی مدار را افزایش داد. با توجه به اینکه از زمان بهره‌برداری خطوط ۲ و ۶ تولید سنگ آهن دانه‌بندی شده سنگان مدت زمان زیادی می‌گذرد حجم قابل توجهی از این باطله دپو شده است که می‌توان با خردایش مجدد آن‌ها و انجام عملیات پرعیارسازی بخش قابل توجهی از آهن موجود در آن را بازیابی کرد.

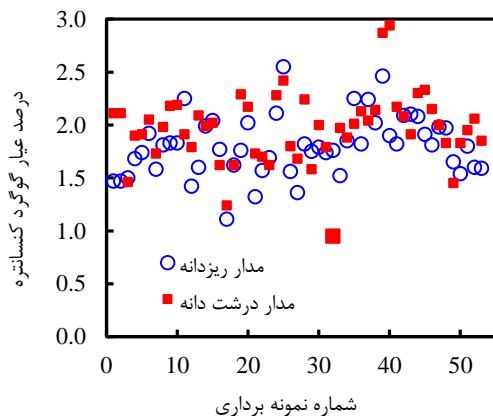


شکل ۵: نمودار عیار منیتیت خوراک، کنسانتره و باطله مدارهای جدایش مغناطیسی ریزدانه و درشت‌دانه واحد ۶ تولید سنگ آهن دانه‌بندی شده مجتمع سنگان در طی چندین سری نمونه‌برداری

۳-۳- بررسی تاثیر عیار آهن خوراک بر عملکرد جداکننده‌های مغناطیسی واحدهای ۲ و ۶

شکل ۶ نمودار عیار آهن کنسانتره را نسبت به عیار آهن

عملیات گوگردزدایی را در مراحل بعدی پریارسازی اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. همچنین با مقایسه عیار گوگرد کنسانتره‌های آهن واحدهای ۲ و ۶ مشخص می‌شود که عیار گوگرد کنسانتره‌های آهن واحد ۲ به میزان قابل توجهی کمتر از واحد ۶ است. دلیل این موضوع وارد شدن تناژ بیشتری از معدن باغک و توده C شمالی که عیار گوگرد آن‌ها بالاتر از سایر معادن است به این سنگ‌شکن است بنابراین در مورد عیار گوگرد کنسانتره نیز می‌توان با اختلاط مناسب سنگ معدن استخراجی از معادن مختلف از لحاظ گوگرد نیز به مقدار مطلوب‌تری دست یافت.



شکل ۸: عیار گوگرد کنسانتره مدارهای جدایش مغناطیسی واحد ۶ تولید سنگ آهن دانه‌بندی شده مجتمع سنگان در چندین سری نمونه‌برداری

عنصر فسفر نیز یکی دیگر از عناصر مزاحم موجود در سنگ آهن است که باعث شکنندگی فولاد تولیدی از آن می‌شود. متوسط درصد فسفر در حدود ۰/۰۳۵ درصد است که از نظر فرآوری مناسب است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از این تحقیق را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

مدارهای جدایش مغناطیسی واحدهای ۲ و ۶ تولید سنگ آهن دانه‌بندی شده مجتمع سنگان قادر هستند تا کنسانتره‌ای با عیار آهن بیشتر از ۵۷ درصد تولید کنند که به لحاظ عملیاتی در حد قابل قبول قرار دارد.

مشکل عمده مدارهای جدایش مغناطیسی واحدهای ۲ و ۶ تولید سنگ آهن دانه‌بندی شده مجتمع سنگان، بازیابی آهن پایین آن‌ها است. با توجه به اینکه بازیابی آهن در مدار جدایش مغناطیسی ریزدانه بیشتر از مدار جدایش مغناطیسی

بنابراین از مجموع شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان نتیجه گرفت افزایش عیار آهن خوراک منجر به افزایش در بازیابی و عیار آهن کنسانتره در هر دو مدار جدایش مغناطیسی ریزدانه و درشت‌دانه واحد ۶ تولید سنگ آهن دانه‌بندی شده سنگان می‌شود. همچنین با بررسی رابطه عیار خوراک با بازیابی و عیار آهن کنسانتره در هر دو مدار جدایش مغناطیسی واحد ۲ نیز نتایج مشابهی به دست آمد. با توجه به بهبود عملکرد جداکننده‌های مغناطیسی با افزایش عیار خوراک و همچنین با توجه به اینکه خوراک واحدهای ۲ و ۶ تولید سنگ آهن دانه‌بندی شده سنگان از معادن مختلف شامل معادن C شمالی، باغک و دردوی تامین می‌شود می‌توان بار ورودی از این معادن را به تفکیک عیار دپو کرد و سپس با نسبت معین مخلوط و خوراک سنگ‌شکن شود تا عیار و بازیابی مطلوب به دست آید.

#### ۳-۴- بررسی عیار گوگرد و فسفر کنسانتره‌های سنگ آهن واحدهای ۲ و ۶

وجود گوگرد در ذخایر سنگ آهن مشکل آفرین است و باعث شکستگی و تردی فولاد می‌شود. همچنین سوختن آن در گندله‌سازی منجر به آلودگی هوا و در احیای مستقیم باعث صدمه زدن به کاتالیست‌ها و خوردگی فولاد می‌شود. شکل ۸ عیار گوگرد کنسانتره مدارهای جدایش مغناطیسی واحد ۶ را در روزهای مختلف نمونه‌برداری نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود میزان گوگرد کنسانتره هر دو مدار جدایش مغناطیسی در محدوده ۱ تا ۳ درصد قرار دارد و متوسط عیار گوگرد کنسانتره سنگ آهن مدار جدایش مغناطیسی ریزدانه و درشت‌دانه واحد ۶ به ترتیب برابر با ۱/۸ و ۱/۹۶ درصد است. با توجه به اینکه مقدار مجاز گوگرد در کنسانتره آهن ۰/۱۳ درصد است بنابراین باید عملیات گوگردزدایی از کنسانتره سنگ آهن در مراحل بعدی به انجام برسد. همچنین با توجه به اینکه عیار گوگرد کنسانتره درشت‌دانه بیشتر از کنسانتره ریزدانه است بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با کاهش اندازه ابعادی خوراک به واسطه بهبود درجه آزادی کانی منیتیت، مقدار کمتری گوگرد وارد کنسانتره سنگ آهن خواهد شد.

متوسط عیار گوگرد کنسانتره سنگ آهن مدار جدایش مغناطیسی ریزدانه و درشت‌دانه واحد ۲ نیز به ترتیب برابر با ۱/۴۳ و ۱/۴۴ درصد است. این مقادیر نشان می‌دهند که در این مدار نیز عیار گوگرد بیشتر از حد مجاز بوده و لزوم

بالاتر از حد مجاز بوده و لزوم فرآیند گوگردزایی از آنها وجود دارد.

#### ۵- سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله از معاونت محترم فنی و بهره‌برداری مجتمع سنگ آهن سنگان جناب آقای مهندس اسماعیل زاده و مدیر محترم خردایش و انتقال مواد مجتمع جناب آقای مهندس نقی‌زاده و دیگر دوستان و همکاران که در انجام این پژوهش نهایت همکاری را داشته‌اند کمال تشکر را دارند.

#### ۶- مراجع

- [1] Kretschmann, J., and Amiri, R. (2013). "Socially responsible mining in east Iran: The Sangon iron ore mines". In: 23rd World Mining Congress and Expo 2013. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal, Quebec, Canada.
- [2] Wilkinson, A. (2012). "Low intensity magnetic separation". Metso Minerals. See also URL: [http://www.madencilik-turkiye.com/dosyalar/metso/sunum6-anderw\\_wilkinson-proses\\_uygulamalarinda\\_metso\\_ekipmanlari2.pdf](http://www.madencilik-turkiye.com/dosyalar/metso/sunum6-anderw_wilkinson-proses_uygulamalarinda_metso_ekipmanlari2.pdf).
- [3] Ezhov, A. M., and Shvaljov, Y. B. (2015). "Dry magnetic separation of iron ore of the Bakchar deposit". *Procedia Chemistry*, 15: 160-166.
- [4] Stener, J. F., Carlson, J. E., Palsson, B. I., and Sand, A. (2015). "Direct measurement of internal material flow in a bench scale wet low-intensity magnetic separator". *Minerals Engineering*, 91: 55-65.
- [5] Bikbov, M. A., Karmazin, V. V., and Bikbov, A. A. (2004). "Low-Intensity magnetic separation: Principal stages of a separator development- What is the next step?". *Physical Separation in Science and Engineering*, 13(2): 53-67.
- [6] Xiong, D., Lu, L., and Holmes, R. J. (2015). "Developments in the physical separation of iron ore: magnetic separation". In: *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*, L. Lu, ed., Elsevier Ltd., Amsterdam, 283-307.

درشت دانه است می‌توان نتیجه گرفت دلیل اصلی بازیابی پایین آهن در این مدارها خردایش ناکافی و در نتیجه عدم دستیابی به درجه آزادی مناسب در آنها است.

جداکننده‌های مغناطیسی واحد ۶ در هر دو مدار ریزدانه و درشت دانه از نوع استوانه‌ای است. جداکننده استوانه‌ای برای خوراک درشت دانه دارای کارایی کمتری است، پیشنهاد می‌شود که جداکننده فعلی موجود در مدار جدایش مغناطیسی درشت‌دانه واحد ۶ با یکی از انواع جداکننده‌های نواری تعویض شود.

پیشنهاد می‌شود به منظور بهبود بازیابی آهن در واحد ۶ تولید سنگ آهن دانه‌بندی شده سنگان در هر دو مدار جدایش مغناطیسی ریزدانه و درشت‌دانه، دو جداکننده مغناطیسی موجود باشد، بطوریکه جداکننده اول از شدت میدان بالاتری در محدوده ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ گوس و جداکننده دوم دارای شدت میدان کمتری در محدوده ۷۰۰ تا ۹۰۰ گوس باشد. با این طراحی هم بازیابی آهن و هم عیار آهن در حد مطلوبی قرار خواهد گرفت. علاوه بر این، اگر پس از اولین جداکننده مغناطیسی هر مدار، خردایش مجدد کنسانتره اول نیز انجام پذیرد در بهبود عیار و بازیابی آهن بسیار مفید خواهد بود.

در مدارهای جدایش مغناطیسی ریزدانه و درشت‌دانه واحد ۲، بازیابی آهن نسبت به واحد ۶ کمتر است. با توجه به قدیمی‌تر بودن این واحد و نقایص عملیاتی جداکننده‌های مغناطیسی موجود در آن، باید اصلاح و یا تعویض آنها در دستور قرار گیرد.

بررسی نتایج نشان داد که با افزایش عیار آهن خوراک، عملکرد واحدهای جدایش مغناطیسی بهبود می‌یابد.

میزان فسفر (P) که یکی از عناصر مزاحم در فولادسازی است در این معادن در حد صفر بوده است و از این‌رو این عنصر در کنسانتره تولیدی در حد مجاز قرار دارد.

بررسی عیار گوگرد کنسانتره آهن مدارهای جدایش مغناطیسی واحدهای ۲ و ۶ نشان داد که عیار گوگرد آنها