

(مقاله پژوهشی)

## ارزیابی فرآوری فسفات از سنگ سبز با استفاده از مدار فعلی کارخانه فرآوری فسفات اسفوردی

حسین برزگر قهفرخی<sup>۱</sup>، محمدرضا صمدزاده یزدی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- پژوهشکده فناوری های معدنکاری، دانشگاه یزد، یزد ایران

(دریافت: اردیبهشت ۱۴۰۰، پذیرش: مهر ۱۴۰۰)

### چکیده

مجتمع فسفات اسفوردی به‌عنوان مهم‌ترین تولیدکننده فسفات در ایران، از ذخیره‌ای با منشأ آذرین، به روش فلوتاسیون کنسانتره آپاتیت تولید می‌کند. مدار فعلی این کارخانه برای جدایش فسفات از کانی‌های آهن‌دار طراحی شده است. بخشی از ماده معدنی، دارای کانی‌های سیلیکاته منیزیم‌دار به‌عنوان باطله می‌باشد که به سنگ سبز معروف است. تا به امروز از سنگ سبز به‌عنوان خوراک کارخانه فرآوری استفاده نشده است. درحالی‌که پنج میلیون تن از ذخیره معدن را سنگ سبز با عیار متوسط ۷ درصد  $P_2O_5$  تشکیل می‌دهد. در این تحقیق فرآوری سنگ سبز با استفاده از مدار فرآوری فعلی بررسی شد. برای این منظور نمونه سنگ سبز مورد شناسایی قرار گرفت و کانی‌های موجود و درجه آزادی آن‌ها مشخص شد. نتایج نشان داد که بخشی از کانی‌های آهن‌دار به‌صورت مگنتیت می‌باشند. آزمایش‌های جدایش مغناطیسی شدت بالا مشخص کرد که بخشی از کانی‌های سیلیکاته به کنسانتره جدایش مغناطیسی آهن راه می‌یابند (بازیابی ۱۰/۳۸ درصد  $MgO$  در شدت ۵۰۰۰ گوس). آزمایش‌های فلوتاسیون نشان داد که بازیابی برای نمونه سنگ سبز بسیار پایین است و در شرایط معمول بازیابی و عیار  $P_2O_5$  ۷/۳۹ و ۲۱/۱۱ درصد به دست آمد که بعد از نرمه گیری به ۳۸/۶۵ و ۲۷/۹۸ درصد ارتقا یافت. پایش کارایی مدار فعلی با خوراک‌دهی سنگ سبز انجام شد و بازیابی کم فلوتاسیون، همراه با پایداری زیاد کف مشاهده گردید. همچنین کارایی مدار آسیا کنی و سیکلون‌های نرمه گیری بررسی شد. در ادامه پیشنهادهایی جهت بهبود مدار فعلی کارخانه برای فرآوری سنگ سبز ارائه گردید.

### کلمات کلیدی

فسفات اسفوردی، سنگ سبز، فلوتاسیون، اصلاح مدار فرآوری، کانی‌های سیلیکاته

\* عهده‌دار مکاتبات: samadzadehyazdi@yazd.ac.ir

## ۱- مقدمه

سنگ معدن به‌عنوان منبع اصلی فسفر، یک منبع حیاتی غیرقابل‌تجدید است. مهم‌ترین کانی فسفردار آپاتیت است. حدود ۹۵ درصد از تولید جهانی فسفات برای تهیه اسید فسفریک و پس‌از آن برای تولید کود شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد که باعث قرار گرفتن فسفر در ردیف مواد و محصولات استراتژیک شده است [۱]. بیش از ۲۰۰ نوع سنگ فسفات معروف وجود دارد. اصلی‌ترین کانی فسفات، آپاتیت است. منابع فسفات در جهان به‌طور عمده از سنگ‌های رسوبی فسفاتی (فسفریت‌ها)، آپاتیت‌های آذرین، دگرگونی و فسفات‌های آلی (گوانو) تشکیل شده است [۲]. اگرچه ذخایر فسفات رسوبی اکثریت ذخایر فسفات جهان را تشکیل می‌دهند و سهم ۸۰ درصدی در تولید فسفات جهان را دارا می‌باشند، اما ذخایر آذرین و دگرگونی نیز با تولید تقریبی ۲۰-۱۵ درصد از فسفات جهان از اهمیت خاصی برخوردار هستند [۳]. اکثر ذخایر فسفات آذرین جهان در جنوب برزیل، جنوب شرقی آفریقا، فنلاند، سوئد و روسیه تشکیل شده‌اند و منابع فسفات آذرین خاورمیانه محدود به ذخایر آپاتیت ایران است [۴]. بیش از ۶۰ درصد فسفات قابل‌فروش در جهان از طریق فلوتاسیون به دست می‌آید [۵]. فلوتاسیون به‌طور ویژه برای فرآوری خوراک‌های دانه‌ریز که به‌طور معمول با روش‌های متداول جدایش ثقلی قابل‌جدایش نیستند، بکار می‌رود [۴]. کانه‌های فسفات آذرین و رسوبی تفاوت‌های بسیاری را شامل می‌شوند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌تواند به تفاوت در نوع باطله آن‌ها اشاره کرد. روش پرعیارسازی این نوع سنگ‌ها بسته به باطله‌های همراه آن‌ها می‌تواند ساده یا پیچیده باشد. فرآیند مشترک در پرعیارسازی تمام فسفات‌های آذرین که شامل گانگ سیلیکاته، کربناته و کانی‌های آهن هستند، فلوتاسیون آپاتیت توسط یک کلکتور اسید چرب در محیط قلیایی می‌باشد [۶]. از نشاسته می‌توان به‌عنوان رایج‌ترین بازداشت‌کننده برای فلوتاسیون آپاتیت نام برد که جهت بازداشت کانی‌های کربناته و اکسیدهای آهن مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷، ۸]. سیلیکات سدیم نیز در فلوتاسیون فسفات‌های آذرین و یا رسوبی باهدف از بین بردن رسوبات کلسیم از سطح کوارتز مورد استفاده قرار می‌گیرد. این عمل باعث افزایش جذب کلکتور اسید چرب بر روی ذرات آپاتیت و جلوگیری از جذب آن توسط ذرات سیلیس می‌شود [۸].

مراحل فرآوری فسفات‌های آذرین دارای سیلیس، اغلب شامل فلوتاسیونی با مسیر مستقیم است، درحالی‌که برای مواردی که با کانسنگ‌های غنی از ناخالصی‌هایی همچون باریت، مگنتیت و کلسیت مواجه باشد، به فرآیندهای پیچیده‌تری نیاز خواهد بود [۹، ۱۰]. روش‌های جدایش مغناطیسی به‌منظور حذف آهن و فلوتاسیون مس، کلسیت و باریت برای رسیدن به محصول موردنظر در فسفات‌های آذرین بکار گرفته شده است [۴].

معدن فسفات اسفوردی با میزان ذخیره ۱۲ میلیون تن  $P_2O_5$  با عیار متوسط ۱۳/۹ درصد بزرگ‌ترین ذخیره از نوع آذرین در کشور می‌باشد [۱۱]. مطالعه زمین‌شناسی کانسار اسفوردی نشان می‌دهد که این کانسار در بقایای هوازده سنگ‌های پرکامبرین، کامبرین و مزوزوئیک واقع شده است. واحدهای سنگی محدوده کانسار مرکب از سنگ‌های ولکانیکی و رسوبی و همچنین سنگ‌های آذرین نفوذی می‌باشند که به‌شدت چین‌خورده و گسل خورده شده‌اند. در فازهای اکتشافی معدن فسفات اسفوردی، پنج افق معدنی متفاوت برای این کانسار در نظر گرفته شده است که شامل افق‌های: (۱) آپاتیت، (۲) آهن-آپاتیت، (۳) دایک‌های آپاتیت، (۴) زون‌های آغشته (ریولیت‌ها، زون‌های برشی، دایک‌های دیابازیکی) و (۵) سنگ سبز می‌باشد [۱۲]. در حال حاضر خوراک کارخانه فرآوری از افق‌های آپاتیت، دایک‌های آپاتیت و آهن-آپاتیتی تأمین می‌شود. افق سنگ سبز، متشکل از یک توده نفوذی دگرسان، با ذخیره‌ای بالغ بر پنج میلیون تن و عیار متوسط ۷ درصد  $P_2O_5$ ، منبعی مناسب به‌عنوان جایگزین خوراک کارخانه فرآوری به شمار می‌رود. برخورد پله‌های استخراجی به افق‌های سنگ سبز، استخراج ناگزیر و انباشت آن‌ها را در پی دارد که مستلزم صرف هزینه می‌باشد؛ بنابراین لزوم استفاده از سنگ سبز در مدار فرآوری برای کاهش این هزینه‌ها، احساس می‌شود.

برای سنگ سبز سه دپو در معدن اسفوردی تعریف شده که سنگ‌ها پس از استخراج با توجه به عیارشان (کم‌عیار، پرعیار و عیار متوسط) به آن‌ها منتقل و تفکیک می‌شوند. این دیوها در حال حاضر بیش از یک میلیون تن خوراک آماده را شامل می‌شوند.

در فرآوری سنگ سبز مشکل حضور نرمه‌ها دوچندان می‌شود، زیرا کانی‌های ترمولیت و اکتینولیت موجود در این سنگ هوازده بوده و تأثیر منفی شدید بر فرآیند فلوتاسیون



شکل ۱- مراحل انجام تحقیق

## ۲-۱- معرفی مدار کارخانه فرآوری فسفات

### اسفوردی

مواد معدنی پس از استخراج از معدن توسط کامیون به واحد سنگ‌شکنی حمل می‌شوند. مواد حمل شده با ابعاد حداکثر ۶۰۰ میلی‌متر از طریق سرنده گریزلی با ابعاد ۶۰cm × ۶۰cm با استفاده از خوراک دهنده به واحد سنگ‌شکن فکی با ظرفیت ۱۰۰ تن در ساعت منتقل می‌شوند. در این بخش مواد با ابعاد زیر ۷۵ میلی‌متر قبل از ورود به سنگ‌شکن فکی جدا می‌شوند. تناژ این مواد جدا شده ۴۰ تن بر ساعت است. محصول سنگ‌شکن فکی با ابعاد ۰-۱۷۵ میلی‌متر به همراه نرمه با ابعاد ۰-۷۵ میلی‌متر وارد سنگ‌شکن مخروطی می‌شود و محصول آن دارای ابعاد ۰-۵۰ میلی‌متر می‌باشد. این مواد سپس وارد سرنده دوطبقه می‌شوند که سایز جدایش آن ۲۲ میلی‌متر است و ذرات درشت مجدداً در یک مدار بسته به سنگ‌شکن مخروطی منتقل می‌شوند. ذرات ریزتر از ۲۲ میلی‌متر در انبار خوراک واحد پرعبارسازی به ظرفیت ۴۰۰۰ مترمکعب انباشت می‌شوند، سپس توسط سه خوراک دهنده و نوار نقاله با ظرفیت ۷۵/۵ تن بر ساعت و  $d_{80}$  معادل ۱۴ میلی‌متر وارد آسیای میله‌ای می‌شوند. خروجی آسیای میله‌ای به شکل پالپ با  $d_{80}$  معادل ۶۰۰ میکرون و با فشار ۰/۰۶ بار به هیدروسیکلون پمپ می‌شود. ته‌ریز سیکلون با دانه‌بندی  $d_{80}$  معادل ۷۵۰ میکرون توسط آسیای گلوله‌ای که با هیدروسیکلون در مدار بسته قرار دارد تا رسیدن به اندازه کوچکتر از ۱۰۰ میکرون تحت خردایش مجدد قرار می‌گیرد. سرریز سیکلون با دانه‌بندی ریزتر از ۱۵۰ میکرون جهت نرمه‌گیری با فشار ۲/۴ بار به یک سیکلون خوشه‌ای (که نقش نرمه‌گیر را دارد) پمپ می‌شود. سرریز سیکلون

می‌گذارند؛ بنابراین حضور سیلیکات‌های منیزیم‌دار و ذرات نرمه دو مشکل اصلی فلوتاسیون سنگ سبز می‌باشند.

بعضی از محققین از روش فلوتاسیون معکوس و بازداشت آپاتیت برای جدایش سیلیکات‌ها (کوارتز) استفاده کرده‌اند. در یک تحقیق از روش‌های فلوتاسیون معکوس دومرحله‌ای با استفاده از کلکتور اسید چرب و آمین برای فلوتاسیون کربنات‌ها و کوارتز و اسید فسفریک و اکسید کلسیم برای بازداشت آپاتیت استفاده شده است [۱۳]. در تحقیق دیگر از سدیم تری پلی فسفات برای بازداشت آپاتیت در فلوتاسیون معکوس استفاده شده است [۱۴]. همچنین استفاده از نانوذرات پلی اکریل آمید (Hy-PAM) برای بازداشت سیلیکات‌ها در فلوتاسیون مستقیم آپاتیت پیشنهاد شده است [۱۵].

کلکتورهای فلوتاسیون معمولاً به حضور نرمه در خوراک حساس هستند [۱۶]. حضور ذرات بسیار ریز در فلوتاسیون باعث پوشش ذرات فسفات و همچنین جلوگیری از اتصال آن‌ها به حباب‌های هوا شده و بازیابی فلوتاسیون آپاتیت را به شدت کاهش می‌دهند [۱۷]. همچنین این ذرات نرمه، مقدار زیادی از مواد شیمیایی فلوتاسیون را مصرف می‌کنند و باعث کاهش کارایی جدایش می‌شوند [۱۴، ۱۶، ۱۸، ۱۹]. کارایی جدایش فسفات از باطله‌ها در ابعاد کوچکتر از ۳۸ میکرون به شدت کم می‌شود [۲۰]. بهینه اندازه ذرات آپاتیت در فلوتاسیون برابر با ۳۸-۱۰۵ میکرون بیان شده است [۲۱]. به تأثیر منفی نرمه‌ها بر فلوتاسیون آپاتیت در فلوتاسیون کاتیونی نیز اشاره شده است [۲۲].

در این تحقیق بررسی عملکرد مدار فعلی کارخانه فرآوری فسفات اسفوردی برای فرآوری سنگ سبز برای اولین بار انجام شده است. برای این منظور نمونه‌گیری از دیوهای سنگ سبز جهت شناسایی اولیه این نوع سنگ انجام گرفت. آزمایش‌های فلوتاسیون بر روی این نمونه انجام پذیرفت. همچنین در یک شیفت کاری نمونه سنگ سبز به‌عنوان خوراک وارد مدار فرآوری کارخانه شده و از قسمت‌های مختلف مدار آسیاکنی، طبقه‌بندی و فلوتاسیون نمونه‌گیری صورت پذیرفت. پس از بررسی نمونه‌ها و شناسایی مشکلات، پیشنهادهایی جهت رفع آن‌ها ارائه شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

روند کلی بررسی‌های انجام شده در این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است.

سنگ سبز به‌عنوان خوراک در مدار کارخانه فرآوری اسفوردی، از قسمت‌های مختلف مدار شامل ورودی و خروجی آسیای میله‌ای (جریان‌های ۱۱۱ و ۱۱۲)، خروجی آسیای گلوله‌ای (جریان ۱۱۶)، سرریز و ته‌ریز سیکلون اولیه (جریان‌های ۱۱۴ و ۱۱۵)، ته‌ریز و سرریز سیکلون خوشه‌ای (جریان‌های ۱۱۷ و ۱۱۸)، باطله رافر (جریان ۲۱۳)، کنسانتره آپاتیت (جریان ۲۱۶) و باطله نهایی (جریان ۳۲۲) صورت پذیرفت.

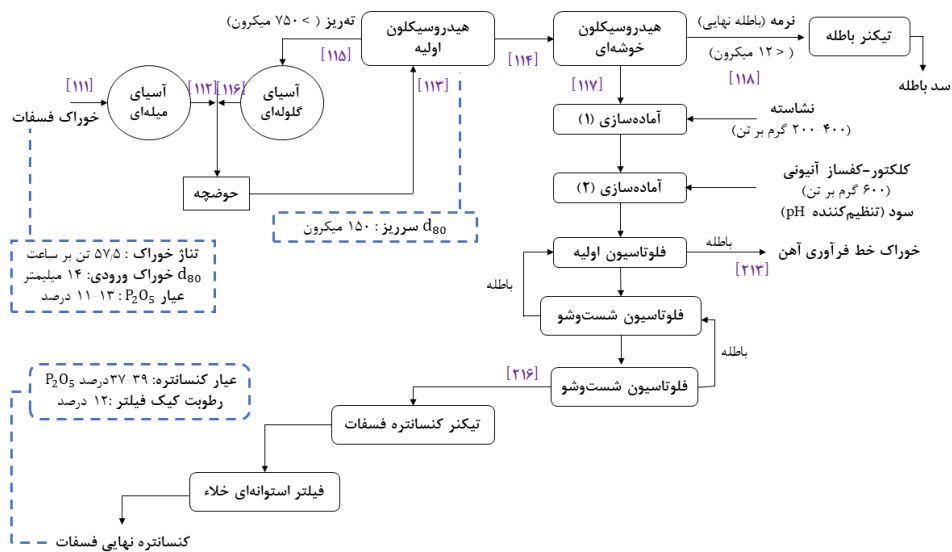
### ۲-۳- آماده‌سازی نمونه

مرحله اصلی آماده‌سازی نمونه‌ها شامل خشک‌کردن، خردایش، تقسیم نمونه و تهیه نمونه معرف بود. عملیات خردکردن نمونه برداشت‌شده از دیواره‌های سنگ سبز طی ۲ مرحله سنگ‌شکنی توسط سنگ‌شکن فکی آزمایشگاهی صورت گرفت و ذرات تا ابعاد کوچک‌تر از ۱۲٫۵ میلی‌متر خرد شدند. پس از تقسیم اولیه نمونه، عملیات سنگ‌شکنی مرحله دوم توسط سنگ‌شکن غلتکی انجام شد و نمونه تا ابعاد ۴ میلی‌متر خردایش شد.

### ۲-۴- شناسایی نمونه

#### ۲-۴-۱- XRD

جهت شناسایی کانی‌های موجود در سنگ سبز، آنالیز XRD انجام شد. برای این منظور طیف پراش اشعه ایکس نمونه معرف در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه یزد و با استفاده از دستگاه مدل Bruker D8 به دست آمد.



شکل ۲- مدار آسیا کنی و فلوتاسیون آپاتیت اسفوردی

خوشه‌ای با ابعاد ریزتر از ۱۲ میکرون به‌عنوان باطله در نظر گرفته می‌شود و به سد باطله منتقل می‌شود. ته‌ریز سیکلون نرمه‌گیر به‌عنوان خوراک واحد فلوتاسیون، به آماده‌سازهای فلوتاسیون آپاتیت وارد می‌شود. در آماده‌ساز اول از سود برای تنظیم pH (در حدود ۹/۵-۱۰) و نشاسته جهت بازداشت آهن استفاده می‌شود و در آماده‌ساز دوم کلکتور با پایه اسید چرب تولیدی معدن اسفوردی اضافه می‌شود و سرریز این آماده‌ساز برای بازیابی آپاتیت وارد سلول رافر می‌شود. باطله‌های رافر تحت عنوان باطله فلوتاسیون از مدار خارج شده و به مدار بازیابی اکسید آهن وارد می‌شوند. محصول رافر به شکل کف جهت پرعیارسازی وارد کلینر اولیه و ثانویه می‌شود. محصول کلینر ثانویه به‌عنوان کنسانتره نهایی آپاتیت و با عیار  $P_2O_5$  حدود ۳۶-۳۳ درصد (۳۹۳۷ درصد در طراحی اولیه) برای آگیری وارد تیکنر می‌شود. ته‌ریز تیکنر با درصد جامد حدود ۶۸ درصد توسط فیلتر خلا استوانه‌ای آگیری می‌شود. باطله خط فسفات نیز جهت استحصال کنسانتره اکسید آهن به جداکننده مغناطیسی شدت پایین و جداکننده مغناطیسی شدت بالا ارسال می‌شود و کنسانتره آهن با عیار حدود ۶۴-۶۰ درصد آهن، استحصال می‌شود. شکل ۲ مدار آسیا کنی و فلوتاسیون آپاتیت را نشان می‌دهد.

### ۲-۲- نمونه‌برداری و تهیه نمونه معرف

در این تحقیق طی دو مرحله، نمونه‌برداری صورت پذیرفت. در مرحله اول جهت شناسایی مشخصات سنگ سبز و کانی‌های تشکیل‌دهنده، نمونه‌برداری از دیواره‌های پرعیارساز سنگ سبز انجام شد. دومین مرحله نمونه‌برداری پس از ورود

جدول ۱- مطالعه‌های آماری عیار و بازیابی

شرح نمونه	میانگین	انحراف معیار	واریانس	محدوده اطمینان ۹۵ درصدی (برای میانگین)
عیار $P_2O_5$	۱۵,۳۹۸	۰,۵۰۲	۰,۲۵۲	$\pm ۱,۲۵$
عیار آهن	۱۶,۴۷۳	۰,۲۰۰	۰,۰۴۰	$\pm ۰,۵۰$
عیار $MgO$ بازیابی	۴,۰۱۷	۰,۱۱۶	۰,۰۱۳	$\pm ۰,۲۹$
بازیابی در $P_2O_5$ کسانتره	۱۱,۵۹۲	۰,۶۷۲	۰,۴۵۲	$\pm ۱,۶۷$

#### ۲-۴-۵- جدایش مغناطیسی

برای تعیین درجه آزادی بخش مغناطیسی از دستگاه لوله دیویس مدل EDT شرکت ERIEZ استفاده شد. برای این منظور نمونه‌های ۲۰ گرمی با ابعاد ۱۵۰- میکرون برای انجام آزمایش‌های دیویس با شدت میدان‌های ۱۰۰۰، ۱۲۰۰، ۱۷۰۰، ۲۰۰۰، ۲۲۰۰، ۲۵۰۰، ۳۰۰۰، ۳۵۰۰ و ۴۰۰۰ گوس بکار گرفته شدند. همچنین به منظور محاسبه بازیابی کسانتره آهن قابل استحصال و امکان حذف کانی‌های سیلیکاته، از جداکننده مغناطیسی شدت بالا موجود در آزمایشگاه معدن فسفات اسفوردی استفاده شد. در این آزمایش‌ها نیز از نمونه خردادش شده تا ابعاد ۱۵۰- میکرون، نمونه همگن ۵۰ گرمی آماده شد، سپس در شدت میدان‌های ۵۰۰۰، ۷۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ گوس آزمایش‌های جدایش مغناطیسی شدت بالا انجام شد. پس از انجام آزمایش‌های جدایش مغناطیسی، عیار و بازیابی Fe و  $MgO$  محاسبه شد.

#### ۲-۴-۶- فلوتاسیون

برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون از سلول فلوتاسیون آزمایشگاهی دنور استفاده شد. مواد شیمیایی مورد استفاده شامل کلکتور با پایه اسید اولئیک مصرفی کارخانه اسفوردی (۶۰۰ گرم بر تن) برای شناورسازی آپاتیت، نشاسته ذرت (۴۰۰ گرم بر تن) برای بازداشت کانی‌های آهن و سیلیکات‌ها بود. برای تنظیم pH (۱۱-۸,۵) از سود سوزآور استفاده شد. همه مواد شیمیایی از نوع صنعتی و مشابه کارخانه اسفوردی استفاده شدند. زمان آماده‌سازی نمونه شامل ۵ دقیقه همزنی با آب، ۴ دقیقه آماده‌سازی با نشاسته، ۴ دقیقه آماده‌سازی با

#### ۲-۴-۲- تهیه و مطالعه مقاطع نازک و صیقلی

از جمله راه‌های شناسایی کانی‌های موجود در نمونه و همچنین تعیین درجه آزادی، تهیه مقاطع نازک و صیقلی و مطالعه آن‌هاست. در این تحقیق برای شناسایی دقیق کانی‌های آپاتیت و سیلیکات‌ها از نمونه سنگ تیغه نازک و برای شناسایی کانی‌های مگنتیت و هماتیت مقاطع صیقلی تهیه شدند. همچنین از محدوده‌های ابعادی  $۶۰۰+۸۵۰-$ ،  $۳۰۰+۴۲۵-$ ،  $۲۱۲+۳۰۰-$ ،  $۱۵۰+۲۱۲-$ ،  $۱۰۶+۱۵۰-$  میکرون مقاطع تهیه شده و پس از شناسایی تمامی کانی‌ها، درجه آزادی مناسب برای مگنتیت و آپاتیت به روش دانه‌شماری به دست آمد. در این روش ذرات تا تعداد تقریبی سیصد دانه از روی مقاطع شمارش شدند، ذراتی که کمتر از ۵ درصد درگیری داشتند به عنوان ذرات آزاد بشمار آمدند. درجه آزادی هر کانی با تقسیم تعداد ذرات آزاد آن به کل ذرات کانی مورد نظر محاسبه شد.

#### ۲-۴-۳- عیار سنجی

به منظور مشخص شدن درصد ترکیبات و عناصر موجود در سنگ سبز، نمونه آزمایشگاهی و نمونه‌های برداشت شده از تمامی جریان‌ها در فراکسیون‌های ابعادی مختلف مورد آنالیز  $P_2O_5$ ، Fe و  $MgO$  قرار گرفتند. آنالیز فسفر بعد از هضم اسیدی توسط دستگاه اسپکتروفتومتر انجام شد. از روش تیتراسیون برای آنالیز آهن استفاده شد و نهایتاً  $Mg$  نیز با استفاده از دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی به دست آمد. همچنین نمونه معرف سنگ سبز مورد آنالیز XRF با دستگاه مدل Bruker S4 قرار گرفت.

#### ۲-۴-۴- بررسی اعتبار سنجی آنالیزها و آزمایش‌ها

به منظور محاسبه میزان خطای حاصل از عیارسنجی  $P_2O_5$ ، یک نمونه خوراک با سه بار تکرار مورد آنالیز قرار گرفت. همچنین یک آزمایش فلوتاسیون با شرایط یکسان سه بار تکرار شد و خطای کلی بازیابی  $P_2O_5$  محاسبه گردید. محاسبات با اطمینان ۹۵ درصد و با استفاده از آزمون t-student انجام شد. نتایج حاصل در جدول ۱ آورده شده‌اند. همان‌گونه که از این داده‌ها مشخص است عیار  $P_2O_5$  دارای خطای عیارسنجی ۱,۲۵ درصدی و بازیابی  $P_2O_5$  در آزمایش فلوتاسیون دارای ۱,۶۷ درصد خطا می‌باشد.

کانی کوئسیت نیز تأیید شده است. همچنین احتمال حضور کانی‌های مونازیت، زنونیتیم و آلانیت نیز در نمونه محتمل است.

حضور کانی‌های تشخیص داده شده در طیف XRD توسط تیغه‌های نازک (شکل ۴) و مقاطع صیقلی تأیید شدند. در شکل ۵ مقاطع صیقلی از بخش‌های مختلف ابعادی باهم مقایسه شده‌اند. از نتایج مطالعه درجه آزادی که در جدول ۲ نشان داده شده است، مشخص شد که نزدیک به ۹۰ درصد از ذرات آپاتیت و مگنتیت در ابعاد کوچک‌تر از ۲۱۲ میکرون آزاد هستند. درجه آزادی برای ذرات کوچک‌تر از ۱۵۰ میکرون نیز نزدیک به ۱۰۰ بوده و تقریباً تمامی ذرات آزاد هستند.

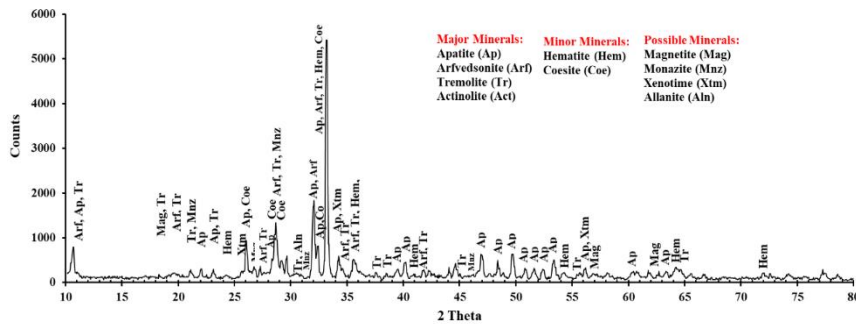
کلکتور و ۴ دقیقه کف‌گیری با دور موتور ۹۰۰ دور بر دقیقه لحاظ شد.

### ۳- نتایج و بحث

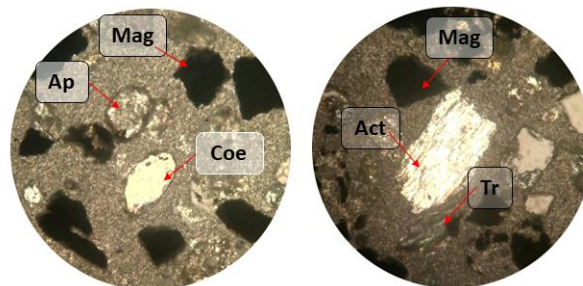
#### ۳-۱- شناسایی نمونه

##### ۳-۱-۱- مطالعات کانی‌شناسی و درجه آزادی

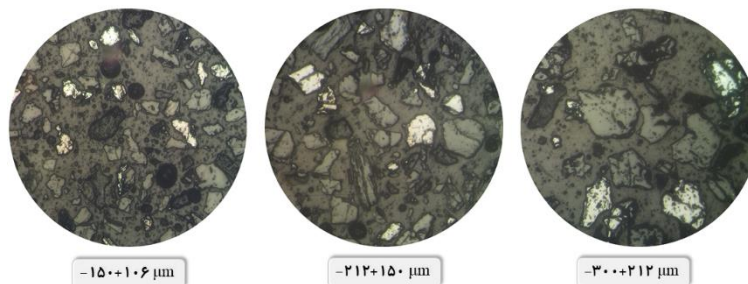
طیف XRD نمونه معرف سنگ سبز فسفات‌دار در شکل ۳ نشان داده شده است. کانی اصلی فسفات در این نمونه آپاتیت است و حضور کانی‌های سیلیکاته ترمولیت، اکتینولیت به مقدار زیاد باعث ایجاد رنگ سبز در این نمونه شده است. آهن موجود در نمونه به صورت کانی‌های هماتیت و مگنتیت وجود دارد. همچنین مقادیر اندکی سیلیس آزاد به صورت



شکل ۳- کانی‌های شناسایی شده توسط آنالیز کانی‌شناسی

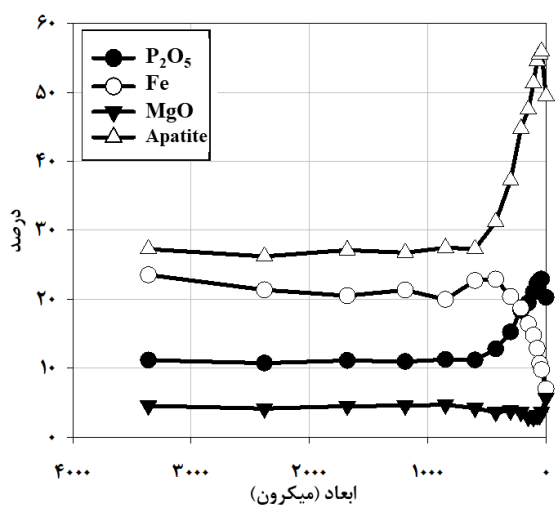


شکل ۴- کانی‌های آپاتیت، مگنتیت، کوئسیت و سیلیکات‌های منیزیم‌دار در تیغه نازک (فراکسیون ابعادی ۳۰۰-۲۱۲+)

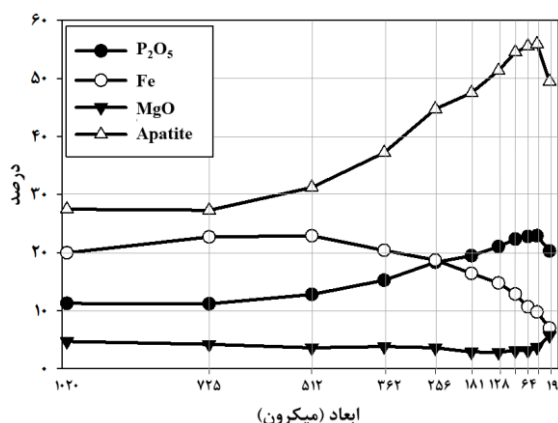


شکل ۵- مقاطع صیقلی در بخش‌های ابعادی مختلف

خیلی ریز، عیار MgO کمی افزایش داشته است. این مطلب نشان می‌دهد که بخشی از کانی‌های سیلیکاته منیزیم‌دار دارای سختی کمتر (هوازدگی بیشتر) می‌باشند.



شکل ۶- آنالیز شیمیایی بخش‌های ابعادی ۰-۴ میلی‌متر



شکل ۷- آنالیز شیمیایی بخش‌های ابعادی ۰-۱ میلی‌متر

### ۲-۳- جدایش مغناطیسی

بر اساس آنالیز نمونه‌های قدیم معدن اسفوردی، عمده ذخیره آهن از نوع هماتیته گزارش شده است، اما در نمونه سنگ سبز بخشی از ذرات آهن خاصیت قوی مغناطیسی نشان می‌دهند. هدف اصلی از انجام آزمایش‌های جدایش مغناطیسی با لوله دیویس تعیین مقداری از آهن نمونه بود که با شدت پایین قابل بازیابی است. در آزمایش‌های شدت بالا نیز هدف بررسی میزان راه‌یابی سیلیکات‌های منیزیم‌دار به کنسانتره مغناطیسی بوده است (جدول ۴ و شکل ۸).

جدول ۲- درجه آزادی برای بخش‌های مختلف آنالیز سرندي

دانه‌بندی	آپاتیت (%)	مگنتیت (%)
(-۶۰۰+۸۵۰)	۲۰	۳۲
(-۳۰۰+۴۲۵)	۵۳	۶۸
(-۲۱۲+۳۰۰)	۸۷	۸۴
(-۱۵۰+۲۱۲)	۹۶	۹۴
(-۱۰۶+۱۵۰)	۱۰۰	۹۸

### ۲-۱-۳- آنالیزهای شیمیایی و توزیع فسفر، آهن و منیزیم

نتیجه آنالیز XRF نمونه سنگ سبز فسفات‌دار (جدول ۳) نشان می‌دهد که عیار  $P_2O_5$  نمونه ۱۵٫۹۲ درصد و  $Fe_2O_3$  ۱۶٫۲۷ درصد می‌باشد. وجود  $SiO_2$  به میزان ۲۹٫۱۹ درصد و MgO ۳٫۹۶ درصد تأییدکننده وجود کانی‌های سیلیکات منیزیم‌دار در نمونه است. این نتایج توسط آنالیز نمونه با روش‌های تیتراسیون و جذب اتمی نیز تأیید شدند.

جدول ۳- نتایج آنالیز XRF

درصد	ترکیب	درصد	ترکیب
۰٫۳۳	$K_2O$	۲۹٫۱۹	$SiO_2$
۰٫۴۷	$Ti_2O$	۱٫۷۳	$Al_2O_3$
۰٫۴۴	$MnO$	۱۶٫۲۷	$Fe_2O_3$
۱۵٫۹۲	$P_2O_5$	۲۰٫۹۳	$CaO$
۳٫۶۰	LOI	۰٫۷۹	$Na_2O$
		۳٫۹۶	MgO

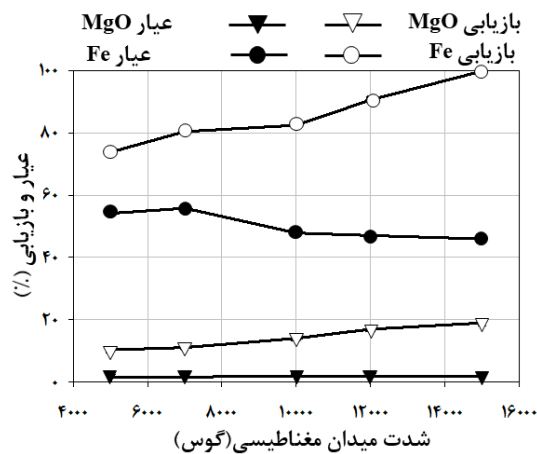
توزیع عیار در هر یک از فراکسیون‌های ابعادی (شکل ۶ و ۷) نشان می‌دهد که  $P_2O_5$  در فراکسیون‌های کوچک‌تر از ۱۵۰ میکرون تمرکز یافته است. مشاهده می‌شود تغییرات عیار  $P_2O_5$ ، Fe و MgO از ۴ تا ۱ میلی‌متر ناچیز بوده، ولی در ابعاد کوچک‌تر از ۱ میلی‌متر تغییرات بیشتری وجود دارد. ذرات آپاتیت با توجه به سختی کمتر نسبت به دیگر کانی‌های موجود، در بخش‌های ابعادی کوچک‌تر تجمع یافته‌اند و این امر باعث افزایش درصد آپاتیت و به تبع آن افزایش عیار  $P_2O_5$  شده است. برخلاف آپاتیت، کانی‌های آهن، دارای سختی بیشتری هستند و به همین دلیل با کاهش ابعاد، درصد آهن نمونه کاهش یافته است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که با کاهش ابعاد کانی‌های سیلیکاته (با سختی بیشتر از کانی آپاتیت)، درصد MgO کاهش یافته است ولی در اندازه ذرات

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های لوله دیویس

بازیابی آهن (%)	بازیابی (%)	(%)P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	(%)Fe	(%)MgO	بازیابی وزنی (%)	شدت میدان (گوس)
۳۵,۵۰	۰,۱۵	-	۶۸,۶۰	-	۹,۳	۱۰۰۰
۵۶,۰۱	۰,۱۵	-	۶۸,۶۰	-	۱۴,۸	۱۲۰۰
۶۰,۳۷	۰,۱۸	-	۶۸,۵۰	-	۱۶,۰	۱۷۰۰
۶۰,۴۱	۰,۲۳	-	۶۸,۳۰	-	۱۶,۲	۲۰۰۰
۶۱,۶۳	۰,۳۶	-	۶۷,۵۰	-	۱۶,۷	۲۲۰۰
۶۷,۳۷	۰,۳۶	۰,۳	۶۶,۸۰	۰,۳	۱۶,۸	۲۵۰۰
۶۷,۵۲	۰,۳۶	۰,۳	۶۶,۶۸	۰,۳	۱۶,۸	۳۰۰۰
۶۸,۰۰	۰,۳۹	۰,۳	۶۶,۵۰	۰,۳	۱۶,۹	۳۵۰۰
۶۸,۳۰	۰,۴۲	۰,۶	۶۶,۱۲	۰,۶	۱۶,۹	۴۰۰۰

از نتایج آزمایش‌های لوله دیویس مشخص شد که در میدان‌های مغناطیسی با شدت‌های ۱۰۰۰ تا ۲۲۰۰ گوس، با افزایش شدت میدان، بازیابی آهن به سرعت افزایش می‌یابد و به تبع آن مقدار کمی از عیار کنسانتره کم می‌شود. در میدان‌های مغناطیسی با شدت ۲۵۰۰ تا ۴۰۰۰ گوس بازیابی عیار آهن تقریباً ثابت بوده است. در مورد MgO نیز می‌توان گفت چون کانی‌های سیلیکاته در میدان مغناطیسی شدت پایین جذب نمی‌شوند عیار آن‌ها در کنسانتره پایین است. کانی‌های آهن‌دار در این نمونه دارای ویژگی مغناطیسی از مگنتیت تا هماتیت هستند و بنابراین در شدت میدان کم بخش مگنتیتی جدا شده و با افزایش شدت مغناطیسی بازیابی آهن افزایش می‌یابد.

جذب کانی‌های هماتی می‌باشد. همچنین افزایش عیار منیزیم نشان می‌دهد که بازیابی کانی‌های سیلیکاته نیز با افزایش شدت میدان مغناطیسی بالا رفته است. با توجه به این نکته که اندازه ذرات این آزمایش‌ها کوچک‌تر از ۱۵۰ میکرون بوده است و احتمال درگیر بودن کانی‌های سیلیکاته با کانی‌های آهن ناچیز می‌باشد می‌توان گفت که علت افزایش بازیابی MgO خاصیت مغناطیسی ضعیف کانی‌های سیلیکات منیزیم‌دار می‌باشد.



شکل ۹- نتایج جدایش مغناطیسی شدت بالا

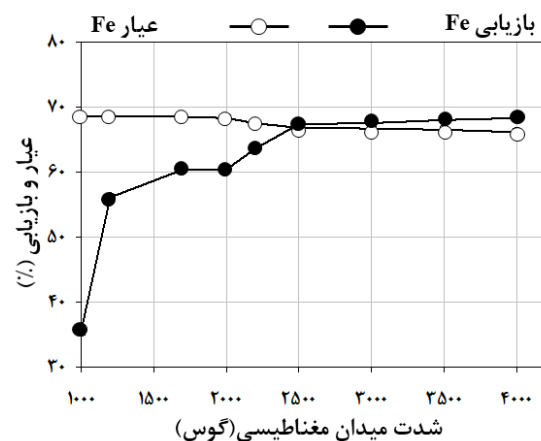
جدول ۵- نتایج آنالیز جدایش مغناطیسی شدت بالا

بازیابی (%)MgO	بازیابی آهن (%)	Fe (%)	MgO (%)	بازیابی وزنی (%)	شدت میدان (گوس)
۱۰,۳۸	۷۳,۷۳	۵۴,۱۴	۱,۷۰	۲۴,۲	۵۰۰۰
۱۱,۱۲	۸۰,۳۵	۵۵,۷۸	۱,۷۲	۲۵,۶	۷۰۰۰
۱۴,۰۶	۸۲,۳۹	۴۷,۸۵	۱,۸۲	۳۰,۶	۱۰۰۰۰
۱۷,۰۱	۹۰,۵۱	۴۷,۰۳	۱,۹۷	۳۴,۲	۱۲۰۰۰
۱۹,۰۱	۹۹,۷۶	۴۵,۹۳	۱,۹۵	۳۸,۶	۱۵۰۰۰

### ۳-۳- مشکلات استفاده از سنگ سبز فسفا ته در

#### مدار فعلی کارخانه اسفوردی

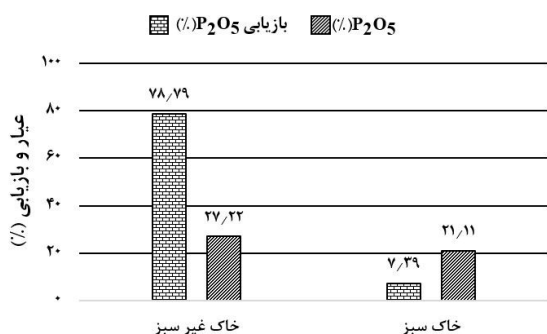
کارخانه‌های فرآوری معمولاً برای یک نوع ماده معدنی طراحی می‌شوند. استفاده از خوراک با ویژگی‌های متفاوت از خوراک مدنظر در طراحی کارخانه همواره می‌تواند نتایج غیرقابل پیش‌بینی و در موارد زیادی عدم کارایی مناسب را ایجاد کند. برای بررسی فرآوری سنگ سبز فسفا ته در کارخانه فعلی اسفوردی، این نوع ماده معدنی در طول یک شیفت کاری به کارخانه خوراک‌دهی شد. پس از گذشت



شکل ۸- نتایج جدایش مغناطیسی لوله دیویس

در مورد جدایش مغناطیسی شدت بالا، همان‌طور که از شکل ۹ و جدول ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش شدت میدان مغناطیسی بازیابی آهن افزایش پیدا کرده است که بیانگر

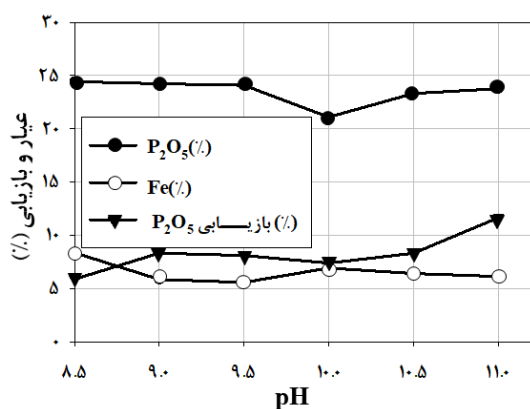




شکل ۱۰- مقایسه بازیابی و عیار P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> حاصل از فلوتاسیون سنگ سبز با سنگ غیر سبز



شکل ۱۱- کف حجیم و کم‌بار حاصل از فلوتاسیون



شکل ۱۲- بازیابی P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>، عیار P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> و Fe حاصل از فلوتاسیون

برای بررسی تأثیر نرمه بر فلوتاسیون آپاتیت، آزمایش با سنگ سبز نرمه‌گیری شده انجام گرفت (شکل ۱۳). آزمایش یادشده در pH=10 انجام شد و نتایج حاصل نشان داد که عدم حضور نرمه در نمونه باعث افزایش عیار و بازیابی P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> به 27/98 درصد و 38/65 درصد همچنین کاهش عیار Fe به 4/02 درصد شده است.

دو ساعت تأثیر منفی سنگ سبز در فرآیند فلوتاسیون و همچنین آبگیری کارخانه به‌وضوح مشاهده گردید. به‌نحوی که فاز کف در مرحله رافر فلوتاسیون به‌صورت بسیار حجیم و کم‌بار تغییر شکل داد. حباب‌های تولیدی دارای پایداری بسیار زیاد بودند. این پایداری باعث ایجاد مشکلات در انتقال مواد توسط پمپ‌ها شد. همچنین این پایداری بیش‌ازحد حباب‌ها باعث ایجاد یک لایه پایدار فاز کف بر روی تیکنرها شد.

آنالیز شیمیایی کنسانتره نهایی فلوتاسیون به‌دست‌آمده از خوراک‌دهی سنگ سبز در کارخانه نشان داد که عیار P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> کنسانتره 36/52 درصد به دست آمد. ولی مقایسه عیار P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> خوراک فلوتاسیون با باطله رافر که به ترتیب برابر با 13/50 درصد و 8/13 درصد نشان داد که بازیابی فسفات به کنسانتره بسیار ناچیز بوده است و بخش زیادی از فسفات خوراک به باطله رافر راه یافته و از مدار فلوتاسیون فسفات خارج شده است.

با توجه به مشکلات ذکر شده سنگ سبز در فلوتاسیون کارخانه اسفوردی، آزمایش‌هایی برای بررسی دقیق‌تر فلوتاسیون سنگ سبز و مقایسه آن با خوراک فعلی کارخانه انجام شد. نتایج نشان داد که بازیابی و عیار P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> کنسانتره سنگ سبز نسبت به کنسانتره سنگ غیر سبز بسیار کم‌تر بوده و بازیابی در حدود 70 درصد تفاوت دارد (شکل ۱۰). همچنین فاز کف حجیم با پایداری حباب بسیار زیاد و بار کم مشاهده شد (شکل ۱۱).

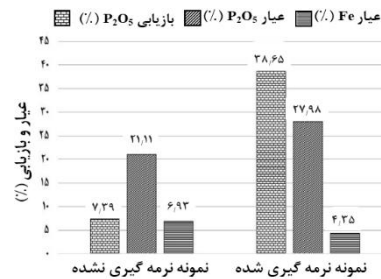
به نظر می‌رسد حضور کانی‌های سیلیکاته منیزیم‌دار (ترمولیت و اکتینولیت)، همراه با هوازگی سنگ سبز، باعث شده تا یون‌های Ca<sup>2+</sup> و Mg<sup>2+</sup> در آب حل شده و غلظت آن‌ها افزایش یابد. با اندازه‌گیری این عناصر مشخص شد که میزان غلظت کلسیم و منیزیم در آب فرآیند به ترتیب 184 و 153 میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد، درحالی‌که غلظت این یون‌ها در آب تازه کارخانه 136 و 86 میلی‌گرم بر لیتر است. حضور این کاتیون‌ها در آب، از طرفی باعث افزایش شدید پایداری کف شده و از طرف دیگر واکنش آن‌ها با کلکتور آنیونی باعث مصرف کلکتور و متعاقباً کاهش کارایی فلوتاسیون می‌شود.

بررسی pH های مختلف نشان داد که تغییر pH تأثیر چندانی بر بهبود فلوتاسیون آپاتیت از سنگ سبز ندارد (شکل ۱۲).

۳-۴- پایش عملکرد مدار کارخانه با استفاده از

سنگ سبز

برای بررسی دقیق عملکرد مدار آسیاکنی و همچنین کارکرد سیکلون‌های خوشه‌ای و فلوتاسیون در هنگام استفاده از سنگ سبز به‌عنوان خوراک کارخانه، از مدارهای موردنظر نمونه‌گیری شد. جدول ۶ مشخصات عیار  $FeO$ ،  $Fe$ ،  $P_2O_5$  و  $MgO$  جریان‌های مختلف مدار فرآوری فسفات اسفوردی را پس از نمونه‌برداری نشان داده است.

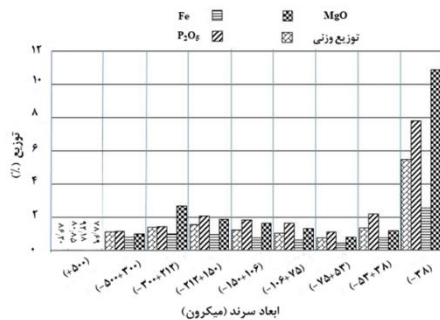


شکل ۱۳- مقایسه عیار و بازایی نمونه نرمة گیری شده و نرمة گیری نشده

جدول ۶- عیار جریان‌های مختلف مدار کارخانه فسفات اسفوردی

جریان	MgO (%)	Fe (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Fe/FeO
خروجی آسیا میله‌ای	۳٫۳۳	۱۷٫۲۹	۱۵٫۳۸	۶٫۳۷
سرریز سیکلون ۱	۲٫۷۳	۲۲٫۷۸	۱۴٫۰۱	۷٫۳۱
خوراک آسیا گلوله‌ای	۲٫۰۰	۳۲٫۳۶	۱۰٫۶۱	۶٫۳۵
خروجی آسیا گلوله‌ای	۲٫۶۵	۳۳٫۴۸	۱۰٫۱۳	۶٫۹۳
ته‌ریز سیکلون نرمة	۲٫۲	۲۶٫۵	۱۳٫۵	۶٫۴۴
سرریز سیکلون نرمة	۳٫۷۸	۱۶٫۷۴	۱۵٫۲۸	۱۰٫۲۶
باطله رافر آپاتیت	۲٫۴۸	۳۰٫۱۳	۸٫۱۳	۸٫۲۸
کنسانتره آپاتیت	۰٫۸۴	۵٫۸۵	۳۲٫۵۶	۵٫۵۲
باطله نهایی مدار	۳٫۵۰	۱۸٫۹۷	۱۳٫۴۳	۴٫۸۵

در شکل ۱۶ آنالیز سرندهی خوراک ورودی آسیا میله‌ای با  $d_{80}=206\mu m$  میکرون همچنین نمودار دانه‌بندی خروجی آسیای میله‌ای با  $d_{80}=206\mu m$  میکرون به‌دست‌آمده که نسبت به  $600\mu m$  میکرون لحاظ شده در طراحی اولیه کارخانه، ریزتر است. علت را می‌توان در سختی کمتر نمونه مورد استفاده، پیش‌بینی کرد. شکل ۱۷ تغییرات توزیع وزنی خروجی آسیای میله‌ای را در بخش‌های مختلف ابعادی نشان داده است. نکته قابل تأمل تولید بیش‌ازحد نرمة در آسیای میله‌ای می‌باشد. با مقایسه درصد وزنی ابعاد کوچک‌تر از  $38\mu m$  میکرون در ورودی و خروجی آسیای میله‌ای، افزایش درصد این محدوده ابعادی به  $37/32\%$  درصد قابل مشاهده است.



شکل ۱۴- توزیع وزنی  $Fe$ ،  $P_2O_5$  و  $MgO$  در بخش‌های مختلف ابعادی خوراک آسیای میله‌ای

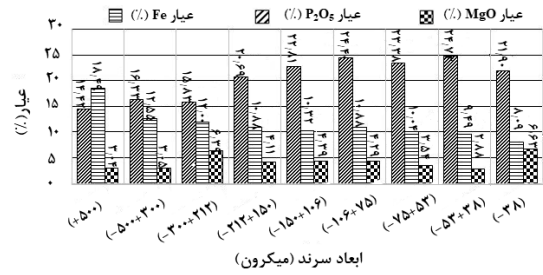
۳-۴-۱- بررسی عملکرد آسیای میله‌ای

خوراک آسیای میله‌ای، خوراک ورودی کارخانه محسوب می‌شود. شکل ۱۴ توزیع وزنی  $Fe$ ،  $P_2O_5$  و  $MgO$  را در بخش‌های مختلف ابعادی خوراک آسیای میله‌ای نشان می‌دهد. نکته قابل توجه وجود مقدار زیاد ذرات ریزدانه در خوراک ورودی می‌باشد به‌نحوی که بیش از ۱۰ درصد از وزن خوراک کوچک‌تر از  $150\mu m$  میکرون می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل از بررسی درجه آزادی، ذرات در این ابعاد به درجه آزادی رسیده‌اند؛ بنابراین خردادش مجدد آن‌ها موردنیاز نخواهد بود. با توجه به شکل ۱۵ که عیار  $Fe$ ،  $P_2O_5$  و  $MgO$  در بخش‌های ابعادی مختلف خوراک آسیای میله‌ای را نشان می‌دهد، مشاهده شد که درصد عیار  $P_2O_5$  با کاهش ابعاد افزایش می‌یابد که این به خاطر سختی کمتر آپاتیت می‌باشد. همچنین عیار آهن با کاهش ابعاد کاهش می‌یابد. نکته دیگر عیار بالای  $MgO$  در بخش ذرات نرمة با اندازه کوچک‌تر از  $38\mu m$  میکرون است. عیار کم  $MgO$  در ذرات با اندازه بیش از  $500\mu m$  میکرون نشان‌دهنده سختی کم و هوازدگی سیلیکات‌های سبزرنگ در نمونه می‌باشد.

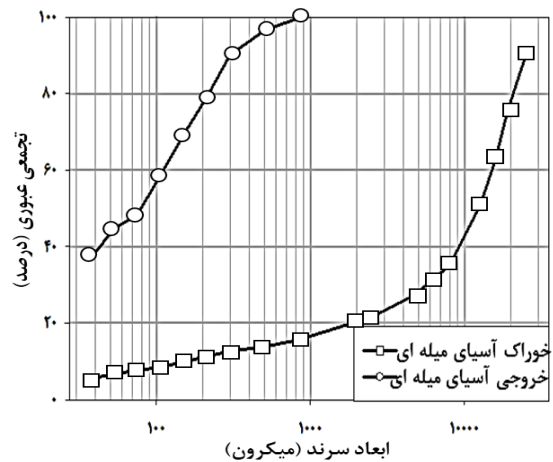
بخش‌های ابعادی مختلف نمونه تهریز سیکلون اولیه (خوراک آسیای گلوله‌ای) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که عیار آهن تهریز سیکلون بسیار بیشتر از خوراک کارخانه می‌باشد، زیرا تهریز سیکلون را عمدتاً ذرات آهن‌دار سخت و درگیر با آپاتیت و دارای وزن مخصوص زیادتر، تشکیل می‌دهند. بیش از ۳۶ درصد از خوراک آسیای گلوله‌ای را ذرات کوچک‌تر از ۱۵۰ میکرون تشکیل می‌دهد درحالی‌که این ذرات باید توسط سیکلون حذف می‌شدند. این اتفاق به خاطر عملکرد نادرست سیکلون که به دنبال خوراک‌دهی بیش‌ازحد به آن می‌باشد، ایجاد می‌شود. از سوی دیگر ذرات ریزدانه آهن‌دار، باوجود اندازه کوچک به خاطر وزن مخصوص بیشتر به تهریز راه یافته و مجدداً در آسیای گلوله‌ای مورد آسیاکنی بیشتر قرار می‌گیرند که در نتیجه منجر به تولید نرمه می‌شود. با مقایسه عیار آهن در ذرات کوچک‌تر از ۳۸ میکرون برای خوراک کارخانه (۸ درصد) و برای خوراک آسیای گلوله‌ای (۳۹ درصد) (شکل ۱۵ و ۱۹) این موضوع به‌وضوح قابل‌مشاهده می‌باشد. عیار MgO در اندازه ذرات کوچک‌تر از ۳۸ میکرون بیش از بقیه بخش‌ها بوده است که نشان‌دهنده هوازده بودن بخشی از کانی‌های سیلیکات سبز و سختی پایین آن‌ها می‌باشد. شکل ۲۰ نمودار دانه‌بندی ورودی و خروجی آسیای گلوله‌ای، همچنین سرریز سیکلون اولیه را نشان می‌دهد. بر این اساس،  $d_{80}$  نمونه ورودی آسیای گلوله‌ای حدود ۲۸۱ میکرون می‌باشد که نسبت به ۷۵۰ میکرون قید شده در فلوشیت کارخانه (شکل ۲) بسیار کوچک‌تر است. در سرریز نیز مشخص شده که ۹۸ درصد از ذرات کوچک‌تر از ۲۱۰ میکرون هستند. همچنین  $d_{80}$  محصول آسیای گلوله‌ای ۱۹۹ میکرون گزارش شد.

درصد وزنی بخش‌های مختلف ابعادی سرریز سیکلون اولیه (شکل ۲۱) نشان می‌دهد که ۱۵ درصد سرریز سیکلون ذراتی با ابعاد بالاتر از ۱۵۰ میکرون دارد که به‌اشتباه به سرریز راه یافته است.

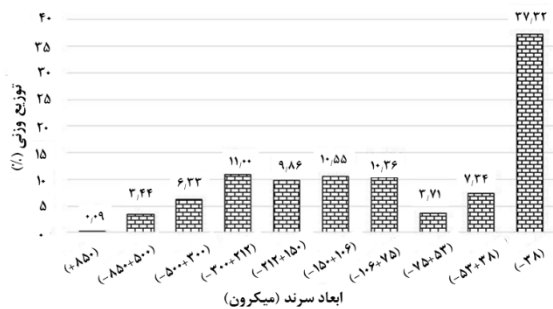
شکل ۲۲ توزیع وزنی  $P_2O_5$ ، Fe و MgO را در بخش‌های ابعادی مختلف خروجی آسیای گلوله‌ای را نشان می‌دهد. با توجه به مکانیزم سایش در آسیای گلوله‌ای بیشتر مواد بعد از آسیاکنی به بخش نرمه انتقال می‌یابند. بیش از ۶۳ درصد از مواد در این آسیا به ابعاد کوچک‌تر از ۱۵۰ میکرون رسیده‌اند. در شکل ۲۳ عیار  $P_2O_5$ ، Fe و MgO بخش‌های ابعادی مختلف خروجی آسیای گلوله‌ای قابل‌مشاهده است.



شکل ۱۵- عیار  $P_2O_5$  و Fe، MgO بخش‌های ابعادی مختلف خوراک آسیای میله‌ای



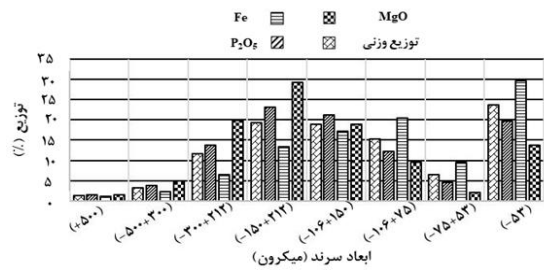
شکل ۱۶- آنالیز سرنندی بخش‌های مختلف ابعادی خوراک و خروجی آسیای میله‌ای



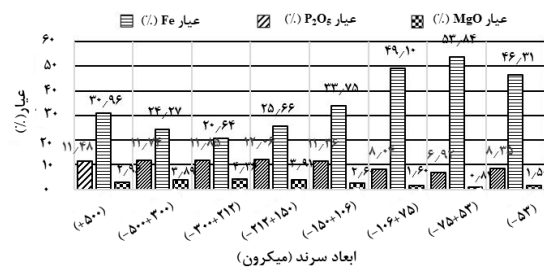
شکل ۱۷- تغییرات درصد وزنی بخش‌های مختلف ابعادی خروجی آسیای میله‌ای

### ۳-۴-۲- بررسی عملکرد آسیای گلوله‌ای و سیکلون اولیه

در کارخانه فرآوری فسفات مجموع محصول آسیای میله‌ای و گلوله‌ای خوراک هیدروسیکلون را تشکیل می‌دهند که سرریز آن محصول نهایی مدار آسیاکنی و تهریز آن به‌صورت باردرگردش به‌عنوان خوراک آسیای گلوله‌ای می‌باشد. شکل ۱۸ توزیع وزنی  $P_2O_5$ ، Fe و MgO را در



شکل ۲۲- توزیع وزنی  $Fe$  و  $P_2O_5$  و  $MgO$  در بخش‌های مختلف ابعادی خروجی آسیای گلوله‌ای



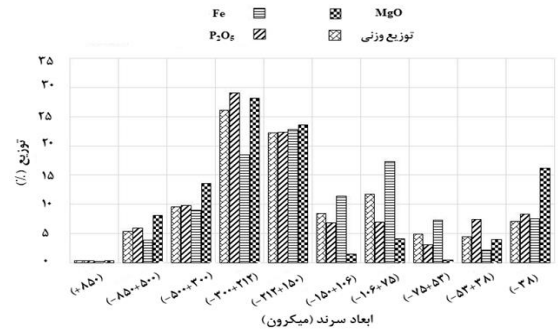
شکل ۲۳- عیار  $Fe$  و  $P_2O_5$  و  $MgO$  بخش‌های مختلف ابعادی خروجی آسیای گلوله‌ای

### ۳-۴-۳- بررسی هیدروسیکلون‌های خوشه‌ای

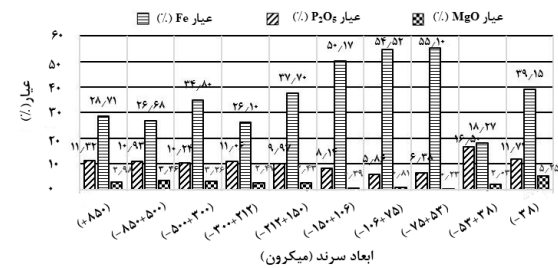
در کارخانه اسفوردی برای حذف نرمه‌ها قبل از فلوتاسیون از هیدروسیکلون‌های خوشه‌ای استفاده می‌شود. شکل ۲۴ توزیع وزنی  $Fe$  و  $P_2O_5$  و  $MgO$  را در بخش‌های ابعادی مختلف سرریز هیدروسیکلون‌های خوشه‌ای نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیش از ۲۱ درصد از مواد در ابعاد درشت‌تر از ۳۸ میکرون قرار دارند که به‌اشتباه به سرریز سیکلون راه پیدا کرده و حذف شده و این اتفاق باعث اتلاف زیاد آپاتیت به باطله خواهد شد. در شکل ۲۵ نیز عیار بخش‌های مختلفی ابعادی سرریز سیکلون آورده شده است. شکل ۲۶ توزیع وزنی  $Fe$  و  $P_2O_5$  و  $MgO$  را در بخش‌های ابعادی مختلف ته‌ریز هیدروسیکلون‌های خوشه‌ای نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نزدیک به ۱۶ درصد از ته‌ریز تشکیل می‌دهند. شکل ۲۷ عیار بخش‌های ابعادی مختلف این نمونه و شکل ۲۸ نمودار دانه‌بندی آن را نشان می‌دهد.  $d_{80}$  نمونه برابر با ۱۶۰ میکرون گزارش شد.

### ۳-۴-۴- بررسی عملکرد مدار فلوتاسیون

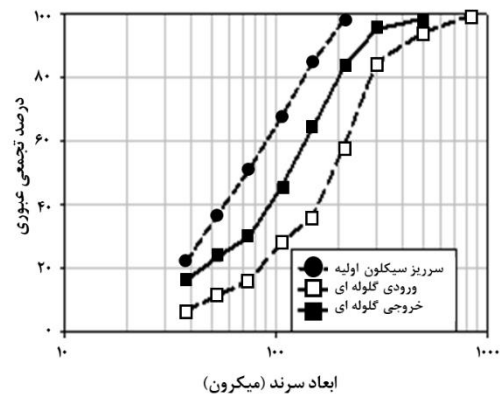
خوراک مرحله رافر فلوتاسیون را ته‌ریز هیدروسیکلون‌های خوشه‌ای تشکیل می‌دهد. خوراک فلوتاسیون در این پایش دارای عیار ۱۳/۵ درصد  $P_2O_5$ ، ۲۶/۵ درصد  $Fe$  و ۲/۲ درصد



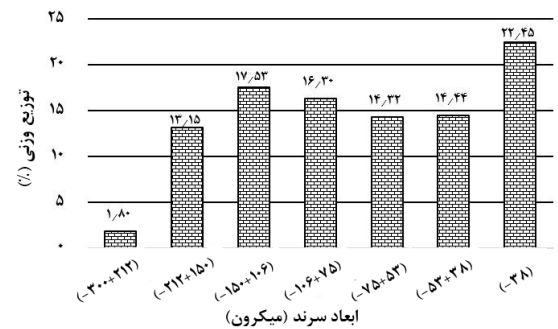
شکل ۱۸- توزیع وزنی  $Fe$  و  $P_2O_5$  و  $MgO$  در بخش‌های مختلف ابعادی ته‌ریز سیکلون اولیه



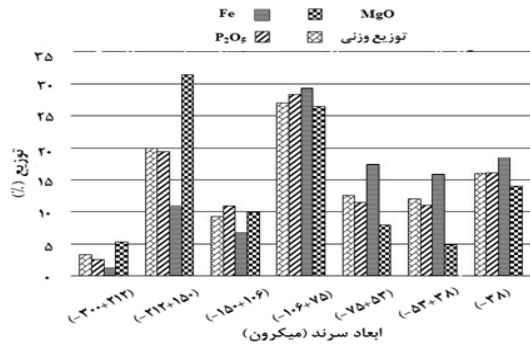
شکل ۱۹- عیار  $Fe$  و  $P_2O_5$  و  $MgO$  بخش‌های ابعادی مختلف ته‌ریز سیکلون اولیه



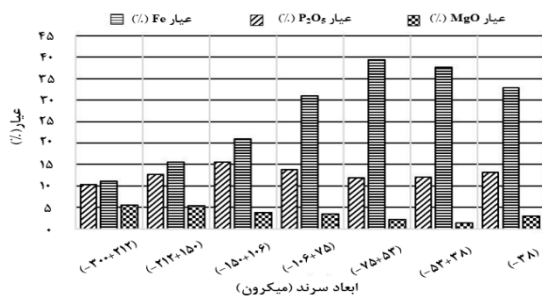
شکل ۲۰- آنالیز سرندي بخش‌های مختلف ابعادی ورودی و خروجی آسیای گلوله‌ای و سرریز سیکلون اولیه



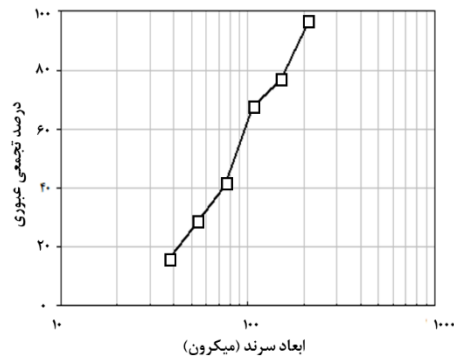
شکل ۲۱- تغییرات درصد وزنی بخش‌های مختلف ابعادی سرریز سیکلون اولیه



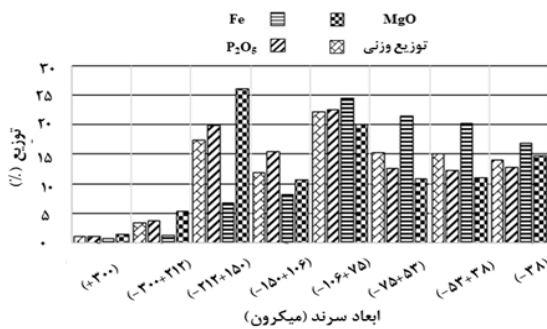
شکل ۲۶- توزیع وزنی Fe, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> و MgO در بخش‌های مختلف ابعادی ته‌ریز هیدروسیکلون



شکل ۲۷- عیار Fe, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> و MgO در بخش‌های مختلف ابعادی ته‌ریز هیدروسیکلون خوشه‌ای



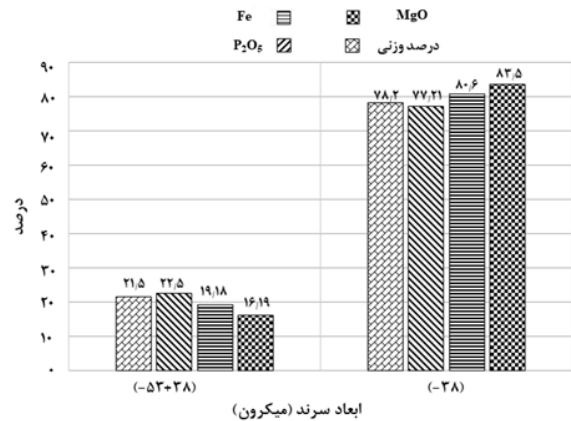
شکل ۲۸- آنالیز سرنندی بخش‌های مختلف ابعادی خوراک فلوتاسیون



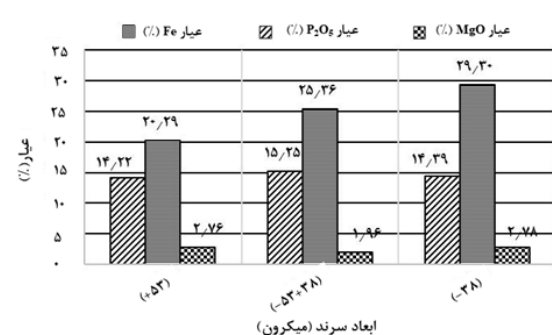
شکل ۲۹- توزیع وزنی Fe, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> و MgO در بخش‌های مختلف ابعادی باطله رافر

MgO بوده است (جدول ۶). شکل ۲۹ توزیع وزنی Fe, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> و MgO را در بخش‌های ابعادی مختلف باطله رافر را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۳۰ عیار بخش‌های ابعادی مختلف آن را نشان می‌دهد. مقایسه عیار خوراک فلوتاسیون و باطله رافر (جدول ۶) نشان می‌دهد که عیار P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> از ۱۳/۵ درصد به ۱۳/۸ درصد رسیده است که نشان از بازیابی پایین فرآیند فلوتاسیون و ناتوانی در شناورسازی کانی بارزش و نهایتاً انتقال آن به باطله بود.

هرچند کنسانتره نهایی مدار فلوتاسیون (کنسانتره مرحله کلینر) به عیار ۳۲/۵۶ درصد P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> رسیده است اما بازیابی کلی مدار فلوتاسیون بسیار پایین است که این موضوع با توجه به عیار ۱۳/۴۳ درصد P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> در باطله نهایی مدار فلوتاسیون مشهود است. شکل ۳۱ عیار Fe, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> و MgO در بخش‌های ابعادی مختلف کنسانتره نهایی مدار فلوتاسیون (کنسانتره مرحله کلینر) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابعاد کوچک‌تر از ۵۳ میکرون عیار آهن افزایش پیدا کرده که ناشی از دنباله‌روی می‌باشد.



شکل ۳۰- توزیع وزنی Fe, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> و MgO در بخش‌های مختلف ابعادی سرریز هیدروسیکلون



شکل ۳۱- عیار Fe, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> و MgO در بخش‌های مختلف ابعادی سرریز هیدروسیکلون خوشه‌ای

ه - پیشنهاد می‌شود جهت جلوگیری از راه‌یابی نرمه‌ها به خوراک فلوتاسیون، سیکلون‌های خوشه‌ای به‌طور مداوم پایش و اصلاح شوند. در همین تحقیق با انجام اصلاحات تهریز این هیدروسیکلون‌ها ۴ درصد از بخش ۳۸- میکرون ورودی به فلوتاسیون کاسته شد.

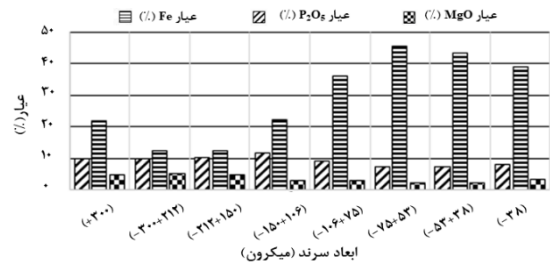
و - پیشنهاد می‌شود خوراک قبل از فلوتاسیون مورد جدایش مغناطیسی قرار گیرد تا آهن و قسمتی از سیلیکات‌ها حذف شوند. به این روش مصرف ناشسته در فلوتاسیون آپاتیت و متعاقباً مصرف کلکتور کاهش می‌یابد. حذف بخشی از سیلیکات‌ها در جدایش مغناطیسی و همچنین کاهش مصرف ناشسته باعث افزایش بازایی آپاتیت خواهد شد. با توجه به مگنتیتی بودن این سنگ نیاز است در ابتدا از یک جداکننده مغناطیسی شدت پایین استفاده شود تا آهن مگنتیتی را حذف کرده و از گرفتگی جداکننده مغناطیسی شدت متوسط جلوگیری کند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

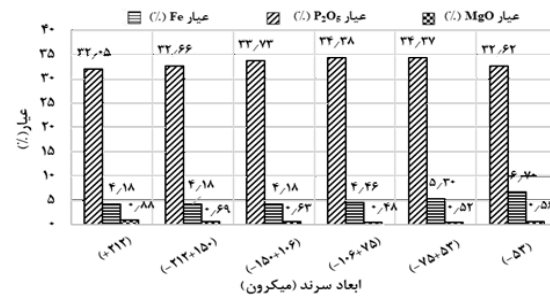
بررسی‌های شناسایی نمونه سنگ سبز مشخص کرد که کانی‌های اصلی شامل آپاتیت، هماتیت، مگنتیت و سیلیکات‌های منیزیم دار (ترمولیت و اکتینولیت) می‌باشند. مطالعه مقاطع نشان داد که آپاتیت و مگنتیت این نمونه سنگ در اندازه ذرات کوچک‌تر از ۲۱۲ میکرون آزاد می‌شوند.

نتایج جدایش مغناطیسی شدت پایین نشان داد با افزایش شدت میدان مغناطیسی تا از ۱۰۰۰ تا ۲۵۰۰ گوس بازایی آهن به‌سرعت افزایش داشته و در شدت‌های ۲۵۰۰ تا ۴۰۰۰ گوس بازایی تقریباً ثابت بوده است. در شدت میدان‌های بالا با افزایش شدت میدان بازایی MgO افزایش می‌یابد که به دلیل داشتن خاصیت مغناطیسی کانی‌های سیلیکاته است.

در پایش کارخانه مشخص شد سنگ سبز بسیار نرم بوده و در حدود ۱۰ درصد از خوراک به درجه آزادی رسیده است و خردادش مجدد آن باعث افزایش نرمه می‌شود به‌طوری‌که باعث شده تا  $d_{80}$  خروجی آسیای میله‌ای از ۶۰۰ میکرون تعریف شده به ۲۰۶ میکرون کاهش یابد و توزیع در ابعاد کوچک‌تر از ۳۸ میکرون از ۵/۵ درصد به ۳۷/۳۲ درصد افزایش یابد.



شکل ۳۰- عیار Fe, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> و MgO بخش‌های ابعادی مختلف باطله رافر



شکل ۳۱- عیار Fe, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> و MgO بخش‌های مختلف ابعادی کنسانتره نهایی

#### ۳-۵- پیشنهادهایی برای اصلاح مدار فعلی

##### کارخانه برای فرآوری سنگ سبز

الف - با توجه به نرم بودن سنگ سبز و تولید نرمه زیاد پیشنهاد می‌شود تا روش آتشباری، استخراج، حمل و خردادش موردبررسی و اصلاح قرار گیرد.

ب - در پایش کارخانه مشخص شد که نزدیک به ۵ درصد از خوراک ورودی به آسیای میله‌ای کوچک‌تر از ۳۸ میکرون و تقریباً ۱۰ درصد کوچک‌تر از ۱۵۰ میکرون است، این در حالی است که بررسی‌های انجام شده نشان داد که بسته به تغییرات خوراک این اعداد می‌تواند حتی تا ۳۰ درصد نیز افزایش داشته باشد. با توجه به نرمه زیاد در خوراک پیشنهاد می‌شود از یک کلاسیفایر مارپیچی برای حذف نرمه‌ها استفاده شود.

ج - پیشنهاد می‌شود با توجه به آزادی زیاد ذرات آپاتیت و مگنتیت در ابعاد زیر ۲۱۲ میکرون، حد جدایش سیکلون اولیه به ۲۱۲ میکرون افزایش یابد.

د - پیشنهاد می‌شود برای افزایش کارایی دانه‌بندی اولیه در مدار آسیاکنی، یک سیکلون دیگر به سیکلون اولیه افزوده شود.

- [4] Kawatra, S. K., & Carlson, J. T. (2013). Beneficiation of phosphate ore. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration..
- [5] Clark, R. N., Swayze, G. A., Wise, R. A., Livo, K. E., Hoefen, T. M., Kokaly, R. F., & Sutley, S. J. (2007). USGS digital spectral library splib06a (No. 231). US Geological Survey.
- [6] Houot, R. (1982). Beneficiation of phosphatic ores through flotation: Review of industrial applications and potential developments. *International Journal of Mineral Processing*, 9(4), 353-384.
- [7] Baudet, G., & Save, M. (1999). Phosphoric esters as carbonate collectors in the flotation of sedimentary phosphate ores. *Beneficiation of Phosphates: Advances in Research and Practice*, 163-185.
- [8] Maltesh, C., Somasundaran, P., & Gruber, G. A. (1996). Fundamentals of oleic acid adsorption on phosphate flotation feed during anionic conditioning. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 13(4), 156-160.
- [9] Souza, A. L. D., Albuquerque, R. O. D., Lameiras, F. S., Praes, P. E., & Peres, A. E. C. (2014). Use of depressants in the direct flotation of a silicate-carbonate phosphate ore. *Rem: Revista Escola de Minas*, 67(2), 191-196.
- [10] Abouzeid, A. (2007). Upgrading of phosphate ores-a review. *Powder Handling and Processing*, 19(2), 92.
- [11] Baudet, G., & Save, M. (1999). Phosphoric esters as carbonate collectors in the flotation of sedimentary phosphate ores. *Beneficiation of Phosphates: Advances in Research and Practice*, 163-185.
- [12] Shafaei Tonkaboni, S. Z., Karamoozian, M., Gharibi, K., Doulati Ardehjani, F., & Khalo Kakaie, R. (2007). Optimization of flotation process in Esfordi phosphate beneficiation plant. *Iranian Journal of Mining Engineering*, 1(2), 31-41.
- [13] Amirech, A., Bouhenguel, M., & Kouachi, S. (2018). Two-stage reverse flotation process for removal of carbonates and silicates from phosphate ore using anionic and cationic collectors. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(19), 1-8.
- [14] Aleksandrova, T., Elbendari, A., & Nikolaeva, N. (2020). Beneficiation of a low-grade phosphate ore using a reverse flotation technique. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1-6.
- [15] Alsafasfeh, A., Khodakarami, M., Alagha, L., Moats, M., & Molatlhegi, O. (2018). Selective depression of silicates in phosphate flotation using polyacrylamide-grafted nanoparticles. *Minerals Engineering*, 127, 198-207.
- [16] Ruan, Y., He, D., & Chi, R. (2019). Review on beneficiation techniques and reagents used for phosphate ores. *Minerals*, 9(4), 253.

در بررسی آسیای میله‌ای و هیدروسیکلون اولیه مشخص شد، خوراک‌دهی بیش‌ازحد به سیکلون باعث عملکرد نادرست آن شده است و ۳۶ درصد از تهریز آن را ذرات کوچک‌تر از ۱۵۰ میکرون تشکیل داده‌اند؛ که به‌اشتباه به آسیای گلوله‌ای منتقل شده و باعث خردداده شدن و تولید نرمه بیشتر شد.

آزمایش‌های فلوتاسیون آزمایشگاهی نشان داد بازیابی در شرایط معمول (کلکتور ۶۰۰ gr/t، نشاسته ۴۰۰ gr/t و pH=۱۰) بسیار پایین بوده ولی با نرمه‌گیری می‌توان عیار را در حدود ۸ درصد و بازیابی را ۳۱ درصد افزایش داد. مقایسه عیار خوراک فلوتاسیون در کارخانه (۱۳/۵ درصد  $P_2O_5$ ) و باطله رافر (۱۳/۸ درصد  $P_2O_5$ ) نشان داد که بازیابی فرآیند فلوتاسیون بسیار کم بوده است. با اصلاح کارکرد هیدروسیکلون‌های نرمه‌گیر چهار درصد از بخش ۳۸- میکرون ورودی به فلوتاسیون کاسته شده و بازیابی فلوتاسیون بهبود یافت.

با بررسی انجام شده مشخص گردید که انحلال یون‌های کلسیم و منیزیم از خاک سبز در آب فرآیند باعث افزایش پایداری کف و مصرف کلکتور و در نتیجه کاهش بازیابی فلوتاسیون می‌شود. با کاهش نرمه تولیدی در مدار آسیاکنی می‌توان انحلال این یون‌ها را در آب کاهش داد.

### سپاسگزاری

نویسندگان لازم می‌دانند تا از زحمات جناب آقای مهندس آزادشده حسینی کارشناس محترم آزمایشگاه فرآوری مواد معدنی دانشگاه یزد و همچنین همکاری مدیریت و کارشناسان مجتمع فسفات اسفوردی تشکر و قدردانی نمایند.

### مراجع

- [1] Shariati, S., Ramadi, A., & Salsani, A. (2015). Beneficiation of low-grade phosphate deposits by a combination of calcination and shaking tables: Southwest Iran. *Minerals*, 5(3), 367-379.
- [2] Oliazadeh, M., MirMohammadi, M. (2006). Processing and application of industrial minerals. *Jihad Daneshgahi Publications, Amirkabir Industrial Branch*. P. 156-140 (In Persian).
- [3] Abouzeid, A. Z. M. (2008). Physical and thermal treatment of phosphate ores—an overview. *International journal of mineral processing*, 85(4), 59-84.

- [17] Tao, D., Zhou, X., Kennedy, D., Dopico, P., & Hines, J. (2010). Improved phosphate flotation using clay binder. *Separation science and technology*, 45(5), 604-609.
- [18] Ahmed, H. A. (2007). Optimization of desliming prior to phosphate ore upgrading flotation. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 41, 79-88.
- [19] Derhy, M., Taha, Y., Hakkou, R., & Benzaazoua, M. (2020). Review of the Main Factors Affecting the Flotation of Phosphate Ores. *Minerals*, 10(12), 1109.
- [20] Santana, R. C., Duarte, C. R., Ataíde, C. H., & Barrozo, M. A. S. (2011). Flotation selectivity of phosphate ore: Effects of particle size and reagent concentration. *Separation Science and Technology*, 46(9), 1511-1518.
- [21] Santana, R. C., Farnese, A. C., Fortes, M. C., Ataíde, C. H., & Barrozo, M. A. (2008). Influence of particle size and reagent dosage on the performance of apatite flotation. *Separation and Purification Technology*, 64(1), 8-15.
- [22] Guo, F., & Li, J. (2010). Separation strategies for Jordanian phosphate rock with siliceous and calcareous gangues. *International Journal of Mineral Processing*, 97(1-4), 74-78.