

پرعیارسازی کانسنگ فسفات موندون به روش‌های لیچینگ، کلسیناسیون و مغناطیسی

سید محمد جواد کلینی؛ ابوالفضل آئین‌پور؛ علیرضا رئیسی

۱- دانشگاه تربیت مدرس، koleini@modares.ac.ir

۲- دانشگاه تربیت مدرس

۳- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

(دریافت ۱۰ اردیبهشت ۱۳۸۶، پذیرش ۲۸ مهر ۱۳۸۶)

چکیده

در مقاله حاضر، پرعیارسازی کانسنگ فسفات موندون به منظور کاهش مقدار کانی‌های باطله از قبیل کربنات‌ها و کانی‌های آهن‌دار، مورد بررسی قرار گرفته است. طبق مطالعات کانی‌شناسی انجام شده، کانی فسفات موجود در کانسنگ، از نوع کانی‌های رسوبی و کلوفان است که کلسیت و کوارتز، بخش عمده باطله موجود در آن را تشکیل می‌دهند. در طراحی آزمایش‌های لیچینگ و کلسیناسیون از روش تاگوچی استفاده گردید. آزمایش‌های لیچینگ با اسید استیک به منظور حذف گانگ کربناته و افزایش عیار P_2O_5 انجام شد و تأثیر عوامل مختلف همچون زمان، غلظت اسید استیک و نسبت مایع/جامد مورد بررسی قرار گرفت. عیار P_2O_5 محصول نهایی در شرایط بهینه، ۳۱/۱۹ درصد و بازیابی P_2O_5 در آن ۹۹/۹ درصد حاصل شد. از روش کلسیناسیون نیز به عنوان روشی برای کاهش گانگ کربناته و افزایش عیار P_2O_5 استفاده گردید. در بهترین شرایط، عیار P_2O_5 با استفاده از این روش به ۲۵/۲۵ درصد و بازیابی ۹۹/۸ درصد افزایش یافت به منظور کاهش مقدار Fe_2O_3 از روش جدایش مغناطیسی تر با شدت بالا استفاده گردید. در بهترین شرایط، عیار Fe_2O_3 از ۲/۵۸ به ۱/۴۳ درصد کاهش یافت.

کلمات کلیدی

فسفات، لیچینگ، کلسیناسیون، جدایش مغناطیسی، تاگوچی

۱- مقدمه

از دیدگاه اقتصادی، سنگ‌های فسفاته نباید بیش از ۸ درصد کربنات داشته باشند. فلوتاسیون یکی از بهترین روش‌ها برای کانسنگ‌هایی است که دارای کربنات‌های خوب متبلور هستند، اما هنگامیکه کانسنگ حاوی کربنات‌های نرم و گچی باشد، فلوتاسیون نتیجه خوبی در بر نخواهد داشت [۱]. افزایش ارزش افزوده کانسنگ‌های فسفات کربناته به دلیل خواص شیمی- فیزیکی مشابه کانی‌های موجود در آن فرآیند بسیار پیچیده‌ای است [۲].

کربنات‌های موجود در سنگ‌های فسفاته به سادگی با هر اسید قوی، قابل انحلال‌اند. متأسفانه، اسیدهای قوی در هنگام لیچینگ کربنات‌ها، آپاتیت را هم حل می‌کنند. این موضوع یکی از موانع اصلی برای بکارگیری فرآیندهای لیچینگ اسیدی در جداسازی کربنات‌ها، مخصوصاً دولومیت از کانسنگ‌های فسفات است. برای جلوگیری از لیچینگ فسفات، اسیدهایی ضعیف به عنوان عوامل لیچینگ، تأثیر مناسب‌تری دارند. معمولاً این اسیدها بسیار هزینه‌بر هستند. با این وجود، به دلیل پایین بودن هزینه سرمایه‌ای آن و اثر بالای آن در حذف کربنات‌ها، لیچینگ اسیدی به کرات مورد مطالعه قرار گرفته است [۳].

اسیدهایی آلی ضعیف مانند اسید استیک، اسید سیتریک و اسید فورمیک نیز می‌توانند برای لیچینگ کربنات‌ها استفاده شوند. به نظر می‌رسد که اسید استیک مزیت‌های بیشتری دارد. اسید استیک مصرف شده در فرآیند با واکنش استات کلسیم و اسید سولفوریک بازیابی می‌شود [۴].

کلسیناسیون تنها روش صنعتی حذف کامل کربنات‌ها از سنگ فسفات، به ویژه سنگی که دارای باطله کربناته بالا است، می‌باشد. در آفریقا و غرب ایالات متحده از کلسیناسیون برای کاهش مقدار باطله کربناته موجود در کانسنگ‌های فسفات استفاده شده است [۵].

در عربستان سعودی به دلیل محدودیت در تهیه آب و ارزانی قیمت انرژی، کلسیناسیون مطالعه و پیشنهاد شده است. یک کانسنگ فسفات در عربستان سعودی شامل ۴۰ تا ۵۰ درصد کربنات و ۱۶ تا ۲۵ درصد P_2O_5 در دمای $850^{\circ}C$ به مدت تقریباً یک ساعت تکلیس شده و به دنبال آن با NH_4NO_3 ۵٪، NH_4Cl ۵٪ یا آب، شسته می‌شود. در بهترین شرایط، یک کنسانتره ای با ۳۸ درصد P_2O_5 حاصل شده است [۶].

۲- روش‌ها و مواد

۲-۱- مواد

در این مطالعه یک نمونه فسفات از کانسنگ موندون که توسط سازمان زمین‌شناسی تهیه گردیده بود، استفاده شد. نتایج حاصل از مطالعات XRD نشان می‌دهد که کانی‌های عمده موجود در کانسنگ عبارتند از آپاتیت، کلسیت و کوارتز. نتایج حاصل از آنالیز XRF در جدول ۱ درج شده است [۷]. مطابق مطالعات میکروسکوپی انجام شده بر روی شش عدد تیغه نازک از نمونه‌های خرد شده و بخش‌های مختلف دانه‌بندی، مشاهده می‌شود که کانی‌های تشکیل دهنده شامل کلسیت، کانی‌های فسفاته ریزبلور تا نهان بلور (کلوفان)، هیدروکسیدهای آهن، مواد آلی، کوارتز ریزبلور (کلسدونی) و گلوکونیت است (شکل ۱).

کلوفان از کربنات فلورآپاتیت یا فرانکولیت تشکیل می‌شود و در مقاطع میکروسکوپی با نور عادی شامل فسفات‌های بسیار دانه‌ریز تا نهان بلور زرد عسلی است که بسته به میزان اندودشدگی و آغشتگی آن با اکسیدهای آبدار آهن/هماتیت، به رنگ‌های قهوه‌ای روشن تا قهوه‌ای تیره تغییر می‌کند. این آغشتگی‌ها که اغلب شامل گلبول‌های نسبتاً خالصی از جنس گوتیت در ابعاد میکرونی است احتمالاً به علت شرایط شیمی- فیزیکی محیط نهشت کلوفان به وقوع پیوسته است. از نظر خصوصیات میکروسکوپی کلوفان در نور پلاریزه (تارهای صلیب شده نیکول) تاریک و ویژگی کانی‌های آمورف را نشان می‌دهد. از بین اسیدهایی آلی، اسید استیک به دلیل عدم واکنش با کانی‌های فسفاته نسبت به اسیدهایی آلی دیگر مانند اسید سیتریک نتایج بهتری می‌دهد. در انجام آزمایش‌های لیچینگ از اسید استیک که از اسیدهایی آلی و ضعیف می‌باشد استفاده شد.

۲-۲- روش‌ها

آزمایش‌های لیچینگ با همزن به علت تأثیر بیشتر آن و در دمای آزمایشگاه ($30^{\circ}C$ - $25^{\circ}C$) انجام شد. دور همزن در تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر با ۵۰ دور بر دقیقه انتخاب و تأثیر عوامل غلظت اسید استیک، نسبت مایع/جامد و زمان بر لیچینگ با روش تاگوچی مورد بررسی قرار گرفت. پس از انجام آزمایش‌ها جامد باقیمانده فیلتر و سپس شسته شد و مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفت.



شکل ۱: حجرات و فسیل‌های فرامنیفر کلسیتی و قطعات فسفات‌ه درگیر با مواد آلی و اکسیدهای آهن در زمینه میکرایتی. نور معمولی (بدون پلاریزور و آنالیزور). بزرگنمایی ۲۰×

جدول ۱: نتایج آنالیز XRF نمونه سنگ فسفات

BaO	SrO	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	F	L.O.I	ترکیب
۰/۲۸	۰/۲۹	۲/۵۸	۴۷/۱۹	۰/۳۸	۰/۵۷	۲۰/۵۲	۹/۲۸	۱/۰۵	۰/۴۰	۰/۱۴	۲/۳۰	۱۴/۸۹	%

۳- آزمایش‌ها و نتایج

۳-۱- لیچینگ با اسید استیک

به منظور بهینه‌سازی شرایط آزمایش‌ها، به بررسی تأثیر هر یک از عوامل در سه سطح و با استفاده از آرایه L9 تاگوچی پرداخته شد [۹،۱۰]. سطوح انتخابی عوامل در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: عوامل اصلی و سطوح انتخابی آزمایش‌های لیچینگ

عوامل	علامت اختصاری	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
غلظت اسید استیک (%)	A	۵	۶/۷	۱۰
نسبت مایع/جامد	B	۱:۴	۱:۳	۱:۵
زمان (دقیقه)	C	۳۰	۶۰	۹۰

پس از انجام آزمایش‌ها، از پسماند باقیمانده نمونه‌گیری شد و مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفت. جدول ۳ عیار CaO، P₂O₅ و SiO₂ و بازیابی P₂O₅ را در پسماند باقیمانده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد.

آزمایش‌های کلسیناسیون با کوره الکتریکی موجود در آزمایشگاه فرآوری دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. از خوراک اولیه با وزن ۳۰ گرم و در ابعاد گوناگون، در زمان‌های ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه و در دماهای مختلف استفاده گردید. به دنبال انجام آزمایش‌های کلسیناسیون، محصول کلسینه شده با ۵ درصد NH₄NO₃، به مدت ۳۰ دقیقه شسته شد.

میزان آهن و ترکیبات آن در نمونه مورد مطالعه به طور متوسط ۲/۵ درصد است که بیشتر از حد مجاز بوده و جهت کاهش میزان آهن، روش‌های مغناطیسی مد نظر قرار گرفت. در مطالعات میکروسکوپی مشخص شد که گوتیت و اکسیدهای آهن به صورت آغشتگی، کلوپان را همراهی می‌کنند.

با توجه به وجود کانی‌های باطله آهن‌دار (مانند گونیت) در کانسنگ فسفات، از روش جدایش مغناطیسی می‌توان به منظور جداسازی این کانی‌ها استفاده کرد. با استفاده از نیروهای وارد بر دانه‌های جامد در یک میدان مغناطیسی می‌توان مواد معدنی را از یکدیگر جدا کرد. در این روش با تنظیم نیروهای مغناطیسی و نیروهای جانبی مانند نیروی ثقل و نیروی گریز از مرکز، دانه‌ها مسیرهای مختلفی را طی می‌کنند و بدین ترتیب می‌توان ذرات را جدا کرد [۸]. به دلیل وجود کانی‌های باطله آهن‌دار (مانند گونیت) در کانسنگ فسفات، می‌توان روش جدایش مغناطیسی را به منظور جداسازی این کانی‌ها به کار برد [۷].

جدول ۳: عیار و بازیابی مربوط به هر یک از آزمایش‌های لیچینگ

مناسب به نظر می‌رسد. دلیل بالا بودن بازیابی در پسماند، انتخابی عمل کردن اسید استیک در انحلال کلسیت می‌باشد. در تعیین سطوح بهینه از نتایج عیار P_2O_5 استفاده گردید. با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که تمام عوامل در سطح سوم افزایش عیار را نشان می‌دهند. بنابراین سطوح بهینه برای این عوامل بر پایه اطلاعات A_3, B_3, C_3 هستند.

جدول ۴ میزان تأثیر هر کدام از پارامترهای مورد بررسی بر بازیابی P_2O_5 را نشان می‌دهد. همانگونه که از نتایج پیداست عوامل غلظت اسید استیک و نسبت مایع/جامد بیشترین تأثیر را داشته و زمان تأثیری در نتایج نداشته است. بنابراین می‌توان از تأثیر اثر زمان در نتایج صرف نظر کرده و مقدار آن را حذف نمود. بعد از حذف عامل C (زمان) که دارای کمترین درصد تأثیر است جدول ۵ حاصل شد.

شماره آزمایش	عیار (%)			بازیابی (%)	
	P_2O_5	CaO	SiO_2	P_2O_5	CaO/ P_2O_5
۱	۲۵/۵۲	۴۶/۴۱	۱۱/۴۸	۹۷/۶	۱/۸۲
۲	۲۴/۴۷	۴۸/۲۳	۱۱/۸۴	۹۸/۷	۱/۹۷
۳	۲۷/۹۱	۴۶/۸۴	۱۰/۹۵	۹۹/۰۹	۱/۶۸
۴	۲۷/۴۵	۴۷/۹۸	۱۳/۱۲	۹۹/۰۵	۱/۷۵
۵	۲۶/۳۱	۴۶/۸۹	۱۳/۶۹	۹۹/۲	۱/۷۹
۶	۲۶/۹۰	۴۷/۰۳	۱۲/۸۰	۹۹/۳۵	۱/۷۵
۷	۲۸/۹۴	۴۷/۴۴	۱۳/۱۱	۹۹/۸	۱/۸۰
۸	۲۷/۹۰	۴۷/۹۳	۱۱/۵۵	۹۹/۴	۱/۷۲
۹	۲۹/۸۶	۴۶/۱۴	۱۳/۰۰	۹۹/۹۹	۱/۵۵

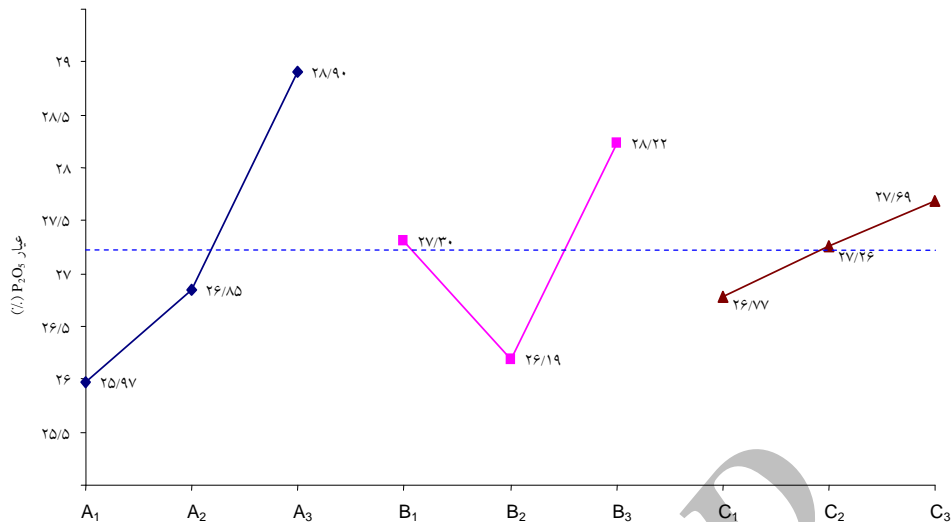
از نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که دامنه تغییرات عیارهای CaO و SiO_2 تقریباً کم بوده و بازیابی P_2O_5 نیز

جدول ۴: آنالیز واریانس و درصد تأثیر عوامل بر عیار P_2O_5 در آزمایش‌های لیچینگ

عوامل	f	S	V	S'	F	درصد تأثیر
غلظت اسید استیک (A) (%)	۲	۱۳/۵۸	۶/۷۸۹	۱۲/۱۲۱	۹/۳۰۸	۵۳/۸۹۱
نسبت جامد به مایع (B)	۲	۶/۱۹۹	۳/۱	۴/۷۴۱	۴/۲۴۹	۲۱/۰۷۸
زمان (دقیقه) (C)	۲	۱/۲۵۳	۰/۶۲۶	۰	۰/۸۵۹	۰
خطا	۲	۱/۴۵۹	۰/۷۲۹	.....	.....	۲۵/۰۳۲
جمع	۸	۲۲/۴۹۱	۲/۸۱۱	.....	.....	۱۰۰

جدول ۵: آنالیز واریانس و درصد تأثیر عوامل بر عیار P_2O_5 بعد از حذف در آزمایش‌های لیچینگ

عوامل	f	S	V	S'	F	درصد تأثیر
غلظت اسید استیک (A) (%)	۲	۱۳/۵۸	۶/۷۸۹	۱۲/۲۲	۱۰/۰۱۵	۵۴/۳۵
نسبت جامد به مایع (B)	۲	۶/۱۹۹	۳/۱	۴/۸۴	۴/۵۷۲	۲۱/۵۴
زمان (دقیقه) (C)	(۲)	(۱/۲۵۳)	(۰/۶۲۶)	.....	POOLED	.....
خطا	۴	۲/۷۱۲	۰/۶۷۸	.....	.....	۲۴/۱۲
جمع	۸	۲۲/۴۹۱	۲/۸۱۱	.....	.....	۱۰۰



شکل ۲: اثر عوامل مختلف بر عیار P₂O₅ در آزمایش های لیچینگ

$$C.I. = \pm \sqrt{\frac{F_{\alpha(1,f)} * V_e}{n_e}} = \pm \sqrt{\frac{4.55 * 0.678}{1.8}} = \pm 1.31 \quad (2)$$

همانگونه که مشاهده می‌شود، عیار آزمایش تأیید در محدوده اطمینان قرار گرفته است. بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که آزمایش‌های طراحی شده مناسب می‌باشند.

۳-۲- کلسیناسیون

معمولاً روش کلسیناسیون در مناطقی که با محدودیت آب مواجه بوده و هزینه انرژی چندان بالا نیست، به کار می‌رود. عوامل متعددی مانند دما، زمان و مشخصات اولیه (ابعاد ذرات، تخلخل و مساحت سطحی) بر روی فرآیند کلسیناسیون تأثیر دارند. هدف از آزمایش‌های کلسیناسیون کاهش مقدار کلسیت و در نتیجه افزایش عیار P₂O₅ است [۵].

جدول ۷ سطوح انتخاب شده عوامل مؤثر را نشان می‌دهد. با توجه به تعداد عوامل مؤثر (سه عامل اصلی) و تعداد سطوح این عوامل، آرایه مناسب برای مرحله بهینه‌سازی آرایه L9 تشخیص داده شد و محل قرار گرفتن عوامل در ستون‌های آرایه مذکور مشخص گردید. آزمایش‌ها به صورت تصادفی و با توجه به آرایه طرح‌ریزی شده، انجام شدند.

جدول ۷: عوامل اصلی و سطوح انتخابی آزمایش‌های کلسیناسیون

عوامل	علامت اختصاری	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
ابعاد بار اولیه (میکرون)	A	۸۸	۱۵۰	۲۱۰
دما (°C)	B	۸۵۰	۹۰۰	۹۵۰
زمان (دقیقه)	C	۶۰	۹۰	۱۲۰

درجه آزادی پارامترها ۲ و درجه آزادی خطا نیز بعد از حذف برابر ۴ است. بنابراین از جداول فیشر (F-Tables) در سطح معناداری ۰/۱۰ (اطمینان ۹۰٪)، $F_{0.1}(2,4) = 4/2346$ به دست می‌آید. از آنجایی که مقادیر محاسبه شده F برای تمام عوامل بزرگتر از $F_{0.1}(2,4)$ است بنابراین به نظر می‌رسد که عوامل غلظت اسید استیک و نسبت جامد به مایع بعد از حذف هر دو معنادار هستند. شرایط بهینه آزمایش‌ها در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶: سطوح بهینه عوامل و مقدار هر یک در آزمایش‌های لیچینگ

عوامل	مقدار	سطح
غلظت اسید استیک (%)	۱۰	۳
نسبت جامد به مایع	۱:۵	۳
زمان (دقیقه)	۹۰	۳

مقدار عیار بهینه در شرایط بهینه بدست آمده را می‌توان با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد. ماکزیمم عیار در شرایط بهینه برای P₂O₅ به صورت زیر به دست می‌آید [۱۰]:

$$y_{opt} = \frac{T}{n} + (\bar{A}_i - \frac{T}{n}) + (\bar{B}_j - \frac{T}{n}) + \dots = 29.9 \quad (1)$$

پس از تخمین مقدار بهینه، آزمایش تأییدی با استفاده از شرایط بهینه بدست آمده انجام شد. نتیجه آزمایش بهینه عبارت است از:

- عیار P₂O₅: ۳۱/۱۹

- بازیابی P₂O₅: ۹۹/۹

محدوده اطمینان پاسخ از رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۱۰]:

مقدار بازیابی‌های به دست آمده زیاد و دامنه تغییرات نیز کم است. بنابراین مناسب است سطوح بهینه برای دستیابی به حداکثر عیار P_2O_5 تعیین گردد و تحلیل‌های واریانس نیز بر همین اساس انجام شوند.

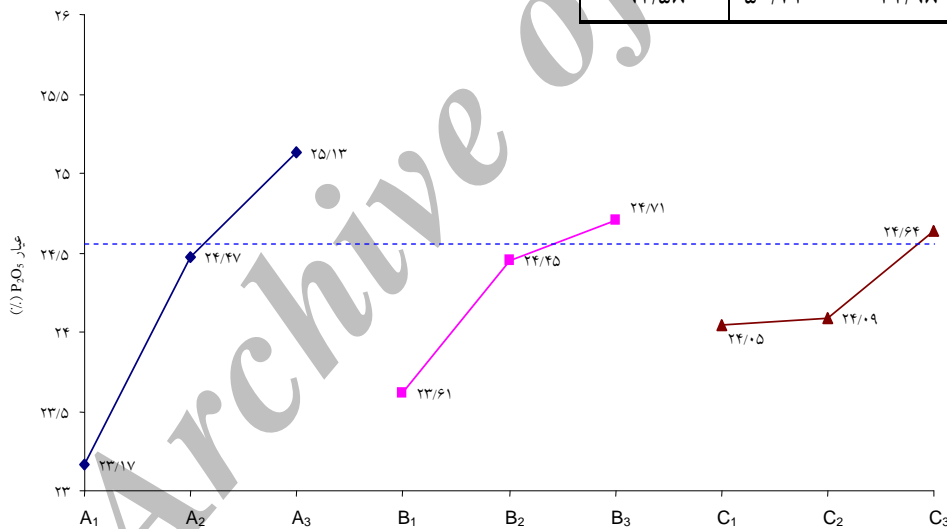
شکل ۳ نشان از افزایش عیار در سطح سوم برای همه عوامل دارد. بنابراین سطوح بهینه برای این عوامل $A_3B_3C_3$ هستند.

جدول ۹ میزان تأثیر هر کدام از عوامل مورد بررسی بر بازیابی P_2O_5 را نشان می‌دهد. همانگونه که از نتایج پیداست عوامل ابعاد خوراک و درجه حرارت بیشترین تأثیر و زمان کمترین تأثیر را در نتایج داشته است. بنابراین می‌توان از تأثیر زمان در نتایج صرف نظر کرده و مقدار آن را حذف نمود. بعد از حذف عامل زمان که دارای درصد تأثیر صفر است، جدول ۱۰ حاصل شد.

پس از انجام آزمایش‌ها، ماده تکلیس شده فیلتر شده و پس از خشک شدن، مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفت. جدول ۸ عیار CaO ، P_2O_5 و بازیابی P_2O_5 ماده کلسینه شده را نشان می‌دهد. عیار P_2O_5 خوراک در محاسبات بازیابی، ۲۱ درصد در نظر گرفته شده است.

جدول ۸: عیار و بازیابی آزمایش‌های کلسیناسیون

شماره آزمایش	عیار (%)		بازیابی (%)
	CaO	P_2O_5	
۱	۵۱/۸۱	۲۱/۸۹	۹۷/۵
۲	۵۳/۲۲	۲۳/۳۶	۹۶/۹
۳	۵۱/۲۳	۲۴/۲۶	۹۹/۹۹
۴	۵۱/۵۰	۲۳/۹۲	۹۶/۸
۵	۵۱/۴۹	۲۴/۶۲	۹۸/۰۷
۶	۵۰/۴۳	۲۴/۸۸	۹۹/۶۷
۷	۵۰/۰۹	۲۵/۰۳	۹۵/۱۳
۸	۵۱/۳۲	۲۵/۳۷	۹۷/۶
۹	۵۰/۷۲	۲۴/۹۸	۹۴/۵۸

شکل ۳: اثر عوامل مختلف بر عیار P_2O_5 در آزمایش‌های کلسیناسیونجدول ۹: آنالیز واریانس و درصد تأثیر عوامل بر عیار P_2O_5 آزمایش‌های کلسیناسیون

عوامل	f	S	V	S'	F	درصد تأثیر
ابعاد خوراک (میکرون)	۲	۵/۹۵	۲/۹۸	۵/۱۲۲	۷/۱۵	۵۴/۴۹
درجه حرارت ($^{\circ}C$)	۲	۱/۹۶	۰/۹۸	۱/۱۳	۲/۳۶	۱۲/۰۱
زمان (دقیقه)	۲	۰/۶۵۲	۰/۳۳	۰	۰/۷۸۴	۰
خطا	۲	۰/۸۳۲	۰/۴۲	.....	.....	۳۳/۵۰
جمع	۸	۹/۴۰	۱/۱۷۵	.....	.....	۱۰۰

جدول ۱۰: آنالیز واریانس و درصد تأثیر عوامل بر عیار P_2O_5 بعد از حذف آزمایش‌های کلسیناسیون

عوامل	f	S	V	S'	F	درصد تأثیر
ابعاد خوراک (میکرون)	۲	۵/۹۵	۲/۹۸	۵/۲۱۲	۸/۰۲۲	۵۵/۴۵
درجه حرارت ($^{\circ}C$)	۲	۱/۹۶	۰/۹۸	۱/۲۲	۲/۶۴	۱۲/۹۷
زمان (دقیقه)	(۲)	.....	.....	.....	.....	.....
خطا	۴	۱/۴۸	۰/۳۷	.....	.....	۳۱/۵۸
جمع	۸	۹/۳۹	۱/۱۷۵	.....	.....	۱۰۰

همانگونه که مشاهده می‌شود، عیار آزمایش تأیید در محدوده اطمینان قرار گرفته است.

۳-۳- آزمایش‌های جدایش مغناطیسی

جدایش مغناطیسی به دو روش انجام می‌گیرد که عبارتند از:

۱- روش جدایش با شدت میدان مغناطیسی کم. در این روش شدت میدان کمتر از ۲۰۰۰ گوس است. این روش برای کانی‌های فرومنیتیک مثل منیتیت به کار برده می‌شود.

۲- روش جدایش با شدت میدان مغناطیسی زیاد. در این روش شدت میدان بیشتر از ۲۰۰۰ گوس است. این روش برای کانی‌های پارامنیتیک مثل هماتیت که دارای تأثیرپذیری مغناطیسی کم هستند به کار برده می‌شود [۷].

دو روش می‌تواند در دو شکل تر و یا خشک به کار برده شود که با توجه به دانه‌بندی خوراک انتخاب می‌شود. با کوچک شدن ابعاد دانه‌ها به تدریج جداکننده‌های مغناطیسی خشک کارایی خود را از دست می‌دهند و لذا باید از روش تر استفاده کرد [۷].

جداکننده‌های مغناطیسی تر با شدت زیاد در مقایسه با جداکننده‌های خشک می‌توانند موادی با ابعاد کوچک‌تر را نیز آرایش دهند. عمده‌ترین کاربرد این جداکننده‌ها، آرایش کانه‌های اکسید آهن (عمدتاً شامل هماتیت) است که می‌تواند جایگزین روش فلوتاسیون نیز شود. در این تحقیق با توجه به نوع کانسنگ مورد استفاده، از روش جدایش مغناطیسی تر با شدت زیاد و با درصد جامد ۲۵٪ استفاده شد [۷].

میزان آهن و ترکیبات آن در نمونه مورد مطالعه به طور متوسط ۲/۵٪ است که بیشتر از حد مجاز بوده و لذا جهت کاهش میزان آهن، روش‌های مغناطیسی مد نظر قرار گرفت.

با توجه به درجه آزادی کانی مورد نظر، آزمایش‌ها در ابعاد ۱۵۰-۴۵+ میکرون و ۴۵- میکرون انجام شدند. برای هر نمونه دو شدت جریان ۲ و ۴ آمپر آزمایش شد. به دلیل ریزدانه بودن

درجه آزادی پارامترها ۲ و درجه آزادی خطا نیز بعد از حذف برابر ۴ است. بنابراین از جداول فیشر (F-Tables) در سطح معناداری ۰/۰۵ (اطمینان ۰/۹۵)، $F_{0.05}(2,4)=6/94$ به دست می‌آید. از آنجایی که مقادیر محاسبه شده برای فاکتور F برای عامل A بزرگ‌تر و برای عامل B کوچک‌تر از $F_{0.05}(2,4)$ است. بنابراین به نظر می‌رسد که عامل ابعاد خوراک بعد از حذف معنادار و عامل درجه حرارت بی‌معنا می‌باشد. شرایط بهینه آزمایش‌های کلسیناسیون در جدول ۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۱۱: سطوح بهینه عوامل و مقدار هر یک در آزمایش‌های کلسیناسیون

عوامل	مقدار	سطح
ابعاد خوراک (میکرون)	-۷۰	۳
درجه حرارت ($^{\circ}C$)	۹۰۰	۲
زمان (دقیقه)	۱۲۰	۳

مقدار عیار بهینه را می‌توان با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد. ماکزیمم عیار در شرایط بهینه برای P_2O_5 به صورت زیر از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$y_{opt} = \frac{T}{n} + (\bar{A}_i - \frac{T}{n}) + (\bar{B}_j - \frac{T}{n}) + \dots = 25.13$$

پس از تخمین مقدار بهینه، آزمایش تأییدی با استفاده از شرایط بهینه بدست آمده، انجام شد. نتیجه آزمایش بهینه عبارت است از:

- عیار P_2O_5 : ۲۵/۲۵

- بازیابی P_2O_5 : ۹۹/۸

محدوده اطمینان پاسخ از رابطه ۲ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C.I. = \pm \sqrt{\frac{F_{\alpha(f)} * V_e}{n_e}} = \pm \sqrt{\frac{7.71 * 0.37}{3}} = \pm 0.975$$

حدود ۱۹ تا ۲۰ درصد، CaO تقریباً ۴۸ تا ۵۰ درصد، SiO₂ ۹ تا ۱۱ درصد به همراه Fe₂O₃ به مقدار ۲ تا ۳ درصد.

(۲) استفاده از روش لیچینگ با اسید استیک تأثیر زیادی در افزایش عیار P₂O₅ داشته است؛ به گونه‌ای که با استفاده از اسید استیک با غلظت ۱۰ درصد و با نسبت جامد به مایع ۱/۵، محصولی با عیار ۳۱/۱۹ درصد P₂O₅ و بازیابی ۹۹/۹ درصد به دست خواهد آمد.

(۳) حداکثر عیار قابل دستیابی برای P₂O₅ با استفاده از روش کلسیناسیون ۲۵/۲۵ درصد P₂O₅ و بازیابی ۹۹/۸ درصد است. شرایط بهینه روش کلسیناسیون ابعاد ۸۸ میکرون، درجه حرارت ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۱۲۰ دقیقه است.

(۴) با انجام آزمایش‌های مغناطیسی با استفاده از دستگاه جداکننده مغناطیسی شدت بالا و روش تر با جریان‌های ۲ و ۴ آمپر مشخص شد که دانه‌بندی خوراک اولیه و مقدار شدت جریان تأثیر ناچیزی بر میزان جدایش Fe₂O₃ دارند.

۵- تقدیر و تشکر

بدینوسیله از مسئولین آزمایشگاه‌های بخش معدن دانشگاه تربیت مدرس و سازمان زمین‌شناسی کشور که امکان انجام این تحقیق را فراهم کردند تشکر و قدردانی می‌شود.

نمونه، برای جذب ذرات مغناطیسی و جدایش آنها از سایر ذرات، از گلوله‌های متوسط و ریزدانه برای دستگاه جداکننده مغناطیسی استفاده گردید. آنالیز شیمیایی بخش مغناطیسی و غیر مغناطیسی نمونه مورد مطالعه در جدول ۱۲ آورده شده است.

دانه‌بندی نمونه‌ها تأثیر زیادی بر میزان جدایش Fe₂O₃ نداشته است، بطوریکه در نمونه‌های با ابعاد ۴۵- میکرون جدایش بسیار کمی اتفاق افتاده است. دلیل این اتفاق حساسیت دستگاه جداکننده و عدم کارایی آن برای ذرات نرمه است. اندازه گلوله‌های حد واسط دستگاه نیز تأثیر چندانی بر میزان جدایش نداشته است و استفاده از گلوله‌های ریز به دلیل افزایش سطح مخصوص و در نتیجه بالا رفتن میزان سطح تماس این گلوله‌ها با ذرات کانی، تأثیر کمی در جدایش Fe₂O₃ از کانسنگ داشته است. مقدار شدت جریان تأثیر چندانی بر جدایش نداشته است و بهترین حالت جدایش در آزمایش‌های سوم و چهارم اتفاق افتاده است.

۴- نتیجه گیری

به طور خلاصه می‌توان نتایج حاصل از مطالعات را به صورت زیر بیان کرد:

(۱) مطالعات کانی‌شناسی کانسنگ فسفات موندون نشان داد که بخش اعظم باطله را کانی‌های کربناته و سیلیکاته تشکیل می‌دهند. میزان ترکیبات اصلی آن عبارتند از P₂O₅

جدول ۱۲: شرایط و نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مغناطیسی

شماره آزمایش	ابعاد ذرات (میکرون)	شدت جریان (آمپر)	اندازه گلوله‌ها	بخش غیر مغناطیسی		بخش مغناطیسی	
				عیار Fe ₂ O ₃	عیار P ₂ O ₅	عیار Fe ₂ O ₃	عیار P ₂ O ₅
۱	+۴۵-۱۵۰	۴	متوسط	۱/۵۴	۲۲/۰۴	۱۱/۱۸	۱۲/۵۸
۲	+۴۵-۱۵۰	۲	متوسط	۱/۶۹	۲۲/۰۷	۱۳/۰۷	۸/۶۹
۳	+۴۵-۱۵۰	۴	ریز	۱/۴۳	۲۲/۳۹	۱۲/۲۳	۸/۴۹
۴	+۴۵-۱۵۰	۲	ریز	۱/۴۵	۲۲/۴۴	۱۲/۹۵	۸/۰۴
۵	-۴۵	۴	ریز	۱/۹۵	۲۲/۰۱	۴/۱۲	۱۸/۶۴
۶	-۴۵	۲	ریز	۱/۹۷	۲۱/۵۰	۴/۰۷	۱۹/۸۳

۶- منابع

- [۶] Al-Fariss, T. F., 1993, "Beneficiation of a Carbonate Rich Saudi Phosphate Rocks", *Engineering Foundation Conference. Beneficiation of Phosphates: Theory and Practice*", SME, Dec. 5-10, Palm Coast, FL.
- [۷] آئین‌پور، ابوالفضل؛ ۱۳۸۵، "فرآوری کان‌سنگ فسفات موندون"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- [۸] نعمت‌الهی، حسین، ۱۳۷۵، "مکانه آرایبی" (جلد ۱ و ۲)، انتشارات دانشگاه تهران.
- [۹] Taguchi G., 1987, "System of experimental design", Vol. 1, KRAVS International publication.
- [۱۰] Taguchi G.; 1987, "System of experimental design", Vol 2, KRAVA International publication.
- [۱] Hignett, T.P., Doll, E.C., Livingston, O.H., Raistrick, B., 1977. "Utilization of difficult ores. In: Carpentier", L.J. (Ed.), *New Developments in Phosphate Fertilizer, Technology, Proceedings*, Elsevier, Amsterdam, pp. 272-288.
- [۲] Somasundaran, P., 1975 "On the problem of separation of calcite from calcareous apatite". In: 11th Int. Miner. Proc. Cong., Cagliari, 2, pp. 155-156.
- [۳] Ashraf, M., Zafar, I.Z., Ansari, T.M., 2005, "Selective leaching kinetics and upgrading of low grade calcareous phosphate rock in succinic acid". *Hydrometallurgy* 80, 286-292.
- [۴] Abu-Elshah, S. I, 1991, "A New Technique for the beneficiation of Low Grade Carbonate Rich Phosphate Rocks by Digestion with Dilute Acetic Acid Solutions: Pilot Plant Testing Results", *Minerals Engineering*, Vol. 4 (5/6), pp. 573-586.
- [۵] Good, P. C, 1976, "Beneficiation of Unweathered Indian Calcareous Phosphate Rock by Calcination and Hydration", U. S. Government Printing Office, 1976-603-755/129, pp. 1-17.