

## بررسی تأثیر فعال‌سازی سطحی و پالایش اسیدی در بازیابی کانی ایلمینیت

مصطفی مالکی مقدم، عباس سام\*<sup>+</sup>، حسن حاجی امین شیرازی

کرمان، دانشگاه شهید باهنر، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی معدن

**چکیده:** به کارگیری روش شناورسازی به منظور بازیابی ذرات ریز ایلمینیت به علت محدودیت شدید مکان‌های فعال روی سطح ایلمینیت و در نتیجه قابلیت ضعیف شناوری این کانی در مطالعه‌های گذشته امید بخش نبوده است. در این پژوهش، فعال‌سازی سطحی و پالایش اسیدی قبل از آماده‌سازی، به منظور بررسی امکان افزایش قابلیت شناوری ایلمینیت مورد توجه قرار گرفته‌اند. نمونه مورد مطالعه خوراک خط ۳ مدار فرآوری کانسار تیتانیوم کهنوج با عیار  $\text{TiO}_2$  ۶۳۶٪ بود. پس از خردایش ذرات تا زیر ۱۰۶ میکرون با به کارگیری طرح آزمایشی تاگوجی، مخلوط کلکتورهای Flotinator FS و Clarient flotinator SM15 با نسبت ۱ به ۱، میزان کلکتور ۷۰۰ گرم بر تن،  $\text{pH}$  برابر ۸٫۵ و زمان آماده‌سازی ۱۵ دقیقه به عنوان شرایط بهینه انجام آزمایش‌ها انتخاب شدند. در این شرایط، میزان بازیابی و عیار  $\text{TiO}_2$  به ترتیب ۳۲ و ۱۲٫۳ در صد به دست آمد. استفاده از سرب نیترات به عنوان فعال‌کننده سطح تا ۱۵۰ گرم بر تن باعث افزایش ۵۰ درصدی بازیابی و ۹ درصدی کارایی جدایش شد. همچنین پالایش اسیدی قبل از آماده‌سازی، موجب افزایش ۱۴ درصدی عیار  $\text{TiO}_2$  در کنسانتره شد. استفاده از روش شناورسازی در مرحله‌های رافر، کلینر و ری کلینر منجر به دستیابی به عیار ۳۲٪ ایلمینیت با بازیابی کمینه ۵۵٪ شد.

**واژه‌های کلیدی:** شناورسازی، فعال‌سازی سطحی، پالایش اسیدی، کارایی جدایش.

**KEY WORDS:** Flotation, Surface activation, Acidic treatment, Separation efficiency.

### مقدمه

ایلمینیت ( $\text{FeTiO}_3$ ) و روتیل ( $\text{TiO}_2$ ) مهمترین منابع تولید تیتانیوم هستند که اغلب از کنسارهای ماسه‌ای کانی‌های سنگین به دست می‌آیند [۱]. تیتانیوم دی‌اکسید یکی از مهمترین مواد اولیه تولید رنگ‌ها، رنگدانه‌ها، پوشش سیم جوش‌ها، سرامیک، کاغذ و دیگر صنایع شیمیایی حتی صنایع غذایی و داروسازی است [۲، ۳]. فلز تیتانیوم استفاده گسترده‌ای در صنایع هوافضا دارد. همچنین آلیاژهای تیتانیوم مقاومت ویژه و سختی بالایی دارند [۴]. کانسار تیتانیوم کهنوج دارای دو ذخیره ابرفتی با عیار

$\text{TiO}_2$  ۳۶٪ و کانسار سنگی (سنگ مادر) با عیار  $\text{TiO}_2$  ۵۲۹٪ است [۵]. خوراک کارخانه نیمه‌صنعتی کهنوج شامل ۵۲٪ ایلمینیت، ۴۲٪ تیتانومگنتیت، ۴۴٫۳٪ پلاژوکلاز، ۳۰٫۲٪ پیروکسن و ۵٫۵٪ هورنبلند است. مدار فرآوری تیتانیوم کهنوج شامل سه خط متوالی است. کانسنگ ایلمینیت با ابعاد کوچکتر از ۰٫۵ میلی‌متر در خط ۱ توسط هیدروسیکلون‌ها و ماریچ‌ها مورد نرمه‌گیری و شستشو قرار می‌گیرد. کنسانتره نهایی تیتانومگنتیت توسط جداکننده مغناطیسی

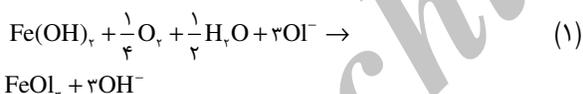
\*عهده دار مکاتبات

+E-mail: sam@uk.ac.ir

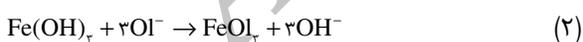
پالایش شود افزایش می‌یابد. آنها اینگونه استنباط کردند که لایه‌ای از هیدروکسیدهای آهن یا دیگر عناصر سطح ایلمینیت را پوشانده است که از واکنش میان الئیک اسید و ایلمینیت جلوگیری می‌کند. اگر این لایه توسط سولفوریک اسید حل شود؛ یون‌های  $Fe^{+2}$  حل شده، شاید روی سطح ایلمینیت جذب شوند جایی که می‌توانند نقش ویژه‌ای در شناورسازی ایلمینیت ایفا نمایند [۸]. این گروه چند سال بعد توضیح دادند که بعد از حل شدن لایه مزاحم، گونه‌های روی سطح ایلمینیت، می‌توانند به‌طور مناسبی با آنیون کلکتور که روی سطح ایلمینیت ظاهر می‌شود، واکنش دهند [۸].

به‌دلیل اینکه قابلیت حل فرو التات  $K_{spFeO_2}=10^{-15.5}$  و برای فریک التات  $K_{spFeO_3}=10^{-29.7}$  است نسبت به  $FeO_2$  به سخت‌تر حل می‌شود [۹]. Gutierrez (۱۹۷۶ میلادی) تأکید کرد که اکسیداسیون یون‌های  $Fe^{+2}$  روی سطح ایلمینیت عمل یون الئیت را آسان می‌کند و باعث افزایش شناوری می‌شود. گرمادان به هوا یا همزدن در آبی که هوا وارد آن می‌شود برای مدت طولانی قابلیت شناوری ایلمینیت را افزایش می‌دهد و این امر به‌وسیله اسپکتروسکوپی تأیید می‌شود که الئیت آهن روی سطح وجود دارد [۱۰].

Luszczkiewicz و همکاران (۱۹۷۹ میلادی) پس از پژوهش بر روی سامانه  $H_2O-O_2-NaOH$  ایلمینیت نتیجه گرفتند که اکسیداسیون الکتروشیمیایی  $Fe^{+2}$  روی سطح باعث تشکیل  $FeO_2$  می‌شود [۱۱]:



در آب، یون‌های روی  $Fe^{+3}$  که روی سطح ایلمینیت وجود دارند و به شکل  $Fe(OH)_3$  هستند و جذب  $OH^-$  روی آن یک جذب تعویض یونی است [۱۱]:



و از آنجا که  $K_{spFe(OH)_3}$  کمتر از  $K_{spFeO_2}$  است این واکنش به‌سختی انجام می‌شود ولی در محیط اسیدی  $Fe(OH)_3$  حل می‌شود و یون‌های  $Fe^{+2}$  آزاد شده می‌توانند به‌طور الکتروشیمیایی به  $FeO_2$  اکسید شوند. و همین امر عامل فعال‌سازی به‌وسیله پالایش با اسید است [۱۱].

در گذشته به‌کارگیری روش شناورسازی در مدار تیتانیوم کهنوج در دوره بررسی شده، لیکن نتیجه‌های به‌دست آمده امیدبخش نبوده‌است:

از بخش غیرمغناطیسی شامل کانی‌های ایلمینیت، پیروکسن و هورنبلند جدا می‌شود. مواد غیرمغناطیسی پس از طبقه‌بندی و خشک کردن وارد جداکننده الکتریکی شده و کنسانتره جداکننده شامل مواد هادی ایلمینیت برای بسته‌بندی به انبار کنسانتره ایلمینیت فرستاده می‌شود. باطله ماریچ‌های خط ۱ دوباره توسط تجهیزات ثقلی و مغناطیسی خط ۲ مورد جدایش قرار گرفته و کنسانتره به‌دست آمده با کنسانتره خط ۱ مخلوط می‌شود. باطله خط ۲ وارد خط ۳ می‌شود.

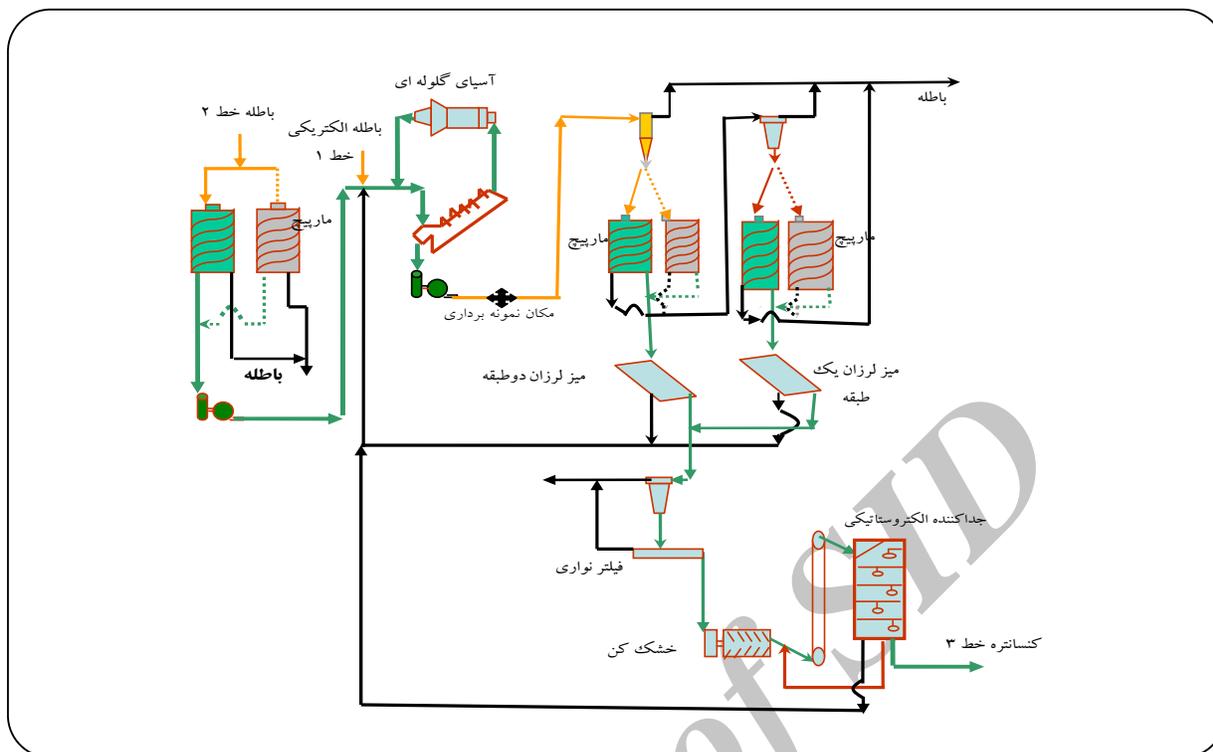
کارایی استحصال ذرات ریز در خط ۳ با وجود استفاده از تجهیزات بسیار ثقلی، مغناطیسی و الکتریکی پایین بوده و هدروری مواد بارزش در باطله زیاد است. در این پژوهش استفاده از روش شناورسازی برای جدایش این بخش از ابعاد، و راه‌های افزایش بازایی مواد بارزش توسط روش‌های فعال‌سازی سطحی و پالایش اسیدی مورد بررسی قرار گرفت.

### مروری بر پژوهش‌های گذشته

شناورسازی فرایندی شیمی فیزیکی و بر مبنای ویژگی‌های شیمی فیزیکی سطوح است [۶]. از این روش در برخی کشورها مانند نروژ و امریکا برای استحصال کانه‌های تیتانیوم‌دار استفاده شده است. ایلمینیت یک کانی با ساختار  $ABO_3$  است که دو عنصر آهن و تیتانیوم در این کانی نقش همانندی دارند. ویژگی‌های سطحی و قابلیت شناوری ایلمینیت تحت تأثیر pH، یون‌های  $Fe^{+2}$ ،  $Ti^{+4}$  و ترکیبات هیدروکسیل،  $Ti(OH)_n^{4-n}$ ،  $Fe(OH)_M^{2-M}$  است. ترکیب کمپلکس تیتانیوم پایدارتر از ترکیبات هیدروکسیل آهن و یون‌های فرو و کمپلکس‌های آن فعال‌ترند و با یون‌های کلکتور زودتر واکنش می‌دهند. غلظت مکان‌های فعال روی سطح ایلمینیت خیلی کمتر از روی سطح مگنتیت یا روتیل است، بنابراین ایلمینیت قابلیت شناوری ضعیفی دارد [۷].

دو روش برای بهبود بازایی ایلمینیت وجود دارد: اول اکسیداسیون سطحی ایلمینیت که یون‌های فرو روی سطح ایلمینیت به یون‌های فریک تبدیل می‌شوند؛ در نتیجه قابلیت جذب یون‌های کلکتور روی سطح ایلمینیت افزایش می‌یابد. دوم فعال‌سازی ایلمینیت توسط یون‌هایی مانند یون‌های سرب (سرب نیترات) برای اصلاح ویژگی‌های سطحی ایلمینیت و افزایش قابلیت شناوری [۷].

در پژوهش Eigels و همکاران در سال ۱۹۶۱ میلادی مشخص شد که شناوری ایلمینیت، اگر قبل از آن توسط محلول ۵٪ سولفوریک اسید



شکل ۱- مدار خط ۳ کارخانه نیمه صنعتی تیتانیوم کهنوج.

### بخش تجربی روش پژوهش

در مدار فرآوری طراحی شده کانسار تیتانیوم کهنوج، باطله به دست آمده از به‌کارگیری تجهیزات ثقلی، مغناطیسی و الکتریکی اولیه دارای میزان زیادی مواد ریز با ارزش و ذرات قفل شده است. این مواد ورودی به خط ۳ این مدار را تشکیل می‌دهند و برای رسیدن به درجه آزادی مناسب درون یک آسیای گلوله‌ای که به‌صورت بسته با یک کلاسیفایر درحال کار است، مورد خردایش قرار می‌گیرند. به‌دلیل کارایی پایین روش‌های ثقلی، مغناطیسی و الکتریکی در جدایش بخش ابعاد دانه ریز، با وجود به‌کارگیری این تجهیزات در مدار خط ۳ هدرروی مواد با ارزش ریز زیاد است و به نظر می‌رسد روش شنورسازی گزینه مناسب برای جدایش این بخش ابعادی است. برای بررسی این موضوع در طی ۳ ساعت و در فواصل زمانی نیم ساعت از مواد ورودی به خط ۳ نمونه برداری شد. مکان نمونه‌برداری از این مواد در شکل ۱ (خط ۳ مدار کارخانه فرآوری تیتانیوم کهنوج) نشان داده شده است.

در بررسی اول که روی خوراک ورودی به کارخانه انجام شده، اسیدهای چرب مخلوط با هیدروکربن‌های خنثی به‌عنوان کلکتور برای شنورسازی ایلمینیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این آزمایش‌ها دیده شد تیتانومگنتیت و تمام سیلیکات‌های آهن‌دار، به‌همراه ایلمینیت شناور می‌شوند. کلکتورهای آنیونی و کاتیونی در این بررسی مورد استفاده قرار گرفتند که کنسانتره‌ای با عیار  $6/1\% \text{TiO}_2$  و بازیابی  $98/1\%$  به‌دست‌آمد. در پایان نتیجه‌گیری شده که این روش برای خالص‌سازی و استحصال تیتانیوم از باطله می‌تواند مورد استفاده قرارگیرد ولی غیراقتصادی است [۱۲].

در کار دوم از Clarient Flotonor SM 15 به‌عنوان کلکتور در محیط خنثی استفاده شد. نمونه‌ی باطله ماریچ‌ها، جداکننده مغناطیسی و میز لرزان ابتدا بدون انجام عملیات خردایش مورد آزمایش قرار گرفت که کنسانتره‌ای با  $6/4\% \text{TiO}_2$  و درصد جرمی  $10/1\%$  به‌دست آمد. ولی به‌دلیل نرسیدن به درجه آزادی، پس از خردایش تا  $100-$  میکرون طی مراحل رافر و کلینر شناور شد که پس از مرحله کلینر کنسانتره‌ای با  $26/8\% \text{TiO}_2$  و بازیابی  $12/2\%$  به‌دست‌آمد [۱۳].

- مرحله آماده‌سازی با تنظیم pH، اضافه نمودن کلکتور و همزنی به مدت چند دقیقه و اضافه کردن کف ساز،
  - انجام آزمایش‌های شناورسازی در سلول ۱ لیتری Denver به مدت ۲ دقیقه،
  - صاف کردن و خشک کردن کنسانتره و تجزیه آن برای به دست آوردن  $\text{TiO}_2$  و Fe به روش شیمی‌تر در آزمایشگاه مجتمع تیتانیوم کهنوج.
- نتیجه‌های به دست آمده از این طرح و شرایط بهینه به دست آمده در قسمت نتیجه‌ها و بحث آمده است.

#### بررسی اثر سرب نیترات

در این پژوهش از یون‌های سرب برای فعال‌سازی سطح ایلمینیت و بهبود بازیابی آن استفاده شد. در این آزمایش‌ها با اضافه کردن سرب نیترات از ۰ تا ۱۵۰ g/ton مقدار سرب نیترات بهینه و تأثیر آن روی بازیابی و عیار مورد بررسی قرار گرفت. برای هر آزمایش ۳۵۰ گرم نمونه انتخاب شد. در مرحله آماده‌سازی پس از ۲ دقیقه هم‌زدن بدون افزودن مواد شیمیایی، سرب نیترات اضافه شد و به مدت ۳ دقیقه هم‌زده شد. آماده‌سازی با اضافه کردن ۳۵۰ g/ton Flotinator FS و ۳۵۰ g/ton Clarient Flotinator SM 15 و هم‌زدن به مدت ۵ دقیقه، افزودن ۷۰ گرم بر تن کف‌ساز و ۱۵۰ گرم بر تن بازداشت کننده سدیم سیلیکات ادامه یافت. کل زمان آماده‌سازی برای هر آزمایش ۱۵ دقیقه بود.

#### بررسی اثر پالایش اسیدی

عملیات پالایش اسیدی قبل از مرحله آماده‌سازی به وسیله سولفوریک اسید ۵٪ و در زمان‌های ۵ تا ۲۰ دقیقه انجام گرفت. این عملیات روی نمونه‌های ۳۵۰ گرمی، در ظرف چینی و با همزنی دستی انجام شد. پس از عملیات پالایش اسیدی، شستشوی نمونه‌ها به کمک آب مقطر و آب معمولی انجام شد. نمونه‌ها، صاف و خشک شد و برای آماده‌سازی از ۵۰ g/ton نیترات سرب برای فعال‌سازی سطح استفاده شد. میزان مواد شیمیایی و مراحل آماده‌سازی مانند آزمایش‌های بخش قبل بود. آزمایش‌های شناورسازی در سلول ۱ لیتری، و عملیات کف‌گیری به مدت ۲/۵ دقیقه صورت پذیرفت.

#### آزمایش‌های چند مرحله‌ای

پس از بررسی تأثیر عوامل گوناگون بر قابلیت شناوری ایلمینیت، برای دستیابی به کنسانتره‌ای با عیار حداکثر، آزمایش‌های رافر، کلینر و ری کلینر انجام گرفتند. آزمایش رافر با ۱۴۰۰ گرم نمونه

پس از آگیری و خشک کردن، از روش تقسیم مخروطی و چهار قسمت کردن برای تهیه نمونه‌های آزمایش شناورسازی استفاده شد. نمونه‌های مورد آزمایش دارای ۳۶٪  $\text{TiO}_2$ ، ۱۱/۵٪ Fe و  $d_{80}$  (اندازه‌ای که ۸۰٪ ذرات از آن کوچک‌ترند) برابر ۱۳۲ میکرون بودند که در آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی به ذرات ریزتر از ۱۰۶ میکرون با  $d_{80}$  برابر ۸۲ تبدیل شدند.

در این پژوهش از گازوئیل، الئیک اسید (۸۵٪)، Flotinator V2711، Clarient Flotinator SM 15 و Flotinator FS به عنوان کلکتور، از Floanol C07 به عنوان کف‌ساز، سدیم سیلیکات برای بازداشت کوارتز و کانی‌های سیلیکاته، نیترات سرب برای فعال‌سازی و سولفوریک اسید (۵٪) برای پالایش اسیدی استفاده شد. آزمایش‌های شناورسازی در سلول‌های ۱، ۳ و ۵ لیتری Denver انجام شدند. میزان  $\text{TiO}_2$  و Fe به روش XRF به وسیله دستگاه Niton یا روش شیمی‌تر در آزمایشگاه مجتمع تیتانیوم کهنوج تعیین شدند.

#### تعیین شرایط بهینه

در این پژوهش عوامل نوع کلکتور، میزان کلکتور مورد استفاده، pH و زمان آماده‌سازی به عنوان عواملی که بیشترین تأثیر را در انجام آزمایش‌ها دارند انتخاب شدند، و مقدار بهینه هر کدام مورد ارزیابی قرار گرفت. طرح آزمایشی مورد استفاده برای این منظور طرح تاگوچی ۹ آزمایشی و L انتخاب شد. عوامل مورد نظر در این طرح آزمایش:

نوع کلکتور با سه سطح: مخلوط گازوئیل و اسیدالئیک (۱-)، مخلوط Flotinator V2711 و گازوئیل (۰)، مخلوط Clarient Flotinator SM 15 و Flotinator FS (۱)، مقدار کلکتور در سه سطح: ۵۷۰ g/ton (۱-)، ۷۰۰ g/ton (۰) و ۹۰۰ g/ton (۱)،

pH در سه سطح: ۸/۵ (۱-)، ۶/۵ (۰) و ۴/۵ (۱) زمان آماده‌سازی در سه سطح: ۵ دقیقه (۱-)، ۱۰ دقیقه (۰) و ۱۵ دقیقه (۱).

برای اجرای طرح L مراحل زیر برای آماده‌سازی و آزمایش‌های شناورسازی انجام گرفت:

- خردایش مواد در آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی تا ۸۰٪ عبوری از ۸۲ میکرون،
- انتخاب ۳۵۰ گرم نمونه برای هر آزمایش،
- آماده‌سازی مواد در درصد جامد ۶۵٪ در pH خنثی و با سرعت همزنی ۸۰۰ دور بر دقیقه،

شان از تأثیر اصلی است و گونه تفاوت‌های جزئی به‌عنوان خطای زمینه در نظر گرفته می‌شود. در این آزمایش از کارایی جدایش به‌عنوان پاسخ استفاده و همانطور که در نمودار ترسیمی نتیجه‌ها در شکل ۳ دیده می‌شود اختلاف بارزی میان بعضی از متغیرها نسبت به سایر، وجود دارد که به عنوان شرایط بهینه مورد نظر انتخاب می‌شوند.

با توجه به نتیجه‌های به‌دست آمده دیده می‌شود که به ازای تمام متغیرها تأثیر اصلی دیده می‌شود و شرایط بهینه زیر برای انجام شناورسازی به‌دست آمد:

- مخلوط کلکتورهای Flotinor FS و Clarient
- Flotinor SM 15 هرکدام به میزان ۳۵۰ g/ton.
- pH معادل ۸٫۵ برای انجام آزمایش شناورسازی
- زمان آماده سازی ۱۵ دقیقه

در این شرایط و باتوجه به یک مرحله بودن شناورسازی میزان بازیابی و عیار به ترتیب ۳۲ و ۱۲٫۳٪  $TiO_2$  به‌دست آمد.

#### بررسی اثر نیترات سرب

شکل ۴ تأثیر مقدار  $Pb(NO_3)_2$  را روی بازیابی و عیار ایلمینیت نشان می‌دهد.

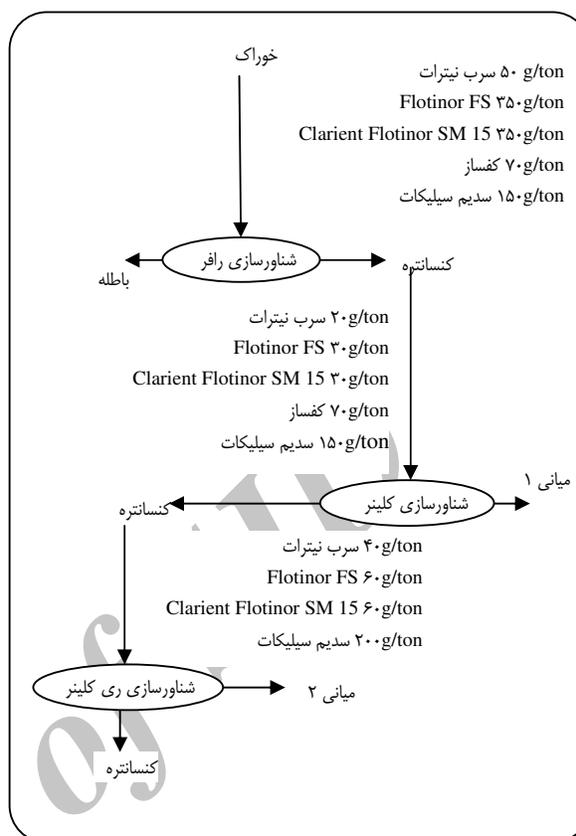
همان‌گونه که دیده می‌شود، افزایش میزان  $Pb(NO_3)_2$  از صفر تا  $150\text{ g/L}$  باعث افزایش قابل‌ملاحظه بازیابی از ۳۲٪ به ۸۲٫۳٪ می‌شود درحالی که عیار  $TiO_2$  از ۱۲٫۳٪ به ۸٫۹٪ کاهش می‌یابد. این افزایش بازیابی، جذب انتخابی یون‌های سرب روی سطح ایلمینیت را تأیید می‌کنند.

این نتیجه‌ها حاکی از تأثیر مثبت  $Pb(NO_3)_2$  بر جدایش است. درنتیجه با در نظر گرفتن کارایی جدایش به عنوان ملاک ارزیابی، با افزایش مقدار سرب نیترات، قابلیت شناورسازی ایلمینیت افزایش می‌یابد.

از آنجاکه در این پژوهش رسیدن به عیار بالا مدنظر بود، از ۵۰ و ۱۰۰ گرم بر تن سرب نیترات برای فعال‌سازی سطحی استفاده شده است. به‌دلیل تأثیر مثبت این روش، می‌توان از این روش برای استحصال کانی ایلمینیت در کانسارهای تیتانیوم‌دار استفاده نمود.

#### بررسی اثر پالایش اسیدی

اثر پالایش اسیدی بر قابلیت شناوری ایلمینیت در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که نتیجه‌های به‌دست آمده از این آزمایش‌ها نشان می‌دهد، پالایش اسیدی به مدت ۵ دقیقه



شکل ۲- مرحله‌های آماده‌سازی و انجام آزمایش‌های رافر- کلیتر- ری کلیتر.

در سلول ۵ لیتری Denver انجام شد. مرحله‌های آماده‌سازی و میزان مواد شیمیایی مورد استفاده در شکل ۲ آورده شده است. با توجه به نتیجه‌های مطلوب به دست آمده از انجام پالایش اسیدی قبل از شناورسازی، آزمایش چند مرحله‌ای رافر- کلیتر- ری کلیتر با انجام پالایش اسیدی توسط سولفوریک اسید ۵٪ به مدت ۱۰ دقیقه قبل از آماده سازی مراحل رافر و کلیتر انجام شد. مرحله‌های آماده‌سازی، اضافه کردن مواد شیمیایی مورد استفاده و شناورسازی همانند روش نشان داده شده در شکل ۲ بود.

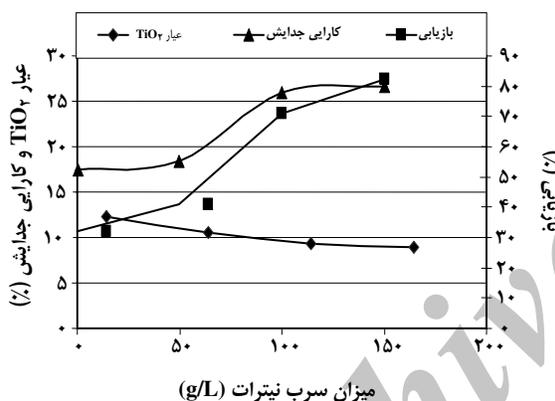
#### نتیجه‌ها و بحث

##### تعیین شرایط بهینه

در جدول ۱ نتیجه‌های به دست آمده از به‌کارگیری طرح آزمایشی تاگوچی نشان داده شده است. در تحلیل داده‌های به‌دست آمده مقادیر متوسط مربوط به هر سطح با هم مقایسه می‌شوند. اگر اختلاف بارزی وجود داشته باشد،

جدول ۱- طرح تاگوچی ۹ آزمایشی و نتیجه‌های به دست آمده.

شماره	نوع کلکتور	میزان کلکتور	pH	زمان آماده سازی	عیار $TiO_2$ (%)	بازیابی (%)	کارایی جدایش (%)
۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۶٫۵	۱٫۳۴	-
۲	-۱	۰	۰	۰	۶٫۴	۱٫۲۷	-
۳	-۱	۱	۱	۱	۶٫۷	۱٫۷۱	-
۴	۰	-۱	۰	۱	۱۰٫۷۱	۸٫۳۷	۳٫۸۶
۵	۰	۰	۱	-۱	۱۳٫۰۳	۹٫۳	۵٫۴۲
۶	۰	۱	-۱	۰	۱۲٫۴۷	۶٫۳۳	۳٫۵۲
۷	۱	-۱	۱	۰	۱۳٫۸۹	۵٫۳	۳٫۲۷
۸	۱	۰	-۱	۱	۱۲٫۲۷	۳٫۱۹۲	۱۷٫۴۸
۹	۱	۱	۰	-۱	۱۲٫۳۳	۱۳٫۵۷	۴٫۷۴

شکل ۴- تأثیر مقدار  $Pb(NO_3)_2$  روی بازیابی و عیار ایلمینیت.

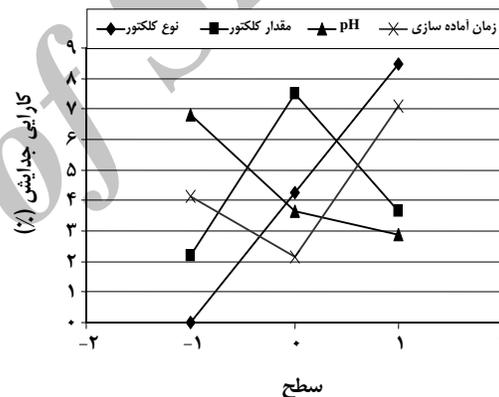
کارایی جدایش زمان ۱۰ دقیقه به عنوان زمان بهینه عملیات پالایش اسیدی انتخاب شد.

#### آزمایش‌های چند مرحله‌ای

نتیجه‌های این آزمایش‌ها که طی مراحل رافر - کلینر - ری کلینر بدون پالایش اسیدی و با پالایش اسیدی در مرحله‌های رافر و کلینر انجام شده‌اند، در جدول ۲ نشان داده شده است.

همانطور که نتیجه‌ها نشان می‌دهد پالایش اسیدی در مرحله رافر، بازیابی ایلمینیت را از ۶۹٫۷٪ به ۹۵٫۹٪ و عیار ایلمینیت را از ۱۶٫۳٪ به ۱۸٫۱٪ رسانده است.

در مرحله کلینر که پالایش اسیدی انجام شده است بازیابی



شکل ۳- نتیجه‌های ترسیمی آزمایش‌ها برای سطوح مختلف.

قبل از آماده‌سازی باعث افزایش عیار  $TiO_2$  از ۱۰٫۵٪ به ۲۴٫۶٪ در کنسانتره می‌شود.

این افزایش عیار را می‌توان از دو جنبه مورد ارزیابی قرارداد. اول اینکه پالایش اسیدی باعث کاهش pH محیط آماده‌سازی و شناورسازی شده که نقش زیادی در بازداشت کانی‌های باطله دارد. از طرفی خود سولفوریک اسید به عنوان بازدارنده، در بسیاری از فرایندهای شناورسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مطلب دوم تأثیر سولفوریک اسید در تبدیل یون‌های فرو به فریک و افزایش پایداری ترکیب کلکتور و یون‌های فریک است.

همان‌گونه که از شکل مشخص است با افزایش زمان پالایش اسیدی عیار  $TiO_2$  کاهش می‌یابد و با توجه به عیار، بازیابی و

جدول ۲- نتیجه‌های به دست آمده آزمایش‌ها در این پژوهش طی مراحل رافر- کلینر- ری کلینر بدون پالایش اسیدی و با پالایش اسیدی.

محصول	شناورسازی همراه با پالایش اسیدی		شناورسازی بدون پالایش اسیدی	
	بازیابی (%)	عیار ایلمینیت (%)	بازیابی (%)	عیار ایلمینیت (%)
کسانتره رافر	۹۵٫۹	۱۸٫۱۳	۶۹٫۷	۱۶٫۲۶
کلینر	۷۸٫۴۱	۲۳٫۷۹	۷۸٫۳۹	۲۲٫۱۱
ری کلینر	۴۷٫۸۸	۲۷٫۲۳	۵۵٫۴	۳۱٫۹

آزمایش‌ها استفاده شد. براساس طرح آزمایشی تاگوچی، مخلوط کلکتورهای Clarient flotinor SM15 و flotinor FS-2 با نسبت ۱ به ۱ به میزان ۷۰۰ گرم بر تن، pH برابر ۸٫۵ و زمان آماده‌سازی ۱۵ دقیقه به عنوان بهترین شرایط تعیین شد.

• افزایش سرب نیترات به عنوان فعال‌کننده سطح به میزان ۱۵۰ g/L منجر به افزایش قابل‌ملاحظه ۵۰ درصدی بازیابی و ۹ درصدی کارایی جدایش شد.

• پالایش به مدت ۱۰ دقیقه قبل از آماده‌سازی توسط سولفوریک اسید ۵٪، منجر به افزایش قابل‌ملاحظه ۱۲ درصدی عیار  $TiO_2$  و افزایش ۶ درصدی کارایی جدایش شد.

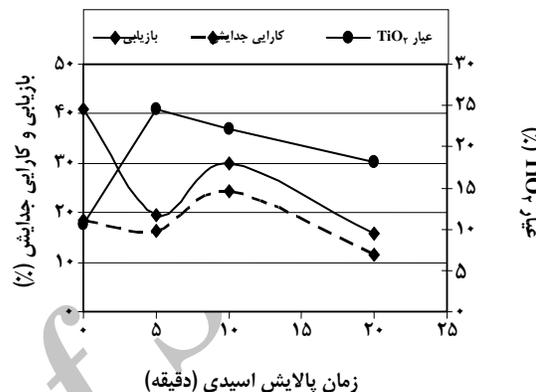
• افزایش عیار نتیجه هر دو عامل اثر بازداشت‌کنندگی سولفوریک اسید و تبدیل یونی است. همچنین دیده شد با افزایش زمان پالایش اسیدی، عیار کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن عیار، بازیابی و کارایی جدایش، زمان ۱۰ دقیقه به عنوان زمان بهینه عملیات پالایش اسیدی انتخاب شد.

• استفاده از روش شناورسازی در خط ۳ مدار در طی مراحل رافر، کلینر و ری کلینر منجر به دستیابی به عیار ۳۲٪ ایلمینیت با بازیابی کمینه ۵۵٪ شد.

• حذف کانی‌های آهن‌دار نظیر مگنتیت و تیتانومگنتیت و کانی‌هایی مانند هورنبلند که شناورسازی شبیه ایلمینیت دارند، با استفاده از جداکننده‌های مغناطیسی شدت کم و زیاد قبل از انجام آزمایش‌های شناورسازی می‌تواند در رسیدن به عیار دلخواه کانی ایلمینیت مؤثر باشد.

• در کانسارهای با تداخل کانی‌های آهن‌دار کم، می‌توان از روش شناورسازی به روش دلخواهی جهت جدایش کانی‌های بارزش تیتانیوم‌دار استفاده نمود. روش‌های فعال‌سازی سطحی و پالایش اسیدی به منظور افزایش قابلیت شناوری کانی‌های تیتانیوم‌دار در این کانسارها مؤثر است.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸، ۱۲، ۲۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹، ۹، ۲۲



شکل ۵- اثر پالایش اسیدی بر قابلیت شناوری ایلمینیت.

به تقریب ثابت مانده و عیار از ۲۲٫۱٪ به ۲۲٫۸٪ افزایش یافته‌است. در مرحله ری کلینر که پالایش اسیدی انجام نشده است کاهش در عیار و بازیابی دیده شد.

وجود کانی‌های همراه در خوراک مانند هورنبلند که شناورسازی شبیه ایلمینیت دارد و همچنین کانی‌های آهن‌داری مانند مگنتیت و تیتانومگنتیت که قابلیت شناوری بالاتر از ایلمینیت دارند باعث عدم دستیابی به عیار دلخواه توسط روش شناورسازی شده‌است و عیار به دست آمده از کسانتره ری کلینر پایین می‌باشد. در نتیجه کاربرد شناورسازی برای جدایش کانی‌های با ارزش تیتانیوم‌دار در کانسارهای با تداخل کانی‌های آهن‌دار، نیازمند حذف این کانی‌ها با استفاده از جداکننده‌های مغناطیسی است.

### نتیجه‌گیری

• با توجه به پایین بودن قابلیت شناوری ایلمینیت نسبت به کانی‌های همانند، می‌توان با فعال‌سازی سطحی و پالایش اسیدی، قبل از انجام شناورسازی، کارایی استحصال این کانی را افزایش داد.

• با توجه به بسیار بودن عامل‌های مؤثر بر شناورسازی، از روش طراحی آزمایش‌ها برای به دست آوردن شرایط بهینه انجام

## مراجع

- [1] Bulatovic S., Wysloulzil D.A., Process Development for Treatment of Complex Perovskite, Ilmenite and Rutile Ores, *Mineral Engineering*, **12**(12), p. 1407 (1999).
- [2] Mahmoud M.H.H., Afifi A.A.I., Ibrahim I.A., Reductive Leaching of Ilmenite Ore in Hydrochloric Acid for Preparation of Synthetic Rutile, *Hydrometallurgy*, **73**, p. 99 (2004).
- [3] El-Hazek N., Lasheen T.A., El-Sheikh R., Salah A., Hydrometallurgical Criteria for  $TiO_2$  Leaching from Rosetailmenite by Hydrochloric Acid, *Hydrometallurgy*, **87**, p. 45 (2007).
- [4] Poletti C., Balog M., Schubert T., Liedtke V., Edtmaier C., Production of Titanium Matrix Composites Reinforced with SiC Particles, *Composites Science and Technology*, **68**, p. 2171 (2008).
- [۵] کرهای، محمدتقی؛ "شرح مختصر کارخانه های فرآوری - کارخانه فرآوری تیتانیوم کهنوج؛ سازمان زمین شناسی و اکتشافات کشور، بانک داده های فرآوری مواد معدنی ایران؛ (۸۳-۱۳۸۲).
- [۶] امینی راد، حسن؛ چباری برجسته، حامد؛ رشتچیان، داود؛ جوهرزدایی از کاغذهای باطله به روش شناورسازی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۲) ۲۶، ص ۱ (۱۳۸۶).
- [7] Fan X., Rowson N.A., The Effect of  $Pb(NO_3)_2$  on Ilmenite Flotation, *Mineral Engineering*, **13**(2), p. 205 (2000).
- [8] Eigeles M.A., Mashyanova A. V., "Flotation of Silicates and Oxides (Study on Interaction of Reagents with Ilmenite and Chlorite by Means of Electrokinetic and Radiometric Methods)", *Publ. Moscow*, p. 88-105; (1961).
- [9] Zhung K., Cui L., Influence of  $Fe^{2+}$  Ions of Ilmenite on its Flotability, *Int. J. Minerals Processing*, **20**, p. 253 (1987).
- [10] Gutierrez C., Influence of Previous Aeration in Water or air of Ilmenite on its Flotation with Oleic Acid, *Int. J. Miner. Process.*, **3**(3), p. 247 (1976).
- [11] Luszczkiewicz A., Lekki J., Laskowski J., The Flotability of Ilmenite, "13<sup>th</sup> Int. Miner. Process. Congr., Treatment of Iron-Titanium Ores Round Table Seminar", p. 164-182; (1979).
- [۱۲] شرکت مهندسی پولا؛ "طرح احداث واحد آزمایشی تولید کنسانتره ایلمینیت کهنوج؛ طرح تیتانیوم کهنوج؛ جلد اول؛ (۱۳۷۴).
- [13] TOT-Report, "Investigation Program to Determine the Possibility of Recleaning the Refuses from the Ilmenite Processing Plant Kahnooj", Kahnooj Titanium Project; (Sep 2004).