



## بررسی های کانی‌شناسی آپاتیت‌های کانسار قره‌آغاچ ارومیه از دیدگاه فرآوری

اکبر مهدیلو<sup>\*</sup>، مهدی ایران نژاد

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۸۹/۸/۳۲، نسخه نهایی: ۸۹/۱۲/۱۱)

**چکیده:** کانسار قره‌آغاچ واقع در ۳۶ کیلومتری شمال-غرب ارومیه، از جمله ذخایر تیتانیم و فسفات محسوب می‌شود. پی‌جویی‌های اولیه حاکی از وجود ۱۰۲ میلیون تن کانسنگ فسفات با عیار متوسط ۲/۳ درصد  $P_2O_5$  در این کانسار است. در این پژوهش بررسی‌های نمونه‌ای معرف تهیه شده با استفاده از XRD، XRF، میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی مجهز به EDX انجام شد. این بررسی‌ها نشان داد که کانی‌های ایلمنیت، منیتیت و آپاتیت کانی‌های با ارزش موجود در کانسنگ هستند. کانی‌های گانگ همراه شامل کلینوپیروکسن، ارتوپیروکسن، اولیوین، آمفیبول و برخی از کانی‌های ثانویه مانند کلریت و آکتینولیت حاصل از دگرسانی پیروکسن و اولیوین هستند. آپاتیت موجود در نمونه از نوع فلوئور-آپاتیت بوده و از نظر بافت به دو شکل دیده می‌شوند، نوع اول که بخش غالب را تشکیل می‌دهد، آپاتیت‌های درگیر با کانی‌های ایلمنیت، منیتیت و گانگ هستند که درجه‌ی آزادی آن‌ها حدود ۶۰ میکرون است. نوع دوم آپاتیت‌هایی هستند که به‌صورت درونگیر در کانی‌های ایلمنیت و منیتیت قرار گرفته و دارای ابعاد کوچک‌تر از ۲۰ میکرون بوده و به راحتی قابل بازیابی نیستند. آزمایش‌های جدایش با آبگون‌های سنگین نشان داد که چگالی کانی آپاتیت در حدود ۲/۹ تا ۳ است. بنابراین بخش عمده‌ی آپاتیت‌های نوع اول در فرآیند جدایش ثقلی کانسنگ به منظور تولید ایلمنیت و منیتیت پرعیار، به بخش باطله منتقل می‌شوند. این آپاتیت‌ها را که بیشتر همراه کانی‌های گانگ سیلیکاتی هستند، می‌توان به روش شناورسازی مورد بازیابی قرار داد. به عبارت دیگر کنسانتره آپاتیت به‌عنوان محصول جانبی فرآیند تولید کنسانتره ایلمنیت محسوب می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** فسفات؛ تیتانیم؛ آپاتیت؛ ایلمنیت؛ فلوئوراسیون.

### مقدمه

خاستگاه آلی (گوانو) ۵- ذخایر فسفات حاصل از فرآیند هوازدگی. حدود ۷۵ درصد ذخایر فسفات دنیا از نوع ذخایر با خاستگاه رسوب‌های دریایی، ۱۵ الی ۲۰ درصد از نوع ذخایر آذرین، دگرگونی و هوازده و ۲ الی ۳ درصد از نوع ذخایر با خاستگاه آلی یا گوانو است [۲].

مهم‌ترین کانی‌های فسفات که در محیط‌های اولیه تشکیل می‌شوند، در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. چنان‌که ملاحظه می‌شود با جایگزینی یون‌های مختلف به جای فسفر، کانی‌های متفاوتی تشکیل می‌شوند. از بین این کانی‌ها، سه مورد اول مهم‌ترین و فراوان‌ترین آن‌هاست که اغلب در ذخایر آذرین و دگرگونی یافت می‌شود [۲، ۴]. بزرگ‌ترین معدن فعال از نوع

فسفر از جمله اساسی‌ترین عنصر برای تغذیه گیاهان و حیوانات است که تاکنون هیچ جایگزین مناسبی نیز برای آن پیدا نشده است. کانسنگ‌های فسفات از اقتصادی‌ترین منابع تولید کودهای فسفاتی و ترکیب‌های دیگر شیمیایی مربوطه است [۱]. بیش از ۹۵ درصد کانسنگ فسفات تولیدی دنیا در تهیه کودهای فسفاته مصرف می‌شود [۲]. هرچند که از سنگ فسفات در تهیه مواد غذایی، پودرهای شوینده، حشره کش‌ها، کبریت نیز استفاده می‌شود [۱].

ذخایر فسفات براساس خاستگاه به پنج دسته تقسیم می‌شوند [۳، ۲]: ۱- ذخایر با خاستگاه رسوب‌های دریایی ۲- ذخایر با خاستگاه آذرین ۳- ذخایر دگرگونی ۴- ذخایر با

\* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۴۲۴۰۹۱۶، پست الکترونیکی: amehdilo@aut.ac.ir

اولیه که از درجه‌ی هوازدگی کمتری برخوردارند در مقایسه با آپاتیت‌های ثانویه که دانه‌های آن با اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن پوشیده شده‌اند، بیشتر است [۱۱]. بنابراین انتظار می‌رود که کانسنگ‌های مختلف طی فرآیندهای پرعیارسازی و انحلال، رفتارهای متفاوتی را از خود نشان دهند [۱]. بنابراین شناسایی آپاتیت و کانی‌های همراه از نظر کانی‌شناسی نقش به سزایی در فرآیندهای جدایش آپاتیت مانند شناورسازی و استحصال فسفر خواهد داشت. برای شناسایی آپاتیت از روش‌هایی نظیر XRD، XRF، میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی (SEM)، ریزپردازنده، IR و غیره استفاده می‌شود [۲].

امروزه با توجه به مصارف فسفات به ویژه در کشاورزی، شناسایی ذخایر فسفات و استحصال آن در کشور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کانسار قره‌آغاج واقع در ۳۶ کیلومتری شمالغرب ارومیه از جمله ذخایری است که می‌تواند به‌عنوان یک پتانسیل مناسب برای تولید فسفات محسوب شود [۱۲، ۱۳]. هرچند این ذخیره به‌عنوان یک کانسار سنگی تیتانیم شناخته شده است ولی این کانسنگ می‌تواند به‌عنوان یک کانسار تیتانیم-فسفر مورد توجه قرار گیرد. از این نظر این کانسار را می‌توان با کانسارهایی مانند همبافت بوشولد، ست ایل کانادا و کاحجاروی فنلاند مقایسه کرد.

کانسار قره‌آغاج از نظر ساختاری در زون خوی-مهاباد قرار داشته و دارای ویژگی‌های لیتولوژیکی زون‌های ساختاری ایران مرکزی، سهندج-سیرجان و البرز-آذربایجان و در حقیقت محل تلاقی این سه زون است. در این منطقه، مهم‌ترین مجموعه‌ی سنگی که باعث کانی‌زایی تیتان شده، نفوذی‌های آذرین موسوم به مجموعه‌ی نفوذی مافیک - اولترامافیک قره‌آغاج است. این توده‌ی آذرین از سمت شمالغرب، رسوب‌های شیلی - ماسه‌سنگی سازند زاگون و باروت را قطع کرده و در اثر دگرگونی مجاورتی آن‌ها را به شیست و هور نفلس تبدیل کرده است و از سمت شمال به درون ماسه سنگ و کوارتزیت‌های درود و آهک - دولومیت‌های پرمین نفوذ کرده و باعث دگرگونی مجاورتی ماسه سنگ‌ها و تبلور دوباره‌ی آهک و دولومیت شده است. توده‌ی نفوذی قره‌آغاج از سمت جنوب، گنایس‌های پرکامبرین را قطع کرده و باعث دگرگونی آن‌ها شده است. شواهد زمین‌شناسی، سن جوان‌تر از پرمین و قدیم‌تر از میوسن را برای این توده مافیک - اولترامافیک تأیید کرده است [۱۲].

فسفات آذرین معدن کولا<sup>۱</sup> در روسیه است که سالانه ۹ میلیون تن کنسانتره آپاتیت با عیار ۳۹ درصد  $P_2O_5$  تولید می‌کند. در کشور برزیل نیز ۸۰ درصد ذخایر از نوع آذرین هستند که معادن آراکسا<sup>۲</sup>، تابیرا<sup>۳</sup>، کاتالائو<sup>۴</sup> و کاجاتی<sup>۵</sup> از بزرگ‌ترین آن‌ها محسوب می‌شود. اکثر این معادن شامل ۲۰ تا ۳۳ درصد آپاتیت، ۸ تا ۱۵ درصد منیتیت و مقداری کانی‌های تیتانیم هستند. از سایر کانی‌های همراه آن نیز می‌توان به کوارتز، میکا و کربنات‌ها اشاره کرد [۵، ۳]. در معدن کاجاتی که آپاتیت کانی اصلی دارای فسفر است، عیار حد ۳ درصد  $P_2O_5$  بوده و پس از فرآوری کنسانتره‌ای با ۳۵ درصد  $P_2O_5$  تولید می‌شود [۵]. در برخی ذخایر با خاستگاه آذرین کانی آپاتیت به‌عنوان کانی با ارزش، کانی‌های تیتانیم به‌ویژه ایلمنیت را همراهی می‌کند. کانسارهایی مانند همبافت بوشولد [۶]، ست ایل<sup>۶</sup> کانادا [۷] و [۸]، کاحجاروی<sup>۷</sup> [۹] و لومیکانگاس<sup>۸</sup> [۱۰] فنلاند از این نوع ذخایر محسوب می‌شوند.

با جایگزینی آنیون‌هایی نظیر  $F^-$ ،  $CO_3^{3-}$  و  $OH^-$  به جای فسفر در کانی آپاتیت، شکل‌های مختلفی از آن مانند فلوئورآپاتیت، هیدروکسی آپاتیت و کربنات هیدروکسی آپاتیت تشکیل می‌شوند. در برخی موارد نیز کلر جایگزین فلوئور شده و منجر به تشکیل کلر آپاتیت می‌شود. در کانسنگ‌های با خاستگاه رسوب‌های دریایی آپاتیت با کانی‌هایی نظیر کوارتز، میکا، رس‌ها، سنگ آهک و گاهی دولومیت همراه است در حالی که ناخالصی‌های آپاتیت در کانسنگ‌های آذرین متفاوت است [۲].

ترکیب‌های شیمیایی و کانی‌شناسی، ساخت و بافت کانسنگ‌های دارای آپاتیت، درجه هوازدگی و غیره از ذخیره‌ای به ذخیره دیگر متغیر است [۱۰، ۱۱]. برای مثال لنهارو<sup>۹</sup> (۱۹۹۴) در بررسی آپاتیت‌های با خاستگاه آذرین مشاهده کرد که قابلیت شناورسازی تحت تأثیر درجه‌ی هوازدگی، نوع آپاتیت (اولیه یا ثانویه)، حضور درونگیر و شدت آغشتگی به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن است. کارایی شناورسازی در آپاتیت‌های

- 1- Kola
- 2- Araxa
- 3- Tapira
- 4- Catalao
- 5- Kajati
- 6- Sept-Iles
- 7- Kauhajarvi
- 8- Lumikangas
- 9- Lenharo

جدول ۱ مهم‌ترین کانی‌های حاوی فسفر [۲،۴].

| ردیف | نام کانی               | فرمول شیمیایی                                      | مقدار $P_2O_5$ | محیط پیدایش                                                     |
|------|------------------------|----------------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------|
| ۱    | فلوئور آپاتیت          | $Ca_5(PO_4)_3F$                                    | ۴۲٫۳           | محیط‌های آذرین و دگرگونی                                        |
| ۲    | کلر آپاتیت             | $Ca_5(PO_4)_3Cl$                                   | ۴۰٫۹           | محیط‌های آذرین و دگرگونی                                        |
| ۳    | هیدروکسی آپاتیت        | $Ca_5(PO_4)_3(OH)$                                 | ۴۲٫۴           | محیط‌های آذرین و دگرگونی و در ذخایر با منشأ آلی                 |
| ۴    | کربنات هیدروکسی آپاتیت | $Ca_{10}(PO_4,CO_3)_6(OH)_2$                       | -              | جزایر، غارها و فضولات پرندگان                                   |
| ۵    | فرانکولیت              | $Ca_{10-x-y}Na_xMg_y(PO_4)_6-z(CO_3)_zF_{0.4}zF_2$ | -              | محیط‌های دریایی                                                 |
| ۶    | داهلیت                 | $3Ca_3(PO_4)_2 \cdot CaCO_3$                       | -              | رسوبات دریایی                                                   |
| ۷    | کلوفان                 | $3Ca_3(PO_4)_2 \cdot nCa(CO_3,F_2,O) \cdot xH_2O$  | -              | رسوبات دریایی                                                   |
| ۸    | مونازیت                | $(Ce,La,Nd,Th)PO_4$                                | ۲۹٫۵۵          | محیط‌های آذرین، سنگ‌های گرانیتی و پگماتیتی و نیز ماسه‌های ساحلی |

نمونه‌ی معرف به دست آید. سپس نمونه‌ی معرف به‌طور مرحله‌ای با استفاده از سنگ‌شکن استوانه‌ای تا زیر ۲ میلی‌متر خرد شد. نمونه‌ی زیر دو میلی‌متر با تقسیم‌های متوالی به نمونه‌های یک کیلوگرمی برای بررسی‌های خواص آن‌ها نظیر تجزیه سرندي و تعیین دانه‌بندی، تجزیه شیمیایی (XRF)، تجزیه فازي (XRD)، بررسی‌های میکروسکوپی و آزمایش‌های مختلف کانه‌آرایی تقسیم شد.

برای بررسی مقاطع و تعیین درجه‌ی آزادی از میکروسکوپ نوری و الکترونی استفاده شد. برای کنترل درجه‌ی آزادی و جدایش کانی‌ها از آبگون‌های سنگین شامل دی‌یدومتان (ساخت شرکت آلدريج<sup>۱۱</sup> و مرک<sup>۱۰</sup>)، کلریسی و بروموفرم (ساخت شرکت مرک) استفاده شد.

### نتایج

#### تجزیه شیمیایی و کانی‌شناسی

تجزیه شیمیایی نمونه معرف تهیه شده در جدول ۲ ارائه شده است. عیار متوسط  $P_2O_5$  در نمونه‌ی مورد بررسی با عیار حد معدن کاجاتی برزیل قابل مقایسه است. نتایج حاصل از XRD (شکل ۱) نشان داد که کانی‌های با ارزش موجود در کانسنگ شامل ایلمنیت، منیتیت و تیتانومنییت و آپاتیت است. کانی‌های گانگ موجود در کانسنگ شامل پیروکسن، اولیوین، پلاژیوکلاز، آمفیبول و برخی کانی‌های ثانویه مانند کلریت و آنتیگوریت حاصل از دگرسانی پیروکسن و اولیوین هستند.

در زمان نمونه‌برداری از کانسار، اکتشاف‌های انجام شده در منطقه به شرح زیر بود. پس از تهیه نقشه‌های مختلف زمین‌شناسی و توپوگرافی و تقسیم‌بندی کانسار به ۱۱ بلوک، ۱۱ ترانشه مجموعاً به طول ۱۵۹۰ متر روی تمام رخنمون‌های توده‌ی اولترامافیک حفر شد. در مرحله‌ی بعدی ۴ سینه کار اکتشافی در چهار تا از بلوک‌ها و دو گمانه مجموعاً با طول ۱۵۵ متر (گمانه ۱ با عمق ۸۲ متر و گمانه ۲ با عمق ۷۳ متر) در دو مورد از بلوک‌ها حفر شدند. محاسبات مربوط به ارزیابی ذخیره بیانگر وجود حدود ۲۰۹ میلیون تن کانسنگ تیتانیم با عیار متوسط ۸٫۵ درصد  $TiO_2$  و ۱۰۲ میلیون تن کانسنگ فسفات با عیار متوسط ۲٫۳ درصد  $P_2O_5$  در این کانسار است [۱۶-۱۲].

از آنجا که امروزه کانی‌شناسی کاربردی، ابزار مناسبی برای طراحی بهینه کارخانه فراوری و حتی عملیات معدنکاری محسوب می‌شود لذا در این پژوهش به بررسی‌های کانی‌شناسی آپاتیت کانسنگ قره‌آغاچ از دیدگاه فراوری پرداخته می‌شود.

#### مواد و روش‌ها

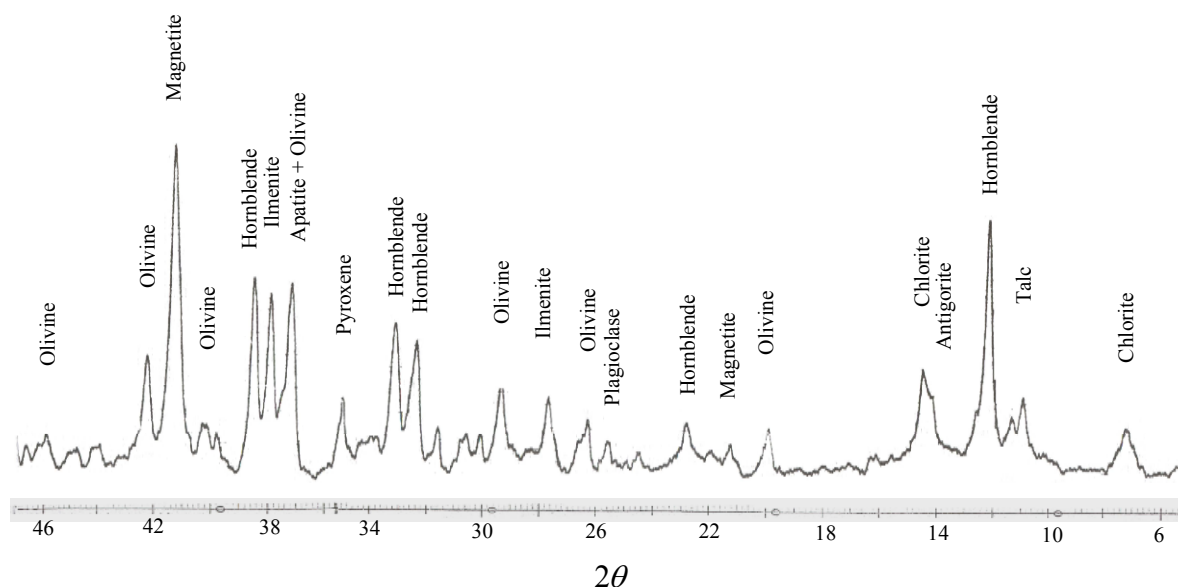
نمونه‌های مورد بررسی از سینه‌ی کارهای اکتشافی و گمانه‌های موجود تهیه شدند. در سینه کارها، نمونه‌گیری در راستای طول آن‌ها و به فواصل ۵ متر صورت گرفت ولی در مورد گمانه‌ها از مغزه‌های تهیه شده به ازای هر متر نمونه‌هایی برداشت شد. در مجموع ۶ نمونه به وزن کلی ۲٫۵ تن از چهار سینه‌ی کار و دو گمانه یادشده تهیه شد. نمونه‌ها پس از عبور از سنگ‌شکن‌های فکی و مخروطی به‌طور کامل با هم مخلوط و همگن شدند تا

10 -Aldrich

11 -Merck

جدول ۲ نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های معرف تهیه شده.

| ترکیب | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | MgO  | TiO <sub>2</sub> | CaO | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | MnO  | S    | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | L.O.I |
|-------|--------------------------------|------------------|------|------------------|-----|--------------------------------|-------------------------------|------|------|-------------------------------|-------|
| (%)   | ۳۲٫۳۵                          | ۲۸٫۱             | ۱۳٫۹ | ۸٫۱              | ۷٫۲ | ۴٫۳                            | ۳٫۶                           | ۰٫۲۲ | ۰٫۲۵ | ۰٫۰۸                          | ۰٫۶۳  |



شکل ۱ نتایج حاصل از تجزیه‌ی کانی‌شناسی نمونه با استفاده از XRD.

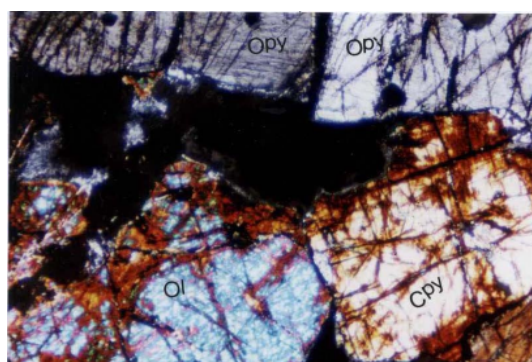
### بررسی‌های میکروسکوپ نوری

براساس بررسی مقاطع نازک، کانی‌های تشکیل دهنده‌ی کانسنگ به شرح جدول ۳ است. در شکل ۲-الف و ب درگیری کانی‌های مهم تشکیل دهنده‌ی کانسنگ در نمونه‌های سطحی که کانه‌سازی بیشتر به همراه کانی‌های پیروکسن و یا به عبارتی در سنگ پیروکسنیت صورت گرفته، به تصویر کشیده شد. مقدار پلاژیوکلاز در این بخش نسبتاً کم است. همچنین این تصاویر نشان می‌دهند که اولیوین و کلینوپیروکسن در راستای درز و شکستگی‌ها در حال دگرسانی و تبدیل شدن به اکسیدهای آهن، آمفیبول و کلریت هستند. شکل ۲-ب

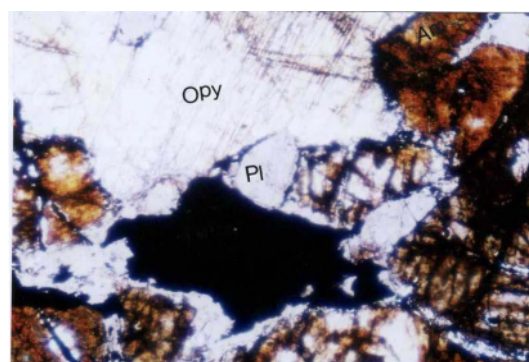
چگونگی درگیری کانی‌های تشکیل دهنده‌ی کانسنگ در بخش دیوریتی گمانه‌ها را نشان می‌دهد. قسمت مهم بخش دیوریتی را پلاژیوکلاز تشکیل داده و مقداری کوارتز نیز قابل مشاهده است. کانه‌سازی در این بخش بسیار کم و ریزدانه است. شکل ۲-ت کانی‌های تشکیل دهنده‌ی کانسنگ در بخش کانه‌سازی گمانه‌ها را نشان می‌دهد و حاکی از آن است که کانه‌سازی همانند نمونه‌های سطحی بیشتر به همراه کانی‌های پیروکسن صورت گرفته ولی ابعاد کانه‌سازی در مقایسه با آن‌ها کوچک‌تر است.

جدول ۳ کانی‌های تشکیل دهنده‌ی کانسنگ براساس نتایج حاصل از بررسی مقاطع نازک.

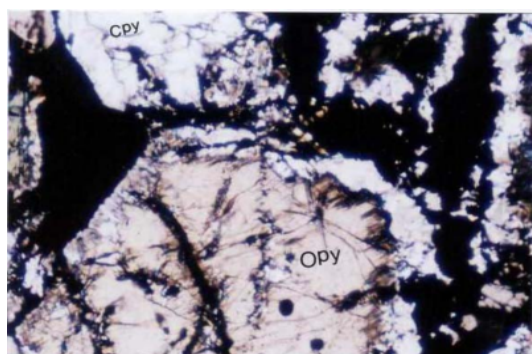
| کانی            | توصیف                                                                             |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| پیروکسن         | شامل کلینوپیروکسن و ارتوپیروکسن که کلینوپیروکسن‌ها عمدتاً در حال دگرسانی هستند    |
| اولیوین         | مقدار آن در بخش کانه‌سازی بیشتر از بخش‌های دیوریتی است                            |
| پلاژیوکلاز      | قسمت اعظم بخش کم عیار کانسنگ (بخش دیوریتی) را تشکیل می‌دهد                        |
| آمفیبول         | از نوع هورنبلند که در اثر دگرسانی و آبگیری کلینوپیروکسن حاصل شده است              |
| کانی‌های کدر    | شامل ایلمنیت و منیتیت، به عنوان کانه که فضای بین کانی‌های سیلیکاته را پر کرده‌اند |
| کانی‌های ثانویه | نظیر کلریت، آنتی گوریت و سرپانتین ناشی از دگرسانی کلینوپیروکسن و اولیوین          |
| سایر کانی‌ها    | شامل آپاتیت و مقدار بسیار کم کوارتز و فلدسپات                                     |



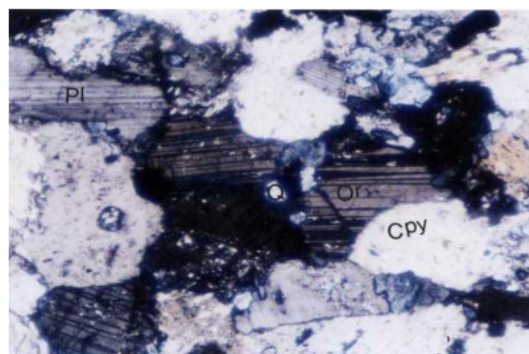
ب



الف



ت



پ

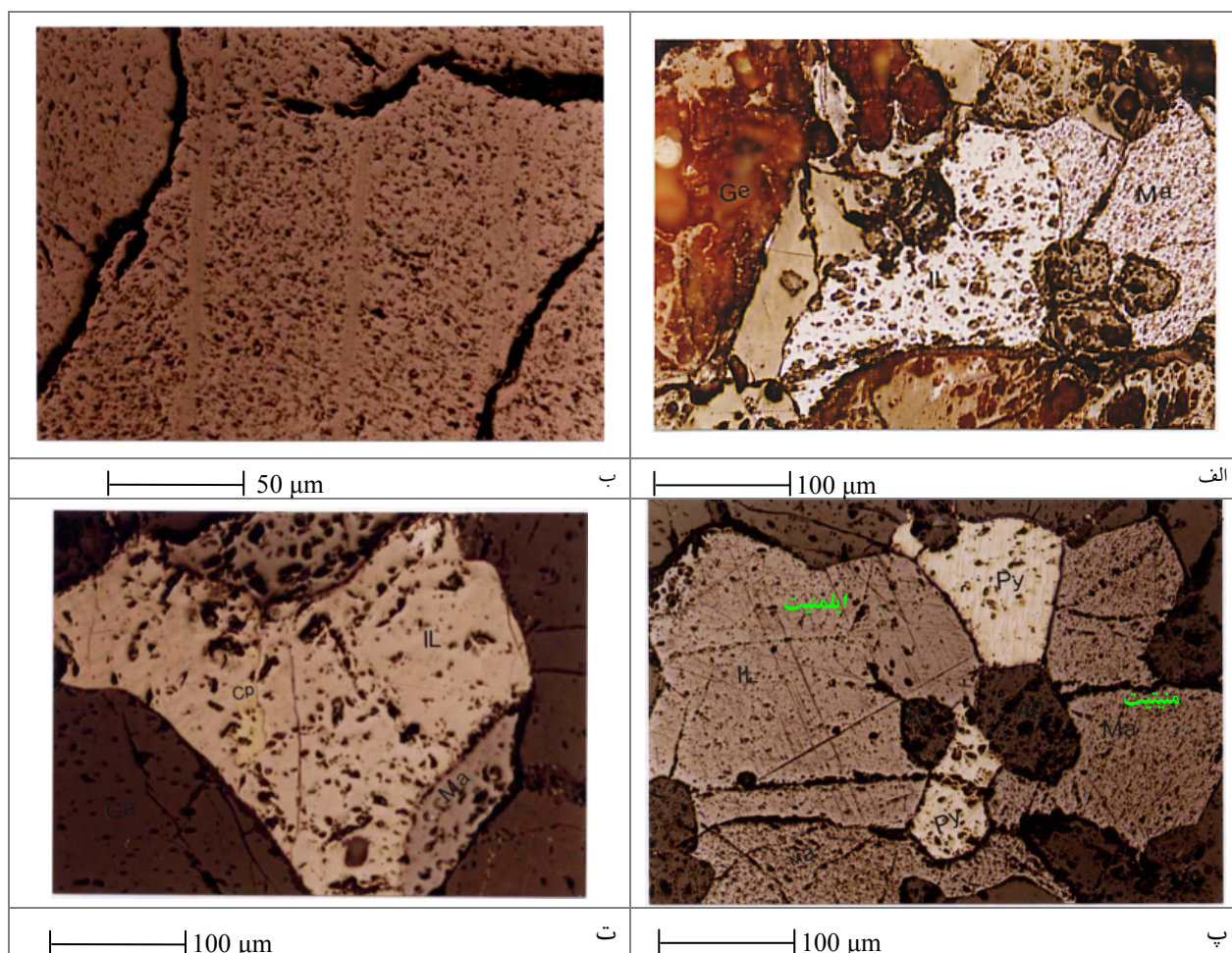
شکل ۲ الف و ب: درگیری کانی‌های شفاف و کدر در بخش کانه‌سازی نمونه سینه‌کارها و دیوریتی و نمونه گمانه‌ها (نور XPL)، پ- درگیری کانی‌های تشکیل دهنده کانسنگ در بخش دیوریتی که مقدار پلاژیوکلاز بیشتر است (تصویر در نور XPL)، ت- کانی‌های تشکیل دهنده کانسنگ در بخش کانه‌سازی گمانه‌ها (عمق ۲۹ متری گمانه ۲) (تصویر در نور XPL). (ارتوپروکسن: Opy، کلینوپروکسن: Cpy، اولیون: Ol، پلاژیوکلاز: Pl، آمفیبول: Am).

قرار گرفته‌اند. همچنین با افزایش عمق کانسار کانی‌های سولفیدی پیریت و کالکوپریت نیز بیشتر در درون کانی‌های اکسیدی نظیر ایلمنیت و منیتیت به صورت هم‌رشد با آن‌ها و یا به شکل میانبره‌هایی در درون آن‌ها ظاهر می‌شوند (شکل ۳-پ و ۳-ت).

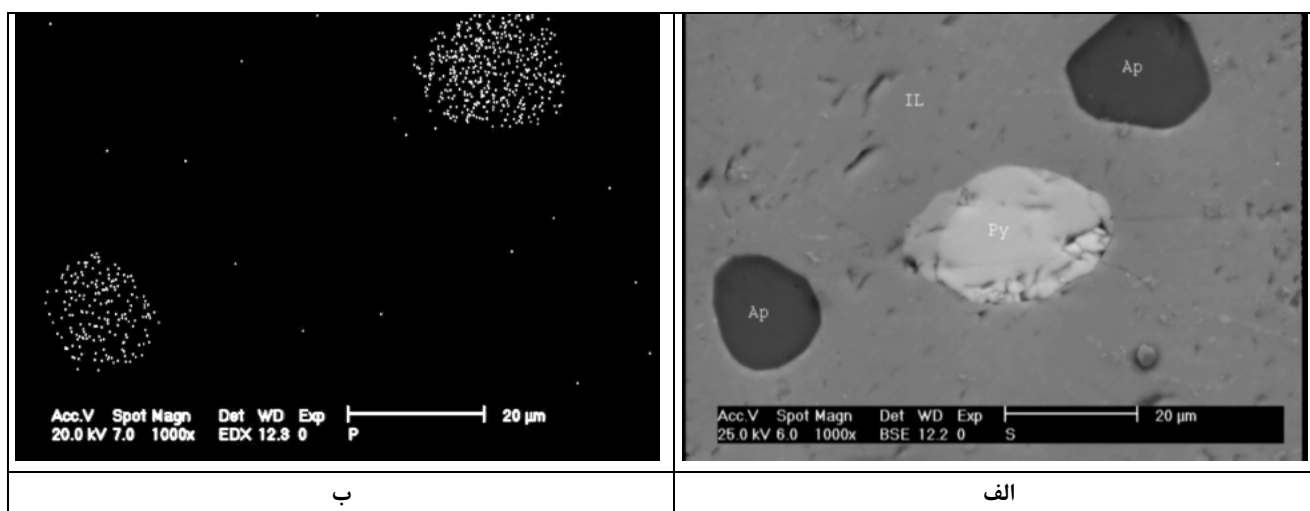
#### بررسی با میکروسکوپ الکترونی

در بررسی با میکروسکوپ الکترونی معلوم شد که کانی آپاتیت حتی در ابعاد خیلی ریز (زیر ۲۰ میکرون) و به صورت میانبار در درون ایلمنیت و منیتیت قرار گرفته است (شکل ۴ الف) که این مسئله با آنالیز EDX و تهیه‌ی X-Ray Mapping از عنصر فسفر به تائید رسیده است (شکل ۴ ب). این آپاتیت‌ها به روش‌های فیزیکی و حتی شیمی- فیزیکی قابل بازیابی نخواهند بود. همچنین نتایج تجزیه‌ی نقطه‌ای کانی آپاتیت با استفاده از EDX در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. حضور فلئوئور (F) در ترکیب شیمیایی نشانگر آن است که آپاتیت مورد بررسی از نوع فلئوئور آپاتیت است.

نتایج حاصل از بررسی مقاطع صیقلی نشان می‌دهد که کانی‌های کدر موجود در نمونه، ایلمنیت و منیتیت اند که به صورت جداگانه و درگیر، فضای بین کانی‌های سیلیکاتی پروکسن و اولیون را اشغال کرده‌اند. منیتیت بیشتر به دو صورت اسفنجی و متراکم بوده و تیغه‌هایی از ایلمنیت اغلب در درون بخش متراکم مشاهده می‌شود. آپاتیت‌های ریزدانه بیشتر در درون ایلمنیت و منیتیت و یا در تماس با آن‌ها و نیز کانی‌های گانگ تشکیل شده است (شکل ۳-الف). براساس بررسی‌های میکروسکوپی مقاطع تهیه شده از نمونه‌های سینه‌کارها و نیز عمق‌های مختلف گمانه‌ها، مشخص شد که در نمونه‌های سطحی مقدار کانی‌های سولفیدی ناچیز است و با افزایش عمق، مقدار آن‌ها افزایش می‌یابد. در حالی که مقدار آپاتیت در نمونه‌های سطحی و عمقی تفاوت چندانی نداشته و اغلب تابع تغییرات ایلمنیت است. ایلمنیت بیشتر به صورت دانه‌ای بوده و مقدار کمی از آن نیز به صورت تیغه‌ها و لامل‌هایی با ضخامت بسیار کم (شکل ۳-ب) در درون منیتیت



شکل ۳ الف - حضور کانی آپاتیت در درون کانی‌های کدر ایلمنیت و منیتیت و در تماس با آن‌ها (تصویر در نور PPL). ب- تیغه‌هایی از ایلمنیت در درون منیتیت (تصویر در نور PPL). پ- درگیری پیریت و آپاتیت با ایلمنیت و منیتیت در نمونه تهیه شده از عمق ۴۷ متری گمانه‌ی ۲ (نور XPL). ت- حضور کالکوپیریت در درون ایلمنیت در نمونه‌ی تهیه شده از عمق ۴۷ متری گمانه ۲ (نور XPL). IL: ایلمنیت، Ma: منیتیت، Ap: آپاتیت، Py: پیریت، Cp: کالکوپیریت، Ge: گوتیت).



شکل ۴ الف: حضور آپاتیت به شکل درونگیر در درون ایلمنیت ب: نقشه توزیع فسفر به عنوان معرف کانی آپاتیت.

جدول ۴ نتایج آنالیز آپاتیت با استفاده از EDX.

| نقطه | ترکیب (%) | TiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO  | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | CaO   | MgO  | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | F    | Total |
|------|-----------|------------------|--------------------------------|------|-------------------------------|-------------------------------|-------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------|
| ۱    | ۰/۳۹      | ۱/۲۶             | -                              | -    | ۰/۱۹                          | ۳۹/۸                          | ۵۴/۱  | -    | ۱/۴۸             | -                              | -                              | ۲/۷۱ | ۹۹/۹۳ |
| ۲    | ۰/۲۹      | ۰/۹۴             | ۰/۳۷                           | ۰/۳۲ | ۴۰/۳                          | ۵۳/۰۷                         | ۵۳/۰۷ | ۰/۹۶ | ۱/۰۳             | ۰/۵۴                           | -                              | ۲/۱۴ | ۹۹/۹۶ |

## تعیین درجه‌ی آزادی

به منظور تعیین درجه‌ی آزادی آپاتیت از بخش‌های ابعادی مختلف مقاطع صیقلی تهیه و با میکروسکوپ نوری بازتابی و میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. با شمارش دانه‌های آزاد و درگیر آپاتیت در بخش‌های مختلف، درصد درجه‌ی آزادی از طریق رابطه زیر [۱۷] محاسبه و منحنی آن به صورت شکل ۵ ترسیم شده است.

$$\%L.D = \frac{n_{La}}{n_{La} + n_{Ia}} \times 100$$

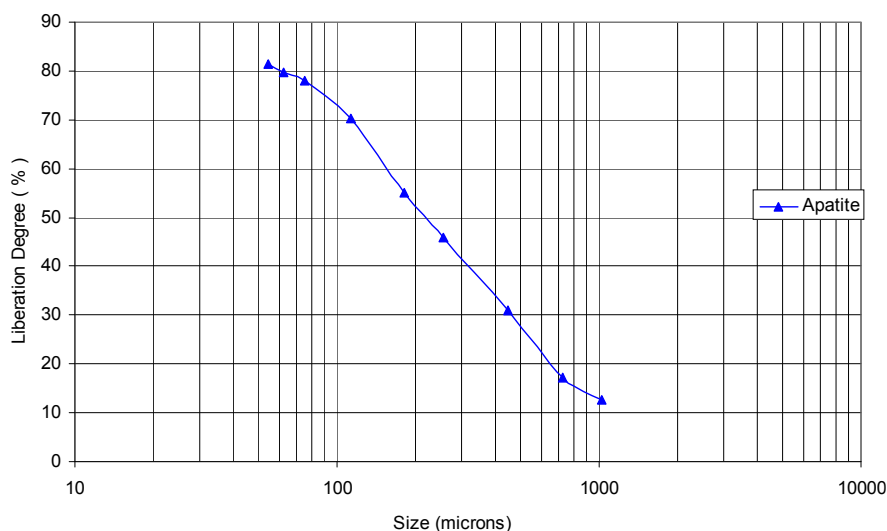
که در آن L.D درجه‌ی آزادی،  $n_{La}$  تعداد آپاتیت‌های آزاد و  $n_{Ia}$  تعداد آپاتیت‌های درگیر است.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ملاحظه می‌شود که حدود ۸۰ درصد کانی آپاتیت در ابعاد زیر ۶۰ میکرون آزاد می‌شوند. به عبارت دیگر درجه‌ی آزادی آپاتیت حدود ۶۰ میکرون است. همچنین برای کنترل درجه‌ی آزادی از روش غرق و شناورسازی در محلول دی‌یدو متان با چگالی ۳/۳ استفاده شد که نتایج در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. بیشترین عیار  $P_2O_5$  و بازیابی آن در گستره‌ی ابعادی زیر ۶۰ میکرون

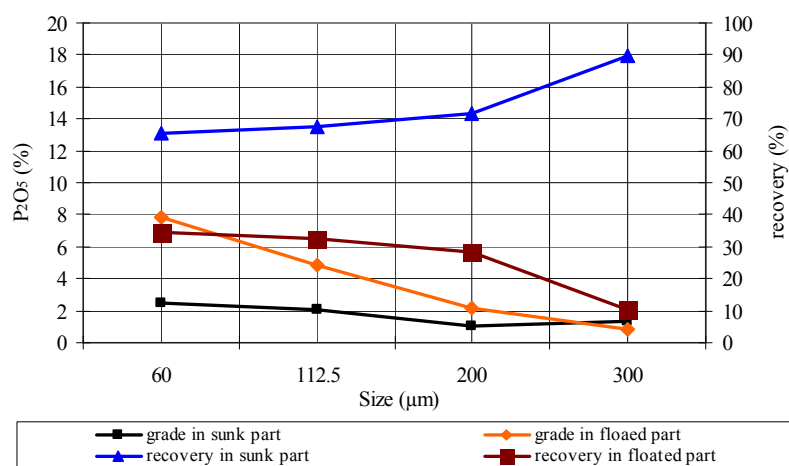
حاصل شد، و این تأییدی بر درجه آزادی تعیین شده است.

## جدایش با آبگون‌های سنگین

نمونه معرف پس از خردایش تا ابعاد ۱۵۰ میکرون (درجه‌ی آزادی ایلمنیت) با استفاده از آبگون‌های سنگین کلریسی (SG = ۴)، دی‌یدو متان (SG = ۳/۳) و بروموفرم (SG = ۲/۸) و نیز محلول‌های تهیه شده از دی‌یدو متان با چگالی‌های ۳/۱ و ۲/۹ مورد جدایش قرار گرفت. بخش غرق شده‌ی آبگون‌های با چگالی‌های مختلف و نیز بخش شناور بروموفرم، آنالیز شیمیایی شدند که نتایج در جدول ۵ ارائه شده است. لازم به یادآوری است که بخش غرق شده‌ی محلول با وزن مخصوص ۴ با جداکننده‌ی مغناطیسی جدا شده است. همچنین مقدار آپاتیت براساس نتایج تجزیه شیمیایی و کانی‌شناسی بخش‌های مختلف آزمایش‌های آبگون‌های سنگین محاسبه که تغییرات آن در شکل ۷ نمایش داده شده است. دیده می‌شود که بیشترین مقدار کانی آپاتیت (حدود ۲۳٪) بیشتر در بخش ۳/۱+۲/۹- انباشته شده است و به عبارت دیگر چگالی آپاتیت مورد بررسی در حدود ۳ است.



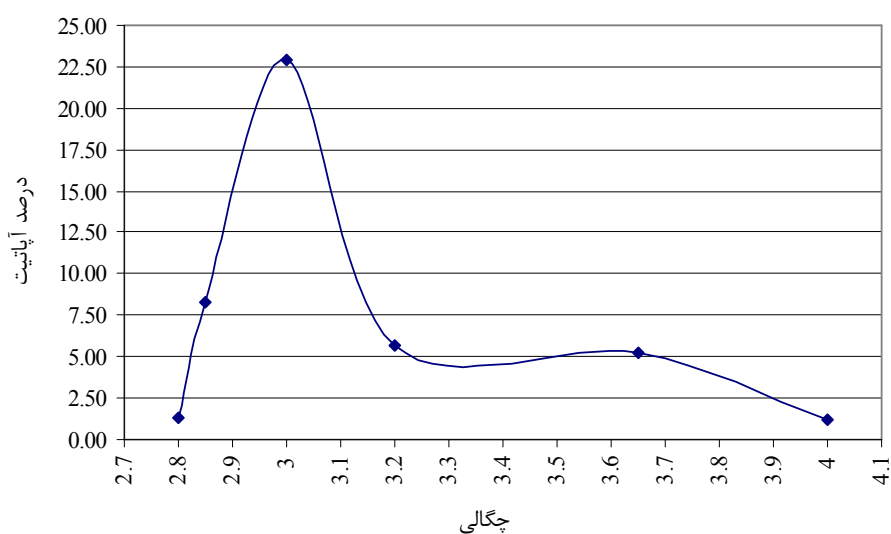
شکل ۵ منحنی درصد آزادی بر حسب ابعاد.



شکل ۶ نتایج کنترل درجه آزادی با استفاده از دی‌یدو متان.

جدول ۵ نتایج آنالیز شیمیایی بخش‌های مختلف حاصل از جدایش با آبگون‌های سنگین.

| بخش<br>ترکیب (%)               | +۴     |         | -۴+۳٫۳ | -۳٫۳+۳٫۱ | -۳٫۱+۲٫۹ | -۲٫۹+۲٫۸ | -۲٫۸  |
|--------------------------------|--------|---------|--------|----------|----------|----------|-------|
|                                | منیتیت | ایلمنیت |        |          |          |          |       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۶۲٫۸   | ۴۶٫۷    | ۳۷٫۱   | ۳۳٫۰     | ۲۰٫۳     | ۱۹٫۳     | ۱۸٫۴  |
| SiO <sub>2</sub>               | ۴٫۶    | ۲٫۰     | ۳۱٫۷   | ۳۳٫۰     | ۲۸٫۶     | ۳۷٫۰     | ۴۰٫۹  |
| MgO                            | ۵٫۶    | ۳٫۸۷    | ۱۸٫۵   | ۱۷٫۱     | ۱۳٫۰     | ۱۷٫۶     | ۱۸٫۰  |
| TiO <sub>2</sub>               | ۲۰٫۴   | ۴۳٫۵    | ۱٫۹۴   | ۲٫۸۵     | ۱٫۵۷     | ۱٫۱۸     | ۰٫۵۱  |
| CaO                            | ۰٫۸۶   | ۰٫۶۹    | ۴٫۸    | ۷٫۳      | ۱۷٫۷     | ۹٫۸      | ۳٫۶۸  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۲٫۷۷   | ۰٫۷     | ۱٫۷۵   | ۲٫۶۲     | ۳٫۶۵     | ۶٫۰      | ۷٫۹   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | ۰٫۶۲   | ۰٫۴     | ۲٫۲۲   | ۲٫۴۱     | ۹٫۷      | ۳٫۵۲     | ۰٫۵۵  |
| MnO                            | ۰٫۳۸   | ۰٫۸۳    | ۰٫۵۳   | ۰٫۴۳     | ۰٫۲۲     | ۰٫۱۷     | ۰٫۱۴  |
| Na <sub>2</sub> O              | ۰٫۰۳۷  | ۰٫۰۴۶   | ۰٫۱۹   | ۰٫۳۲     | ۰٫۴۶     | ۰٫۵۰     | ۰٫۹۵  |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | ۰٫۶۹   | ۰٫۲۶    | ۰٫۰۳   | ۰٫۰۶۵    | ۰٫۰۵۴    | ۰٫۰۵۹    | ۰٫۰۳۲ |



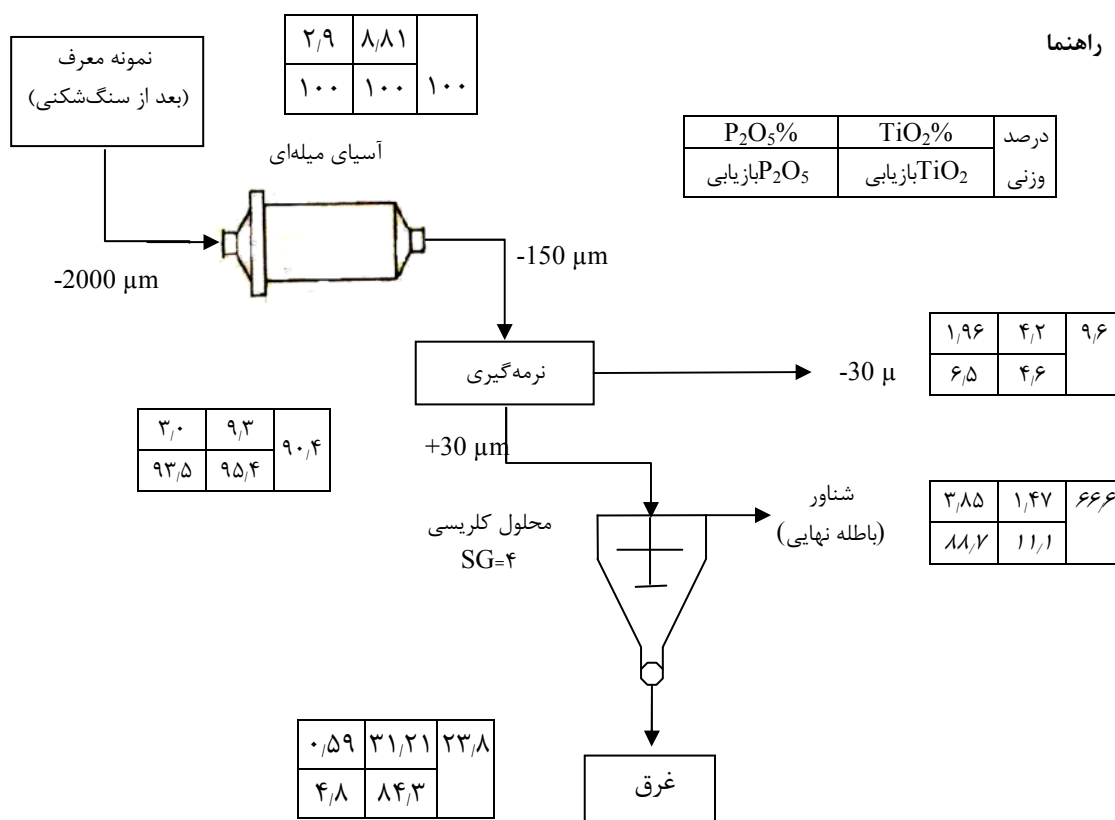
شکل ۷ تغییرات مقدار آپاتیت نسبت به چگالی جدایش در آزمایش‌های آبگون‌های سنگین.

TiO<sub>2</sub> به‌عنوان محصول اصلی به دست می‌آید، باطله‌های میز لرزان خوراک مناسبی برای تهیه‌ی کنسانتره آپاتیت یا استحصال فسفر است. این باطله‌ها دارای ۳/۷۱ درصد P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> بوده و حدود ۵۶ درصد آپاتیت موجود در نمونه‌ی متوسط را شامل می‌شود. بنابراین این بخش از نظر عیار با خوراک برخی از معادن فعال دنیا قابل مقایسه است. برتری دیگر این باطله‌ها برای تهیه‌ی کنسانتره آپاتیت آن است که نیاز چندانی به عملیات سنگ‌شکنی و آسیاکنی که بیش از ۷۰ درصد هزینه‌های عملیات فرآوری را در برمی‌گیرند، ندارند. بنابراین این باطله‌ها را می‌توان با یک عملیات آسیاکنی مختصر به روش شناورسازی مورد آرایش قرار داد.

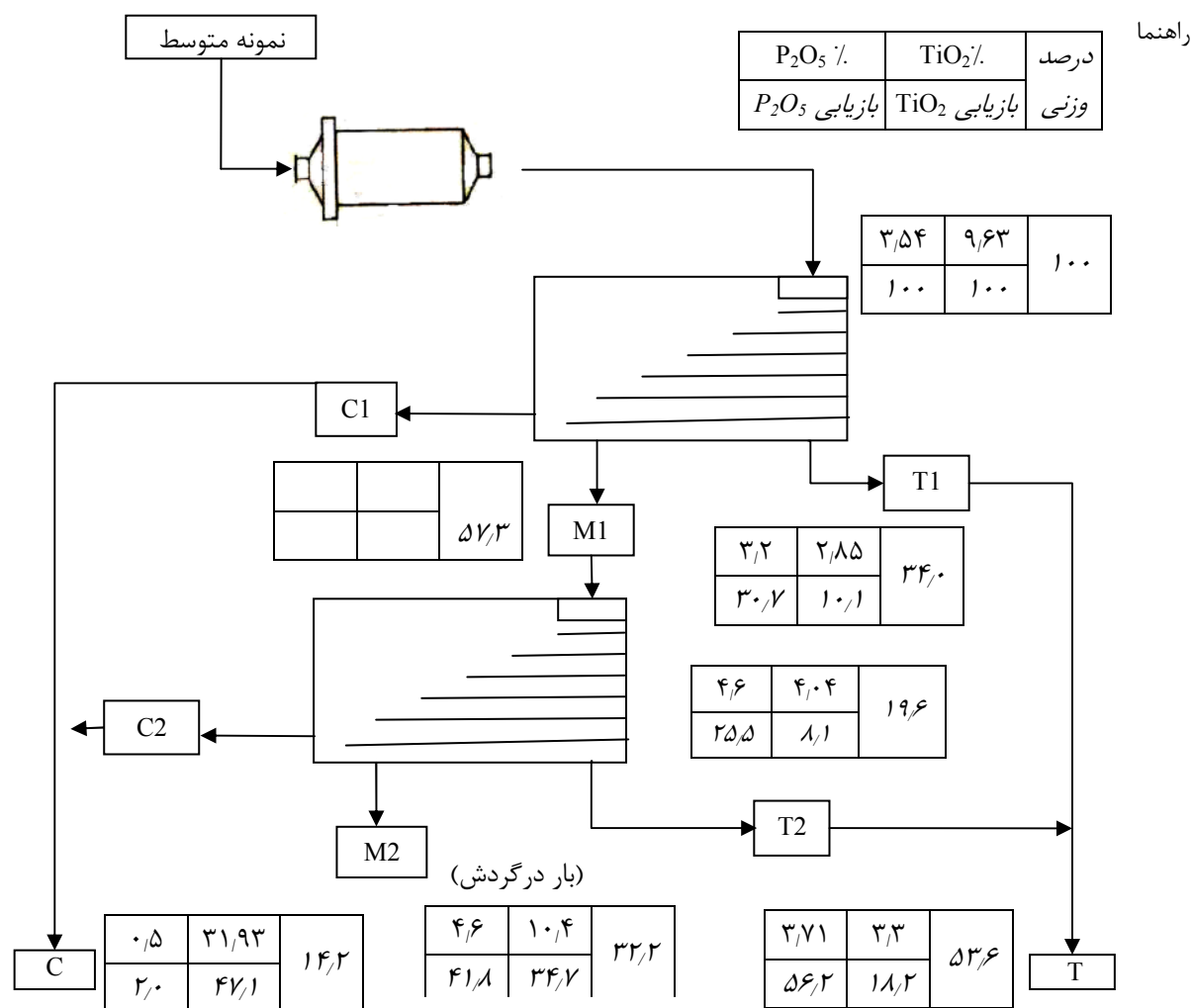
همچنین نتایج حاصل از جدایش نمونه با آبگون سنگین کلریسی (SG = ۴) در شکل ۸ آورده شده‌اند. نتایج بیانگر آن است که بخش مهم آپاتیت (حدود ۸۹ درصد P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) به بخش شناور منتقل شده است. به عبارت دیگر در جدایش کانسنگ مورد بررسی با استفاده از روش‌های ثقلی برای تهیه‌ی کنسانتره ایلمنیت، آپاتیت در بخش باطله انباشته خواهد شد.

#### جدایش با میز لرزان

براساس نتایج جدایش با آبگون‌های سنگین، نمونه معرف پس از خردایش تا ابعاد ۱۵۰ میکرون (درجه‌ی آزادی ایلمنیت) با ترکیب میز لرزان و جداکننده‌ی مغناطیسی آرایش یافت که نتایج در شکل ۹ ارائه شده‌اند. چنانکه ملاحظه می‌شود با این ترکیب، علاوه بر اینکه یک کنسانتره ایلمنیت با عیار ۴۵ درصد



شکل ۸ جدایش نمونه با آبگون سنگین کلریسی (SG = ۴) و توزیع P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> یا آپاتیت در بخش‌های مختلف.



شکل ۹ نتایج جدایش نمونه‌ی متوسط با میز لرزان و توزیع P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> یا آپاتیت در بخش‌های مختلف.

#### برداشت

- بررسی‌های میکروسکوپی حاکی از آن است که بافت کانی‌سازی کومولیتی یا ارتوکومولایی بوده و فازهای اکسیدی همراه با آپاتیت فضای بین سیلیکات‌ها را اشغال کرده‌اند. بر این اساس می‌توان گفت که در فرایند تبلور، کانی‌های سیلیکاتی نظیر کلینوپیروکسن، ارتوپیروکسن و اولیوین در مراحل نخست تبلور شده، در حالی که فاز مذاب حاوی عناصر فسفر، آهن، تیتانیم و عناصر کمیاب به‌صورت آگون بین بلوری حضور داشته و در مرحله‌ی نهایی تبلور ماگمایی در میان این سیلیکات‌ها تبلور شده است.
- تجزیه‌ی نقطه‌ای کانی آپاتیت نشانگر آن است که آپاتیت موجود در کانسنگ قره‌آغاز از نوع فلوئور-آپاتیت است.

- کانسنگ مورد بررسی از نظر کانی‌شناسی از دو بخش کانی‌های سیلیکاتی و کانی‌های اکسیدی همراه با آپاتیت تشکیل شده است.
- کانی‌های بالارزش موجود در کانسنگ شامل ایلمنیت (حدود ۱۷ درصد)، منیتیت (حدود ۱۶ درصد) و آپاتیت (حدود ۸-۹ درصد) است و کانی‌های گانگ شامل کلینوپیروکسن، ارتوپیروکسن، اولیوین و مقداری پلاژیوکلاز و نیز کانی‌های ثانویه حاصل از دگرسانی اولیوین و کلینوپیروکسن شامل هورنبلند، کلریت، تالک و آنتی‌گوریت است.

- Engineering, Vol. 14, No. 12, (2001) pp. 1649-1657.
- [6] VonGruenewalt G., "Ilmenite-apatite enrichment in the Upper Zone of Bushveld Complex: a major titanium rock phosphate resource", International Geological Review, Vol. 35, (1993) pp. 987-1000.
- [7] Tollari N., Barnes S.-J., Cox R. A., Nabil H., "Trace element concentrations in apatite's from the Sept-Îles Intrusive Suite, Canada — Implications for the genesis of nelsonites", Chemical Geology, Vol. 252, (2008) pp.180-190.
- [8] Nabil H., Barnes S., Higgins M., "Genesis of phosphorous and titanium deposits in Sept-Iles mafic intrusion", Mining industry conference and exhibition, Abstract, Montreal, May 4-7, (2003).
- [9] Kärkkäinen K., Appelqvist H., "Genesis of a low-grade apatite-ilmenite-magnetite deposit in the Kauhajärvi gabbro, western Finland", Mineralium Deposita, Vol. 34, (1999) pp.754-769.
- [10] Olli Sarapää, Niilo Kärkkäinen, Tegist Chernet, Jaana Lohva, Timo Ahtola, "Exploration results and mineralogical studies on the Lumikangas apatite-ilmenite gabbro, Kauhajoki, Western Finland", Geological Survey of Finland, Special Paper, (2005) pp.31-38.
- [11] Luiz A. F. Barros, Eliomar E. Ferreira, Antonio E. C. Peres, "Floatability of apatites and gangue minerals of an igneous phosphate ore", Minerals Engineering, Vol. 21, (2008) pp. 994-999.
- [۱۲] شرکت مهندسين مشاور کاوشگران؛ "گزارش طرح اکتشاف نیمه تفصیلی تیتان و فسفات در منطقه قره آغاج / ارومیه"، (۱۳۷۵).
- [۱۳] مهدیلو اکبر، "مطالعات کانه آرایي کانسنگ تیتانیم قره آغاج به روشهای فیزیکی، پایان نامه کارشناسی ارشد؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) (۱۳۸۲).
- [14] Mehdilo A., Irannajad M., "Applied Mineralogical Studies on Iranian Hard Rock Titanium Deposit", Journal of Minerals & • آپاتیت موجود در کانسنگ مورد بررسی از نظر بافت بر دو نوع است: نوع اول آپاتیت‌های درگیر با ایلمنیت، منیتیت و کانی‌های گانگ و نوع دوم آپاتیت‌هایی به صورت میانبار در درون ایلمنیت و منیتیت.
- درجه‌ی آزادی آپاتیت‌های نوع اول حدود ۶۰ میکرون بوده و به روش فلوتاسیون قابل بازیابی هستند در حالی که ابعاد آپاتیت‌های نوع دوم کوچک‌تر از ۲۰ میکرون بوده و به روش فیزیکی و شیمی-فیزیکی قابل بازیابی نیستند.
- در فرآیند پرعیارسازی کانسنگ قره‌آغاج به روش‌های ثقلی برای تولید کنسانتره ایلمنیت، آپاتیت به بخش باطله منتقل خواهد شد و در نتیجه کنسانتره آپاتیت می‌تواند به عنوان فراورده‌ی جانبی تولید شود.
- از آنجا که بخش مهم عملیات خردایش و آسیاکنی روی کانسنگ طی فرآیند پرعیارسازی ایلمنیت صورت می‌گیرد لذا عملیات تولید کنسانتره آپاتیت از باطله‌ها از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه خواهد بود.
- مراجع**
- [1] Ricardo C. Santana, Ana C.C. Farnese, Marília C.B. Fortes, Carlos H. Ataíde, Marcos A.S. Barrozo, "Influence of particle size and reagent dosage on the performance of apatite flotation", Separation and Purification Technology Vol. 64, (2008) pp. 8-15.
- [2] Abdel-Zaher M. Abouzeid, "Physical and thermal treatment of phosphate ores — an overview", International Journal of Mineral Processing, Vol. 85, (2008) pp. 59-84.
- [3] Guimaraes R.C., Araujo A.C., Peres A.E.C., 2005, "Reagents in igneous phosphate ores flotation", Minerals Engineering, Vol. 18, pp. 199-204.
- [4] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., "An Introduction to The Rock-Forming Minerals", Longman Scientific & Technical Pub (1991).
- [5] Sant Agostino L. M., Alves P. R., Shimabukuro N., Bonas T.B., "Applied mineralogy as a tool for mine planning of phosphate rock", Minerals

[16] Irannajad M., Mehdilo A., "*Concentration of Iranian Titanium Ore by Physical Methods*", 2nd International Gravity Concentration Symposium (Gravity 04), Perth, Australia (2004).

[۱۷] نعمت اللهی حسین، "کانه آرای"، جلد اول (چاپ دوم)؛ انتشارات دانشگاه تهران (۱۳۷۵).

Materials Characterization & Engineering, Vol. 9, No.3, (2010) pp.247-262.

[15] Irannajad M., Mehdilo A., "*Laboratory-Based Flowsheet Development of Iranian Ilmenite Upgrading*", XXIII International Mineral Processing Congress, 3 September 2006 Istanbul, Turkey (IMCET) (2007).