

تفاوت رفتار فلوتاسیون آپاتیت زون‌های سطحی و عمقی کانسنگ چند فلزی قره‌آغاچ ارومیه

فاطمه وکیلی فسقندیس^۱، پرویز پورقهرمانی^{۲*}، حسین عبادی^۳

^۱ کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، Fatemeh.vakili1372@gmail.com
^۲ استاد دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی سهند، pourghahramani@sut.ac.ir
^۳ دانشجوی دکتری فرآوری مواد معدنی، H_ebadi@Sut.ac.ir

(دریافت: ۱۵ بهمن ۱۳۹۷ و پذیرش: ۵ تیر ۱۳۹۸)

چکیده

در این تحقیق رفتار فلوتاسیون کانی آپاتیت از نمونه‌های سطحی و عمقی کانسنگ چند فلزی قره‌آغاچ ارومیه مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌های فلوتاسیون در قالب طرح آزمایشی و با در نظر گرفتن متغیرهای pH، درصد جامد و میزان مصرف کلکتور برای دو نمونه سطحی و عمقی کانسنگ یاد شده انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که امکان تهیه کنسانتره از هر دو نمونه وجود دارد ولی کیفیت کنسانتره‌ها کاملاً با یکدیگر متفاوت و خاصیت شناورسازی آپاتیت نمونه عمقی ضعیف‌تر از نمونه سطحی است. تحلیل تاثیر متغیرها بر پاسخ‌های عیار و بازیابی مشخص کرد که متغیر pH، درصد جامد و میزان کلکتور تاثیر منفی بر عیار نمونه سطحی دارد ولی در نمونه عمقی pH و درصد جامد تاثیر معنی‌داری بر عیار ندارند و تاثیر میزان کلکتور بر عیار نمونه عمقی مثبت است. پس از بهینه‌سازی شرایط فلوتاسیون هر دو نمونه، در شرایط بهینه پس از یک مرحله رافر و ۵ مرحله شستشو برای نمونه سطحی کنسانتره‌ای با عیار ۳۳/۲۳ درصد P_2O_5 و بازیابی ۷۴/۸۰ درصد و برای نمونه عمقی پس از ۶ مرحله شستشو کنسانتره‌ای با عیار ۲۸/۸۱ درصد P_2O_5 و بازیابی ۵۵/۰۱ درصد حاصل شد. مطالعات شناسایی نشان داد که کنسانتره عمقی دارای کلسیت و هورنبلند منیزیم‌دار است که همراه با آپاتیت شناور شده و مانع از افزایش عیار کنسانتره نهایی می‌شوند. از طرفی نتایج آنالیز EDX نشان داد که میزان عنصر فلوتور در نمونه عمقی کمتر از نمونه سطحی است که از دلایل قابلیت شناورسازی کم آپاتیت نمونه عمقی است. در نهایت مشخص شد که در کانسار قره‌آغاچ ارومیه با افزایش عمق، کارایی فلوتاسیون آپاتیت کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی

آپاتیت، فلوتاسیون، طرح آزمایشی، کانسنگ چند فلزی، قره‌آغاچ ارومیه.

* نویسنده مسئول مکاتبات.

۱- مقدمه

یکی از فرآیندهای رایج شده برای فرآوری کانسنگ‌های فسفات رسوبی فرآیند دوگانه کراگو^۱ است. این فرآیند به طور کلی شامل طبقه‌بندی، نرمه‌زدایی و فلوتاسیون است. از محدودیت‌های این روش این است که در صورت وجود مقادیر زیاد دولومیت، فرآیند پرعیارسازی به علت خواص سطحی مشابه مابین کانی‌های فسفات و دولومیت، با مشکل مواجه می‌شود [۸]. برای پرعیارسازی کانسنگ‌های فسفات آذرین که عمدتاً کانی‌های گانگ سیلیکاته از نوع کوارتز، پیروکسن، آمفیبول و نظایر آن دارند نیز روش فلوتاسیون به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. فسفات‌های آذرین کریستالیزه به دلیل ساختار بلوری مناسب و نوع گانگ همراه برای فلوتاسیون مناسباند [۳].

به طور کلی پرعیارسازی کانسنگ‌های فسفات آذرین بسته به نوع گانگ موجود متفاوت است. فرآیندی که در همه فلوشیت‌ها یکسان است، شناورسازی آنیونی آپاتیت با اسید چرب است [۳]. کلکتورهایی از این نوع که به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند، اسیدهای چرب بلندزنجیر و نمک‌های آن‌ها مانند اولئیک اسید و اولئات سدیم است [۷]. در استفاده از روش فلوتاسیون برای فسفات‌های آذرین به دلیل اینکه نقطه بار صفر آپاتیت در حدود pH برابر با ۸ است، بنابراین محدوده کاری برای فلوتاسیون نیز در محدوده pH قلیایی باید باشد [۸].

به دلیل وجود جانمایی‌های مختلف در ترکیب اصلی آپاتیت و تفاوت‌های ساختاری و کانی‌شناختی، کانی‌های آپاتیت تشکیل شده، رفتار فلوتاسیون متفاوتی دارند که رفتار شیمی فیزیکی آن‌ها را پیچیده و غیرانتخابی می‌کند و مستقیماً بر عملکرد فلوتاسیون تأثیر می‌گذارد به طوری که دانسیته جذب کلکتور، حالت هیدروفوبیک سطح و بازیابی فلوتاسیون به ترتیب از فلوتورآپاتیت به کربنات آپاتیت، هیدروکسیل آپاتیت و کلروآپاتیت کاهش می‌یابد [۷]. سورنسن^۲ (۱۹۷۳) نیز طی تحقیقات خود دریافت که قابلیت شناور شدن آپاتیت بستگی به محتوی فلوتور دارد به طوری که با افزایش فلوتور قابلیت شناوری افزایش می‌یابد [۹]. در مطالعه‌ای که در کارخانه فسفات فلوریدا برای حل مشکل تغییر مشخصات خوراک ورودی به کارخانه انجام شد به این نتیجه رسیدند که سیلیس موجود در سنگ‌های فسفات پارامتر عمده‌ای است که بازیابی فلوتاسیون را تحت تأثیر قرار می‌دهد. علاوه بر این، نتایج حاصل از آنالیز EDX^۳ نشان داد که در

فسفر یکی از عناصر مهم سطح زمین است که برای حیات تمامی موجودات ضروری است. این عنصر به دلیل واکنش‌پذیری زیاد، عموماً به صورت اکسیدی (فسفاتی) در طبیعت یافت می‌شود [۱]. عمده‌ترین کاربرد فسفات‌ها در تهیه کود شیمیایی است اما در تهیه اسید فسفریک، صنایع غذایی، داروسازی و نظایر آن نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. با افزایش جمعیت در جهان و نیاز روزافزون به مواد غذایی، کودهای شیمیایی نقش مهمی را در تولید محصولات زراعی برای پاسخ به نیاز بشر ایفا می‌کنند [۳]. بنابراین با توجه به اهمیت کودهای شیمیایی در توسعه کشاورزی و همچنین نقش مهم کشاورزی در استقلال اقتصادی، ثبات سیاسی و رفاه اجتماعی توجه ویژه‌ای به منابع شناخته شده فسفات شده است [۴].

کانسارهای فسفات جهان به سه نوع رسوبی، آذرین و بیوژنیک طبقه‌بندی می‌شوند. بیش از ۷۵ درصد ذخایر فسفات به ذخایر رسوبی و مازنی، ۱۵ تا ۲۰ درصد به ذخایر آذرین و مقدار ناچیزی به ذخایر بیوژنیک اختصاص می‌یابد [۵]. معمول‌ترین کانی‌های فسفات آپاتیت‌ها، فرمول شیمیایی $Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$ را دارند که به طور گسترده در ذخایر رسوب، به عنوان کانی فرعی در سنگ‌های آذرین و به مقدار کم در سنگ‌های متامورفیک توزیع شده‌اند [۶]. فسفات‌های رسوبی به طور معمول شامل کانی‌های فرانکولیت یا کلوفان‌اند. کانی‌های گانگ موجود در کانسنگ‌های فسفات رسوبی عمدتاً از نوع رس، سیلیس، کلسیت و دولومیت است. از این میان کلسیت و دولومیت دارای خواص سطحی مشابه با کانی‌های فسفات‌اند و رفتار فلوتاسیون آن‌ها شبیه به یکدیگر است که منجر به عدم فلوتاسیون موفق در این کانسنگ‌ها می‌شود اما کانسنگ‌های فسفات با منشا آذرین متفاوت از کانسنگ‌های رسوبی‌اند و به دلیل حضور کانی آپاتیت به عنوان کانی فسفات غالب و نبود کانی‌های کربناته و به ویژه کلسیت، از لحاظ فرآوری و فرآیند فلوتاسیون مطلوب تلقی می‌شوند [۳].

کانسنگ‌های پرعیار و کنسانتره‌های فسفات مناسب برای کارخانه‌های تولید کود فسفات باید دارای بیش از ۳۰ درصد P_2O_5 ، نسبت CaO/P_2O_5 کمتر از ۱/۶ و MgO کمتر از ۱ درصد باشند. اگر کانسنگ‌های فسفات دارای این ویژگی‌ها نباشند، نیاز به فرآوری دارند که باید به وسیله روش‌های فرآوری ناخالصی‌های موجود کاهش داده شود که بهترین روش فرآوری در حال حاضر روش فلوتاسیون است [۷].

1- Crago

2- Sorensen

3- Energy-dispersive X-ray spectroscopy

۲- مواد و روش‌ها

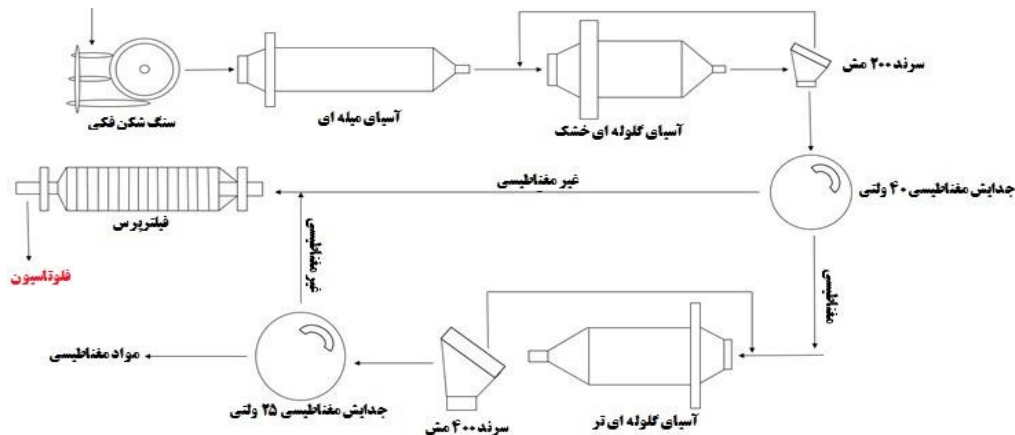
۲-۱- تهیه نمونه فلوتاسیون

ماده معدنی معرف در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی سهند خردایش شد. پس از رسیدن مواد به ابعاد ۷۵- میکرون به وسیله جدایش مغناطیسی تر شدت پایین (۱۰۰۰ گوس)، بخش تیتانومگنتیت آن جدا شد که این بخش عمدتاً حاوی ایلمنیت آهن و تیتانومگنتیت بود. در نهایت قسمت تیتانومگنتیتی تا ۴۵- میکرون برای رسیدن آپاتیت به درجه آزادی مناسب با استفاده از آسیای گلوله‌ای تر، خردایش مجدد شده و با استفاده از جدایش مغناطیسی، بخش غیرمغناطیسی آن جدا شده و به بخش غیرمغناطیس اولیه اضافه شد. بدین ترتیب نمونه‌ای که قسمت مگنتیت و تیتانومگنتیتی آن جدا شده است، وارد مرحله فلوتاسیون شد. فلوشیت تهیه نمونه معرف برای فلوتاسیون در شکل ۱ به طور شماتیک نشان داده شده است. برای مشخص شدن ترکیب شیمیایی دو نمونه سطحی و عمقی نمونه‌ها به روش XRF آنالیز شدند که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است. نتایج آنالیز نشان داد که میزان مواد فرار (LOI)، اکسید سیلیسیوم، اکسید آلومینیوم و اکسید کلسیم در نمونه عمقی بیشتر از نمونه سطحی است و از طرفی میزان اکسید آهن، منیزیم و تیتانیوم در نمونه سطحی بیشتر از نمونه عمقی است. در نمونه عمقی و سطحی درصد فسفر تقریباً یکسان است. این نتایج حاکی از ترکیب کانی‌شناسی متفاوت برای دو نمونه عمقی و سطحی است که احتمالاً به نوبه خود پاسخ فلوتاسیون را تحت تاثیر قرار خواهد داد. دانه‌بندی نمونه‌ها در شکل ۲ آورده شده است. دانه‌بندی نمونه‌ها نشان از یکسان بودن توزیع ابعادی برای نمونه‌های سطحی و عمقی است و از این بابت می‌توان اثر دانه‌بندی در نتایج فلوتاسیون را نادیده گرفت.

شرایط شناورسازی نامناسب، ذرات فسفات با یک لایه نازک از آلومینوسیلیکات‌ها مانند خاک رس پوشیده می‌شوند که دلیلی دیگر بر تفاوت رفتار فلوتاسیون کانسنگ است [۴]. وجود انواع مختلف آپاتیت که از ویژگی‌های فسفات‌های آذرین است، می‌تواند رفتار فلوتاسیون را تغییر دهد. آپاتیت‌ها در دو گروه بزرگ اولیه و ثانویه تقسیم‌بندی می‌شوند. آپاتیت‌های اولیه کمتر هوازده می‌شوند، بنابراین کارایی فلوتاسیون بالایی در مقایسه با آپاتیت‌های ثانویه که در تماس با ذرات پوشیده شده با اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن‌اند، دارند [۱۰].

کانسار قره‌آغاج ارومیه یک کانسار آذرین چند فلزی است که حاوی کانی‌های با ارزش ایلمنیت، مگنتیت و آپاتیت است. عیار فسفر این کانسنگ به طور میانگین در حدود ۲/۵ درصد P_2O_5 است. بر اساس گزارش‌های اکتشافی موجود کانسار قره‌آغاج ارومیه به دو زون سطحی و عمقی تقسیم‌بندی می‌شود. مطالعات اولیه فلوتاسیون آپاتیت از این کانسنگ حاکی از امکان تهیه کنسانتره آپاتیت با درجه تجاری است [۱۱].

بررسی‌های اولیه در آزمایشگاه فرآوری مواد معدنی در دانشگاه صنعتی سهند تبریز نشان داده است که رفتار فلوتاسیون آپاتیت با افزایش عمق کانسار تغییر می‌کند، بنابراین هدف از این مطالعه بررسی دقیق رفتار فلوتاسیون آپاتیت از نمونه‌های زون‌های سطحی و عمقی است. برای این منظور ابتدا نمونه‌های معرفی از هر زون تهیه و سپس یک طرح آزمایشی با متغیرهای pH، میزان مصرف کلکتور و درصد جامد برای هر نمونه در نظر گرفته شد. نتایج حاصل برای هر نمونه تجزیه و تحلیل شده و با یکدیگر مقایسه شدند.



شکل ۱- فلوشیت تهیه نمونه.

جدول ۱- آنالیز نمونه‌های سطحی و عمقی با استفاده از روش XRF.

	L.O.I	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	SUM
نمونه سطحی	۰٫۱	۲۸٫۶	۵٫۲۲	۶٫۹	۱۰٫۳۲	۳۸٫۱	۰٫۱>	۲٫۵۴	۰٫۱۸	۸٫۰۴	۰٫۱>	۰٫۱>	۱۰۰
نمونه عمقی	۲٫۱	۳۳٫۳۶	۸٫۷	۸٫۹	۸٫۵۵	۲۸٫۳	۰٫۱>	۲٫۳۳	۰٫۵۳	۵٫۴۱	۱٫۴	۰٫۴۲	۱۰۰

عمقی و سطحی در قالب طرح آزمایشی مطالعه شده و تاثیرپذیری رفتار فلوتاسیون این دو نمونه از هر کدام از متغیرها بررسی شود. در ادامه با انجام آزمایش‌های مرحله شستشو توانایی تولید کنسانتره مطلوب از هر کدام از نمونه‌ها مد نظر قرار گرفت و آنالیزهای تکمیلی برای تشخیص علل تفاوت رفتاری دو نمونه انجام پذیرفت.

در این آزمایش‌ها برای بهینه‌سازی فرآیند فلوتاسیون نتایج به روش رگرسیون خطی چند متغیره^۱ و با استفاده از نرم‌افزار MODDE9.1 تجزیه و تحلیل شدند [۱۲]. پس از شناسایی فاکتورهای موثر، pH پالپ در دو سطح ۸٫۵ و ۹٫۵، درصد جامد در دو سطح ۲۵ و ۳۵ و میزان کلکتور مصرفی در دو سطح ۷۰۰ و ۱۱۰۰ گرم در تن مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱]. عوامل موثر به همراه مقادیر آزمایشی آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

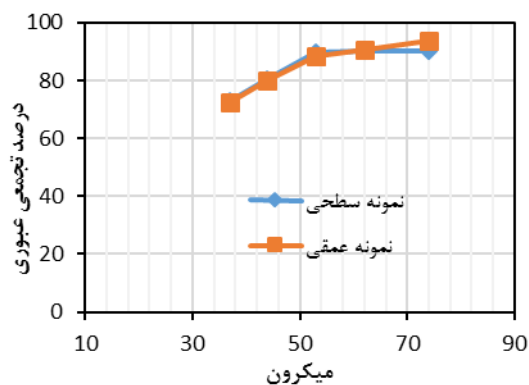
جدول ۲- عوامل موثر در آزمایش.

سطوح		علامت	فاکتورها
۳۵	۲۵	SoI	درصد جامد
۱۱۰۰	۷۰۰	CoI	مقدار کلکتور مصرفی (گرم در تن)
۹٫۵	۸٫۵	pH	pH

آزمایش‌های فلوتاسیون با دستگاه فلوتاسیون دنور در سلول ۳ لیتری انجام شد.

۲-۳- مواد شیمیایی

در این آزمایش‌ها از کلکتور Procoll Flo Ys20 ساخت شرکت کوپلیمر اصفهان که از مشتقات اسیدهای چرب است، استفاده شده است. به دلیل خاصیت کف‌سازی کلکتور یاد شده از کف‌ساز استفاده نشد. برای تنظیم pH بر مبنای کارهای قبلی انجام گرفته بر روی این کانسنگ از کربنات سدیم استفاده شد [۱۱]. در بیشتر مطالعات انجام شده در فلوتاسیون آپاتیت از هیدروکسید سدیم برای تنظیم pH استفاده شده است. با این وجود در برخی از مطالعات نیز از کربنات سدیم برای تنظیم



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی نمونه‌ها.

مطالعات درجه آزادی کانی آپاتیت در این کنسار توسط آقایان عبادی و پورقهرمانی [۱۱] برای نمونه عمقی کنسار انجام شده است و بر طبق گزارش آن‌ها با خردایش نمونه تا زیر ۹۰ میکرون در حدود ۸۰ درصد از آپاتیت آزاد می‌شود. در مورد نمونه سطحی نیز مطالعات انجام شده همین مقدار را نشان داد و به دلیل ابعاد بسیار ریز برای دو نمونه می‌توان از اختلافات جزئی در درجه آزادی چشم‌پوشی کرد. به دلیل نیاز به حصول درجه آزادی بالا و جلوگیری از هدر رفت آپاتیت در این آزمایش‌ها از خوراک با توزیع دانه‌بندی ریز استفاده شده است.

چگالی نمونه‌ها با استفاده از پیکنومتر آبی اندازه‌گیری شد که برای نمونه‌های سطحی و عمقی به ترتیب ۳٫۱۴ و ۲٫۹ به دست آمد. این مقادیر نشان می‌دهند که در نمونه سطحی میزان کانی‌های سنگین نسبت به نمونه عمقی بیشتر است که می‌تواند مربوط به کانی‌های ایلمنیت، مگنتیت و تیتانومگنتیت موجود در نمونه باشد.

۲-۲- روش انجام آزمایش‌ها

شناخت پارامترهای موثر در فرآیند فلوتاسیون و میزان تاثیرگذاری آن‌ها بر پاسخ، مهم‌ترین گام در فلوتاسیون است. بر طبق مطالعات قبلی انجام شده، از بین فاکتورهای تاثیرگذار در فلوتاسیون، تاثیر سه فاکتور درصد جامد، مقدار کلکتور مصرفی و pH بر مقدار عیار و بازیابی بیشتر است [۱۱]، بنابراین با در نظر گرفتن این متغیرها تلاش شد که رفتار فلوتاسیون دو نمونه

^۱ - Multi linear regression (MLR)

درصد جامد برای پاسخ عیار در نمونه عمقی بر خلاف نمونه سطحی تاثیر چندانی را نشان نمی‌دهند. با توجه به شکل ۴ و اثر pH بر عیار کنسانتره نمونه سطحی نشان می‌دهد که با افزایش pH عیار کنسانتره کاهش می‌یابد و این به معنی افزایش قابلیت شناورسازی کانی‌های گانگ از نوع پیروکسن، کوارتز، آمفیبول و نظایر آن است. دلیل این امر احتمالاً تشکیل کمپلکس‌های CaOH^+ و MgOH^+ و جذب ویژه بر روی سطوح کانی‌ها است که منجر به جذب کلکتور آنیونی Floy20 می‌شود و قابلیت شناورسازی کانی‌ها را افزایش می‌دهد [۱۰، ۱۵]. این پدیده برای کانی آپاتیت نیز صادق است، چنان که با افزایش pH میزان بازیابی نیز افزایش می‌یابد.

تغییر مقدار درصد جامد بر عیار نمونه عمقی تاثیری ندارد ولی روی نمونه سطحی تاثیر منفی می‌گذارد. احتمالاً با افزایش درصد جامد دنباله‌روی هیدرولیکی و گیر افتادن ذرات در ناحیه کف بیشتر شده و این دو مکانیزم با ورود هم‌زمان کانی‌های با ارزش و گانگ به کنسانتره باعث افزایش مقدار بازیابی و کاهش عیار می‌شوند [۱۱].

بازیابی هر دو نمونه به مقدار کلکتور مورد استفاده بستگی دارد به طوری که با افزایش مقدار کلکتور بازیابی نیز افزایش می‌یابد ولی این افزایش برای نمونه عمقی نسبت به نمونه سطحی بیشتر است. تاثیر مثبت افزایش کلکتور بر افزایش بازیابی، معمول و پذیرفته شده است ولی نکته قابل توجه در این دو نمونه، این است که در نمونه عمقی با وجود تغییرپذیری زیاد و مقادیر زیاد خطای تکرارها که منجر به عدم تشخیص تاثیر سایر پارامترها بر پاسخ عیار و بازیابی می‌شود، تاثیر زیاد کلکتور بر افزایش بازیابی معنی‌دار تشخیص داده شده است. با توجه به ضرایب مدل برای پاسخ بازیابی می‌توان دریافت که افزایش میزان کلکتور تاثیر مثبت بر بازیابی نیز دارد. مجموعه این مشاهدات نشان از قابلیت فلوتاسیون بسیار پایین کانی‌های آپاتیت نمونه عمقی نسبت به نمونه سطحی است زیرا با افزایش میزان کلکتور بازیابی و عیار کنسانتره بیشتر می‌شود و این نشان از افزایش شناورسازی کانی‌های آپاتیت با افزایش میزان مصرف کلکتور است. به این معنی که دانسیته جذب کلکتور در سطح آپاتیت‌های عمقی بسیار پایین است (شکل ۵).

pH استفاده شده است [۱۳، ۱۴]. با توجه به هزینه زیاد هیدروکسید سدیم نسبت به کربنات سدیم انتخاب کربنات سدیم برای تنظیم pH مناسب‌تر به نظر می‌رسد.

۲-۴- روش آنالیز

آنالیز شیمیایی نمونه‌ها در آزمایشگاه کانه‌آرایی دانشگاه صنعتی سهند با استفاده از دستگاه (SPECORD 200) UV ساخت کشور آلمان انجام شد. در این روش که بر پایه سنجش رنگ است، ابتدا کانی آپاتیت با نسبت آب به اسیدنیتريك ۵ به ۱ حل شده و سپس با استفاده از معرف‌های شیمیایی مخصوص، فسفر وارد فاز کمپلکس شده است و محلول رنگی تشکیل می‌دهد که با تهیه محلول استاندارد و مقایسه رنگ نمونه‌ها با محلول استاندارد (با دستگاه UV) عیار P_2O_5 اندازه‌گیری می‌شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیرات عمده پارامترها

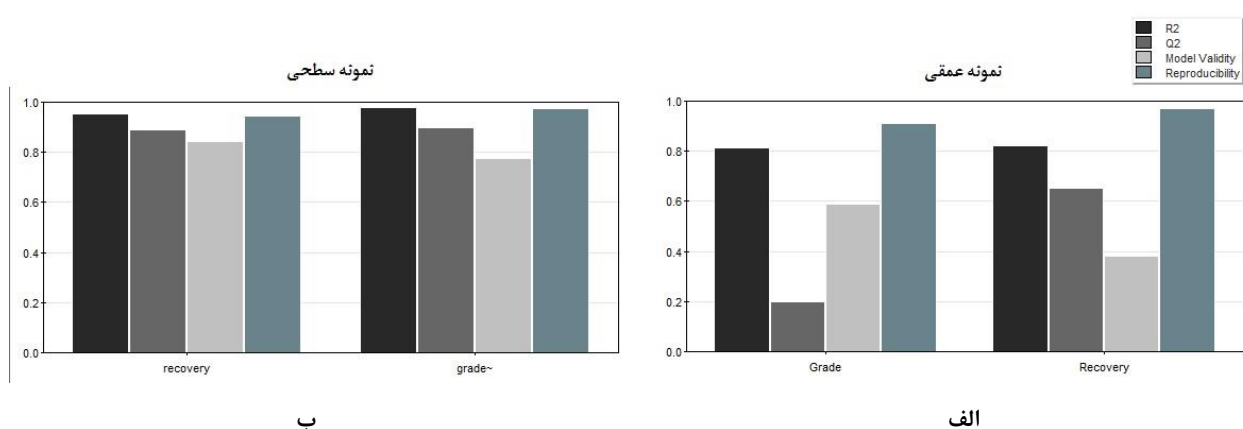
برای هر نمونه طبق طرح آزمایشی CCF^۱، ۱۷ آزمایش انجام شد. این طرح آزمایشی از نوع طرح‌های آزمایشی بهینه‌سازی است که دارای هندسه مکعبی وجوه مرکزدار است به طوری که آزمایش‌های با مقادیر بالا و پایین متغیرها در گوشه‌های مکعب و نقاط مرکزی در مرکز وجوه قرار می‌گیرند. شرایط و مقدار پاسخ آزمایش‌ها در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به جدول مشاهده می‌شود که در شرایط یکسان میزان عیار و بازیابی و در نتیجه مقدار کارایی جدایش برای نمونه سطحی در مقایسه با نمونه عمقی بالا است. همچنین نمونه سطحی با مصرف مواد شیمیایی کمتر نیز در مقایسه با نمونه عمقی پاسخ بهتری به فلوتاسیون می‌دهد. مدلسازی داده‌های حاصل بعد از بررسی‌های اولیه و آنالیز داده‌های خام و پالایش مدل نیز نشان داد که داده‌های نمونه سطحی در مقایسه با داده‌های نمونه عمقی قابلیت مدل شدن بهتری را از خود نشان می‌دهند و فاکتورهای ارزیابی مدل برای نمونه سطحی، وضعیت بسیار مطلوب‌تری نسبت به نمونه عمقی دارد (شکل ۳). به عنوان مثال دستیابی به عیار حدود ۳ برای نمونه عمقی نشان می‌دهد که برای این نمونه در این شرایط در عمل فلوتاسیونی انجام نشده است.

پس از پالایش مدل، نمودار ضرایب رگرسیون در سطح اعتماد مهندسی ۹۵ درصد برای پاسخ عیار در شکل ۴ و برای پاسخ بازیابی در شکل ۵ آورده شده است. پارامترهای pH و

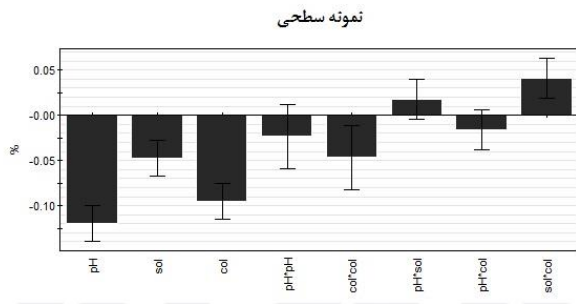
^۱- Central composite face-centered

جدول ۳- شرایط آزمایش و مقدار پاسخ آن‌ها.

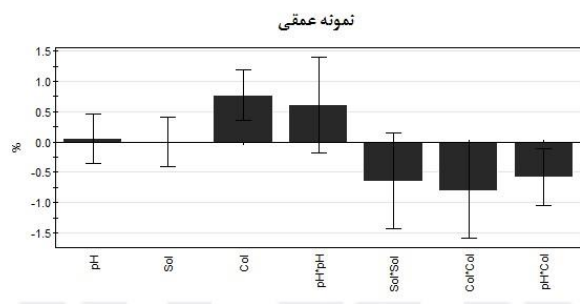
ردیف	شرایط آزمایش			نمونه سطحی				نمونه عمقی			
	pH	درصد جامد	میزان کلکتور	عیار	بازیابی	کارایی جدایش	بازیابی وزنی	عیار	بازیابی	کارایی جدایش	بازیابی وزنی
۱	۸,۵	۲۵	۷۰۰	۱۹,۱۴	۷۶,۸۹	۷۰,۸۱	۱۰,۲	۴,۰۱	۳۸,۵۴	۱۷,۰۵	۲۲,۴
۲	۹,۵	۲۵	۷۰۰	۱۰,۷۵	۸۷,۲۵	۷۰,۷۷	۲۰,۶	۵,۵۸	۶۳,۶۵	۳۹,۱۴	۲۶,۶
۳	۸,۵	۳۵	۷۰۰	۱۱	۸۲,۳۳	۶۷,۲۴	۱۹	۳,۳۱	۳۲,۸۴	۱۰,۲۹	۲۳,۱
۴	۹,۵	۳۵	۷۰۰	۷,۶۱	۸۸,۴۷	۶۲,۶۱	۲۹,۵	۴,۶۱	۵۱,۵۸	۲۶,۹۲	۲۶,۱
۵	۸,۵	۲۵	۱۱۰۰	۱۰,۸۳	۸۶,۶۲	۷۰,۴۱	۲۰,۳	۶,۳۴	۶۱,۷۳	۴۱,۲۴	۲۲,۷
۶	۹,۵	۲۵	۱۱۰۰	۵,۴۹	۹۵,۰۲	۵۴,۲۸	۴۳,۹	۵,۰۲	۸۴,۱۱	۴۷,۵۵	۳۹,۱
۷	۸,۵	۳۵	۱۱۰۰	۹,۵۴	۸۸,۳۱	۶۸,۸۱	۲۳,۵	۵,۹۷	۷۲,۹۶	۴۶,۹۷	۲۸,۵
۸	۹,۵	۳۵	۱۱۰۰	۵,۴۳	۹۳,۷۹	۵۳,۰۸	۴۳,۸	۵,۵۳	۹۱,۲۰	۵۵,۶۸	۳۸,۵
۹	۸,۵	۳۰	۹۰۰	۱۳,۷۸	۸۴,۰۹	۷۲,۸۳	۲۰,۶	۶,۶۷	۴۶,۳۱	۳۱,۸۱	۱۶,۲
۱۰	۹,۵	۳۰	۹۰۰	۷,۷۳	۸۹,۸۴	۶۴,۰۷	۲۹,۵	۶,۱۵	۶۷,۸۱	۴۴,۴۹	۲۵,۷
۱۱	۹	۲۵	۹۰۰	۱۱,۵۷	۸۷,۰۷	۷۲,۱۶	۱۹,۱	۴,۴	۳۱,۷	۱۵,۷۵	۱۶,۸
۱۲	۹	۳۵	۹۰۰	۱۱,۰۵	۸۸,۳۵	۷۲,۲۵	۲۰,۳	۵,۹۲	۵۹,۳۶	۳۸	۲۳,۴
۱۳	۹	۳۰	۷۰۰	۱۲,۴۷	۸۴,۹۵	۷۱,۸۳	۱۷,۳	۳,۸۰	۲۶,۴۱	۱۰,۷۹	۱۶,۲
۱۴	۹	۳۰	۱۱۰۰	۷,۶۸	۸۸,۲۹	۶۲,۷۴	۲۹,۲	۶,۲۱	۷۶,۳۶	۵۰,۳۵	۲۸,۷
۱۵	۹	۳۰	۹۰۰	۱۰	۸۸,۵۸	۶۹,۶۷	۲۲,۴۹	۵,۷۴	۶۴,۰۲	۴۰,۱۷	۲۶
۱۶	۹	۳۰	۹۰۰	۱۱	۸۶,۶۷	۷۰,۷۹	۲۰	۶,۲۸	۶۱,۱۵	۴۰,۶۲	۲۲,۷
۱۷	۹	۳۰	۹۰۰	۱۰,۷۷	۸۷,۳۶	۷۰,۸۹	۲۰,۶	۵,۷۹	۶۷,۳۱	۴۲,۴۸	۲۷,۱



شکل ۳- پارامترهای ارزیابی مدل رگرسیون نهایی و پالایش شده، الف- نمونه عمقی و ب- نمونه سطحی.



ب

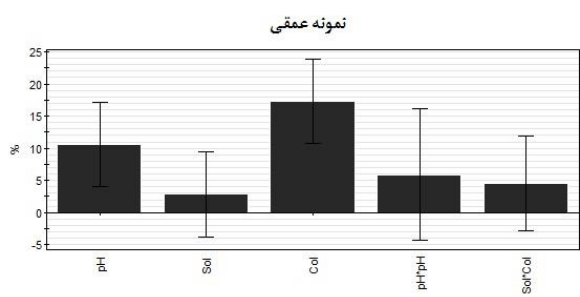


الف

شکل ۴- نمودار ضرایب رگرسیون برای پاسخ عیار، الف- نمونه عمقی و ب- نمونه سطحی.



ب



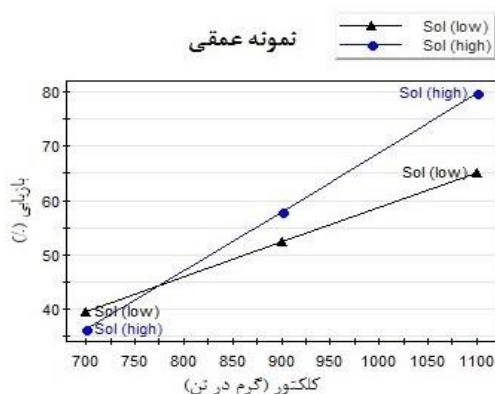
الف

شکل ۵- نمودار ضرایب رگرسیون برای پاسخ بازیابی، الف- نمونه عمقی و ب- نمونه سطحی.

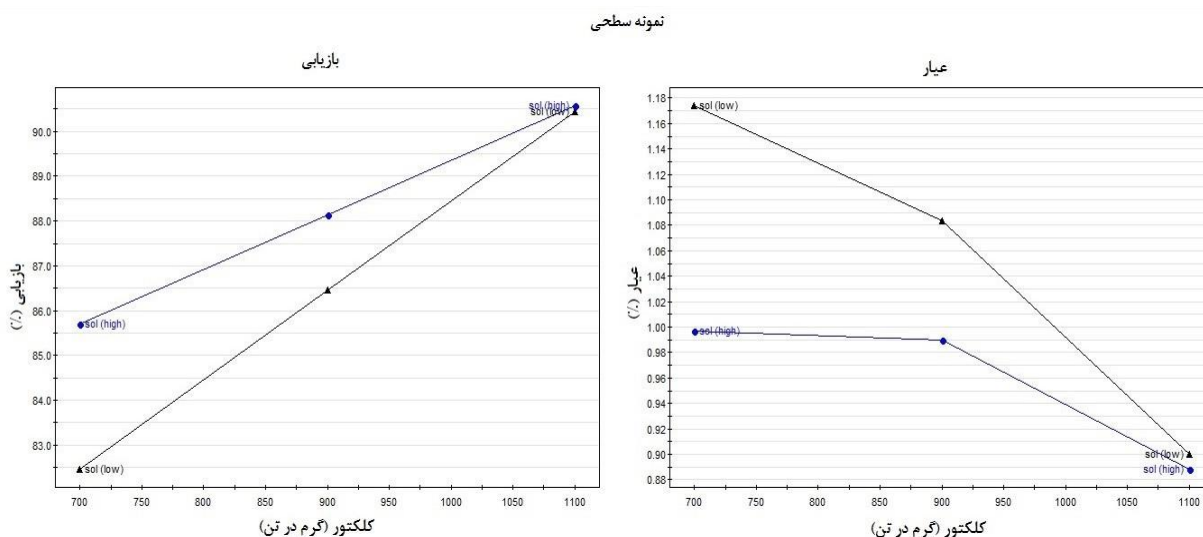
۳-۲- تاثیرات متقابل متغیرها

نمونه عمقی است و در مقادیر پایین مصرف کلکتور افزایش درصد جامد منجر به افزایش بازیابی می‌شود ولی در مقادیر زیاد درصد جامد، اثر درصد جامد از بین می‌رود و دو نمودار به هم نزدیک می‌شوند. از دلایل احتمالی این پدیده می‌توان به تفاوت در قدرت جذب کلکتور در سطح آپاتیت‌های سطحی و عمقی اشاره کرد و به نظر می‌رسد که در مورد آپاتیت‌های سطحی قدرت جذب کلکتور بیشتر از آپاتیت‌های عمقی است زیرا در میزان مصرف کم و درصد جامد پایین به دلیل احتمال برخورد ضعیف سطح ذرات و کلکتور، میزان بازیابی کم است و با افزایش درصد جامد و افزایش احتمال واکنش کلکتور و سطح متعاقبا بازیابی نیز افزایش می‌یابد. البته این مساله نیاز به بررسی دقیق‌تر و آنالیز سطح دارد. تاثیر متقابل درصد جامد و کلکتور بر عیار نیز مشابه بازیابی است با این تفاوت که در جهت عکس عمل می‌کند. در مقادیر مصرف پایین کلکتور و درصد جامد پایین به دلیل جذب انتخابی در سطح کانی‌های آپاتیت و دنباله‌روی پایین ذرات عیار بالا است ولی با افزایش میزان مصرف کلکتور اثر درصد جامد از بین می‌رود.

از میان متغیرها، درصد جامد و میزان کلکتور مصرفی تاثیرات متقابل دارند. نمودار تاثیرات متقابل پاسخ بازیابی برای هر دو نمونه سطحی و عمقی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهد که در نمونه عمقی در مقادیر مصرف کم کلکتور اثر درصد جامد بر بازیابی معنی‌دار نیست ولی با افزایش میزان مصرف کلکتور، درصد جامد زیاد برای افزایش بازیابی مناسب است. احتمالا این پدیده را نیز بتوان در قالب قدرت جذب پایین کلکتور در سطح آپاتیت تحلیل کرد زیرا در غلظت‌های پایین کلکتور تفاوتی در بازیابی و جذب وجود ندارد ولی با افزایش میزان غلظت کلکتور، افزایش درصد جامد می‌تواند منجر به افزایش احتمال برخورد و واکنش بین کلکتور و سطح کانی‌های آپاتیت شود. از دلایل محتمل دیگر دیگر می‌توان به افزایش میزان کف در مقادیر بالای مصرف کلکتور و تاثیر آن به پدیده دنباله‌روی ذرات در درصد جامدهای بالا اشاره کرد. در مشاهدات آزمایشگاهی نیز این افزایش زیاد میزان کف کاملا مشهود بود. این پدیده در مورد نمونه سطحی درست برعکس



شکل ۶- نمودار تاثیرات متقابل برای پاسخ بازیابی نمونه عمقی

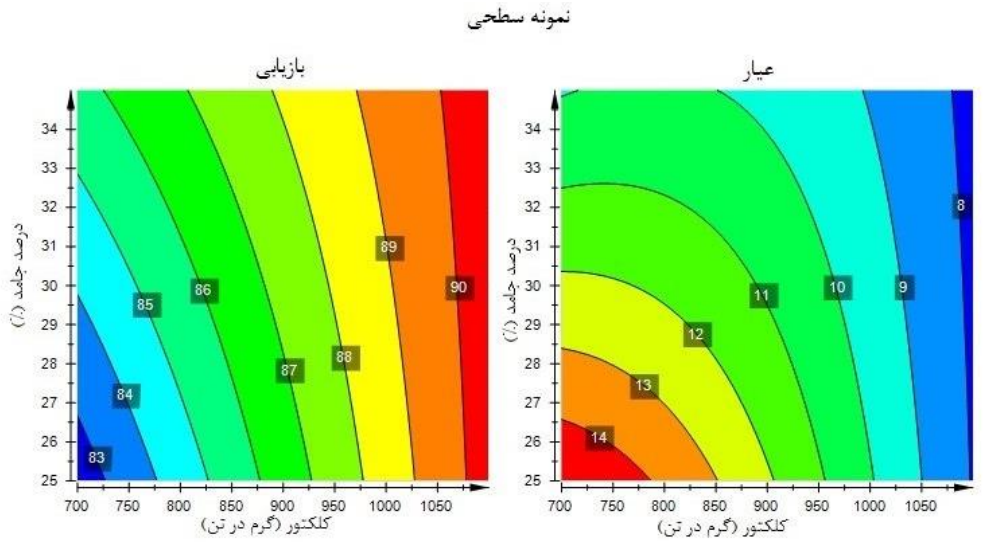


شکل ۷- نمودار تاثیرات متقابل برای پاسخ عیار و بازیابی برای نمونه سطحی

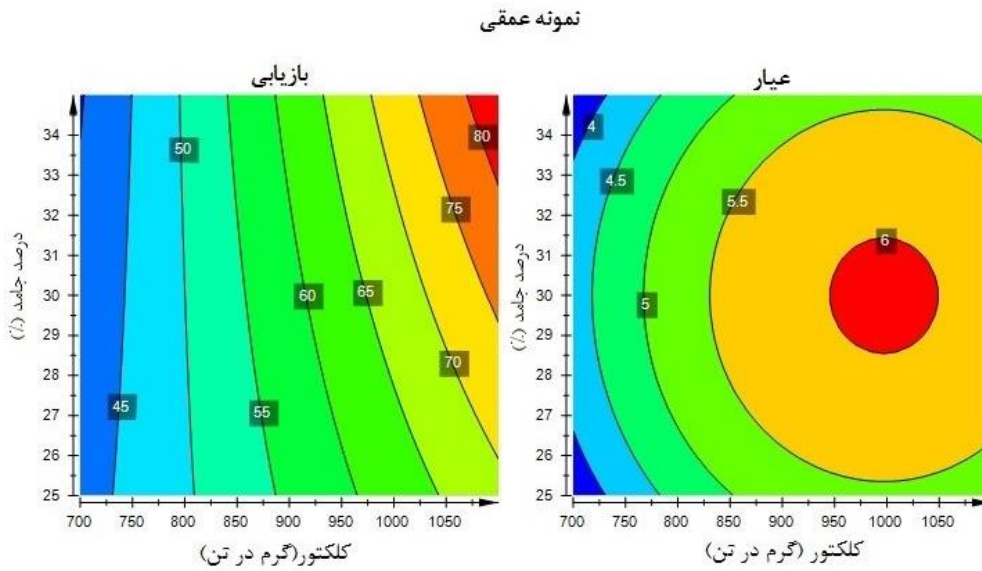
بازیابی بالاست (مرحله فلوتاسیون اولیه و رمق‌گیری)، بنابراین عیار قابل قبول در نظر گرفته می‌شود.

دیگرام مطلوبیت برای پیدا کردن مقدار بهینه فاکتورها به منظور رسیدن به مقدار بازیابی و عیار مطلوب مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱۰). برای نمونه سطحی بازیابی بیشتر از ۷۷ و برای نمونه عمقی مقدار بازیابی بیشتر از ۵۰ درصد به عنوان ناحیه مطلوب شناخته شده است. این مقادیر نشان می‌دهد که کارایی جدایش نمونه عمقی خیلی پایین‌تر از نمونه سطحی است و دلیلی بر این مدعاست که فلوتاسیون آپاتیت کانسنگ قره‌آغاج ارومیه با افزایش عمق مشکل‌تر می‌شود. بر طبق دیگرام مطلوبیت مقادیر بهینه پارامترها برای هر نمونه در جدول ۴ آورده شده است.

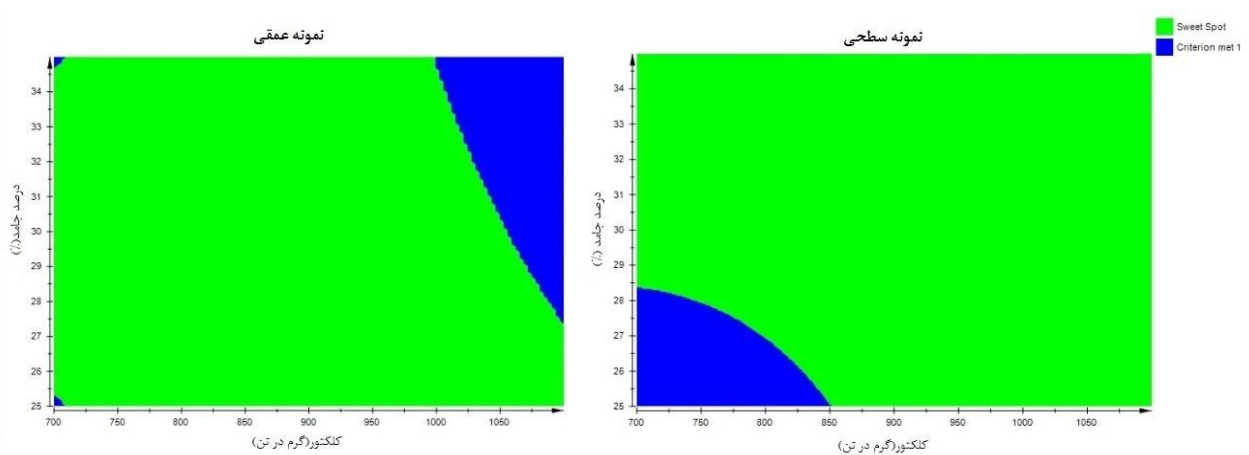
منحنی سطح پاسخ برای هر دو پاسخ عیار و بازیابی برای نمونه سطحی در شکل ۸ و برای نمونه عمقی در شکل ۹ آورده شده است. در رسم نمودارها مقدار pH برای هر دو نمونه در مقدار متوسط بازه ۸٫۵ تا ۹٫۵ در نظر گرفته شده است. بر این اساس برای نمونه سطحی بازیابی ماکزیمم با مصرف بیش از ۱۰۷۰ گرم بر تن کلکتور قابل دستیابی است و به میزان درصد جامد در حد ناچیزی وابسته است که در نمودار شکل ۵ نیز با توجه به مقدار ضرایب نمایان است. برای نمونه عمقی بازیابی ماکزیمم با مصرف بیش از ۱۰۵۰ گرم بر تن کلکتور و در درصد جامدهای بالا قابل دستیابی است (شکل ۵). مقدار بازیابی در نمونه عمقی بیش از نمونه سطحی به مقدار درصد جامد بستگی دارد. در نواحی یاد شده عیار کنسانتره‌های تولیدی پایین است ولی چون در این آزمایش‌ها هدف رسیدن به مقدار



شکل ۸- منحنی‌های سطح پاسخ برای عیار و بازیابی برای نمونه سطحی.



شکل ۹- منحنی‌های سطح پاسخ برای عیار و بازیابی برای نمونه عمقی.



ب

الف

شکل ۱۰- دیاگرام مطلوبیت، الف- نمونه سطحی و ب- نمونه عمقی.

جدول ۴- مقادیر بهینه پارامترها برای نمونه سطحی و عمقی.

	pH	درصد جامد	مقدار کلکتور (گرم در تن)	بازیابی مدل (درصد)	عیار مدل (درصد)	بازیابی (درصد)	عیار (درصد)
نمونه سطحی	۹٫۲۴	۳۵	۱۰۲۶	۹۱	۷٫۴۸	۸۸٫۶۳	۷٫۵۵
نمونه عمقی	۹٫۵	۳۳٫۵	۱۱۰۰	۹۴٫۱۳	۵٫۶۱	۹۱	۵٫۵

۳-۳- نتایج تست سینتیکی

آورده شده است. بر این اساس مقدار عیار برای نمونه عمقی با ۶ مرحله شستشو و استفاده از مقدار بیشتر کلکتور در مقایسه با نمونه سطحی با ۵ مرحله شستشو و استفاده از مقدار کمتر کلکتور، کمتر است. پس در مراحل شستشو حذف کانی‌های گانگ برای نمونه عمقی به سختی اتفاق می‌افتد و در این حین کانی‌های آپاتیسی که به سختی شناور شده‌اند نیز حذف می‌شوند و در نهایت امکان افزایش عیار وجود ندارد.

جدول ۶- آزمایش‌های مرحله افزایش عیار.

بازیابی	عیار	شستشو	تعداد مراحل	مقدار کلکتور (گرم در تن)	درصد جامد	pH
۷۴٫۸۰	۳۲٫۳۳	۵	۵	۱۰۲۶	۳۵	۹٫۲۴
۵۵٫۰۱	۲۸٫۸۱	۶	۶	۱۱۰۰	۳۳٫۵	۹٫۵

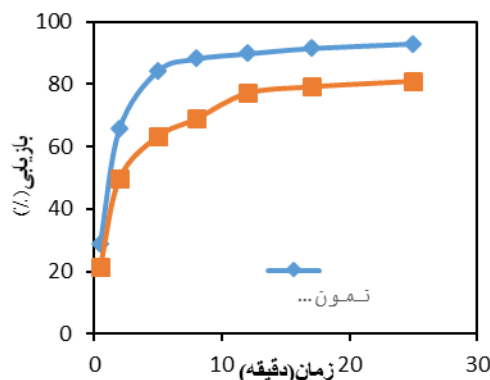
۳-۵- منحنی‌های عیار- بازیابی

منحنی‌های عیار- بازیابی برای هر دو نمونه در شکل ۱۲ آورده شده است. همان‌گونه که از منحنی‌ها هم مشخص است، منحنی مربوط به نمونه سطحی در سطح خیلی بالاتری از نمونه عمقی قرار دارد، بنابراین کارایی جدایش بالاتری دارد. پس نمونه عمقی فلوتاسیون دشوارتری نسبت به نمونه سطحی دارد. نکته دیگری که از این نمودار برمی‌آید این است که در خصوص نمونه سطحی در ابتدای فلوتاسیون می‌توان حتی به عیار حدود ۴۴ درصد نیز دست یافت ولی بازیابی در این صورت پایین است که نشان می‌دهد، ذرات گانگ در نمونه سطحی در ادامه فرآیند فلوتاسیون شناور می‌شوند، پس ذرات گانگ در نمونه سطحی قدرت آبرانی کمتری نسبت به ذرات با ارزش دارند. در نمونه عمقی مقدار بیشینه عیار در ابتدای فلوتاسیون حدود ۲۹ است. با توجه به نتایج آزمایش‌های مراحل شستشو که در قسمت قبل عنوان شد، پس از ۶ مرحله شستشو برای نمونه عمقی مقدار عیار و بازیابی کم است. در واقع در نمونه عمقی افزایش تعداد مراحل شستشو تاثیر زیادی در افزایش عیار ندارد.

برای هر دو نمونه سطحی و عمقی از تست سینتیکی استفاده شد که شرایط آن در جدول ۵ و نمودار حاصل از تست‌های سینتیکی در شکل ۱۱ آورده شده است. مقدار بازیابی ماکزیمم برای نمونه سطحی ۹۲٫۹۷ و برای نمونه عمقی ۸۱٫۱۱ درصد به دست آمده است. هر دو نمونه سطحی و عمقی از سینتیک مرتبه ۱ پیروی می‌کنند که ثابت فلوتاسیون نمونه سطحی مقدار ۰٫۶۷۷، مقدار بازیابی بی‌نهایت آن ۹۰٫۱ درصد و ثابت فلوتاسیون نمونه عمقی مقدار ۰٫۴۹ و مقدار بازیابی بی‌نهایت آن ۷۶٫۲۸ درصد است. با توجه به منحنی‌ها کاملاً مشخص است که نمونه عمقی قابلیت فلوتاسیون پایین‌تری نسبت به نمونه سطحی دارد.

جدول ۵- شرایط تست‌های سینتیکی.

	pH	درصد جامد	مقدار کلکتور (گرم در تن)
نمونه سطحی	۹٫۲۴	۳۵	۱۰۲۶
نمونه عمقی	۹٫۵	۳۳٫۵	۱۱۰۰



شکل ۱۱- نمودار تست سینتیکی برای نمونه سطحی و عمقی.

۳-۴- مرحله شستشو

در این بخش، مراحل پرعیارکنی نهایی در مقدار بهینه پارامترها مورد بررسی قرار گرفته شد که نتایج آن در جدول ۵

سیلیس موجود در خوراک نیز پارامتر مهمی است که بر عملکرد فلوتاسیون تاثیر می‌گذارد [۴]. با توجه به داده‌های جدول ۷ میزان سیلیس در نمونه عمقی بالاست و ممکن است روی ذرات آپاتیت را بپوشاند و آپاتیت به جای انتقال به کنسانتره به باطله منتقل شود و باعث کاهش کارایی فلوتاسیون نمونه عمقی شده باشد [۴].

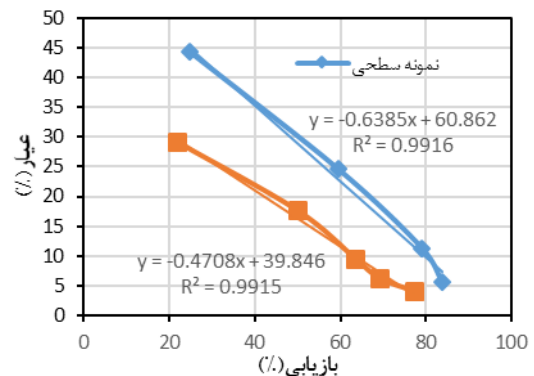
جدول ۷- آنالیز EDX نمونه‌های سطحی و عمقی.

کد نمونه	O	F	Mg	Al	Si	P	Cl	Ca	Ti	Fe	
نمونه سطحی	FAS44	۳۷٫۸۲	۹٫۰۷	۰٫۴۳	۰٫۴	۰٫۸۲	۱۵٫۲۳	۰٫۲۹	۳۴٫۶۴	۰٫۱	۰٫۴۳
نمونه عمقی	FBS36	۴۶٫۵۸	۳٫۲۴	۲٫۳۴	۰٫۵۱	۴٫۹۲	۹٫۳۹	۰٫۱۶	۲۷٫۳۳	۰٫۲۵	۲٫۰۲

کنسانتره‌های تولیدی باید ویژگی‌هایی داشته باشند که در صنعت قابل استفاده باشند. یکی از این ویژگی‌ها این است که محتوای کنسانتره‌ها باید نسبت CaO/P_2O_5 کمتر از ۱٫۶ داشته باشد [۷]. این ویژگی برای هر دو نمونه سطحی و عمقی صادق است. ویژگی دیگر این که مقدار MgO در کنسانتره‌ها کمتر از ۱ درصد باشد که برای نمونه سطحی این ویژگی نیز صادق است ولی برای نمونه عمقی مقدار MgO بالاتر از ۱ درصد است. بنابراین کنسانتره‌های تولیدی از نمونه عمقی بدین صورت قابل استفاده در صنعت نیستند و باید در فرآوری آن‌ها روش‌های دیگری نیز به کار گرفت.

در مرحله بعد نمونه‌ای از کنسانتره‌های مرحله چهارم شستشو از هر دو نمونه سطحی و عمقی تهیه شد و مورد آنالیز XRD قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۱۳ ارائه شده است. نتایج XRD نمونه‌های عمقی و سطحی نشان داد که در هر دو نمونه آپاتیت‌های موجود از نوع فلوتورآپاتیت است که این نتایج با نتایج آنالیز جدول ۷ نیز سازگار است. کانی گانگ عمده در نمونه عمقی با توجه به پیک‌های موجود کلسیت بود که جزو کانی‌های کربناته است و به دلیل خواص کانی‌شناسی مشابه آپاتیت و کلسیت، کلسیت نیز در فلوتاسیون همراه آپاتیت شناور می‌شود و عیار کنسانتره تولیدی را به شدت پایین می‌آورد. همچنین نتایج XRD نشان داد که کانی گانگ سیلیکاته از نوع هورنبلند منیزیم‌دار است، بنابراین کانی گانگ سیلیکاته که وارد کنسانتره نهایی شده و مانع از افزایش عیار کنسانتره نهایی در نمونه عمقی می‌شود، هورنبلند منیزیم‌دار است.

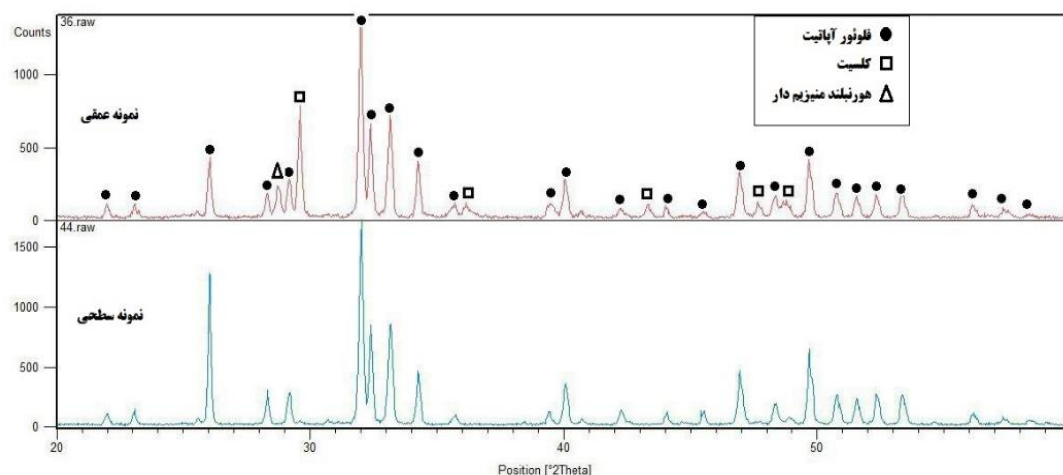
و بازیابی و در نهایت کارایی جدایش کم است. با توجه به معادلات رگرسیون در نمودارهای شکل ۱۲ مشخص می‌شود که قدرمطلق شیب خط و عرض از مبدا (مرتبط با عیار) برای نمونه سطحی بیشتر از نمونه عمقی است که نشان می‌دهد، آهنگ افزایش عیار و مقدار بیشینه عیار قابل دسترسی برای نمونه سطحی بیشتر از نمونه عمقی است.



شکل ۱۲- منحنی‌های عیار- بازیابی برای هر دو نمونه سطحی و عمقی.

۳-۶- نتایج آنالیزهای EDX و XRD

برای تشخیص ترکیب شیمیایی و میزان درصد عناصر مختلف در سطح نمونه‌های سطحی و عمقی، کنسانتره‌های مرحله ۴ شستشوی هر دو نمونه سطحی و عمقی به روش EDX آنالیز شدند (جدول ۷). با توجه به این جدول با افزایش عمق مقدار عناصر منیزیم، آهن، اکسیژن و سیلیس در کنسانتره آپاتیت تولیدی افزایش می‌یابد. افزایش مقادیر عناصر سیلیسیم، اکسیژن و منیزیم در کنسانتره نمونه عمقی به احتمال زیاد مربوط به کانی‌های گانگ سیلیکاته از نوع پیروکسن، آمفیبول و یا اولیوین است که قابلیت شناورسازی با کلکتورهای اسید چرب را دارد و با شناور شدن در حین فلوتاسیون آپاتیت مانع از افزایش عیار کنسانتره نهایی می‌شود. آنالیز EDX برای کنسانتره‌های عمقی و سطحی در محدوده‌های 200×200 میکرون اخذ شد که میانگین تکرار آنالیزها در جدول ۷ گزارش شده است. عامل دیگر کاهش کارایی فلوتاسیون آپاتیت با افزایش عمق با توجه به نتایج EDX می‌تواند به کاهش مقدار F در نمونه عمقی نسبت داده شود. نتایج EDX نشان می‌دهد که درصد فلوتور در کنسانتره عمقی خیلی کمتر از نمونه سطحی است و به احتمال زیاد میزان فلوتور موجود در شبکه آپاتیت‌های عمقی و سطحی متفاوت است. قابلیت شناور شدن آپاتیت تا حد زیادی به مقدار فلوتور بستگی دارد به طوری که با افزایش فلوتور میزان شناور شدن افزایش می‌یابد که این خود دلیلی بر افزایش کارایی فلوتاسیون در نمونه سطحی است [۹].



شکل ۱۳- نتایج آنالیز XRD.

عمقی در فلوتاسیون است.

- در این کانسار از سطح به عمق، مقدار منیزیم افزایش می‌یابد که مربوط به وجود کانی سیلیکاته هورنبلند منیزیم‌دار است.
- با توجه به نتایج آنالیز XRD مقدار کلسیت در نمونه‌های عمقی بالا است. به دلیل تشابه خواص فلوتاسیون آپاتیت و کلسیت، کلسیت نیز همراه آپاتیت وارد کنسانتره می‌شود و عیار کنسانتره‌های تولیدی را کاهش می‌دهد.
- قابلیت شناور شدن نمونه‌های آپاتیت کانسنگ چند فلزی قره‌آغاج ارومیه از سطح به عمق کاهش می‌یابد.

تشکر و قدردانی

از پشتیبانی ارایه شده توسط دانشگاه صنعتی سهند سپاسگزاری و قدردانی می‌شود.

منابع

1. Cao, Q., et al., A mixed collector system for phosphate flotation. *Minerals Engineering*, 2015. 78: p. 114-121.
۲. یعقوب‌پور، ع.، مبانی زمین‌شناسی اقتصادی ۱۳۹۰، مرکز نشر دانشگاهی: جلال فصل‌بهار.
3. Kawatra, S.K. and J. Carlson, *Beneficiation of Phosphate Ore* 2013: SME.
4. Zhang, P., H. El-Shall, and P. Somasundaran, *Beneficiation of Phosphates*, 2002, SME.

در نمونه عمقی پایین بودن عیار کنسانتره را می‌توان به بالا بودن مقدار کلسیت در نمونه عمقی نسبت داد که چون جذب کلکتور در سطح کربنات بسیار قوی‌تر از جذب آن بر روی سطح آپاتیت است، فلوتاسیون ترجیحی کانی‌های کربناته را آسان می‌کند و کیفیت کنسانتره نمونه عمقی را پایین می‌آورد [۱۶] و [۱۷].

۴- نتیجه‌گیری

• مطالعه فلوتاسیون کانسنگ چند فلزی قره‌آغاج ارومیه نشان داد که امکان تهیه کنسانتره آپاتیت با عیار حدود ۳۲ درصد از زون سطحی و با عیار حدود ۲۹ درصد از زون عمقی امکان‌پذیر است.

• در نمونه‌های سطحی، با استفاده از مقادیر مواد شیمیایی کمتر و با تعداد مراحل شستشوی کمتر به عیار و بازیابی بیشتری از آپاتیت نسبت به نمونه عمقی می‌توان دست یافت.

• طبق منحنی‌های عیار- بازیابی نمونه سطحی کارآیی جدایش بالاتری نسبت به نمونه عمقی دارد و منحنی مربوط به آن بالاتر از نمونه عمقی قرار می‌گیرد.

• با توجه به نتایج آنالیز EDX و XRD، آپاتیت موجود در این کانسار از نوع فلوئورآپاتیت است که مقدار فلوئور آن از سطح به عمق کاهش می‌یابد. طبق مطالعات انجام شده هر چه مقدار فلوئور در نمونه آپاتیت بیشتر باشد، آپاتیت در محیط فلوتاسیون بهتر شناور خواهد شد و با توجه به کاهش فلوئور در عمق توجیهی برای کارآیی پایین نمونه

- معدن، ۲۰۱۶، ۱۰(۲۹): p. 81-94.
12. Eriksson, L., et al., Design of experiments. Principles and applications, 2000: p. 172-174.
 13. Kou, J., D. Tao, and G. Xu, Fatty acid collectors for phosphate flotation and their adsorption behavior using QCM-D. International Journal of Mineral Processing, 2010. 95(1-4): p. 1-9.
 14. Teague, A. and M. Lollback, The beneficiation of ultrafine phosphate. Minerals Engineering, 2012. 27: p. 52-59.
 15. dos Santos, M.A., et al., Effect of ionic species on the performance of apatite flotation. Separation and Purification Technology, 2010. 76(1): p. 15-20.
 16. Fuerstenau, M.C., G.J. Jameson, and R.-H. Yoon, Froth flotation: a century of innovation 2007: SME.
 17. Santana, R.C., et al., Influence of particle size and reagent dosage on the performance of apatite flotation. Separation and Purification Technology, 2008. 64(1): p. 8-15.
 5. Abouzeid, A.-Z.M., Physical and thermal treatment of phosphate ores—an overview. International journal of mineral processing, 2008. 85(4): p. 59-84.
 6. Elliott, J., R. Wilson, and S. Dowker, Apatite structures. Advances in X-ray Analysis, 2002. 45: p. 172-181.
 7. Sis, H. and S. Chander, Reagents used in the flotation of phosphate ores: a critical review. Minerals Engineering, 2003. 16(7): p. 577-585.
۸. بهرام، ر.، تکنولوژی فلوتاسیون ۱۳۹۴، انتشارات نهر دانش.
9. Zhong, K., T. Vasudevan, and P. Somasundaran, Floatability of apatites of different type and origin: role of surface area and porosity. International journal of mineral processing, 1993. 38:(۴-۳) p. 177-188.
 10. Barros, L.A., E.E. Ferreira, and A.E. Peres, Floatability of apatites and gangue minerals of an igneous phosphate ore. Minerals Engineering, 2008. 21(12-14): p. 994-999.
۱۱. عبادی و پورقهرمانی، بهینه‌سازی فلوتاسیون آپاتیت از کانسنگ قره‌آقاج ارومیه. نشریه علمی- پژوهشی مهندسی