



مقاله پژوهشی

فلوتاسیون کانسنگ رسوبی فسفات معدن چرام

علیرضا جوادی^{*}، محمدرضا علیپور^۲

۱. استادیار گروه معدن، دانشگاه کاشان، alireza.javadi@kashanu.ac.ir
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه معدن، دانشگاه کاشان، mreza.alipour2020@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۹

چکیده

با توجه به کاربرد وسیع فسفات، نیاز است در رابطه با فرآوری آن، مطالعات و آزمایش های گسترده ای انجام شود. در این تحقیق از روش فلوتاسیون جهت حذف گانگ کربناته به کمک کلکتور ساخته شده (j-mrap1) استفاده شد. عیار کانه رسوبی معدن فسفات چرام استفاده شده در این تحقیق ۱۳ درصد P_2O_5 است و جزء ذخایر کم عیار محسوب می شود و همچنین کانی های فرعی آن ۴۶٪ کلسیت و ۷ درصد سیلیس می باشد. برای دستیابی به عیار تجاری ۲۸ درصد P_2O_5 ، کلکتور جدیدی با گروه عاملی اسید هیدرو کسامیک سنتز و استفاده شده است. با بهینه سازی توسط نرم افزار طراحی آزمایش ها (DX7)، در pH برابر با ۶/۲ و میزان کلکتور ۱۰۰۰ گرم در تن، بیشترین بازیابی ۸۴/۹۷ درصد P_2O_5 با عیار ۲۷/۷۱ درصد P_2O_5 حاصل شد. با تغییر pH به ۶/۵ و مقدار کلکتور به ۱۲۰۰ گرم در تن، کنسانتره با بیشترین عیار ۲۹/۴۷ درصد P_2O_5 و بازیابی ۸۲/۸۷ درصد P_2O_5 حاصل شد. استفاده از کلکتور سنتز شده بر پایه گیاهی نشان داد که این نوع کلکتور می تواند جایگزین مناسبی برای کلکتورهای بر پایه شیمیایی باشد.

کلمات کلیدی

فسفات، معدن چرام، فلوتاسیون، کانه رسوبی.

* نویسنده مسئول مکاتبات.

۱- مقدمه

کانه فسفات، کاربرد بسیاری داشته و از این رو از اهمیت بالایی برخوردارست و در سطح جهان و ایران مطالعاتی زیادی بر روی آن صورت گرفته است. فلوتاسیون یا همان شناور سازی بر اساس خواص سطحی به عنوان یک فرآیند مؤثر در پرعیارسازی کانیهای فلزی و صنعتی دارای اهمیت و جایگاه منحصر به فرد می باشد. بیش از ۶۰٪ از فسفات های تجاری در دنیا با روش فلوتاسیون فرآوری می شوند [۱]. هیگنت و همکاران (۱۹۷۷) به این نتیجه رسیدند که روش فلوتاسیون تنها برای فسفات های رسوبی که در آن کربنات به خوبی متبلور شده است، نتایج رضایت بخش دارد. کانه های فسفاتی در شمال آفریقا و شرق دریای مدیترانه مثال هایی از این نوع کانسارها هستند که در آنها بلورهای کربنات در داخل یکدیگر هم رشدی یافته و برای آزاد شدن ذرات فسفات جهت فلوتاسیون کانه باید تا ابعاد بسیار ریزی آسیا شود [۲].

در مطالعات جان دی میلر و همکاران سال ۲۰۰۲، کلکتور انتخابی برای فلوتاسیون فسفات مورد بررسی قرار گرفت. مقاله مذکور از کلکتور جدید که بر پایه اسید هیدروکسامیک (AERO 6493) می باشد استفاده شده که در بهترین حالت با خوراک کم عیار (۵ درصد P_2O_5) بازیابی ۹۵ درصد و عیار ۳۱ درصد P_2O_5 بدست آمد. در صورتیکه با کلکتورهای قبلی مانند کلکتور اسید چرب سوختی متداول چنین نتایجی بدست نمی آمد [۳]. در مطالعات رودریگو او، آلبوکرکی و همکاران سال ۲۰۱۱، در مقیاس آزمایشگاهی در رابطه با فلوتاسیون فسفات با گانگ سیلیکات-کربنات، با هدف انتخابی بودن جداسازی آپاتیت از کانه فسفات حاوی سیلیکات/کربنات با استفاده از ستون های فلوتاسیون که بر اساس نتایج یک آزمایش قبلی در مقیاس آزمایشگاه، یک طرح کلی از واکنشگرها، ناشاسته ذرت و یک کلکتور طبیعی که از تقطیر روغن نارگیل استخراج شده بود، مورد آزمایش قرار گرفت. یک مدار باز رافر-کلینر، کنسانتره نهایی را به عیار ۳۰٫۵٪ P_2O_5 در سطح بازیابی ۸۰٫۸ درصد رساند [۴]. در مطالعات شفائی و همکاران سال ۱۳۸۵، بهینه سازی شرایط فلوتاسیون در کارخانه فسفات اسفوردی انجام شد. هدف تحقیق مذکور دستیابی به حداکثر بازیابی فسفات همراه با حداقل بازیابی آهن در کنسانتره بوده که عوامل میزان مصرف ناشاسته، دانسیته پالپ و مدت زمان کفگیری به ترتیب بیشترین تأثیر را بر فلوتاسیون فسفات دارند [۵]. در مطالعات محمد خانی سال ۱۳۸۷، فرآوری فسفات کوه لار بری حذف بیش از ۸۵ درصد کربنات به روش فلوتاسیون معکوس (به دلیل قابلیت شناوری بیشتر کلسیت نسبت به آپاتیت

در کانه های رسوبی) انجام شد. استفاده از سولفات آلومینیوم و سدیم-پتاسیم تارتارات بعنوان بازدارنده برای بازداشت کانی های فسفات بهترین پاسخ را داد. دو فلوئید عملیات فلوتاسیون (آنیونی-کاتیونی و کاتیونی-آنیونی) برای حذف کربنات و سیلیکات طراحی و اجرا شد. انجام فرآیند آنیونیک-کاتیونیک منجر به کسب عیار ۲۱٫۶۷٪ P_2O_5 با بازیابی ۶۵٫۵ درصد از عملیات فلوتاسیون و بازیابی کلی ۵۲٫۴ درصد گردید. همچنین با استفاده از لیچینگ، کنسانتره نهایی مرحله فلوتاسیون جهت حذف کربنات باقی مانده توسط اسید استیک یک مولار لیچ شده و عیار ۲۷٫۷۸ درصد حاصل شد و بازیابی عملیات فلوتاسیون و لیچ ۶۴ درصد و بازیابی کلی ۵۱ درصد تعیین شد [۶]. در مطالعات یوهیمی و همکاران در سال ۲۰۱۸، به منظور مقایسه تفاوت های بین تغییرات کلکتورهای کانسنگ فسفات که توسط روغن های هگوش (گنداب) تهیه شده، نتایج نشان داد که کلکتور JZQ-F حاوی اسیدهای چرب اشباع نشده است که می تواند کنسانتره های فسفر را با عیار P_2O_5 بالاتر از ۳۱٫۹۶٪ بدست آورند و بازیابی بیش از ۹۱٫۵۲٪ باشد. این کلکتور ظرفیت جذب سطحی بیشتری دارد، نرخ جذب سریع تر و ساختار جذب قوی تر در سطح آپاتیت، که باعث عملکرد خوب جذب و تأثیر مطلوب در فلوتاسیون می شود [۷].

فانگ و آلدریچ [۸] به این نتیجه رسیدند که نوع خردایش تر یا خشک تأثیر معنی داری بر بازیابی و نرخ فلوتاسیون آپاتیت نداشته و pH پالپ و میزان مصرف کلکتور بیشترین تأثیر را بر بازیابی دارند و از این میان افزایش مصرف کلکتور به شدت نرخ فلوتاسیون و بازیابی را افزایش میدهد که با یافته های راثو و همکاران [۹] نیز سازگاری دارد.

مطالعاتی که توسط ونگ در دانشگاه یوتا انجام گرفت نشان داد که میتوان با استفاده از کلکتورهای آلکیل هیدروکسامیک اسید در محدوده pH حدود ۶٫۵ به راحتی فسفاتها (آپاتیت و فرانکولیت) را از باطله های سیلیکاتی و کربناتی با میزان بازیابی زیاد (بیشتر از ۹۰٪) فرآوری نمود. نوع هیدروکساماتی که در این تحقیق به کار گرفته شده بود، اسید اکتیل هیدروکسامیک کریستالی ساخت شرکت سایتک می باشد که میزان انتخابی بودن این کلکتور نسبت به روشهای سنتی بیشتر است [۱۰].

در این تحقیق امکان فرآوری فسفاتهای منطقه فسفات کوه لار که در حدود ۵۰ کیلومتری شمال شهرستان گچساران و در فاصله ۳ کیلومتری شهرستان چرام از توابع استان کهگیلویه و بویراحمد قرار دارد، با فلوتاسیون توسط کلکتور جدید بررسی شده است.

۱-۱- معدن فسفات چرام

کانه فسفات معدن چرام مربوط به سازند پابده متعلق به دوران پالئوسن، ائوسن، الیگوسن است و سن افق فسفات دار را نیز ائوسن بالایی می دانند. تاقدیس کانه در سطح گسترده ای به طول ۱۵ کیلومتر وجود دارد که محور آن در امتداد شمال غربی-جنوب شرقی است. هسته مرکزی این تاقدیس از رسوبات آهکی گروه بنگستان (سازند ایلام-سروک) است. در طول این تاقدیس شکستگی هایی صورت گرفته که باعث فرسایش در بعضی از نقاط شده است. وقوع چنین پدیده هایی باعث بوجود آمدن پنجره های تکتونیکی کم وسعتی گردیده و نهشته های قدیمی در چنین پنجره هایی دارای رخنمون هستند [۶].

این کانه بزرگ ترین فسفات شناخته شده در سطح کشور است. بالاترین بخش لایه فسفات در این منطقه تا حدود ۲۳۵۰ متر و پایین ترین آن ۸۳۰ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. طی سال های ۱۳۶۶ تا ۱۳۷۰ مطالعات مقدماتی به همراه تهیه نقشه زمین شناسی و تپوگرافی انجام گرفته است [۶].

کانه فسفات بر اساس میزان P_2O_5 به سه گروه طبقه بندی شده است [۶]:

۱- کانه کم عیار (۱۲ تا ۱۶ درصد P_2O_5)

۲- کانه متوسط عیار (۱۷ تا ۲۵ درصد P_2O_5)

۳- کانه پرعیار (۲۶ تا ۳۵ درصد P_2O_5)

برآورد انجام شده از معدن فسفات کوه خامین معدن فسفات شهرستان چرام (یاسوج-کهگیویه و بویر احمد)، ۸۰ میلیون تن ذخیره قطعی (۲۰۰ میلیون تن ذخیره احتمالی) با عیاری بین ۵ تا ۱۵ درصد P_2O_5 ، محتوای کربنات زیاد ۷۰ درصد و سیلیکات کم را نشان می دهد. ذخیره احتمالی معدن فسفات محدوده کوه بناری در چرام را ۲۰۰ میلیون تن و ذخیره قطعی این معدن نیز ۸۲ میلیون تن است.

با این وصف، معدن فسفات چرام جزء ذخایر کم عیار محسوب شده و در تحقیق پیش رو مطالعاتی برای تولید کنسانتره پرعیار انجام شده است.

۲- مواد و روش ها

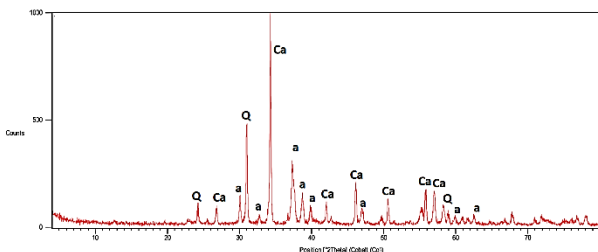
نمونه فسفات مورد استفاده در این پروژه از معدن چرام واقع در استان کهگیلویه و بویراحمد به میزان ۳۰ کیلوگرم جمع آوری شده است. ۷ کیلوگرم از آن به عنوان معرف و ۲۳ کیلوگرم برای آزمایش ها در نظر گرفته شده است. ابتدا نمونه ها از طریق سنگ شکن فکی به اندازه زیر ۲۰ میلی متر

خردایش شدند، به گونه ای که d80 آن برابر با ۱۴ میلی متر می باشد. سپس با آسیا میله ای با توجه به اندازه مورد نیاز زیر ۱۰۶ میکرون و رسیدن به d80 متناسب با آن، آزمایش های آنالیز سرندی انجام گرفته که بهترین زمان برای رسیدن به d80 برابر با ۱۰/۱ میکرون، ۱۰ دقیقه می باشد که بعنوان زمان خردایش برای آزمایش های بعدی مورد استفاده قرار گرفت. نهایتاً بعد از همگن سازی و نمونه برداری از کل نمونه مورد آزمایش و با توجه به درصد جامد (۳۰-۳۵٪)، نمونه های ۶۶۰ گرمی جهت مراحل بعدی بسته بندی شده اند. آنالیز عیار فسفر و عناصر دیگر با استفاده از دستگاه Agilent 735 ICP-OES توسط مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی کرج انجام شد.

۲-۱- آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD)

یک معرف ۵۰۰ گرمی از کل نمونه، برداشت شده و بعد از خردایش توسط سنگ شکن فکی و آسیا میله ای و سپس معرف ۵۰ گرمی از آن برای انجام مطالعات کانی شناسی توسط دستگاه پراش اشعه ایکس (X Ray Diffraction) یا XRD، مدل Philips-Xpert Pro به مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی کرج ارسال شد. نتایج به دست آمده (شکل ۱) به شرح زیر می باشد:

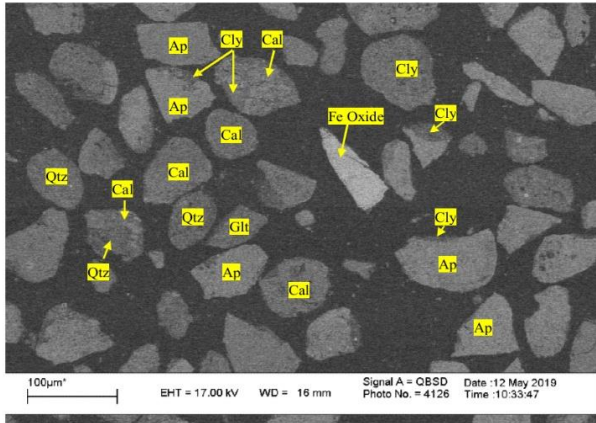
کلسیت ($CaCO_3$)، کوارتز (SiO_2) و فلوئور آپاتیت ($Ca_5(PO_4)_3F$).



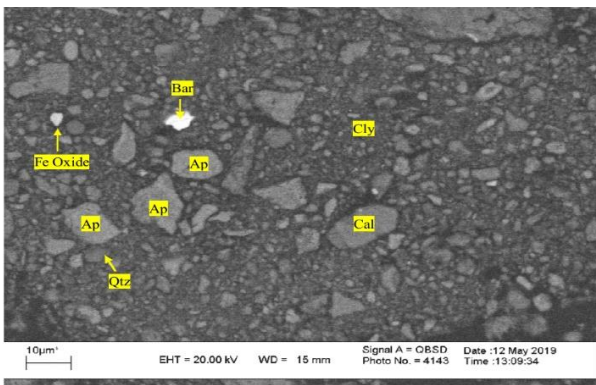
شکل ۱- آنالیز XRD از نمونه فسفات معدن چرام، کلسیت (Ca)، کوارتز (Q) و فلوئور آپاتیت (a).

۲-۲- آنالیز توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

به منظور تشخیص کانی های موجود مستقل و درگیر در هر مقطع، معرف ۵۰ گرمی از محدوده ابعادی مورد استفاده در آنالیز سرندی به عبارتی پنج مقطع نازک صیقلی از نمونه با محدوده ابعادی (۱۵۰+، (۱۵۰+۱۰۶)، (۱۰۶+۷۵-)، (۳۸- و (۳۸+۷۵-) میکرون برداشت شده و سپس توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی (Scanning Electron Microscope) مدل LEO1450 UP از مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی کرج آنالیز شد. نتیجه این مطالعات به شرح زیر است: در این نمونه ها مقدار قابل توجهی کانی آپاتیت وجود دارد.

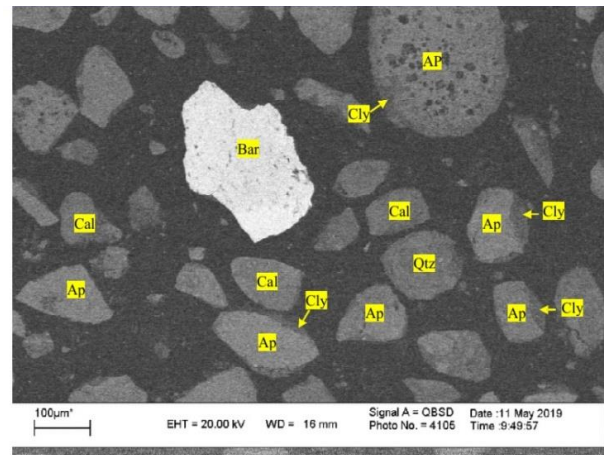


شکل ۳- محدوده ابعادی (۷۵+ تا ۱۰۶- میکرون)، درگیری آپاتیت و مجموعه کانی‌های ریزبلور در حد رس، درگیری کوارتز و کلسیت، اکسید آهن.



شکل ۴- محدوده ابعادی (۳۸- میکرون)، باریت، اکسید آهن، آپاتیت، کلسیت، کوارتز و مجموعه کانی‌های ریزبلور در حد رس. خلاصه ای از این مطالعات در جدول ۱ نشان داده شده است.

کانی آپاتیت در بیشتر قسمت‌ها به صورت درگیر با مجموعه ای از ذرات ریز در حد رس و سیلت مشاهده گردید. احتمالاً این مجموعه، گل‌های حاوی ترکیبات فسفرداری بوده که در محیط رسوبی تشکیل شده است. ذرات ریز آپاتیت، کلسیت، کوارتز و گلوکونیت درون این مجموعه مشاهده شد. در برخی مناطق درگیری آپاتیت با گلوکونیت و کلسیت و بعضاً با کوارتز دیده می‌شود. گلوکونیت در برخی قسمت‌ها آزاد است. کانی‌های کلسیت و کوارتز نیز در برخی قسمت‌ها درگیر هستند. کانی‌های آهن دار به صورت اکسید آهن (مگنتیت و ...) در نمونه‌ها دیده شد، که در برخی قسمت‌ها به صورت آزاد است، اما در اکثر مناطق به صورت درگیر مشاهده می‌شود، که این درگیری عمدتاً با کوارتز و بعضاً با کلسیت و مجموعه ای از ذرات ریز در حد رس و سیلت است. لازم به ذکر است که مقدار کمی باریت نیز در نمونه‌ها شناسایی شد (شکل ۲-۴). حروف مخفف استفاده در شکل‌ها در جدول ۱ معرفی شده است.



شکل ۲- محدوده ابعادی ۱۵۰+ میکرون، باریت، درگیری آپاتیت با مجموعه کانی‌های ریز بلور در حد رس، کلسیت و کوارتز.

جدول ۱- آنالیز کانی شناسی نمونه فسفات معدن چرام.

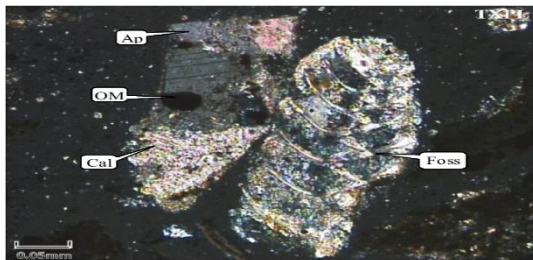
نام کانی	Mineral Name	علائم اختصاری	فرمول شیمیایی	فراوانی (%)
آپاتیت	Apatite	Ap	$Ca_5(PO_4)_3(Cl,F,OH)$	۳۰
اکسیدهای آهن	Iron Oxide	Fe-Oxide	$Fe_2O_3-FeO(OH)$	۵
کلسیت	Calcite	Cal	$CaCO_3$	۴۰
کوارتز	Quartz	Qtz	SiO_2	۱۵
گلوکونیت	Glauconite	Glt	$(K,Na)(Fe,Al,Mg)_2((Si,Al)_4O_{10})(OH)_2$	۳
گوتیت	Goethite	Gt	$FeO(OH)$	۳
مگنتیت	Magnetite	Mag	Fe_3O_4	کمتر از ۲
کانی رسی	Clay Mineral	Cly	-	ناچیز
مواد آلی	Organic Matter	OM	-	ناچیز

۳-۲- درجه آزادی

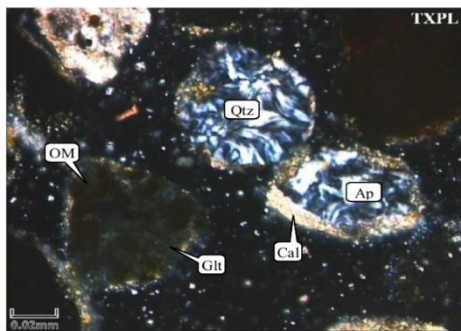
کلکتور $Gj-mrap1$ همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است با گروه عاملی اسید هیدرو کسامیک می باشد و کاملاً بر پایه گیاهی است و آلودگی کمتری نسبت به کلکتورهای با پایه شیمیایی دارد.

جدول ۲- درجه آزادی کانی ها موجود در نمونه بر حسب درصد.

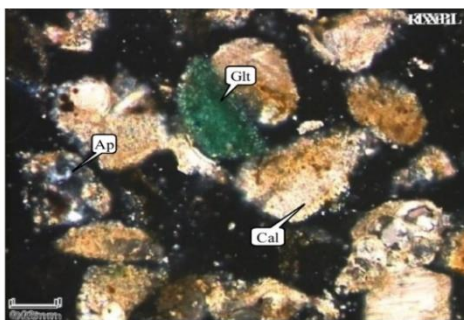
نام نمونه	ابعاد نمونه (میکرون)	
	آپاتیت	گوئیت- مگنتیت- هماتیت
۴۵	۲۵	+۱۵۰
۷۵	۴۵	-۱۵۰ تا +۱۰۶
۸۵	۶۸	-۱۰۶ تا +۷۵
--	۷۸	-۷۵ تا +۳۸
--	۸۶	-۳۸



شکل ۵- محدوده ابعادی (+۱۵۰)، درگیری آپاتیت با کلسیت و مواد آلی.



شکل ۶- محدوده ابعادی (+۳۸ تا -۷۵ میکرون)، درگیری آپاتیت با کلسیت.



شکل ۷- محدوده ابعادی (۳۸- میکرون)، آپاتیت آزاد.

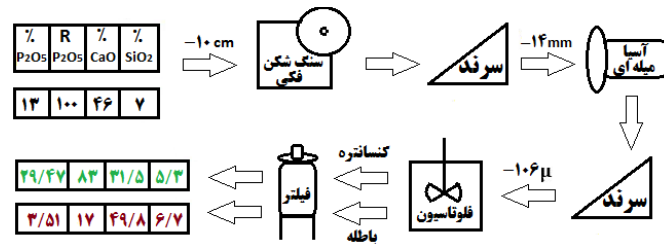
برای انجام مطالعات درجه آزادی از نمونه های محدوده ابعادی با ابعاد (+۱۵۰)، (-۱۵۰+۱۰۶)، (-۱۰۶+۷۵)، (-۳۸) و (-۷۵+۳۸) میکرون، مقاطع نازک-صیقلی و صیقلی تهیه شده و توسط میکروسکوپ نوری پلاریزان ZEISS مدل Axioplan 2 با نور انعکاسی و عبوری مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج مطالعات درجه آزادی در جدول ۲ آورده شده است.

مطالعات درجه آزادی نشان داد، که درگیری ها بیشتر به صورت تماسی هستند، اما گاهی درگیری به صورت ادخال نیز مشاهده شده است. درگیری در محدوده ابعادی با ابعاد بزرگتر بیشتر بوده و هرچه ابعاد نمونه کوچکتر می شود، درگیری ها نیز کمتر شده اند (شکل ۵ تا ۷).

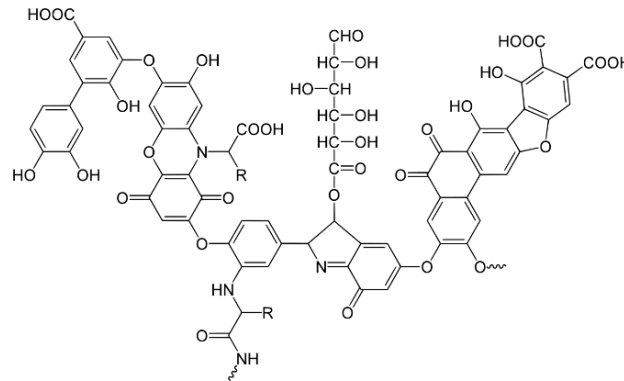
۴-۲- آزمایش فلوتاسیون

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می شود، ابتدا نمونه پس از یکنواخت سازی ابعاد به زیر ۱۰ سانتی متر وارد سنگ شکن فکی آزمایشگاهی شده، پس از خردایش و کوچکتر شدن ابعاد نمونه، ذرات از یک سرند کنترل ۱۴ میلی متری عبور داده می شوند و خوارک آسیا میله ای در بخش بعدی خواهند شد، با نرمایش توسط آسیا میله ای و سرند کنترلی ۱۰۶ میکرون، خوارک فلوتاسیون آماده شد. نتیجتاً این مدار با استفاده از کلکتور $Gj-mrap1$ (شکل ۹) برای شناور سازی فسفات، متفرق کننده: سیلیکات سدیم با فرمول شیمیایی $(Na_2(SiO_3))_3$ از شرکت مرک با خلوص ۹۹٪ بازداشت کننده: نشاسته خریداری شده از شرکت کوپلیمر اصفهان با خلوص ۹۸٪ برای بازداشت کانی های اکسیدی آهن، از کف ساز متیل ایزوبوتیل کرینول (MIBC) خریداری شده از شرکت کوپلیمر اصفهان با خلوص ۹۸٪ به میزان ۵۰ گرم بر تن استفاده شد. اطلاعات عملیاتی آزمایش های فلوتاسیون عبارتند از: ابتدا از کلسیم هیدروکسید برای تنظیم pH برابر با ۹ با زمان ۳ دقیقه و از متفرق کننده سیلیکات سدیم به میزان ثابت ۲۰۰ گرم بر تن با زمان ۱۰ دقیقه سپس بازداشت کننده نشاسته به میزان ثابت ۴۰۰ گرم بر تن با زمان ۵ دقیقه و بعد از آن از کلکتور $Gj-mrap1$ به میزان ۲۵۰ تا ۱۲۰۰ گرم بر تن با زمان ۳ دقیقه و کف ساز MIBC به میزان ثابت ۵۰ گرم بر تن با زمان ۲ دقیقه استفاده و در نهایت هوادهی و کف گیری با زمان ۳ دقیقه انجام شده است. ضمناً درصد جامد ۳۰٪ و دور همزن سلول فلوتاسیون ۱۰۰۰ دور در دقیقه می باشد.

مقایسه پایداری کف توسط ۶ کلکتور در جدول ۳ نشان داده شده است. جدول ۳ اطلاعات عملیاتی آزمایش های فلوتاسیون را نشان می دهد.



شکل ۸- فرآیند انجام آزمایشها برای نمونه فسفات کم عیار معدن چرام (منظور از R بازیابی است).



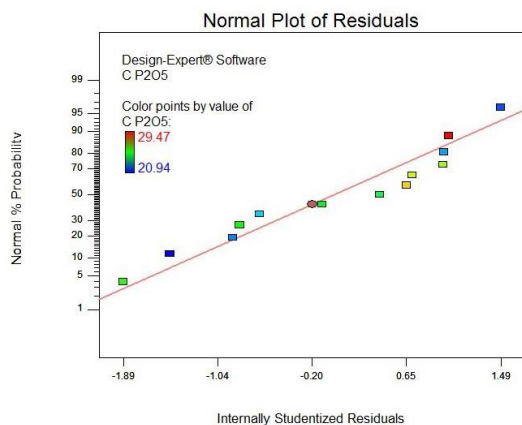
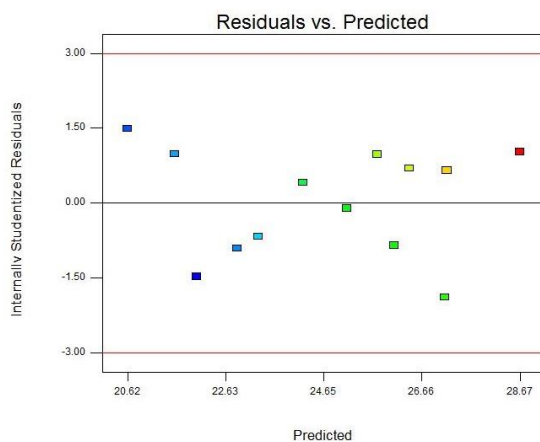
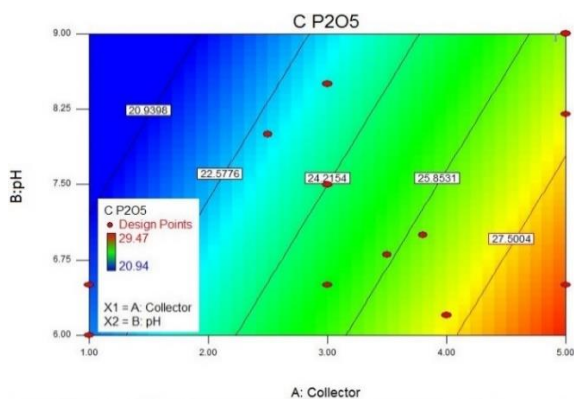
شکل ۹- ساختار ملکولی کلکتور $G_j-mrap1$.

جدول ۳- اطلاعات عملیاتی آزمایش های فلوتاسیون مقایسه پایداری کف توسط ۶ کلکتور.

نوع کف ساز	غلظت بازداشت کننده (g/t) زمان آماده سازی (min)	pH	زمان کف گیری	نوع متفرق کننده غلظت (g/t) زمان آماده سازی (min)	درصد جامد	غلظت کلکتور (g/t) زمان آماده سازی (min)	نوع کلکتور
صفر	نشاسته ۴۰۰ g/t ۵ min	۹	۳ min	سیلیکات سدیم ۲۰۰ g/t ۱۰ min	٪۳۰	۱۰۰۰ g/t ۳ min	آپیروول-سی
MIBC ۵۰ g/t ۲ min	نشاسته ۴۰۰ g/t ۵ min	۹	۳ min	سیلیکات سدیم ۲۰۰ g/t ۱۰ min	٪۳۰	۵۰۰ g/t ۳ min	اسید چرب روغن نارگیل
صفر	نشاسته ۴۰۰ g/t ۵ min	۹	۳ min	سیلیکات سدیم ۲۰۰ g/t ۱۰ min	٪۳۰	۱۰۰۰ g/t ۳ min	دیروول-دی
MIBC ۵۰ g/t ۲ min	نشاسته ۴۰۰ g/t ۵ min	۹	۳ min	سیلیکات سدیم ۲۰۰ g/t ۱۰ min	٪۳۰	۵۰۰ g/t ۳ min	اولنات سدیم - سوخت نفی
MIBC ۵۰ g/t ۲ min	نشاسته ۴۰۰ g/t ۵ min	۹	۳ min	سیلیکات سدیم ۲۰۰ g/t ۱۰ min	٪۳۰	۵۰۰ g/t ۳ min	فسفات اسفوردی
MIBC ۵۰ g/t ۲ min	نشاسته ۴۰۰ g/t ۵ min	۹	۳ min	سیلیکات سدیم ۲۰۰ g/t ۱۰ min	٪۳۰	۵۰۰ g/t ۳ min	$G_j-mrap1$

۳- نتایج

و منفی نشان دهنده تصادفی بودن خطاها و عدم وجود روند در ایجاد خطا است و آزمایش ها صحت دارد. در رابطه با پاسخ دوم نیز همین گونه بوده و معنی دار می باشد و از آن برآزش مناسب، خطاهای تصادفی و صحت آزمایش نتیجه می شود. در ادامه حالت بهینه آزمایش ها به کمک نرم افزار DX7 انجام شده است. شکل ۱۲ نشان می دهد که با افزایش pH و کاهش میزان کلکتور عیار P_2O_5 کاهش یافته است، بنابراین برای افزایش عیار P_2O_5 باید pH کاهش و میزان کلکتور افزایش یابد.

شکل ۱۰- نمودار برازش پاسخ اول (عیار P_2O_5).شکل ۱۱- نمودار اندازه گیری خطا برای پاسخ اول (عیار P_2O_5).شکل ۱۲- نمودار میزان کلکتور pH برای پاسخ اول (عیار P_2O_5).

بطور معمول پارامترهای بسیاری بر نتیجه یک آزمایش اثرگذار می باشد، اما با توجه به مطالعات قبلی در این زمینه pH بازی برای کلکتور تولید شده در این مطالعه مناسب تر می باشد و از طرفی میزان کلکتور مورد استفاده با توجه به هزینه تولید، عامل مهمی است، بنابراین این دو عامل مهم با استفاده از نرم افزار DX7 به عنوان پارامترهای عملیاتی در نظر گرفته شد که بازه تغییرات pH با توجه به مطالعات و آزمایشاتی که در گذشته انجام گرفته است، بین ۶ تا ۹ و بازه تغییرات میزان کلکتور بین ۲۵۰ تا ۱۲۰۰ گرم برتن می باشد، همچنین عیار و بازیابی P_2O_5 در کنسانتره به عنوان پاسخ ها در نظر گرفته شده اند، با استفاده از نرم افزار DX7 ۱۳ آزمایش طراحی شد که در جدول ۴ نشان داده است.

جدول ۴- طراحی آزمایش به کمک نرم افزار DX7 و نتایج آن.

ردیف آزمایش	غلظت کلکتور (g/t)	pH	عیار (P_2O_5)	بازیابی (P_2O_5)
۱	۷۵۰	۶٫۵	۲۵٫۰۳	۶۵٫۸۳
۲	۷۵۰	۷٫۵	۲۴٫۵۸	۶۳٫۳۹
۳	۸۵۰	۶٫۸	۲۶٫۶	۶۷٫۳۳
۴	۵۰۰	۹٫۵	۲۱٫۶۲	۴۸٫۸۰
۵	۹۵۰	۷	۲۵٫۳۴	۷۰٫۲۹
۶	۱۲۰۰	۸٫۲	۲۵٫۵۸	۷۰٫۶۸
۷	۱۰۰۰	۶٫۲	۲۷٫۷۱	۸۴٫۹۷
۸	۲۵۰	۶	۲۰٫۹۴	۴۳٫۵۳
۹	۷۵۰	۸٫۵	۲۲٫۷۳	۵۱٫۶۶
۱۰	۶۰۰	۸	۲۲٫۰۸	۴۸٫۱۳
۱۱	۱۲۰۰	۶٫۵	۲۹٫۴۷	۸۲٫۸۷
۱۲	۱۲۰۰	۹	۲۶٫۹۳	۷۷٫۴۶
۱۳	۲۵۰	۶٫۵	۲۲٫۳۴	۵۰٫۶۲

آنالیز برازش پاسخ اول (عیار P_2O_5) نشان داد که مدل پاسخ نیازی به اعمال انتقال جهت برازش ندارد و بهترین حالت پیشنهادی برای مدل، خطی در برابر میانگین و نقصان در برازش بصورت خطی است. نتایج آنالیز معنادار بودن پاسخ اول (عیار P_2O_5) نشان داد که مدل مذکور در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنادار است.

مطابق شکل ۱۰، نتایج نمودار نرمال باقیمانده ها نشانه داد برازش خوبی صورت گرفته است و نشان دهنده نرمال بودن نتایج عیار P_2O_5 می باشد.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۱۱، وجود خطای مثبت

فرآیند فلوتاسیون، حباب های تا حدی غیر یکنواخت شده و پایداری آن ها افزایش می یابد که این خود مشکلاتی همچون افزایش آب شستشو جهت از بین بردن پایداری حباب ها و افزایش زمان فیلتر را به همراه خواهد داشت اما همانطور که قسمت ۶ شکل ۱۴ نشان می دهد کلکتور شماره ۵ یعنی $G_j-mrap1$ ، در حین و بعد از فرآیند فلوتاسیون دارای پایداری مطلوب کف می باشد. عدم پایداری کف، باعث پر شدن کف در فضای کارخانه به هنگام از کارافتادن سیستم فلوتاسیون می شود در حالی که کلکتور $G_j-mrap1$ این مشکل را حل کرده و کاملاً قابل کنترل است و مدت زمان فیلتراسیون را نیز کاهش می دهد.



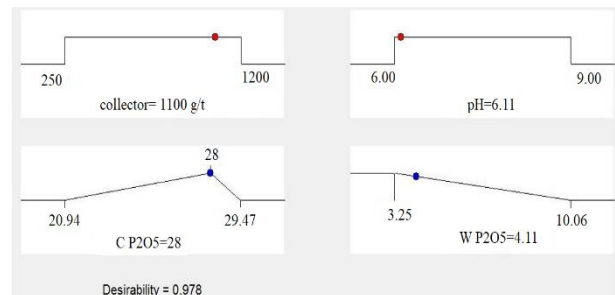
شکل ۱۴- مقایسه پایداری کف حین و بعد از استفاده در فرآیند فلوتاسیون با کلکتورهای مختلف.

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه با استفاده از کلکتور جدید سنتز شده با انجام آزمایش های تکمیلی به کمک نرم افزار طراحی آزمایش DX7 و بهینه سازی با تغییر مقدار کلکتور و pH، نمونه کم عیار معدن فسفات چرام با عیار میانگین ورودی ۱۳ درصد P_2O_5 به عیار بیشتر از ۲۸ درصد P_2O_5 حاصل شد. با استفاده از نرم افزار DX7 شرایط بهینه برای رسیدن به عیار ۲۸ درصد، pH برابر با ۶٫۱۱، مقدار کلکتور $G_j-mrap1$ برابر با ۱۱۰۰ گرم بر تن، متفرق کننده سیلیکات سدیم به میزان ثابت ۲۰۰ گرم بر تن، بازداشت کننده نشاسته به میزان ثابت ۴۰۰ گرم بر تن و کف ساز MIBC به میزان ثابت ۵۰ گرم بر تن است. مزیت های استفاده از کلکتور $G_j-mrap1$ در مقایسه با کلکتور مورد استفاده در کارخانه فسفات اسفوردی یزد در شرایط یکسان بازیابی بیشتری دارد، همچنین پایداری کف بهتری در حین و بعد از فرآیند فلوتاسیون نسبت به کلکتور مورد استفاده در فسفات اسفوردی و کلکتورهای دیگر دارد. کلکتور $G_j-mrap1$ چون پایه گیاهی دارد آلودگی کمتری در محیط کارخانه فلوتاسیون و محیط زیست نسبت به کلکتورها با پایه شیمیایی دارد.

با توجه به جدول ۳، تست ۷ با pH برابر ۶٫۲ و میزان کلکتور ۱۰۰۰ گرم بر تن، بالاترین بازیابی (۸۴٫۹۷ درصد P_2O_5) و تست ۱۱ با pH برابر ۶٫۵ و میزان کلکتور ۱۲۰۰ گرم بر تن، بالاترین عیار (۲۹٫۴۷ درصد P_2O_5) را دارند.

همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می شود، جهت بهینه سازی شرایط میزان کلکتور در حالت بازه آزاد از ۲۵۰ تا ۱۲۰۰ گرم بر تن و مقدار pH در بازه آزاد ۶ تا ۹ قرار داده شده است، همچنین پاسخ اول یعنی عیار P_2O_5 با توجه به حداقل عیار مورد نظر تجاری ۲۸ درصد در نظر گرفته شده و پاسخ دوم یعنی عیار P_2O_5 باطله در حالت مینیمم فرض شده است. حالت بهینه که نرم افزار DX7 برای کنسانتره ۲۸٪، نشان می دهد عبارتند از: غلظت کلکتور ۱۱۰۰ گرم بر تن و pH برابر با ۶٫۱۱ می باشد.



شکل ۱۳- تعیین بازه فاکتورهای عیار و pH و پاسخ های بهینه در نرم افزار DX7.

پایداری کف در حین و بعد فرآیند فلوتاسیون مسئله مهم فنی می باشد و شکل ۱۴ مقایسه پایداری کف توسط ۶ کلکتور را نشان می دهد. کلکتور شماره ۴ یعنی آپیرول-سی (کلکتور خریداری شده از کولپلیم اصفهان، APIROLE-C) و کلکتور شماره ۲ یعنی کلکتور اسید چرب روغن نارگیل بسیار پایدار بوده و به حباب های پایین تر به سختی اجازه بالا آمدن داده و در نتیجه باعث بازگشت فسفات شناور شده به پالپ می شود. کلکتور شماره ۳ یعنی دیروول-دی (کلکتور خریداری شده از کولپلیم اصفهان، DIROLE-D) دارای پایداری کف بسیار کم بوده و ممکن است قبل از بالا آمدن حباب و رساندن ذرات فسفات به سطح و شناور سازی آن ها از بین برود. کلکتور شماره ۱ یعنی اولئات سدیم و سوخت نفتی دارای حباب های کف غیر یکنواخت با پایداری کم می باشد. کلکتور شماره ۸ یعنی کلکتور فسفات اسفوردی در حین استفاده در فرآیند فلوتاسیون دارای حباب های یکنواخت و پایداری بوده که در فرآیند جداسازی بسیار مؤثر است اما همانطور که در قسمت ۷ شکل ۱۴ نشان داده شده است این کلکتور بعد از استفاده

منابع

.۴۱

۶. محسن محمدخانی "فرآوری کانه رسوبی فسفات کوه لار به روش فلوتاسیون" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده معدن-پرديس دانشکده های فنی-دانشگاه تهران-ایران، ۱۳۸۷ (۲۰۰۸).
7. H. Yu, H. Wang and C. Sun, "Comparative studies on phosphate ore flotation collectors prepared by hogwash oil from different regions", international Journal of Mining Science and Technology, 2018, pp. 453-459.
8. D. Feng, C. Aldrich "Influence of operating parameters on the flotation of apatite" Minerals Engineering, , 2004; pp.453-455.
9. Hanumantha Rao, K., Samskog, P.-O., Forssberg, K.S.E.; "Pulp chemistry of flotation of phosphate gangue from magnetite fines". Trans. Inst. Min. Metall. 1990, C147-C156.
10. Xu. Wang, "The surface chemistry of phosphate mineral flotation with alcohol solutions of oktyl hydroxamic acid, Thesis dodtor of philosophy", department of metallurgical engineering, university of Utah.
1. A.Z.M. Abouzeid, A.T. Negm, D.A. Elgillani, "Upgrading of calcareous phosphate ores by flotation: Effect of ore characteristics", Int. J. Miner. Process., 2009, pp.81-89.
2. N.A. Abdel-Khalek, "Evaluation of flotation strategies for sedimentary phosphates with siliceous and carbonates gangues", J. of Min. Eng., 2000, pp. 789-793.
3. J.D. Miller, X. Wang, and M. Li, "A selective collector for phosphate flotation", 2002, Report, University of Utah-Florida-USA.
4. R.O. Albuquerque, A.E.C. Peres, J.A. Aquino, P.E. Praes, C.A. Pereira, "Pilot Scale Direct Flotation of a Phosphate Ore with Silicate Carbonate Gangue", Procedia Engineering, 2012 pp. 105 - 110.
۵. سید ضیاء الدین شفقائی، محمد کارآموزیان، خداکرم غریبی، فرامرز دولتی ارده جانی، رضا خالوکاکایی، "بهینه سازی شرایط فلوتاسیون در کارخانه فسفات اسفوردی" مهندسی معدن دوره ۱، شماره ۲ پاییز ۱۳۸۵ صفحه ۳۱-