

بازیابی کنسانتره آهن از باطله کارخانه کانه آرایی معدن مس مزرعه با استفاده از جدایش مغناطیسی تر و تجزیه و تحلیل نتایج به روش کمترین مربعات جزئی

پرویز پورقهرمانی

استادیار دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی سهند تبریز

(دریافت ۲۷ مهر ۱۳۹۰، پذیرش ۱۴ آبان ۱۳۹۱)

چکیده

در این مقاله فرآوری کنسانتره آهن از باطله های کارخانه معدن مس مزرعه با استفاده از جدایش مغناطیسی تر و بر اساس طرح آزمایش تمام فاکتوری مطالعه و سپس نتایج روش مدل سازی حداقل مربعات جزئی تجزیه و تحلیل شده است. نتایج نشان داد که با استفاده از یک مرحله جدایش مغناطیسی تر تهیه کنسانتره آهن با بازیابی و عیار مناسب آهن به راحتی میسر بوده ولی حذف مواد مزاحم نظیر گوگرد و سیلیس به راحتی امکان پذیر نیست. برای حذف مواد مضر تا حد مجاز در کنسانتره آهن حداقل به دو مرحله جدایش مغناطیسی و خردایش بیشتر نیاز است. مطالعات تکمیلی مشخص کرد که با خردایش باطله تا ۲۳۰- مش (۶۲- میکرون) و با دو مرحله جدایش مغناطیسی تر امکان تهیه کنسانتره با بازیابی های ۷۸-۹۲ درصد آهن با عیار های آهن ۶۹/۳۰-۶۷/۲ درصد و با عیارهای سیلیس ۳/۷-۴/۵ درصد بسته به پارامترهای عملیاتی در جداکننده های مغناطیسی امکان پذیر می باشد و میزان گوگرد بسیار ناچیز و زیر حد حساسیت روش های آنالیز گزارش (۰/۰۰۱٪) شد. استفاده از روش آنالیز حداقل مربعات جزئی مدلی با سه مولفه اصلی را ارائه داد که می تواند بطور همزمان ۹۲/۱۱ درصد از واریانس کل پاسخها را تشریح و حدود ۷۳ درصد از واریانس کل پاسخها را پیش بینی کند. نتایج مدل سازی حداقل مربعات جزئی نشان داد که به ترتیب میزان خردایش و سپس به ترتیب شدت جدایش های مغناطیسی مرحله دوم و اول بیشترین نقش را در تهیه کنسانتره مطلوب آهن دارند. با بررسی نمودار مطلوبیت مشخص شد که میدان بهینه وسیعی برای دستیابی به کنسانتره مطلوب وجود دارد که با آزمایش های انجام گرفته تأیید شد.

کلمات کلیدی

باطله معدن مزرعه، جدایش مغناطیسی، کنسانتره آهن، روش PLS

۱- مقدمه

علیرغم تاریخچه طولانی تکنولوژی فرآوری کانسنگ های آهن، در مواردی مشکلات و محدودیت هایی جدی در فرآوری کنسانتره های آهن از باطله های آهن دار وجود دارد. مشکل اول باطله های عیار کم آهن بوده و بطور نسبی حاوی مقدار زیادی آلومینا، سیلیس، فسفر و گوگرد می باشند [۱-۳]. وجود هر یک از عناصر مضر به همراه کنسانتره مشکلات خاصی را در فرایندهای بعدی نظیر احیا و ذوب ایجاد می کند [۴،۱]. مشکل دوم به وجود مقدار زیاد نرمه به دلیل نرمی کانسنگ های اولیه آهن است. نرمه زیاد علاوه بر کاهش قابل توجهی از حجم ذخایر، مشکلات محیط زیستی طولانی مدت را نیز بوجود می آورد. در این راستا، روش ها و راه حل های مختلفی مانند روش طبقه بندی و جدایش با هیدروسیکلون [۵]، روش فولکولاسیون [۶-۸]، روش های جدایش مغناطیسی تر و طبقه بندی با سیکلون [۹،۱۰]، روش جداکننده ثقلی مرکب MGS [۱۱،۱۲]، روش مغناطیسی و ماریپیج [۱۳]، روش میز لرزان و جیگ [۱۴]، فلوتاسیون [۱۵] و روش فولکولاسیون مغناطیسی [۱۶] برای فرآوری نرمه های آهن دار مطالعه و گزارش شده اند که اغلب آن ها در فرآوری معمول کانسنگ های آهن هم بکار گرفته می شوند.

باطله معدن مس مزرعه کارخانه فرآوری در این واحد حجم قابل توجهی دارد. به دلیل تیپ کانسار که بصورت اسکارنی است، علاوه بر کانی سازی مس، کانی سازی آهن به طور عمده در فاز منیتیتی همراه با کانی های مس تشکیل شده است که در واحد فرآوری فقط بخش کانی های مس بازیابی می شود و بخش آهن پس از فرآوری کانی های مس به سد باطله هدایت می شود. مطالعه امکان فرآوری آهن از باطله کارخانه فرآوری معدن مس مزرعه به دلیل نرمه، سیلیس و گوگرد زیاد بسیار مهم است. با توجه به عیار بالای آهن در سد باطله، مقدار قابل توجهی منابع آهن تجدید ناپذیر وجود دارد که در صورت عدم فرآوری و بهره برداری مناسب اغلب با مشکلات محیط زیستی در منطقه مذکور همراه خواهد بود.

هدف این مقاله ارائه نتایج مطالعه امکان تهیه کنسانتره آهن از باطله کارخانه فرآوری مس مزرعه با استفاده از جدایش

مغناطیسی تر است. مطالعه فرآوری بر اساس طرح آزمایش تمام فاکتوری انجام گرفته و به روش حداقل مربعات جزئی آنالیز شد.

۲- مواد و آزمایش ها

۲-۱- مواد

با نمونه برداری به روش شیاری نمونه معرف کلی به وزن خشک ۱۲۵۰ کیلوگرم از مواد موجود در سد باطله معدن مزرعه تهیه شد که دانه بندی نمونه معرف در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج دانه بندی بیانگر این است که حدود ۵۰ درصد وزنی نمونه کوچکتر از ۳۷ میکرون است که نشان دهنده ماهیت ترد و شکننده بودن کانسنگ اولیه مس مزرعه است. بر اساس آنالیز شیمیایی نمونه مشخص شد که باطله مذکور حاوی ۴۵/۷ درصد اکسید های آهن است (جدول ۱).

جدول ۱: ترکیب شیمیایی نمونه معرف از باطله معدن (%)

SiO_2	۲۹/۸۳	Cu	۰/۱۳
Fe_2O_3	۴۵/۷۹	Al_2O_3	۶/۰۸
S	۰/۱۸	CaO	۹/۴۶
K_2O	۱/۲۰	MgO	۲/۲۷
$Ag(ppm)$	۴	Na_2O	۰/۸۳

۲-۲- آزمایش ها و روش آنالیز

برای انجام آزمایش های جدایش مغناطیسی، از جداکننده مغناطیسی القایی تر با شدت متغیر (ساخت شرکت اتوکامپو) استفاده شد. شدت میدان مغناطیسی در این جداکننده با تغییر جریان ورودی تغییر می کند. این جداکننده مغناطیسی در آزمایشگاه به یک سیستم فیدر و همزن مکانیکی با دور متغیر تجهیز شده است که امکان خوراک دهی با دبی ثابت، همگن و پیوسته را فراهم می کند. وزن نمونه مورد آزمایش در هر آزمایش حدود ۵۰۰ گرم بود که بعد از آماده سازی و تقسیم نمونه کلی تهیه شده بودند.

مطالعات کانی شناسی و درجه آزادی نمونه با تهیه مقاطع نازک و سیقلی از باطله توسط یک میکروسکوپ پلاریزان مجهز به سیستم پردازش تصویری انجام گرفت.

آنالیز شیمیایی نمونه ها توسط آزمایشگاه شیمی تجزیه و ژئوشیمی سازمان زمین شناسی به روش های مختلف نظیر تیتراسیون و جذب اتمی انجام شد.

برای تهیه طیف XRD از نمونه ها، از دستگاه پراش اشعه ایکس مدل D9 ساخت شرکت زیمنس (کشور آلمان) استفاده شد.

۴-۱- مطالعات مینرالوژی و درجه آزادی کانی ها

مطالعه مقاطع نازک نشان داد که کوارتز، کلسیت و فلدسپاتهای قلیایی فراوانترین کانی های شفاف در نمونه بوده و بعلاوه کانی های اپیدوت و گارنت هم در نمونه وجود دارند. وجود ادخال هایی از کانی های اپک در داخل کانی های شفاف دیده شد. از طرفی مطالعات مقاطع صیقلی نشان داد که عمده ترین کانی های اکسیدی آهن شامل منیتیت می باشد که بیشتر از ۴۰ درصد مقاطع را به خود اختصاص می دهد. از میان کانی های سولفوری مس، کالکوپیریت فراوانترین کانی مس بوده و بورنیت و کولین به ترتیب در رده های بعدی قرار دارند.

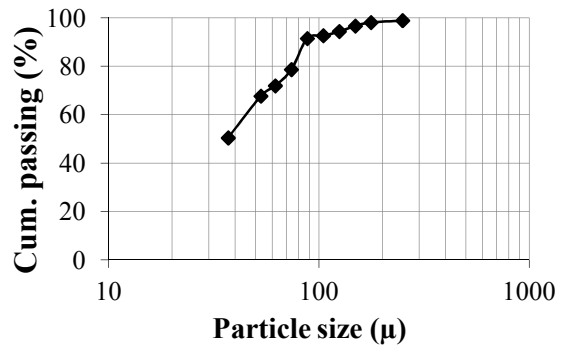
درجه آزادی کانی های مس دار و آهن دار (بطور عمده منیتیت) در فراکسیونهای مختلف با انتخاب تصادفی حداقل بیش از ۷۰۰ ذره از هر فراکسیون مطالعه و نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. مشاهده می شود که درجه آزادی منیتیت همواره بیشتر از کانی های حاوی مس می باشد و علت عمده آن عیار بیشتر منیتیت در نمونه می باشد. ولی درجه آزادی کانی های حاوی مس بسیار کمتر از درجه آزادی منیتیت است و آزاد سازی مناسب کانی های مس نیاز به خردایش مواد باطله تا ابعاد خیلی کوچکتر است.

جدول ۲: درجه آزادی کانی های حاوی مس و آهن (منیتیت) در فراکسیون های مختلف

کانی های مس (%)	منیتیت (%)	تعداد ذرات	اندازه (میکرون)
<۲	۱۳/۶	۷۰۰	+۲۵۰
۷/۵	۲۸/۱	۷۰۰	+۱۷۷
۲۱/۷	۳۶/۱	۷۰۰	+۱۴۹
۲۷/۱	۴۸/۸	۸۷۰	+۱۲۵
۳۶/۷	۶۱/۵	۸۵۰	+۱۰۵
۴۳/۵	۷۵/۰	۹۳۵	+۸۸
۵۱/۷	۸۳/۲	۹۲۰	+۷۴
۶۱/۲	۸۸/۶	۹۲۰	+۶۲
۶۸	۹۳/۳	۸۲۳	+۵۳

۴-۲- بررسی تعداد مراحل مغناطیسی

به منظور ارزیابی تعداد مراحل مغناطیسی و کیفیت کنسانتره، پس از انجام آزمایش های اولیه، نمونه ای تا ۲۳۰- مش خرد شد، و در مناسبترین شرایط آزمایش شد. پس از تهیه پالپی با ۱۰ درصد وزنی جامد، پالپ مذکور در میدان مغناطیسی با شدت ۲۵ ولت و با دبی یک لیتر بر دقیقه تست گردید. نتایج نشان داد که تهیه کنسانتره مطلوب بطور رضایت



شکل ۱: دانه بندی باطله معدن مس مزرعه

۳- روش پردازش نتایج

پس از انجام آزمایش های اولیه و شناخت پارامتر های موثر، برای انجام آزمایش ها یک طرح آماری تمام فاکتوری طراحی و اجرا شد. سپس نتایج بدست آمده به روش مدل سازی حداقل مربعات جزئی (PLS) تجزیه و تحلیل شد. زمانی که چندین پاسخ اندازه گیری وجود داشته باشد، یک مدل سازی همزمان که بتواند تغییرات تمام پاسخ ها را نسبت به تغییرات متغیرها بیان کند، بسیار مفید واقع می شود که این عمل با مدل سازی حداقل مربعات جزئی امکان پذیر است چرا که این روش تعداد زیادی پاسخ را با در نظر گرفتن کوارینانس آن ها میتواند مدل سازی کند. اما روش رگرسیون خطی چند متغیره (MLR) در چنین حالتی نمی تواند مؤثر واقع شود چرا که روش MLR مدل های رگرسیون را بطور جداگانه و بدون در نظر گرفتن روابط بین آن ها برای هر پاسخ برازش می کند و نمی تواند همبستگی ما بین پاسخ ها را در نظر بگیرد. به علاوه زمانی که طرح آزمایش ها خیلی منظم و سیستماتیک انجام نگرفته باشد، روش PLS نسبت به MLR جواب های مطمئن تری را ارائه می کند چراکه روش MLR در اصل بر اساس فرض به طور متعامد عمل می کند. همچنین زمانیکه داده ای برای یک یا چندین اندازه گیری در دسترس نباشد، در روش MLR حذف می شود ولی روش PLS توانایی مدل سازی با چنین داده هایی را به خوبی دارد [۱۷]. از آنجایی که در فرآوری کنسانتره آهن، علاوه بر پاسخ های عیار و بازیابی آهن، عیار و میزان حذف عناصری نظیر گوگرد و سیلیس نیز مهم است و مستقل از ویژگی های آهن در کنسانتره نیست، مدل سازی به روش حداقل مربعات جزئی بسیار مفید بوده و اطلاعات دقیق تر و مقیدتری نسبت به روش رگرسیون خطی چند متغیره ارائه می کند.

۴- نتایج

برای این منظور، متغیر میزان خردایش در سه سطح ۶۰- مش (۲۵۰- میکرون) به معنی عدم خردایش باطله موجود، ۱۰۰- مش (۱۴۹- میکرون) و ۲۰۰- مش (۷۴- میکرون) و شدت جداکننده مغناطیسی اول در دو سطح ۲۹۰ ولت (شدت زیاد) و ۵۰ ولت (شدت متوسط) بررسی شد. در تمامی آزمایش‌ها درصد وزنی جامد در مرحله اول آرایش مغناطیسی حدود ۱۵ درصد و در مرحله دوم حدود ۱۰ درصد و با نرخ خوراک دهی ثابت (۱/۵ لیتر بر دقیقه) در نظر گرفته شد. شدت جداکننده مغناطیسی مرحله دوم همواره ثابت و برابر با ۲۰ ولت در حین آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. فلوشیت انجام آزمایش‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. پس از انجام آزمایش‌ها، نتایج در جدول ۴ خلاصه شده است.

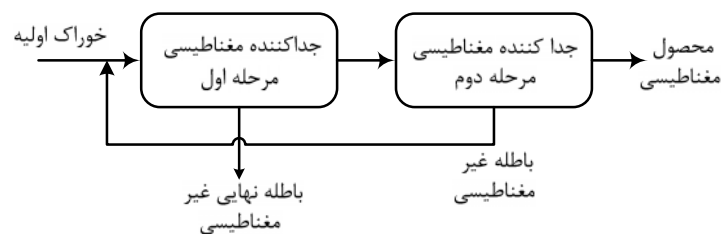
بخش ممکن نبوده و حداقل دو مرحله جدایش مغناطیسی جهت تهیه کنسانتره مطلوب لازم است. آزمایش مذکور بر روی سه نمونه به‌طور دقیق تکرار شد و پس از اختلاط محصول نهایی آنالیز شد که محاسبات متالورژیکی مربوطه در جدول ۳ خلاصه شده است. به‌طوری‌که ملاحظه می‌شود حذف گوگرد بر خلاف کوارتز با یک مرحله جدایش مغناطیسی امکان‌پذیر است.

۳-۴- تأثیر شدت جداکننده مغناطیسی اول و میزان خردایش

در هنگام انجام آزمایش‌ها و بررسی‌ها مشخص شد که با یک مرحله جدایش مغناطیسی نمی‌توان کنسانتره مطلوب آهن را به‌دست آورد و حداقل ترکیب دو مرحله جدایش مغناطیسی جهت آرایش باطله و تهیه کنسانتره مطلوب آهن مورد نیاز است.

جدول ۳: نتایج یک مرحله جدایش مغناطیسی

بازیابی (%)			ترکیب شیمیایی (%)				جریان‌ها
R_{SiO_2}	R_S	R_{Fe}	S	Fe	SiO_2	درصد وزنی	
-	--	-	۰/۱۸	۳۲/۰۵	۲۹/۸۳	۱۰۰	خوراک اولیه
۱۳/۶	۰/۵۵	۹۹/۲	۰/۰۰۲	۶۳/۳	۸/۰۶	۵۰/۲	مواد مغناطیسی



شکل ۲: فلوشیت انجام آزمایش برای بررسی جدایش مغناطیسی اولیه

جدول ۴: نتایج آزمایش‌های تکمیلی با استفاده از طرح آزمایش

بازیابی (%)		ترکیب شیمیایی (%)			درصد وزنی کنسانتره	شدت جداکننده مغناطیسی اول (ولت)	میزان خردایش (مش)
R_{Fe}	R_{SiO_2}	S	Fe	SiO_2			
۹۸/۹۶	۱۱/۳۸	n.d	۶۳/۴۰	۶/۳۵	۵۰/۰۳	۲۹۰	-۲۰۰
۹۸/۹۷	۱۰/۶۵	n.d	۶۴/۰۸	۶/۱۷	۴۹/۵	۵۰	-۲۰۰
۹۰/۰۹	۱۴/۶۲	۰/۰۱	۵۹/۶۶	۹/۰۱	۴۸/۴	۲۹۰	-۱۰۰
۸۶/۹۲	۱۴/۹۳	n.d	۵۸/۵۹	۹/۴۲	۴۷/۳	۵۰	-۱۰۰
۸۵/۹۱	۱۶/۰	۰/۰۱	۵۸/۷۱	۱۰/۱۷	۴۶/۹	۲۹۰	-۶۰
۸۵/۷۱	۱۵/۱۲	۰/۰۲	۶۰/۱۱	۹/۸۷	۴۵/۷	۵۰	-۶۰

*حد خردایش ۶۰- مش بدین معنی است که نمونه باطله بدون خردایش است.

مطلوب با در نظر گرفتن مقدار عناصر سیلیس و گوگرد خردایش بیشتر از آنچه انجام گرفته است مورد نیاز است و از طرفی می توان شدت جدا کننده مغناطیسی اول را کمتر گرفت بدون آن که تأثیر زیادی بر روی فرآیند جدایش داشته باشد. برای یک میزان خردایش، شدت زیاد میدان مغناطیسی سبب زیاد شدن بازیابی وزنی کنسانتره و از طرفی باعث کاهش عیار آن می گردد که بطور کلی تأثیر زیادی بر روی بازیابی نهایی ندارد. در نتیجه، خردایش بیشتر تا ۲۰۰- مش نه تنها عیار و بازیابی را افزایش می دهد بلکه مقدار سیلیس را نیز کاهش می دهد.

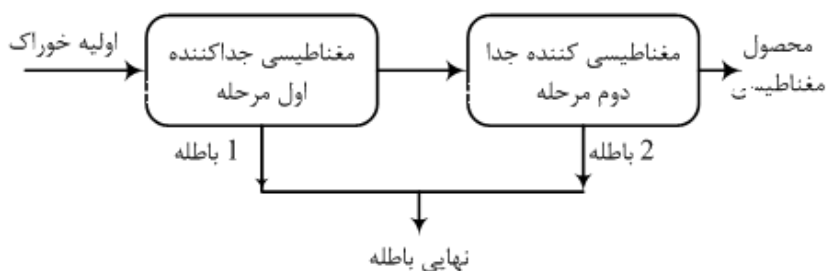
کنسانتره های نهایی بدست آمده در شرایط تقریباً یکسان شستشو داده شد و پس از خشک نمودن آن ها، کنسانتره ها و باطله های نهایی حاصل از آزمایش ها توزین شد که پس از آنالیز شیمیایی نمونه ها نتایج بدست آمده به همراه محاسبات متالورژیکی در جدول ۵ خلاصه گردیده است.

نتایج بدست آمده نشان می دهد که به راحتی امکان تهیه کنسانتره آهن با مقدار مجاز سیلیس و گوگرد وجود دارد. از طرفی بیشترین تأثیر را میزان خردایش در نتایج به همراه دارد، بطوریکه با خردایش باطله تا ۶۲- میکرون در تمامی آزمایش های انجام شده (۸ تست) مقدار سیلیس کنسانتره بدست آمده همواره کمتر از ۴/۸ درصد و با مقدار گوگرد کمتر از ۰/۱ درصد (زیر حد حساسیت دستگاه) می باشد. در صورت خردایش باطله تا ۷۴- میکرون مقدار گوگرد باز هم از حد مجاز کمتر می باشد ولی مقدار سیلیس به علت وجود ادخال های منیتیتی در آن نمی تواند همواره در حد مجاز باشد هر چند که با تغییر دقیق شدت مغناطیسی مراحل اول و دوم می توان کنسانتره قابل قبولی بدست آورد. برای خردایش ۷۴- میکرون، در صورتیکه شدت هر دوجداکننده های مغناطیسی در سطح پایین تنظیم گردند امکان تهیه کنسانتره آهن با مقدار سیلیس کمتر از ۵ درصد و با بازیابی آهن ۸۷ درصد وجود دارد. ولی نتایج خردایش باطله تا ۶۲- میکرون هم از لحاظ عیار آهن، عیار سیلیس و بازیابی آهن به مراتب بسیار رضایت بخش می باشد. لازم به ذکر است که در همه موارد میتوان گفت که بازیابی و عیار آهن در اکثر موارد در سطح قابل قبولی می باشد.

واضح است که خردایش کمتر (دانه درشت) در این آزمایش ها نسبت به آزمایش های قبلی باعث شده است که بازیابی سیلیس همراه کنسانتره آهن بطور قابل توجهی افزایش یابد. همچنین خردایش بیشتر منجر به افزایش عیار و بازیابی آهن و کاهش عیار و بازیابی سیلیس و گوگرد همراه کنسانتره می شود. که علت آن آزاد شدگی بیشتر کانی ها از همدیگر می باشد. بعلاوه، نتایج بدست آمده نشان می دهند که تأثیر دانه بندی بیشتر از شدت مغناطیسی می باشد چرا که مواد موجود فرومنیتیک بوده و شدت میدان مغناطیسی کمتر هم مانع انتقال آن ها به باطله مغناطیسی می شود. آزمایش های فوق نشان می دهند که برای تهیه کنسانتره آنالیز واریانس نشان می دهد که میزان خردایش بطور آماری تأثیر با اهمیت تری بر روی هر سه پاسخ بازیابی آهن، عیار آهن و سیلیس در سطح اعتماد ۹۵ درصد دارد در حالی که شدت میدان مغناطیسی در محدوده مورد مطالعه تأثیر زیادی بر روی پاسخ ها در سطح اعتماد ۹۵ و حتی ۹۰ درصد ندارد که علت آن خاصیت فرومغناطیسی مواد می تواند باشد.

۴-۴- آزمایش های تکمیلی

با توجه به آزمایش های اولیه و نتایج حاصل از آن ها، برای بهینه سازی پارامتر های موثر در تهیه کنسانتره آهن چهار پارامتر اندازه ذرات (میزان خردایش)، شدت جداکننده مغناطیسی مرحله اول و دوم و همچنین درصد وزنی جامد در مرحله اولیه مغناطیسی در نظر گرفته شد. درصد وزنی جامد در مرحله دوم به دلیل شستشوی نهایی کنسانتره ثابت (۱۰ درصد) در نظر گرفته شد. سپس طرح آماری کامل آزمایش ها با در نظر گرفتن دو سطح برای هر یک از متغیر ها بررسی و طراحی گردید. برای میزان خردایش نمونه، دوسطح ۲۰۰- و ۲۳۰- مش در نظر گرفته شد. شدت جداکننده مغناطیسی مرحله اول در دو سطح ۵۰ و ۲۵ ولت تنظیم گردید و شدت های ۱۰ و ۲۰ ولت برای جداکننده مرحله دوم در نظر گرفته شد. و نهایتاً درصد وزنی جامد در مرحله اول مغناطیسی در دو سطح ۱۰ و ۲۰ درصد تنظیم گردید. سپس ۱۶ آزمایش تمام فاکتوری طبق فلو شیت نشان داده شده در شکل ۳ بدقت انجام گردید. کنسانتره مرحله اول بدون شستشو خشک گردید و پس از تنظیم درصد وزنی جامد از مرحله دوم مغناطیسی عبور داده شد. تمامی آزمایش ها در هر دو مرحله مغناطیسی با دبی خوراک دهی ثابت ۱ لیتر بر دقیقه انجام گردید. سپس



شکل ۳: فلوشیت انجام آزمایش های نهایی

جدول ۵: نتایج آزمایش های نهایی

بازیابی (%)			ترکیب شیمیایی (%)				درصد وزنی کانسازنده	درصد جامد	شدت جداکننده مغناطیسی دوم (V)	شدت جداکننده مغناطیسی اول (V)	خردایش (μm)	کد نمونه
Cu	Fe	SiO ₂	Cu	S	Fe	SiO ₂						
۱۵/۵	۷۷/۸۲	۴/۴۶	۵۶۰	n.d	۶۹/۳۰	۳/۷۰	۳۵/۹۸	۱۰	۱۰	۲۵	۶۲	FN1
۱۶/۷۸	۸۲/۲۸	۵/۵۳	۵۷۰	n.d	۶۸/۹۰	۴/۳۱	۳۸/۲۷	۱۰	۱۰	۵۰	۶۲	FN3
۱۹/۴۲	۸۹/۳۲	۵/۸۴	۶۰۱	n.d	۶۸/۱۴	۴/۱۵	۴۲/۰۱	۱۰	۲۰	۲۵	۶۲	FN5
۲۱/۰۹	۸۹/۸۵	۶/۳۷	۶۴۵	n.d	۶۷/۷۶	۴/۴۷	۴۲/۵	۱۰	۲۰	۵۰	۶۲	FN7
۱۹/۰۰	۷۹/۷۸	۴/۸۵	۶۵۸	n.d	۶۸/۱۱	۳/۸۵	۳۷/۵۴	۲۰	۱۰	۲۵	۶۲	FN9
۲۰/۷۱	۸۶/۵۳	۵/۰۳	۶۶۲	n.d	۶۸/۲۰	۳/۶۹	۴۰/۶۶	۲۰	۱۰	۵۰	۶۲	FN11
۲۰/۱۱	۹۰/۷۱	۵/۴۸	۶۱۷	n.d	۶۸/۶۰	۳/۸۶	۴۳/۳۸	۲۰	۲۰	۲۵	۶۲	FN13
۲۲/۷۳	۹۱/۰۵	۶/۹۴	۶۸۱	n.d	۶۷/۲۶	۴/۷۷	۴۳/۳۹	۲۰	۲۰	۵۰	۶۲	FN15
۲۲/۳۹	۸۴/۲۳	۸/۴۹	۶۹۵	n.d.	۶۶/۴۷	۶/۰۵	۴۱/۸۷	۱۰	۱۰	۲۵	۷۴	FN2
۲۳/۲۴	۸۵/۲۵	۹/۱۰	۷۲۱	n.d.	۶۵/۲۱	۶/۴۸	۴۱/۹	۱۰	۱۰	۵۰	۷۴	FN4
۲۱/۷۹	۸۹/۸۱	۸/۰۹	۶۵۵	n.d.	۶۶/۵۷	۵/۵۸	۴۳/۲۶	۱۰	۲۰	۲۵	۷۴	FN6
۲۵/۳۹	۸۶/۵۲	۱۰/۸۰	۷۶۳	n.d.	۶۴/۱۱	۷/۴۵	۴۳/۲۸	۱۰	۲۰	۵۰	۷۴	FN8
۲۱/۱۸	۸۷/۱۳	۵/۷۹	۶۶۶	n.d.	۶۷/۵۵	۴/۱۸	۴۱/۳۴	۲۰	۱۰	۲۵	۷۴	FN10
۲۳/۱۶	۸۴/۷۳	۸/۶۰	۷۲۸	n.d.	۶۵/۶۶	۶/۲۰	۴۱/۳۶	۲۰	۱۰	۵۰	۷۴	FN12
۲۲/۷۰	۹۰/۵۴	۷/۵۵	۶۸۴	n.d.	۶۷/۲۶	۵/۲۲	۴۳/۱۴	۲۰	۲۰	۲۵	۷۴	FN14
۲۶/۳۸	۸۵/۷۶	۱۲/۴۸	۷۹۱	۰/۰۱	۶۳/۴۱	۸/۵۹	۴۳/۳۵	۲۰	۲۰	۵۰	۷۴	FN16

* عیار مس بر حسب ppm است. همچنین فاکتورهای خردایش، شدت جداکننده مغناطیسی مرحله اول، شدت جداکننده مغناطیسی مرحله دوم و درصد وزنی جامد در خوراک جداکننده مرحله اول به ترتیب با علائم اختصاری Size, PMI, SMI و PSP مشخص شده اند.

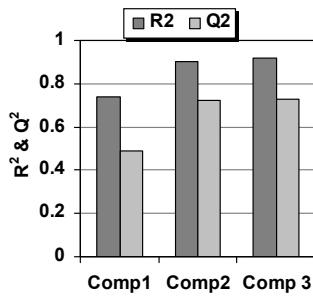
۵- تجزیه و تحلیل نتایج نهایی به روش حداقل مربعات جزئی

۵-۱- مدل سازی PLS

برای بررسی آماری نتایج نهایی، ۶ متغیر عیارهای سیلیس، آهن و مس و بازیابی آنها در نظر گرفته شد. از آنجاییکه در اکثر نتایج آزمایش ها مقدار گوگرد زیر حد حساسیت دستگاه آنالیز بوده واز طرفی مقدار آن در آزمایش

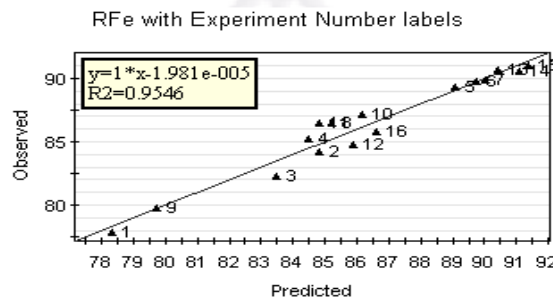
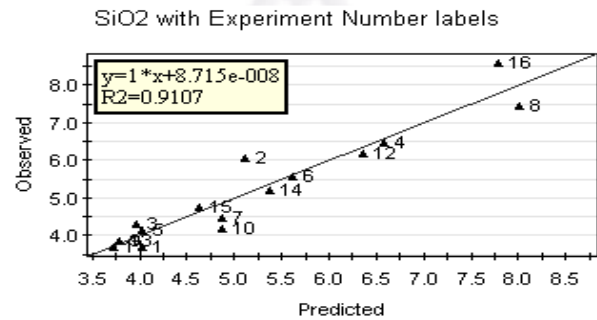
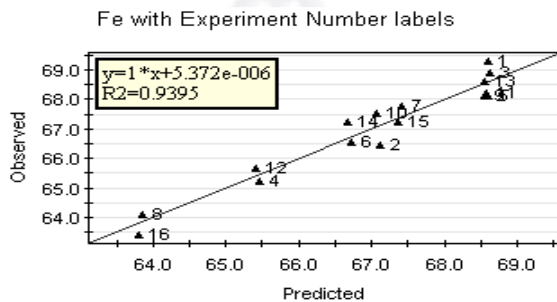
های انجام شده همواره در حد مجاز و قابل قبول بوده، در بررسی های آماری در نظر گرفته نشد.

مدل سازی نهایی پس از پالایش و بررسی های اولیه نشان داد که مدل PLS بسیار قابل قبول با سه مولفه اصلی می باشد بطوریکه مدل تهیه شده PLS میتواند بطور همزمان ۹۲/۱۱ درصد ($R^2 = 92.11$) از واریانس کل پاسخ ها را بطور همزمان تشریح نماید و حدود ۷۳ درصد ($Q^2 = 73$) از



شکل ۴: مشخصات مدل PLS تهیه شده

واریانس کل پاسخ ها را بطور همزمان پیش بینی نماید (شکل ۴). از طرفی، مدل سازی PLS بعد از پالایش نهایی نشان می دهد که هر یک از پاسخ های مورد مطالعه به خوبی میتوانند توسط مدل مذکور نیز توصیف و پیش بینی گردند. (شکل ۵).

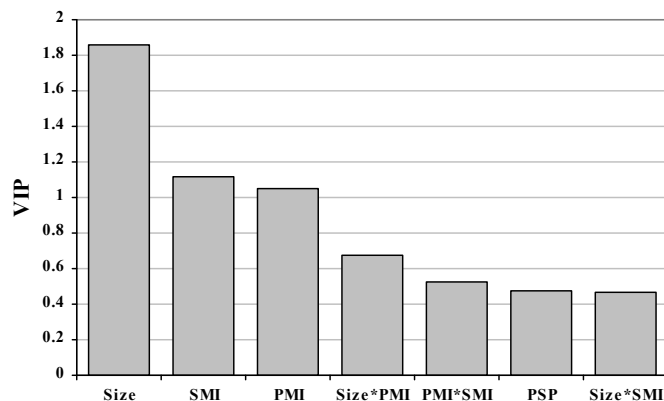


شکل ۵: منحنی های پیش بینی سه پاسخ مهم و مورد نظر توسط مدل PLS

نظر گرفتن تأثیرات متقابل درجه ۱، نمودار مربوطه برای مدل نهایی در شکل ۶ نشان داده شده است. بطوریکه میتوان گفت میزان خردایش و سپس به ترتیب شدت جدایش های مغناطیسی مرحله دوم و اول تأثیر گذارترین پارامترها بر روی پاسخ های مورد نظر می باشند. از طرفی نقش درصد وزنی جامد در مرحله اول جدایش مغناطیسی و تأثیر متقابل $Size*SMI$ به مراتب کمتر می باشد.

۵-۲- پالایش مدل PLS

بر خلاف مدل سازی MLR، روش PLS ابزار قدرتمندی جهت پالایش مدل و انتخاب پارامترهایی که تأثیر زیادی بر روی همه پاسخ ها دارند را ارایه می کند که تحت عنوان نمودار VIP^i نامیده می شود. بطوریکه اگر مقدار VIP برای یک پارامتری بیشتر از $0.7-0.8$ باشد، آن پارامتر تأثیر زیادی بر روی پاسخ ها دارد. که پس از پالایش مدل مربوطه با در



شکل ۶: نمودار VIP مدل نهایی. عبارات Size میزان خردایش، PMI شدت جداکننده مغناطیسی اول، SMI شدت جداکننده مغناطیسی مرحله دوم و PSP درصد وزنی جامد در مرحله اول می باشند

۳-۵- آنالیز واریانس مدل PLS

به منظور مشخص نمودن درجه اهمیت مدل و همچنین سطح اهمیت تأثیرات اصلی و متقابل در مدل نهایی، آنالیز واریانس مدل نهایی در سطح اعتماد ۹۰ درصد در جدول ۶ خلاصه گردیده است.

با توجه به مقادیر P (مقادیر احتمالی که اگر کمتر از ۰/۰۵ باشد نشان دهنده این است که ان اثر و یا مدل در سطح اعتماد ۹۵ درصد از لحاظ آماری با اهمیت می باشد) مربوط به مدل مشاهده می شود که مدل های برازش شده بر همه پاسخ ها در سطح اعتماد بیش از ۹۹ درصد هم معتبر می باشند. بعلاوه، بررسی تأثیر پارامتر های اصلی نشان می دهد که درصد وزنی جامد بر روی پاسخ های بازیابی سیلیس، عیار سیلیس و آهن تأثیر با اهمیتی در سطح اعتماد ۹۵ و حتی ۹۰ درصد ندارد که علت آن می تواند شستشوی مواد در مرحله دوم جدایش مغناطیسی و کنسانتره نهایی باشد که تأثیر آماری آن را کم نموده است. همچنین دو پارامتر اصلی اندازه و شدت جداکننده مغناطیسی اولیه بر روی بازیابی آهن تأثیر با اهمیتی در سطح اعتماد ۹۵ و حتی ۹۰ ندارد که علت آن احتمالاً فرومنیتیک بودن مواد و استفاده از دو مرحله مغناطیسی می باشد.

۴-۵- تفسیر تأثیرات متقابل عمده

بررسی تأثیرات متقابل عمده در شکل ۷ نشان داده شده است. هرچند که برخی تأثیرات متقابل دیگر هم وجود دارند که تأثیر آنها بر روی پاسخ ها کمتر بوده و از بیان آنها در اینجا خودداری شده است. یکی از تأثیرات متقابل عمده مابین خردایش و شدت جداکننده مغناطیسی مرحله اول (PMI*Size) بر روی پاسخ بازیابی آهن می باشد. بطوریکه

در خردایش ۶۲- میکرون با افزایش شدت مغناطیسی، بازیابی آهن زیاد می شود ولی در خردایش ۷۴- میکرون با افزایش شدت مغناطیسی بازیابی آهن کمتر می شود. که علت آن می تواند تغییرات عیار و بازیابی وزنی در حین فرایند باشد. بطوریکه در خردایش ۶۲- میکرون و شدت بالای مغناطیسی، هم عیار آهن در کنسانتره به دلیل آزاد شدن بهتر و همچنین بازیابی وزنی به علت شدت زیاد جداکننده مغناطیسی افزایش می یابد. ولی در خردایش ۷۴- میکرون، با افزایش شدت مغناطیسی بازیابی وزنی افزایش ولی عیار کنسانتره به دلیل درگیری بیشتر کاهش می یابد. به نظر می رسد که تأثیر شدت جداکننده مغناطیسی در افزایش وزن محصول به دلیل جذب ناخالصی ها در ابعاد درشت تر بیشتر می باشد و در نتیجه تأثیر متقابل عمده و حایز اهمیتی ایجاد می شود. جالب اینکه تأثیر متقابل مشابهی بر روی بازیابی آهن توسط جداکننده مغناطیسی دوم و میزان خردایش وجود دارد ولی شدت و بزرگی آن کمتر می باشد.

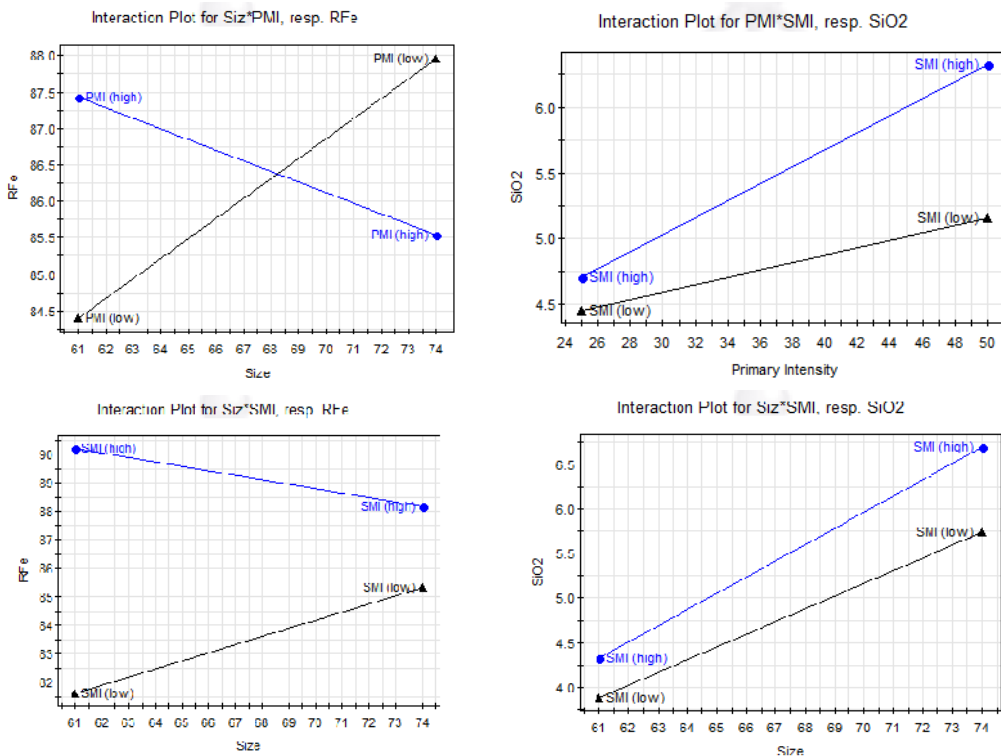
تأثیر متقابل نسبتاً مهم PMI*SMI بر روی عیار سیلیس مشاهده می شود. بطوریکه با افزایش شدت مغناطیسی مرحله دوم سبب افزایش بیشتر عیار سیلیس در کنسانتره می شود که علت آن می تواند به درگیری بیشتر سیلیس با کانی های منیتیتی و افزایش نیروی مغناطیسی در نگه داشتن ذرات سیلیکاته درگیر با منیتیت در میدان مغناطیسی باشد. زمانیکه شدت مغناطیسی مرحله اول کمتر می باشد، افزایش شدت مرحله دوم تأثیر زیادی بر روی عیار سیلیس ندارد که علت آن می تواند حذف عمده سیلیس در مرحله اول به دلیل شدت پایین جداکننده مغناطیسی باشد.

تأثیر متقابل آن به مراتب کم اهمیت تر از تأثیر PMI*SMI بر روی عیار سیلیس است.

همچنین تأثیر متقابل (Size*SMI) بر روی عیار سیلیس بسیار جزئی بوده و از لحاظ آماری با اهمیت تلقی نمی شود و

جدول ۶: نتایج آنالیز واریانس مدل و فاکتورهای اصلی و متقابل

مقادیر P						تأثیرات و مدل
R _{Cu} (%)	R _{SiO₂} (%)	R _{Fe} (%)	Cu (ppm)	SiO ₂ (%)	Fe (%)	
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰	مدل رگرسیون
۱/۴۲e-۱۲	۸/۸e-۱۰	۱/۷۲e-۱۷	۱/۶۹e-۱۳	۵/۲۹e-۱۰	۴/۷۵e-۱۹	ثابت مدل
تأثیرات عمده						اندازه (Size) شدت مغناطیس اولیه (PMI) شدت مغناطیس ثانویه (SMI) درصد جامد در خوراک مغناطیس اولیه (PSP)
۰/۰۰۰۱	۴e-۵	۰/۱۸۳	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۱	۲/۱۳e-۵	
۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۳	۰/۶۰۴	۰/۰۰۵۶	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۱	
۰/۰۰۵۵	۰/۰۱۲	۸/۸۱e-۶	۰/۱۵۸	۰/۰۴۴۶	۰/۰۲۲۷	
۰/۰۵۳	۰/۵۸۶	۰/۰۴۳	۰/۰۴۲	۰/۴۶۰۳	۰/۸۴۷۱	
تأثیرات متقابل						اندازه × شدت مغناطیس اولیه (Size*PMI) اندازه × شدت مغناطیس ثانویه (Size*SMI) شدت مغناطیس اولیه × شدت مغناطیس ثانویه (PMI*SMI)
۰/۴۹۵	۰/۰۵۰	۰/۰۰۱۴۷	۰/۱۴۹	۰/۰۳۱۵	۰/۰۱۸۶	
۰/۳۲۰	۰/۶۵۱	۰/۰۰۱	۰/۸۵۹	۰/۴۱۷	۰/۵۱۳۲	
۰/۳۰۶	۰/۲۲۹	۰/۰۰۶۷	۰/۰۷۷	۰/۱۶۴	۰/۰۶۵۹	



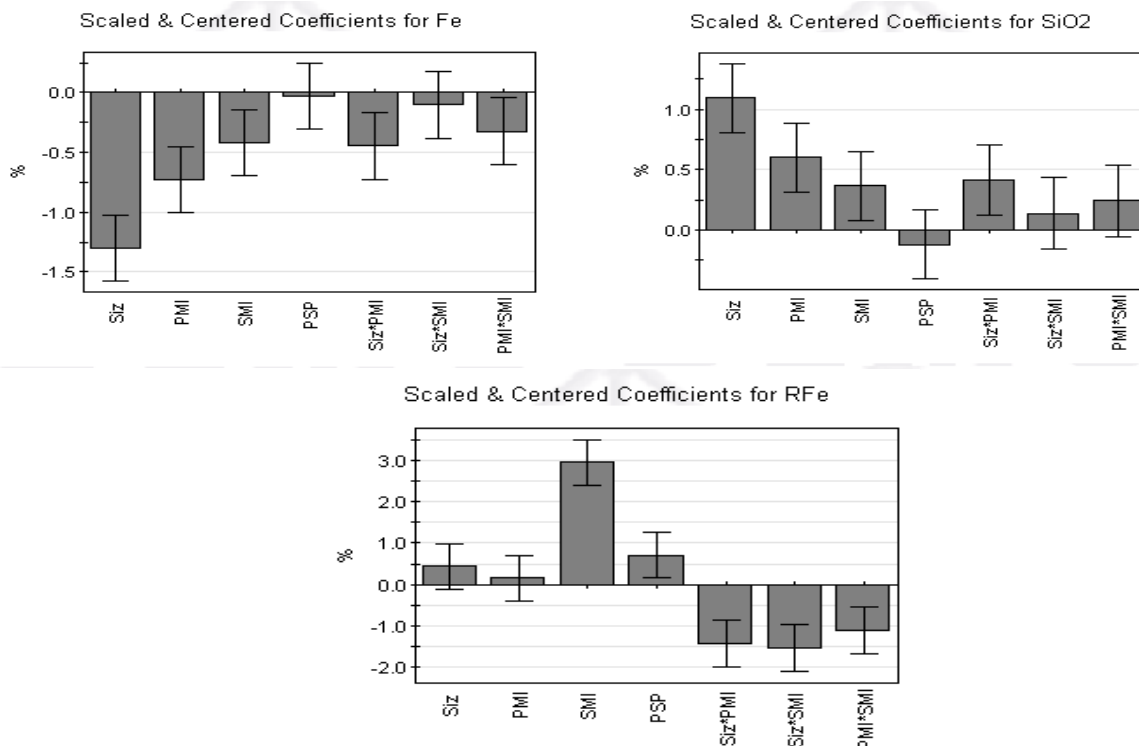
شکل ۷: تأثیرات متقابل عمده بین پارامترها

خردایش بر روی تمامی پاسخ ها دارد. از طرفی تأثیر افزایش تمامی پارامترها در راستای کاهش عیار آهن در کنسانتره است که تقریباً در خلاف جهت برای عیار سیلیس و مس در کنسانتره است. به عبارتی برای افزایش عیار آهن در کنسانتره بایستی شدت جدایش های مغناطیسی و اندازه ذرات و

جهت و بزرگی تأثیر پارامترها بر روی پاسخ ها
برای بررسی جهت و بزرگی تغییرات پاسخ ها بر حسب متغیرهای مدل انتخابی، ضرایب رگرسیون مدل نهایی PLS در سطح اعتماد ۹۰ درصد در شکل های ۸ تهیه شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهند که بیشترین تأثیر را میزان

سایر پارامترها است. بر اساس ضرایب رگرسیون بدست آمده معادلات پارامتری پاسخ های عمده محاسبه و نتایج آن ها در معادلات ۱ تا ۳ ارایه شده اند.

همچنین درصد وزنی جامد کاهش یابد. از طرفی بر روی پاسخ بازیابی آهن سه تأثیر متقابل نقش با اهمیتی داشته و تأثیر شدت جدایش مغناطیسی مرحله دوم بر روی بازیابی بیشتر از



شکل ۸: ضرایب رگرسیون برخی از پاسخ ها به روش PLS و معادلات سه پاسخ عمده

$$Fe (\%) = 67/03 - 1/3 Size - 0/73 PMI - 0/42 SMI - 0/3 PSP - 0/45 (Size \times PMI) - 0/1 (Size \times SMI) - 0/32 (PMI \times SMI) \quad (1)$$

$$SiO_2 (\%) = 5/16 + 1/1 Size + 0/6 PMI + 0/37 SMI - 0/12 PSP + 0/41 (Size \times PMI) + 0/14 (Size \times SMI) + 0/24 (PMI \times SMI) \quad (2)$$

$$R_{Fe} (\%) = 86/3 + 0/43 Size + 0/16 PMI + 2/96 SMI + 0/11 PSP - 1/45 (Size \times PMI) - 1/55 (Size \times SMI) - 1/1 (PMI \times SMI) \quad (3)$$

۵-۶- بررسی چگونگی تأثیر پارامترها بر روی پاسخ ها به

روش سطوح همتراز

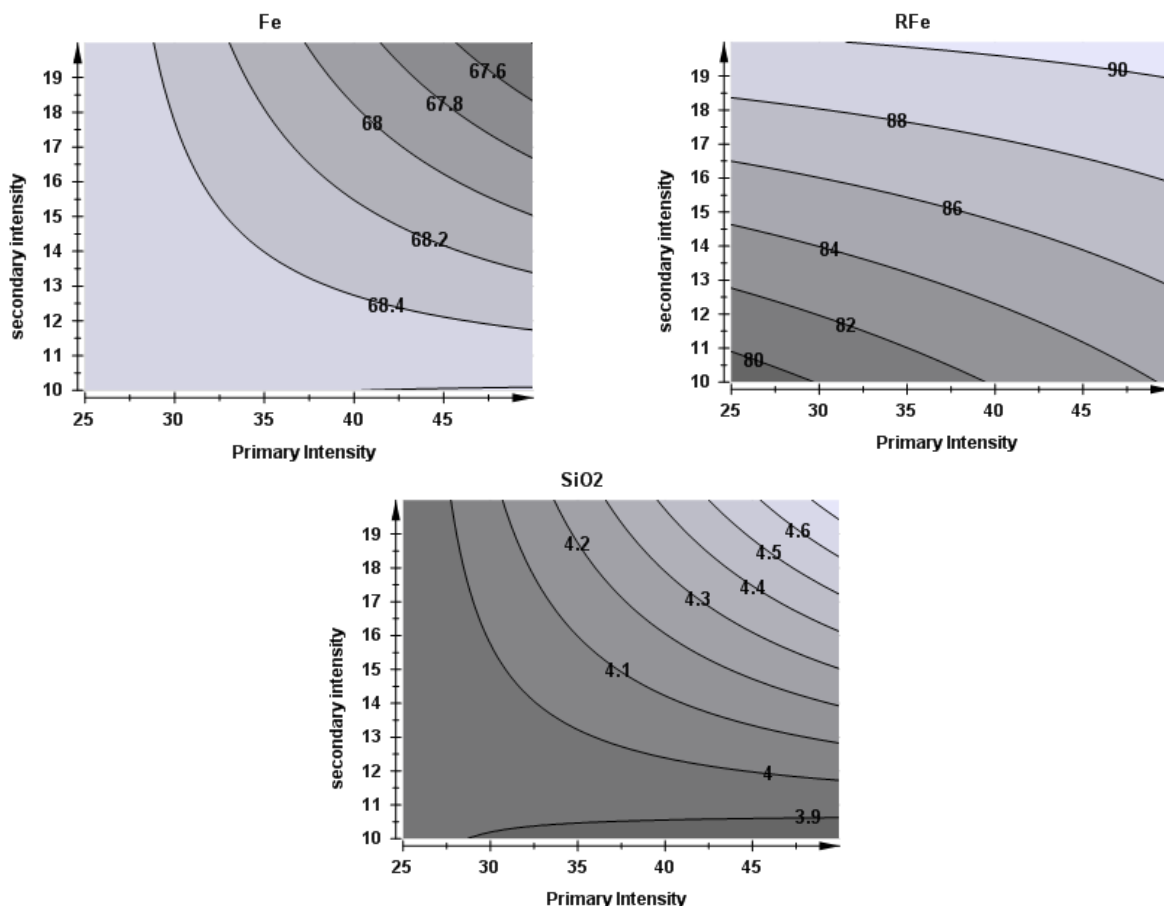
شدت های بالای جداکننده دوم مغناطیسی بدست می آید که از هدروی بیشتر آهن جلوگیری می شود. از طرفی عیار سیلیس تحت تأثیر شدت هر دو جداکننده مغناطیسی قرار می گیرد هر چند که تأثیر شدت جداکننده مغناطیسی مرحله دوم بر روی کاهش مقدار سیلیس کنسانتره زمانیکه شدت مرحله اول بیشتر باشد، بیشتر است. می توان نتیجه گرفت که نقش شدت جداکننده مغناطیسی دوم در کاهش سیلیس و بازیابی آهن در خردایش ۶۲- میکرون به مراتب بیشتر از نقش شدت جداکننده مغناطیسی مرحله اول است. بطوریکه به ازای هر شدت جداکننده مغناطیسی اول در محدوده کار شده، با افزایش شدت مرحله دوم امکان بازیابی بالای آهن امکان پذیر

با توجه به مشخص شدن تأثیر عمده سه پارامتر اصلی بر روی فرایند تهیه کنسانتره آهن از باطله، در این قسمت سعی شده است با تهیه سطوح کنتوری پاسخ های مهم بر حسب پارامترهای عمده، نحوه تغییرات آنها بررسی شوند. شکل های ۹ تغییرات سه پاسخ عمده بر حسب شدت جداکننده های مغناطیسی با میزان خردایش ۶۲- میکرون را نشان می دهد و حد واسط بقیه پارامترها در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهند که بیشترین مقدار عیار آهن منطبق بر شدت های مغناطیسی کم بوده و بعلاوه با حداقل کردن شدت هر یک از جداکننده ها امکان تهیه کنسانتره با عیار بالا و قابل قبول وجود دارد اما بازیابی بالای آهن در

مجاز می باشد. از طرفی تهیه کنسانتره ای با عیار بالا فقط زمانی امکان پذیر است که شدت جداکننده های مغناطیسی و بخصوص شدت جداکننده مرحله اول حتماً در سطح پایین تنظیم شوند و از طرفی در چنین شرایطی بازیابی آهن تا حدودی کاهش خواهد یافت. واضح است که عیار سیلیس کم و بیش رفتار مشابه به خردایش ۶۲- میکرون را نشان می دهد هر چند که مقادیر عددی آن در خردایش ۷۴- میکرون به مراتب بالاتر می باشد و گرادیان تغییرات آن در خردایش های ۷۴- میکرون به دلیل درگیری بیشتر یکنواخت تر می باشد (از ذکر منحنی ها برای ۷۴- میکرون خود داری شد).

است. بررسی محدوده تغییرات عیار سیلیس بر حسب شدت جداکننده های مغناطیسی نشان می دهد که با ماکزیم نمودن شدت هر دو جداکننده مغناطیسی مقدار سیلیس کنسانتره افزایش خواهد یافت ولی با افزایش شدت فقط یکی از جداکننده های مغناطیسی امکان تهیه کنسانتره مطلوب آهن با سیلیس در حد مجاز وجود دارد هر چند که مرحله دوم بهتر از مرحله اول است.

بررسی همان سطوح همتراز برای خردایش ۷۴- میکرون داد که اولاً سیلیس کنسانتره در این حد خردایش به مراتب بالاتر از ۶۲- میکرون خواهد بود و همواره بالاتر از ۵ درصد



شکل ۹: تغییرات سه پاسخ عمده بر حسب شدت جداکننده های مغناطیسی با میزان خردایش ۶۲- میکرون. حد واسط بقیه پارامترها در نظر گرفته شده است.

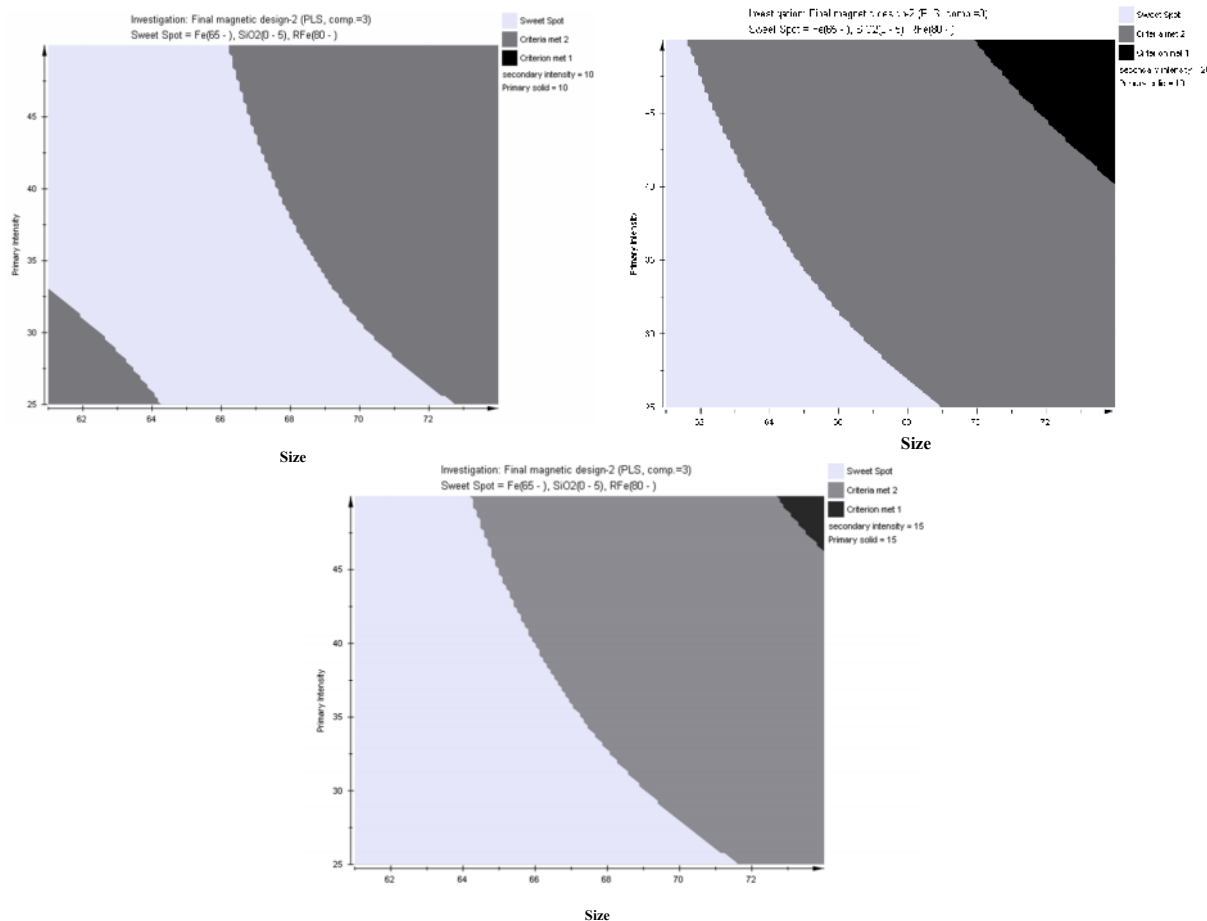
۶- دیاگرام های مطلوبیت

برای این منظور معیارهای دستیابی به کنسانتره آهن با عیار بیشتر از ۶۵ درصد، بازیابی بیشتر از ۸۰ درصد و مقدار سیلیس کمتر از ۵ درصد که مطلوب ما می باشند در نظر گرفته شد. و سپس شدت جداکننده مغناطیسی مرحله دوم در سطوح بالا و پایین طرح مورد آزمایش و میانگین آنها در

به منظور نهایی کردن بررسی ها، نمودار مطلوبیت تهیه شد. این نمودار با روی هم قرار دادن همزمان تمامی پاسخ ها، میدانی را بر حسب معیار های مورد نیاز (مطلوبیت) مشخص می کند. به عبارتی محلی بهینه با این نمودارها مشخص می شود که در آن تمام معیار های مورد نیاز صادق می باشند.

کنسانتره مطلوب زمانی که شدت جداکننده مغناطیسی پایین تر باشد، وسیع است و به راحتی میتوان به کنسانتره مطلوب دست یافت.

نظر گرفته شد. نتایج شکل های ۱۰ بر حسب متغیرها نشان داده شده است. واضح است که میدان عمل بهینه وسیع (محدوده رنگ روشن در شکل) برای تهیه کنسانتره مورد نظر وجود دارد. ملاحظه می شود که میدان عمل برای تهیه



شکل ۱۰: نمودار مطلوبیت با در نظر گرفتن معیارها و تمامی پاسخها (نواحی روشن میدان عمل بهینه را نشان می دهند)

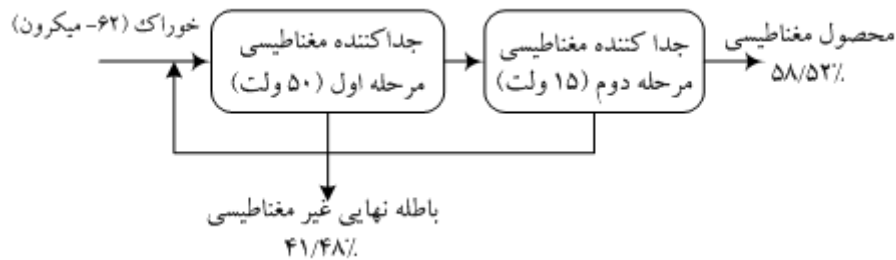
میکرون) خرد گردید. پس از تست برای سه نمونه مورد آزمایش در شرایط فوق، نتایج جدول ۷ بدست آمده است. لازم به ذکر است که باطله مرحله دوم در هر آزمایش یکبار طبق فلوشیت آرایش داده شد که مقدار متوسط آن در سه آزمایش حدود ۱۴/۷ درصد بار اولیه بود. پس از آرایش محصول میانی موازنه مدار محاسبه شده است. از طرفی بخش عمده باطله غیر مغناطیسی در مرحله اول حذف می گردد که بسیار مناسب از نقطه نظر عملیات صنعتی می باشد. نتایج ارایه شده بخوبی نشان می دهند که امکان تهیه کنسانتره آهن با کنترل مواد مضر در حد پایین و بسیار قابل قبول به راحتی با دو

۷- تست نهایی مدار پیشنهادی برای تهیه کنسانتره آهن

با توجه با نتایج بدست آمده از نمودار مطلوبیت، به منظور ارزیابی عملی و نهایی مدار مورد نظر برای تهیه کنسانتره آهن و محاسبات متالورژیکی مدار، مدار ارزیابی شده در شکل ۱۱ مجدداً مورد بررسی قرار گرفت. شدت جدا کننده مغناطیسی مرحله اول ۵۰ ولت و مغناطیس مرحله دوم ۱۵ ولت در نظر گرفته شد. درصد وزنی جامد در هر دو مرحله ۱۰ درصد در نظر گرفته شد و نمونه های مذکور تا ۲۳۰- مش (۶۲-

XRD کنسانتره نهایی، نشان داد که فاز عمده آهن در کنسانتره (بیش از ۹۸ درصد) از نوع منیتیت است.

مرحله جدایش مغناطیسی میسر می باشد. نتایج بدست آمده انطباق خوبی با نتایج نمودارهای مطلوبیت دارند. نتایج



شکل ۱۱: مدار نهایی جهت تهیه کنسانتره آهن

جدول ۷: نتایج متالورژیکی مدار نهایی مورد نظر

بازیابی (%)			ترکیب شیمیایی (%)				جریان ها
R_{SiO_2}	R_S	R_{Fe}	S	Fe	SiO_2	$Wt\%$	
-	-	-	۰/۱۸	۳۲/۰۵	۲۹/۸۳	۱۰۰	خوراک اولیه
۶/۱۴	۰/۲۴۳	۹۲/۱۹	۰/۰۰۱	۶۷/۴۳	۴/۱۸	۴۳/۸۲	مواد مغناطیسی

منیتیتی در بخش سیلیکاته حذف سیلیس نسبت به

گوگرد در خردایش بیشتر امکان پذیر است.

۵. مطالعات تکمیلی نشان داد که با خردایش باطله تا

۲۳۰- مش (۶۱- میکرون) و با دو مرحله جدایش

مغناطیسی تر امکان تهیه کنسانتره با بازیابی های

۶۷/۲-۶۹/۳۰ درصد آهن، عیار های آهن ۷۸-۹۲

درصد با عیار سیلیس ۳/۷-۴/۵ درصد بسته به

پارامترهای عملیاتی در جداکننده های مغناطیسی

امکان پذیر می باشد.

۶. مدل سازی PLS نشان داد که میزان خردایش و

سپس به ترتیب شدت جداکننده های مغناطیسی

ثانویه و اولیه از عوامل خیلی مهم تأثیر گذار در

فرایند تهیه کنسانتره آهن و کنترل مواد مضر می

باشد.

۷. با استفاده از نمودار مطلوبیت محدوده های مناسب

در عمل برای تهیه کنسانتره مطلوب آهن مشخص

و تایید گردید. بطوریکه اگر شدت جداکننده

مغناطیسی مرحله اول ۵۰ ولت، شدت مرحله دوم

۱۵ ولت، و درصد جامد در هر دو مرحله دوم ۱۰

۸- نتایج

بر اساس مطالعات انجام شده نتایج زیر را می توان استنتاج

نمود:

۱. مطالعات کانی شناسی، آنالیز شیمیایی و فرآوری

نمونه معرف از باطله معدن مس مزرعه نشان داد که

باطله معدن مس مزرعه پتانسیل تولید کنسانتره

آهن با کیفیت قابل قبول را دارد.

۲. روش های مختلف نشان داد که مقدار اکسید های

آهن در باطله حدود ۴۵/۸ درصد می باشد همچنین

درجه آزادی بخش کانی منیتیت به مراتب بیشتر از

کانی های مس می باشد.

۳. با استفاده از آزمایش های اولیه مشخص شد که با

تغییر شدت میدان مغناطیسی در دو مرحله به

راحتی می توان کنسانتره مطلوب آهن با بازیابی بالا

و قابل قبول را بدست آورد.

۴. مطالعات جدایش مغناطیسی نشان داد که حذف

عنصر مزاحم گوگرد نسبت به سیلیس به راحتی

امکان پذیر می باشد ولی به دلیل وجود اذخال های

iron ore fines and slime using chemical additives, *International Journal of Mineral Processing*, vol. 11, pp. 285-302.

[9] Prasad, N., Ponomarev, M. A., Mukherjee, S.K., Sengupta, P.K., Roy, P.K., & Gupta, S. K., 1988, "Introduction of new technologies for beneficiation of Indian hematite ores, reduction of losses and increase in their quality", in XVI International Mineral Processing Congress, Forssberg, pp.1369-1380.

[10] Das, B., Mohapatra, B. K., Reddy, P. S. R., & Das, S., 1995, "Characterization and beneficiation of iron ore slimes for further processing", *Powder Handling and Process*, vol. 7, pp. 41-44.

[11] Pradip, P., 1995, "Beneficiation of alumina-rich Indian iron-ore slimes", *Metals Materials and Processes*, vol. 6, pp. 179-194

[12] Roy, S., 2009, "Recovery Improvement of Fine Iron Ore Particles by Multi Gravity Separation", *The Open Mineral Processing Journal*, Vol. 2, 17-30.

[13] Srivastava, M. P., Pan, S. K., Prasad, N., & Mishra, B. K., 2001, "Characterization and processing of iron ore fines of Kiriburu deposit of India", *International Journal of Mineral Processing*, vol. 61, pp 107-93.

[14] Olubambi, P. A., & Potgieter, J. H., 2005, "Effectiveness of gravity concentration for the beneficiation of itakpe (Nigeria) iron ore achieved through jigging operation", *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, vol. 4, pp. 21-30.

[15] Quast, K. B., 2000, "A Review of hematite flotation using 12-Carbon chain collectors", *Mineral Engineering*, vol. 13, pp. 1361-1376.

[16] Arol, A. I., & Aydogan, A., 2004, "Recovery enhancement of magnetite fines in magnetic separation", *Colloids Surface A: Physico-chemistry Engineering Aspects*, vol. 232, pp. 151-154.

[17] Eriksson, L., Johansson, E., Kettaneh-Wold, N., Wikstrom, C., & Wold, S., "Design of Experiments (principles and enlarged edition)", *Umetrics Academy*, Umea, Sweden, 2008.

درصد باشد به سادگی کنسانتره ای با عیار بیش از ۶۷٪ آهن، بازیابی بیشتر از ۹۲٪ و با مقدار سیلیس کمتر از ۴/۵٪ تولید می شود.

تشکر و قدردانی

نویسنده از مسئولین محترم امور تحقیق و توسعه شرکت صنایع ملی مس ایران که امکان انجام این تحقیق و اجازه انتشار این مقاله را فراهم آوردند، تشکر می نماید.

منابع

[1] Roy, S., Das, A., & Mohanty, M. K., 2007, "Feasibility to producing pellet grade concentrate by beneficiation of iron ore slimes in India", *Separation Science and Technology*, vol. 42, pp. 3271-3287.

[2] Roy, S., Das, A., 2008, "Characterization and processing of low grade iron ore slime from Jilling area of India", *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 29, pp. 213-231.

[3] Veghar, R., Tohidi, N., "Preparation of iron and steel production furnace feed", *Tehran University*, Tehran, Iran, 1997.

[4] Mabodi Babil Olliaei, A., "Optimization of magnetic separation circuits in Gole-ghohar Plant aiming at decreasing silica in final concentrate", *M.Sc. Thesis*, *Tehran University*, 2009.

[5] Das, B., Prakash, S., Mohapatra, B.K., Bhaumik, S.K., & Narasimhan, K. S., 1992, "Beneficiation of iron ore slimes using hydrocyclone", *Mineral and Metallurgical Processing*, vol. 9, pp. 101-103.

[6] Gujraj, B., Sharma, J.P., Baldawa, A., Arora, S. C. D., Prasad, N., & Biswas, A. K., 1983, "Dispersion-flocculation studies on hematite-clay systems", *International Journal of Mineral Processing*, vol. 11, pp. 285-302.

[7] Rao, K. H., & Narasimhan, K. S., 1985, "Selective flocculation applied to Barsuan iron ore tailings", *International Journal of Mineral Processing*, vol. 14, pp. 67-75.

[8] Mahiuddin, S., Bandopadhyay, S., & Baruah, J. N., 1989, "A study on the beneficiation of Indian