مطالعه و بررسی خواص سنجی فسفات منطقه دلیر از دیدگاه فرآوری

صابر خوش جوان [۱*]، بهرام رضایی[۱] و احمد امینی[۲]

[۱] دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، تهران، ایران
[۲] سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱۲/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۸/۰۵

چکیده

در این پژوهش بررسی‌های خواص سنجی از دیدگاه فرآوری بر روی نمونه‌های فسفات رسوبی منطقه دلیر بررسی شد. بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی کانی فسفاتی موجود در کانسنگ از نوع کانی‌های رسوبی و کلوفان (۲۸/۱۳٪) است و کلسیت (۴۳/۵۳٪)، کوارتز (۲۴/۴۹٪) و دولومیت (۴/۶۵٪) عمده کانی‌های باطله هستند. عمده‌ترین ترکیبات کانسنگ P_2O_5 (۱۱/۹٪)، CaO (۳۶/۳۶٪)، SiO_2 (۲۴/۴۹٪) و MgO (۱/۰۱٪) هستند. پلت‌های آپاتیت دارای میان‌بارهای (انکلوزیون) با ابعاد حدود ۷۰- ۱۵ میکرون کوارتز و کلسیت بوده و میزان این میان‌بارها نیز قابل توجه است. بافت کانی‌شناسی نیز بسیار پیچیده است. درجه آزادی بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی و غرق و شناورسازی حدود ۱۴۰ میکرون به دست آمد. حدود ۸/۲٪ از کل فسفات در بخش نرمه‌گیری خردایش اتلاف شد. مدت زمان بهینه برای رسیدن به درجه آزادی تقریباً زمان ۱۰ دقیقه و ۳۰ ثانیه حاصل شد. میزان مواد آلی (ارگانیکی) که بر اساس روش حرارتی به دست آمد، حدود (۱/۶۶٪) است بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی نیز وجود میان‌بارها و مواد آلی را نشان داد. اختلاف وزن مخصوص کانی فسفاتی با باطله‌ها پایین است. با توجه به مسائل بیان شده، پیش‌بینی می‌شود که تنها به روش فلوتاسیون بتوان کانی فسفاتی را از کانی‌های کربناتی و سیلیکاتی جدا نمود.

کلیدواژه‌ها: فسفات، درجه‌آزادی، میکروسکوپ، فلوتاسیون، غرق و شناورسازی و زمان خردایش

***نویسنده مسئول:** صابر خوش‌جوان
E-mail: Saber.khoshjavan@gmail.com

۱- مقدمه

دهکده دلیر در ۶۶ کیلومتری جنوب چالوس با ارتفاع ۲۰۹۰ متر از سطح دریا واقع شده است. سنگ‌های کانسار فسفات دلیر متعلق به دوره‌های پره‌کامبرین و پالئوزوییک است. این کانسار در سازند سلطانیه قرار گرفته و این سازند به طورعمده از سه بخش تشکیل شده‌اند: دولومیت پایین - شیل پایین (شیل چپقلو) ؛ دولومیت میانی - شیل بالایی (شیل سلطانیه) ؛ دولومیت بالایی. به طور عمده کانی‌سازی در شیل بالایی کانی‌سازی رخ داده هست. میزان ذخیره کانسنگ ۲۳ میلیون تن با عیار متوسط ۱۱/۹٪ P_2O_5 است (نمدمالیان و ملک زاده، ۱۳۶۳).

فسفر عنصر ضروری برای انسان‌ها و دام است، این عنصر در سنگ‌های فسفاتی یافت می‌شود و با افزایش جمعیت جهان میزان نیاز بر این عنصر نیز افزایش پیدا می‌کند. کم و بیش ۹۰٪ از فسفات‌های تولیدی در صنایع کود شیمیایی مصرف شده و ۱۰٪ باقی‌مانده در صنایع دیگر مصرف می‌شود (Hikmet, 2002).

همچنین فسفات‌ها در بسیاری از صنایع مانند کشاورزی، شوینده، نظامی و غیره به صورت عمده به کار گرفته می‌شود. رایج‌ترین کانی در سنگ فسفات آپاتیت است فرمول شیمیایی آپاتیت به صورت فرم کلی $Ca_{10}(PO_4)_6(F^{-1},OH^{-1}orCO_3^{-2})$ بوده و به انواع هیدروکسی، کربوکسی و فلوئور و آپاتیت تقسیم‌بندی می‌شود. در حالت کلی، فسفات‌ها به دو گروه رسوبی و آذرین تقسیم می‌شوند و به طور عمده فسفات‌های رسوبی عیار پایین و از نظر فرآوری مشکل‌دار هستند. ۸۰-۷۵٪ از کل ذخایر فسفات‌های جهان عیار پایین هستند (Abouzeid, 2008).

در سال ۲۰۰۷ تولید جهانی سنگ فسفات قابل فروش با ۲۰٪ افزایش نسبت به سال ۲۰۰۶، ۵۳۷۶۰ هزار تن P_2O_5 بود (Mobbs et al., 2007). ایالات متحده آمریکا، روسیه، چین، مراکش و تانزانیا و برزیل بیش از ۸۰٪ از کل فسفات دنیا را تولید می‌کنند. ایالات متحده و روسیه بیشترین مصرف کننده داخلی هستند اما مراکش، چین و تانزانیا بزرگ‌ترین صادرکنندگان هستند. منطقه خاورمیانه در سال ۲۰۰۷ حدود ۹٪ از کل فسفات تولیدی دنیا را تولید کردند که عمده‌ترین کشورهای تولید کننده در این منطقه سوریه، اردن و عربستان سعودی هستند (Mobbs et al., 2007). مجموع ذخایر کانسارهای فسفات شناخته شده در ایران ۶۲۳ میلیون تن بوده که در حال حاضر تنها از ۲/۵٪ آن بهره‌برداری می‌شود و بیش از ۹۰٪ از فسفات‌های ایران از نوع رسوبی هستند (امینی و همکاران، ۱۳۸۶).

تولید فسفات ایران طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۷ از صفر تن، در سال ۱۹۹۵ تا ۲۰ هزار تن در سال بوده و پیش‌بینی می‌شود که در سال ۲۰۰۹ به میزان ۳۰ هزار تن افزایش پیدا کند (Mobbs et al., 2007). در سال ۲۰۰۷ قیمت سنگ فسفات به طور محسوسی از ۳۰/۴۷ به ۳۹/۵۹ دلار بر تن افزایش یافته است(Emigh, 2007). بررسی‌های خواص سنجی بر روی نمونه‌های فسفات‌های منطقه دلیر به منظور دستیابی به روش مناسب فرآوری در ادامه این مقاله آورده شده است.

۲- آماده‌سازی نمونه

در این پژوهش حدود ۳۰۰ کیلوگرم نمونه از فسفات‌های منطقه دلیر توسط کارشناسان زمین‌شناسی برداشت شد. با سنگ‌شکنی فکی نمونه را تا به D_{80} = ۹۴۵۰(μm) خرد نموده، سپس با استفاده از سنگ شکن استوانه‌ای ۱۰۰٪ مواد تا ابعاد زیر ۲ میلی‌متری خرد شد و D_{80} =۱۴۵۸ (μm) به دست آمد. در نهایت نمونه خرد شده با استفاده ریفل آزمایشگاهی به بخش‌های کوچک‌تر تقسیم شد.

۳- آزمایش‌ها

۳-۱. تجزیه شیمیایی نمونه

نمونه معرف به دست آمده از مرحله سنگ‌شکنی پس از طی مراحل آماده‌سازی، تجزیه شیمیایی شد و نتیجه آن در جدول ۱ درج شده است. با توجه به جدول، کانسنگ از نوع فسفات‌های کربناتی و سیلیکاتی است.

۳-۲. تجزیه XRD

نمونه به دست آمده از سنگ‌شکنی پس از آماده‌سازی با XRD مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه به دست آمده، در جدول ۲ درج شده است. با توجه به جدول عمده کانی‌های تشکیل دهنده کانسنگ کوارتز، کلسیت، آپاتیت و دولومیت است. سنگ فسفات دلیر از نوع فسفات کربناتی و سیلیکاتی است.

۳-۳. بررسی‌های دانه‌بندی

نتایج تجزیه سرندی مرحله سنگ‌شکنی استوانه‌ای در جدول ۳ و نمودار مرتبط با این جدول در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳-۴. پراکندگی عناصر در فراکسیون‌های مختلف

برای بررسی پراکندگی دانه‌بندی و تغییرات عیار در فراکسیون‌های مختلف، نمونه کانسنگ توسط سنگ‌شکن فکی خرد شد و سپس با سنگ‌شکن استوانه‌ای تا ابعاد صددرصد زیر ۲ میلی‌متر خرد شد (توسط سرند کنترل ۱۰ مش) و مورد تجزیه سرندی‌تر قرار گرفت. از فراکسیون‌های مختلف ابعادی تجزیه شیمیایی تهیه شد که نتایج در شکل‌های ۲ و ۳ درج شده است. در شکل ۲ تغییرات عیاری، ترکیبات مختلف در فراکسیون‌های مختلف نشان داده شده است. در شکل ۳ پراکندگی دانه‌بندی و پراکندگی عیاری P_2O_5 در فراکسیون‌های مختلف نشان داده شده است.

از شکل‌های یادشده نتایج زیر به دست می‌آید:

۱- اگر نمونه فسفات دلیر با سنگ‌شکن‌های فکی (مدار باز) و استوانه‌ای (مدار بسته با سرند کنترل) خرد شده به نحوی که ۱۰۰٪ نمونه از سرند کنترل ۱۰ مش عبور کند، d_{80} محصول خردایش (۱۴۵۸ µm) خواهد بود.

۲- با توجه به این که عیار فسفات در فراکسیون‌های مختلف پایین‌تر از حد مورد نیاز بوده، و عیار در فراکسیون‌ها آنقدر پایین نیست که به عنوان باطله در نظر گرفته شود، به همین خاطر هیچ یک از فراکسیون‌ها را نمی‌توان به تنهایی باطله یا کنسانتره نهایی به‌شمار آورد.

۳- بیشترین عیار P_2O_5 در محدوده ابعادی ۱۲۵ تا ۲۰۰ میکرون قرار دارد و کمترین عیار مربوط به محدوده ابعادی زیر ۵۰ میکرون است.

۴- پراکندگی P_2O_5 در محدوده ابعادی ۱۰۰۰ تا ۱۶۰۰ میکرون بیشترین مقدار (۳۶/۲٪) است. در فراکسیون بالا و پایین این فراکسیون میزان پراکندگی کاهش پیدا کرده و در فراکسیون ۵۰۰ تا ۸۰۰ میکرون میزان پراکندگی فسفات دوباره به ۱۶/۲٪ افزایش پیدا کرده و در دیگر فراکسیون‌ها با کاهش ابعاد کاهش می‌یابد.

۵- ۴/۵۳٪ درصد P_2O_5 در فراکسیون زیر ۵۰ میکرون و ۹۵/۴۷٪ در بالای ۵۰ میکرون پراکنده شده است.

۶- تغییرات عیار ترکیبات Fe_2O_3، SiO_2، CaO و P_2O_5 در فراکسیون‌های مختلف به طور کامل متفاوت بوده و در حالت کلی نسبت به یکدیگر، کم و بیش هیچ گونه وابستگی نداشته‌اند. در برخی فراکسیون‌ها با یکدیگر نسبت مستقیم داشته و در برخی فراکسیون‌های دیگر با یکدیگر رابطه عکس دارند. در حالت کلی عیار اکسیدآهن در تمام فراکسیون‌ها به نسبت ثابت است.

۳-۵. بررسی‌های میکروسکوپی

برای انجام بررسی‌های کانی‌شناسی تعدادی مقاطع نازک از نمونه‌های اولیه تهیه و مورد بررسی قرار گرفت. در همه مقاطع کانی‌های کوارتز، کلسیت، دولومیت و کلوفان دیده شد. کانی فسفاتی از نوع آپاتیت نهان بلورین (کلوفان) است. پلت‌های فسفاتی در برخی نمونه‌ها به صورت بافت‌های تیغه‌ای، موزاییکی و بیضوی دیده شد. پلت‌های آپاتیت دارای مقادیر زیادی میان‌بارهای کوارتز و کربنات (به طور عمده کلسیت و گاه دولومیت) بود.

بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی نتایج زیر حاصل شد:

۱- پلت‌های فسفاتی دیده شده نهان تا ریزبلور یا به اصطلاح از نوع کلوفان است.

۲- ترکیب کانی‌شناسی کانسنگ بسیار پیچیده است.

۳- عمده کانی‌های باطله کوارتز، کلسیت و دولومیت است.

۴- ابعاد پلت‌های فسفات بیشتر در محدوده کمتر از ۲ میلی‌متر و بیش از ۴۰ میکرون (به طور عمده در محدوده ۲۱۰-۴۰ میکرون) است.

۵- پلت‌های فسفات دارای مقادیر بسیار زیادی میان‌بار (کربناتی و کوارتز) است.

۶- ابعاد میان‌بار کوارتز در حدود ۷۰-۱۵ میکرون است.

۷- در حالت کلی ابعاد میان‌بارها تا ابعاد ۸۰-۷۰ میکرون هم می‌رسد.

۸- پلت‌های فسفاتی درگیری تنگاتنگی با مواد آلی داشته است.

۹- کوارتزهای موجود در نمونه، ابعاد بسیار ریزی داشته و به صورت میان‌بار و رس‌های شیلی در زمینه پراکنده شده‌اند. ابعاد این ذرات در ابعاد میانگین ۵۰-۴۰ میکرون در زمینه دیده شد.

۱۰- حدود ۲٪ نیز اکسیدهای‌آهن در نمونه دیده شد که مقدار ناچیزی بود

۱۱- در برخی مقاطع میزان میان‌بار چرت ریز بلور آنقدر بالا بود که می‌توان پلت فسفاتی را چرت فسفات‌دار نامید.

۳-۶. بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی کانسنگ

این بررسی‌ها پس از آماده‌سازی سطح مقاطع صیقلی با پوشش طلا، توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی XL ساخت شرکت فیلیپس انجام گرفت. در این بخش مقاطع صیقلی مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه به طور مختصر به نتایج حاصل از آنها پرداخته می‌شود.

همان گونه که در بررسی‌های میکروسکوپ نوری اشاره شد عمده میان‌بارهای موجود در درون پلت‌های آپاتیت کوارتز، کلسیت و دولومیت بود. نتایج حاصل از SEM نیز تأییدکننده نتایج میکروسکوپ نوری است. عمده کوارتزهای موجود در زمینه و پلت آپاتیت، ابعاد ریز بلور (۷۰-۱۰ میکرون) دارند که در درجه آزادی ۱۴۰ میکرون آزاد نمی‌شوند. به همین دلیل پیش‌بینی می‌شود که عیار سیلیس موجود در محصول پرعیار بالا باشد. حضور مواد آلی در کانسار باعث تیره شدن رنگ کانسار است. پراکندگی مواد آلی نیز در SEM نشان داده شده است. در این مقاله عکس SEM که از پلت تهیه شده است تشریح می‌شود.

از شکل ۶ بر می‌آید که، درون پلت فسفاتی حاوی ابعاد بسیار متغیری از کوارتز است (از چند میکرون تا ۴۰ میکرون). دولومیت با ابعاد بسیار ریز حدود چند میکرون و کلسیت با ابعاد بسیار متغیر (چند میکرون تا ابعاد ۵۰ میکرون) نیز در درون پلت آپاتیت موجود است. در این بخش از نمونه ماده آلی دیده نشده است (نکته: نقطه‌ای که بررسی عنصری شد نقاطی از پلت آپاتیت هستند که در دو شکل بالایی شکل ۶ با مربع نشان داده شده است).

از بررسی‌های عکس‌های SEM نتایج زیر حاصل شد:

۱- پلت‌های فسفاتی دارای میان‌بارهای بسیار زیاد (شامل کلسیتی دولومیتی و کوارتزی) است.

۲- ابعاد میان‌بارهای کوارتز در محدوده (۲ تا ۵۰ میکرون) متغیر است.

۳- مواد آلی نیز در زمینه سنگ دیده شد.

۴- میان‌بارهای کوارتز و کلسیت همرشدی بسیار قوی با پلت‌های فسفاتی داشتند.

۳-۷. بررسی‌های تعیین درجه آزادی

برای بررسی درجه آزادی پلت‌های فسفات از ناخالصی‌های کوارتز و کربنات همراه، دو روش شمارش میکروسکوپی و محلول‌های سنگین استفاده شد.

– تعیین درجه آزادی به روش شمارش میکروسکوپی: در این پژوهش درجه آزادی با روش دانه‌شماری توسط میکروسکوپ اندازه‌گیری و نتایج حاصل از این درجه آزادی با محلول سنگین کنترل شد. میزان تغییرات در این دو روش با همدیگر اختلاف چندانی نداشته و می‌توان گفت که درجه آزادی با اطمینان بالا انجام گرفته شده است.

بررسی‌های انجام شده برای تعیین درجه آزادی با روش بررسی‌های میکروسکوپی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طوری که دیده می‌شود، در ابعاد ۱۴۰ میکرون تقریبا ۹۶٪ ذرات به درجه‌آزادی کامل رسیدند.

– فراکسیون دانه‌بندی ۱۰۰+۱۲۵– (میکرون): در این فراکسیون پراکندگی دانه‌های فسفات‌دار (به لحاظ میزان فسفات در یک دانه) به نحوی است که کم و بیش تمامی دانه‌های حاوی فسفات (کلوفان) آزاد هستند. به طوری که از میان ۵۴ دانه کلوفان تنها دو دانه درگیر است. یکی از دانه‌ها در ابعاد ۱۵۰-۹۰ میکرون با ۹۰-۷۰ درصد بوده و

دانه‌بندی در ابعاد بیش از ۲۱۰ میکرون با عیار ۷۰-۵۰ درصد است. در این فراکسیون تقریباً همه ذرات آزاد می‌شوند. درجه آزادی کم و بیش بیشتر از ۹۶٪ است. نکته قابل توجه آن است که در تعیین درجه آزادی از درگیری دانه‌ها با مواد آلی که در دانه‌های فراکسیون‌های مختلف این کانسار که متداول است صرف‌نظر شده است و دانه‌هایی از این نوع آزاد در نظر گرفته شده‌اند (چون کانی‌های فسفاتی با این مواد پوشش داده شده‌اند). بنابراین این فراکسیون نسبت به فراکسیون‌های پیشین متفاوت بوده و دانه‌ها در این فراکسیون بیشتر آزاد هستند. ۳۵ دانه آزاد در محدوده ۱۵۰-۹۰ میکرون و ۱۰ دانه آزاد در محدوده ۲۱۰-۱۵۰ میکرون قرار دارد. از توضیحات بالا، می‌توان میزان درجه آزادی را بر اساس رابطه (۱) به دست آورد. درجه آزادی میزان ذرات آزاد شده به کل ذرات با ارزش موجود در کانسنگ است.

$$\text{درجه آزادی}\ \% = \{(40\times7)+(120\times35)+(10\times180)\}/100\times$$
$$\{(40\times7)+(120\times35)+(10\times180)+(0/8\times120)+(210\times0/6)\} = 96\% \qquad (1)$$

در این فراکسیون ذرات به درجه آزادی مورد نظر می‌رسند که بیش از ۹۶ درصد ذرات فسفات آزاد شده‌اند. شکل ۸ دانه‌های آزاد پلت‌های فسفاتی مقطع نازک فراکسیون ۱۰۰+۱۲۵- میکرون را نشان داده است. همان طوری که در این شکل دیده می‌شود بیشتر پلت‌های فسفاتی آزاد شده‌اند. از بررسی‌های میکروسکوپی برش‌های نازک از فراکسیون‌های مختلف نتایج زیر به دست آمد:

۱- در محدوده فراکسیون (۵۰۰+۱۰۰۰- میکرون) پلت فسفات آزاد دیده نشد.

۲- درجه آزادی در حدود ۱۴۰ میکرون به دست آمد.

۳- درجه آزادی پلت‌های فسفاتی در فراکسیون ۱۲۵+۲۰۰- میکرون ۸۵/۴۱٪ است.

۴- در فراکسیون ۱۰۰+۱۲۵- میکرون نیز درجه آزادی پلت‌های فسفاتی ۹۶/۶۷٪ است.

۵- پلت‌های فسفاتی آزاد نیز دارای بسیار زیادی میان‌بار کوارتز و کربناتی (حدود ۵۰-۴۰میکرون) هستند.

- تعیین درجه آزادی به روش غرق و شناورسازی: در این روش محلول‌های با وزن مخصوص‌های ۲/۸۵ و ۳/۴۱ گرم بر تن برای بررسی به کار گرفته شد (با توجه به وزن مخصوص عمده کانی‌های تشکیل دهنده). با انجام آزمایش‌های محلول سنگین درجه آزادی تعیین شد و نتایج حاصل در جدول‌های ۴ و ۵ درج شده است. در آزمایش‌های با وزن مخصوص ۲/۸۵، در فراکسیون ۱۰۶+۱۵۰- میکرون بیشترین و کمترین عیار به ترتیب در بخش غوطه‌وری و شناوری نسبت به دیگر فراکسیون‌ها دارد (بر اساس جدول۴). در آزمایش‌های غرق و شناورسازی در فراکسیون ۱۰۶+۱۵۰- میکرون بیشترین و کمترین عیار و بازیابی به ترتیب در بخش شناوری و غوطه‌وری است (بر اساس جدول۵). بر اساس نتایج حاصل از جداول ۴ و ۵ غرق و شناورسازی، درجه آزادی در محدوده فراکسیون ۱۰۶+۱۵۰- میکرون است. که با بررسی‌های میکروسکوپی همخوانی لازم را دارد.

۳-۸. تعیین زمان بهینه خردایش و میزان نرمه

برای تعیین زمان مورد نیاز برای رسیدن به درجه آزادی مطلوب، آزمایش آسیای گلوله‌ای به روش تر انجام شد. شرایط انجام آزمایش با آسیای گلوله‌ای تر در جدول ۶ درج شده است. با توجه به شکل ۹، مدت زمان خردایش مورد نیاز برای دست‌یابی به درجه آزادی، برای نمونه فسفات دلیر (d_{80}=۱۴۰) با شرایط جدول ۶، در حدود ۱۰/۵ دقیقه است. در زمان‌های خردایش ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ دقیقه d_{80} محصول خردایش به ترتیب ۱۷۵، ۱۴۵، ۱۱۴ و ۹۶ میکرون است. در طی ۱۰/۵ دقیقه خردایش با شرایط جدول ۶، میزان اتلاف فسفات در بخش نرمه حدود ۸/۲۲٪ با عیار ۷/۵۸٪ P_2O_5 است. حدود ۱۳٪ از وزن خوراک اولیه در خردایش به عنوان نرمه دور ریخته شد.

۳-۹. تعیین میزان مواد آلی موجود در نمونه فسفات

برای تعیین میزان مواد آلی موجود در نمونه فسفات، حدود ۳۰ گرم نمونه در درون کوره در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت حرارت داده شده و سپس نمونه وزن شده و میزان کاهش وزن، به نمونه اولیه تقسیم می‌شود. در نهایت، میزان کاهش وزن، درصد مواد آلی را در نمونه نشان می‌دهد. وزن نمونه اولیه ۳۰ گرم، وزن نمونه پس از حرارت ۲۹/۵ گرم بوده است، بنابراین:

$$\text{درصدمواد آلی} = (30-29/5)/30 = 1/66\% \qquad (2)$$

با توجه به این که میزان مواد آلی موجود در نمونه زیاد بوده به همین خاطر استفاده از روش تکلیس به عنوان روش پیش فرآوری ضروری به نظر می رسد.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده بر روی فسفات منطقه دلیر می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

- نتایج تجزیه شیمیایی و بررسی‌های XRD نشان می‌دهد که نوع فسفات از نوع کانی آپاتیت (۲۸/۱۳٪) است. دیگر کانی‌ها ۳۴/۵۳٪ کلسیت، ۲۴/۴۹٪ کوارتز و ۴/۶۵٪ دولومیت است. میزان ترکیبات اصلی کانسنگ نیز ۱۱/۹۹٪ P_2O_5، ۳۶/۳۶٪ CaO، ۲۴/۴۹٪ SiO_2 است.

- بررسی‌های کانی‌شناختی و میکروسکوپی نوری و الکترونی نشان می‌دهد که:

الف) بررسی‌های کانی‌شناختی به روش‌های میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی نشان داد که بخش عمده باطله‌های کانسنگ را کانی‌های کربناتی (کلسیت و دولومیت) و کوارتز تشکیل داده‌اند. همچنین کانی‌های اکسیدآهن و ژیپس دیده شد، که میزان این کانی‌ها بسیار پایین بود. ب) کانی فسفاتی از نوع آپاتیت نهان بلورین (کلوفان) است. پلت‌های فسفاتی در برخی نمونه‌ها به صورت بافت‌های تیغه‌ای، موزاییکی و بیضوی دیده شد. پلت‌های آپاتیت دارای مقادیر زیادی میان‌بارهای کوارتز و کربنات (به طور عمده کلسیت و گاه دولومیت) بود. ج) پلت‌های آپاتیت درگیری تنگاتنگی با باطله دارند بنابراین باید تا حد امکان درجه آزادی را ریز نموده تا امکان فرآوری کانسنگ بالا باشد. د) پلت‌های آپاتیت دارای میزان قابل توجهی میان‌بار کربناتی و سیلیکاتی (به طور عمده کوارتز) بود که ابعاد میان‌بارهای موجود در پلت‌های فسفاتی حدود ۷۰-۱۵ میکرون است.

- بررسی‌های پراکندگی ابعادی نشان داد که:

الف) اگر نمونه فسفات دلیر با سنگ‌شکن‌های فکی (مدار باز) و استوانه‌ای (مداربسته با سرند کنترل) خرد شده به نحوی که ۱۰۰٪ نمونه از سرند کنترل ۱۰ مش عبور کند، ۸۰ درصد آن زیر ۱/۴۶ میلی‌متر (d_{80}=۱۴۵۸ μm) خواهد بود. ب) در خردایش (میکرون d_{80}=۱۴۵۸) حدود ۴/۵۳٪ از کل فسفات در ابعاد زیر ۵۰ میکرون تمرکز یافته‌اند. باقیمانده آن حدود ۹۵/۴۷٪ از کل فسفات در محدوده ابعادی (۵۰+۲۰۰۰-) میکرون پراکنده شده‌اند. ج) بیشترین عیار P_2O_5 در محدوده ابعادی ۱۲۵ تا ۲۰۰ میکرون قرار دارد و کمترین عیار مربوط به محدوده ابعادی زیر ۵۰ میکرون است. د) پراکندگی P_2O_5 در محدوده ابعادی ۱۰۰۰ تا ۱۶۰۰ میکرون بیشترین مقدار (۳۶/۲٪) است. در فراکسیون بالا و پایین این فراکسیون میزان پراکندگی کاهش پیدا کرده و در فراکسیون ۵۰۰ تا ۸۰۰ میکرون میزان پراکندگی فسفات دوباره به ۱۶/۲٪ افزایش پیدا کرده و در دیگر فراکسیون‌ها با کاهش ابعاد کاهش می‌یابد. هـ) تغییرات عیار ترکیبات Fe_2O_3، SiO_2، CaO و P_2O_5 در فراکسیون‌های مختلف به طور کامل متفاوت بوده و در حالت کلی نسبت به یکدیگر کم و بیش هیچ‌گونه وابستگی نداشته‌اند. در برخی فراکسیون‌ها با همدیگر نسبت مستقیم داشته و در برخی فراکسیون‌ها با یکدیگر رابطه عکس دارند. در حالت کلی عیار اکسید آهن در تمام فراکسیون‌ها به نسبت ثابت است. و) در هیچ یک از فراکسیون‌ها عیار بالا نبوده که به عنوان محصول پرعیار در نظر گرفته شود و به همین نحو عیار در هیچ یک از فراکسیون‌ها آنقدر پایین نیست که به عنوان باطله در نظرگرفته شود.

- در بررسی‌های درجه آزادی نتایج زیر حاصل شد:

الف) بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، مناسب‌ترین ابعاد برای آزاد کردن پلت‌های فسفات حدود ۱۴۰ میکرون است (درجه آزادی ۱۴۰ میکرون کانسنگ). ب) بر اساس بررسی‌های غرق و شناورسازی، بهترین فراکسیون برای آزاد شدن

پلت‌های فسفات محدوده (۱۰۶+۱۵۰- میکرون) است. نتایج حاصل از این روش نیز تأیید کننده نتایج حاصل از بررسی‌های میکروسکوپی است. ج) زمان بهینه خردایش برای رسیدن به درجه آزادی، ۱۰ دقیقه و ۳۰ ثانیه حاصل شد. در طی این مدت خردایش، حدود ۸/۲۲٪ از کل فسفات به صورت نرمه زیر ۲۰ میکرون از مدار فرآوری حذف شد. - با توجه به کانی‌های تشکیل دهنده و نوع کانی فسفات و ابعاد پلت‌های آپاتیت روش‌های فرآوری به صورت زیر پیش‌بینی می‌شود.

الف) با توجه به این که کانسنگ رسوبی و اختلاف وزن مخصوص بین کانی فسفاتی و کانی‌های کربناتی و سیلیکاتی کم بوده به همین خاطر استفاده از روش‌های گرانشی (ثقلی) برای پیش تغلیظ یا تغلیظ بعید به نظر می‌رسد.

ب) با توجه به این که کانسنگ سیاه رنگ حاوی مواد آلی (حدود ۱/۶۶٪) بوده به همین دلیل با توجه به پیچیدگی‌های موجود در فرآوری فسفات‌های رسوبی ریز بلور روش پیش تغلیظ تکلیس برای فرآوری این کانسار ضروری به نظر می‌رسد.

ج) کانی‌های مغناطیسی اکسیدهای‌آهن در نمونه بسیار کم بوده به همین دلیل نمی‌توان به راحتی روش‌های مغناطیسی را به کار برد. د) میزان کانی‌های رسی موجود در کانسنگ پایین بوده (Na_2O+K_2O=٪۱) روش سایش و طبقه‌بندی را نمی‌توان به راحتی برای فرآوری این کانسنگ به عنوان پیش تغلیظ به کار برد.

ه) بهترین روشی را که می‌توان برای این کانسنگ پیش نهاد نمود روش فلوتاسیون است.

- با توجه به ترکیبات کانی‌شناختی، وجود میان‌بارهای قابل توجه، ریز بلور بودن فسفات، کانی‌های باطله کربناتی و وجود میزان قابل توجهی مواد آلی، امکان فرآوری با روش فلوتاسیون مرسوم به راحتی امکان‌پذیر نیست.

جدول ۱- تجزیه شیمی نمونه اولیه

ترکیب	درصد	ترکیب	درصد
SiO_2	۲۴/۴۹	MgO	۱/۰۱
Al_2O_3	۱/۶۶	P_2O_5	۱۱/۹۹
Fe_2O_3	۱/۶۷	MnO	۰/۱
CaO	۳۶/۳۶	Na_2O	۰/۳۴
K_2O	۰/۶۶	L.O.I	۲۱/۸۲

جدول ۲- درصد کانی‌های تشکیل دهنده

نوع کانی	آپاتیت	کلسیت	دولومیت	کوارتز
درصد	۲۸/۱۳	۳۴/۵۳	۴/۶۵	۲۴/۴۹

جدول۳ - نتایج تجزیه سرندی‌تر محصول سنگ‌شکن غلتکی

ابعاد چشمه سرند (میکرون)	درصد وزنی روی سرند	درصد تجمعی (٪)	
		روی سرند	زیر سرند
۲۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
۱۶۰۰	۱۱/۰۳	۱۱/۰۳	۸۸/۹۷
۱۰۰۰	۳۹/۱۲	۵۰/۱۴	۴۹/۸۶
۸۰۰	۴/۲۰	۵۴/۳۴	۴۵/۶۶
۵۰۰	۱۵/۳۲	۶۹/۶۶	۳۰/۳۴
۲۵۰	۱۰/۹۷	۸۰/۶۲	۱۹/۳۷
۲۰۰	۲/۶۱	۸۳/۲۴	۱۶/۷۶
۱۲۵	۴/۳۵	۸۷/۵۹	۱۲/۴۱
۱۰۰	۱/۷۶	۸۹/۳۵	۱۰/۶۵
۷۱	۱/۴۷	۹۰/۸۲	۹/۱۸
۵۰	۱/۸۸	۹۲/۶۹	۷/۳۱
-۵۰	۷/۳۱	۱۰۰/۰۰	۰/۰۰
جمع	۱۰۰/۰۰	---	---

جدول۵ - نتایج آزمایش دوم محلول سنگین با وزن مخصوص ۳/۴۱ بر روی فراکسیون‌های مختلف ابعادی

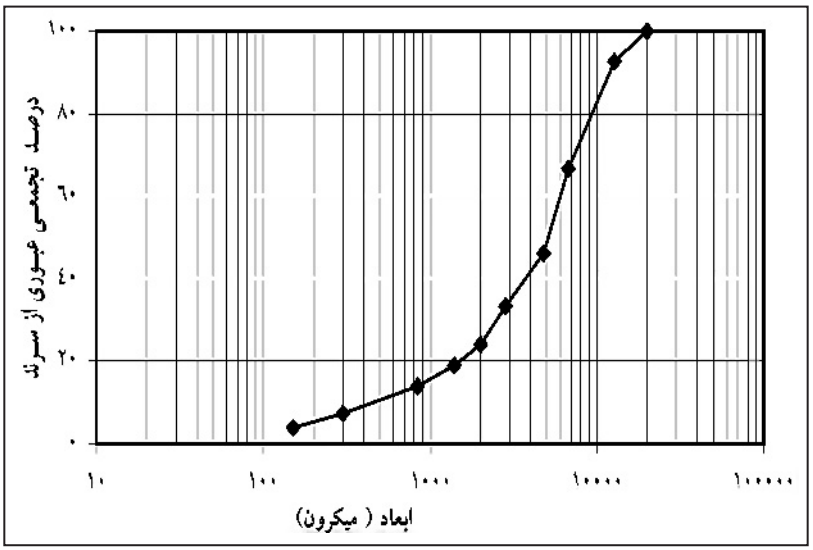
ابعاد (میکرون)	نوع محصول	درصد وزن	عیار (P_2O_5 (٪	بازیابی (P_2O_5 (٪
-۲۱۲+۱۵۰	شناور	۹۹/۵	۱۹/۷۴	۹۹/۸۲
	غوطه ور	۰/۵	۷/۵۵	۰/۱۸
	خوراک محاسباتی	۱۰۰	۱۹/۶۷	۱۰۰
-۱۵۰+۱۰۶	شناور	۸۵/۰۴	۲۰/۵۶	۹۹/۶
	غوطه ور	۱۴/۹۵	۰/۴۷	۰/۴
	خوراک محاسباتی	۱۰۰	۱۷/۵۵	۱۰۰
-۱۰۶+۷۵	شناور	۹۹/۳	۱۸/۶۱	۹۹/۹
	غوطه ور	۰/۷	۲/۴۷	۰/۱
	خوراک محاسباتی	۱۰۰	۱۸/۵	۱۰۰

جدول ۴- نتایج آزمایش اول محلول سنگین با وزن مخصوص۲/۸۵ بر روی فراکسیون‌های مختلف ابعادی

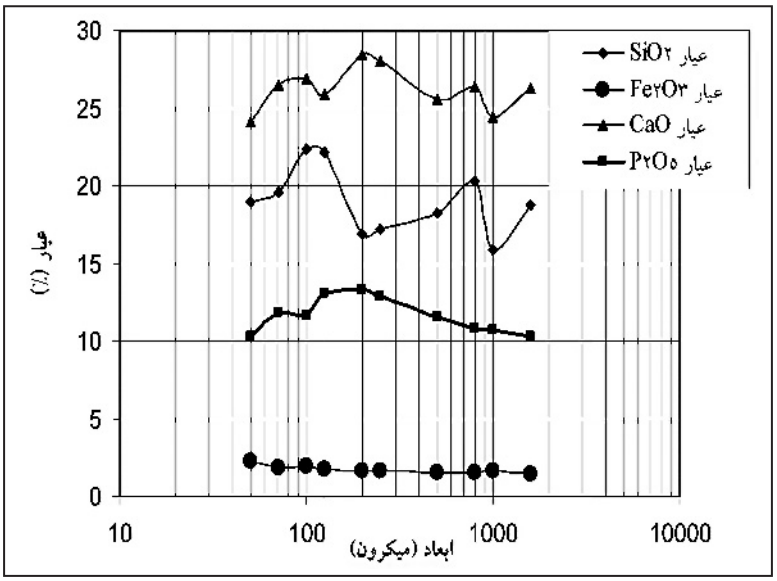
ابعاد (میکرون)	نوع محصول	درصد وزن	عیار (P_2O_5 (٪	بازیابی (P_2O_5 (٪
-۲۱۲+۱۵۰	شناور	۳۰	۷/۴۶	۲۱/۲۴
	غوطه ور	۷۰	۱۶/۶۳	۷۸/۷۵
	خوراک محاسباتی	۱۰۰	۱۳/۸۷	۱۰۰
-۱۵۰+۱۰۶	شناور	۳۲/۸	۳/۳۷	۱۱/۶۲
	غوطه ور	۶۷/۲	۱۶/۹۳	۸۸/۸۸
	خوراک محاسباتی	۱۰۰	۱۲/۴۸	۱۰۰
-۱۰۶+۷۵	شناور	۳۱/۳	۳/۰۸	۱۰/۳۲
	غوطه ور	۶۸/۷	۱۶/۷۸	۸۹/۶۸
	خوراک محاسباتی	۱۰۰	۱۲/۴۹	۱۰۰

جدول ۶- شرایط و ویژگی‌های آسیای گلوله‌ای مورد استفاده

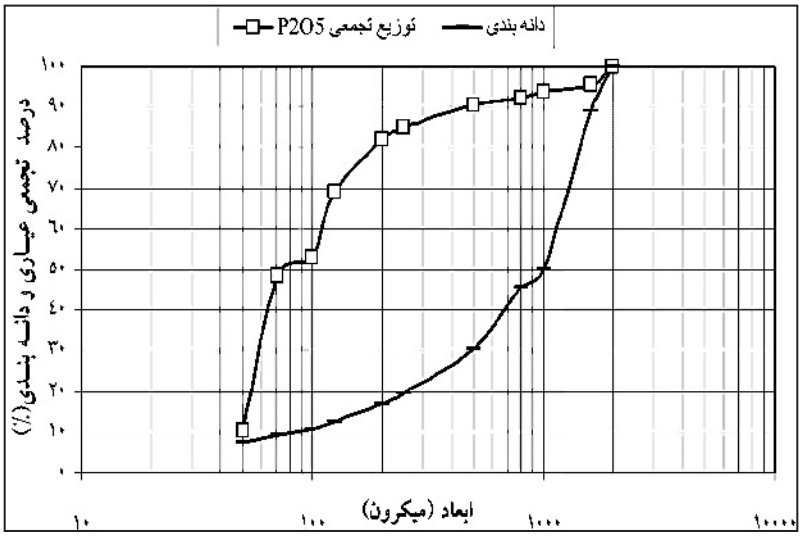
نوع آسیا	گلوله‌ای دنور (Denver)
ابعاد (قطر× طول)	۱۲ × ۵ اینچ
سرعت	۶۰ دور در دقیقه
روش آسیا کردن و تجزیه سرندی	روش تر
وزن بارخردکننده (گلوله‌ها)	۷/۶ کیلوگرم
وزن نمونه	۱ کیلوگرم
درصد جامد	۶۰ درصد



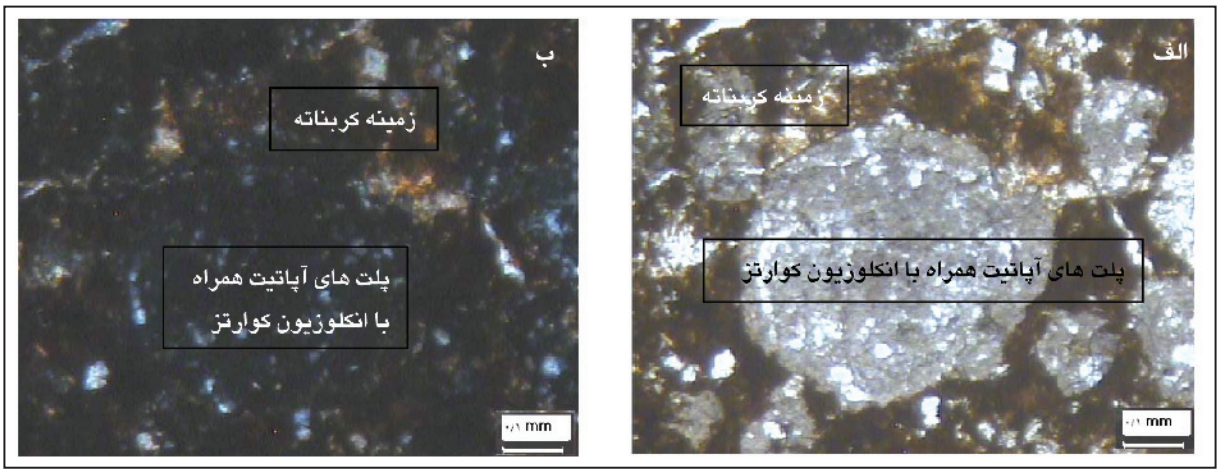
شکل ۱ - منحنی دانه‌بندی محصول سنگ (µm) ۱۴۵۸= D_{80} شکن استوانه‌ای



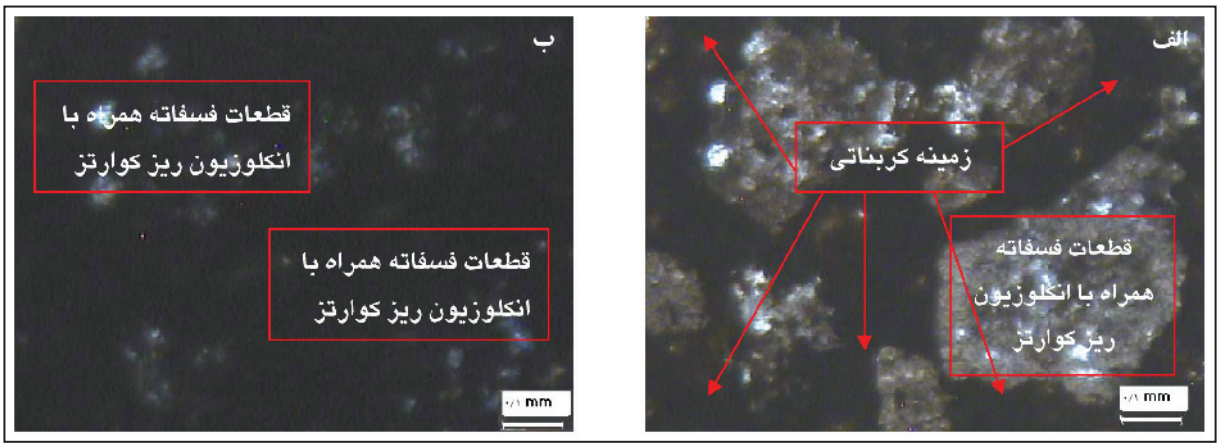
شکل ۲- تغییرات عیار P_2O_5 ،Fe_2O_3، CaO و SiO_2 در فراکسیون‌های مختلف نمونه پس از سنگ‌شکن غلطکی



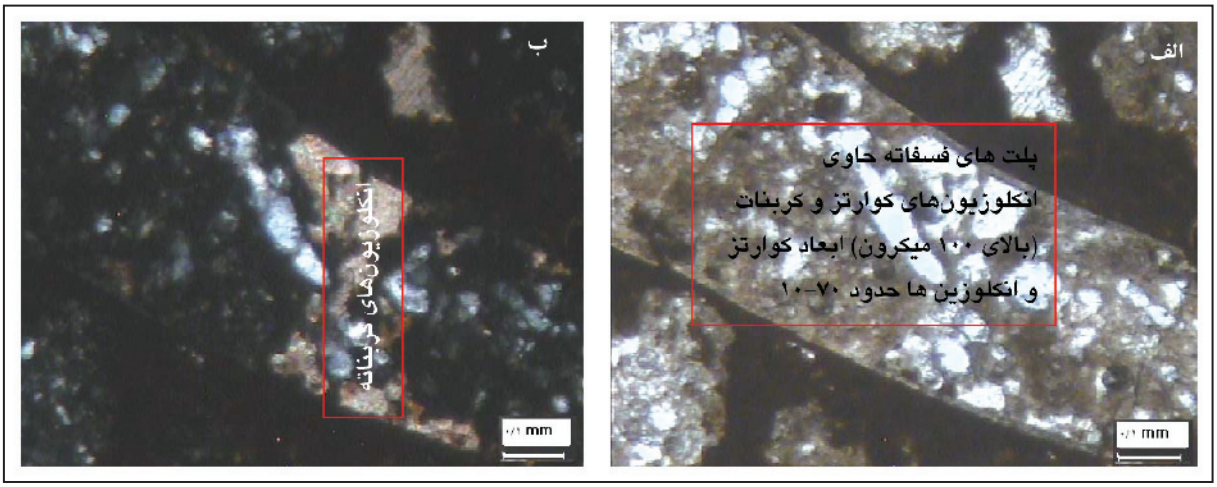
شکل ۳- الف) منحنی دانه‌بندی و پراکندگی تجمعی P_2O_5 در نمونه پس از سنگ‌شکنی استوانه‌ای



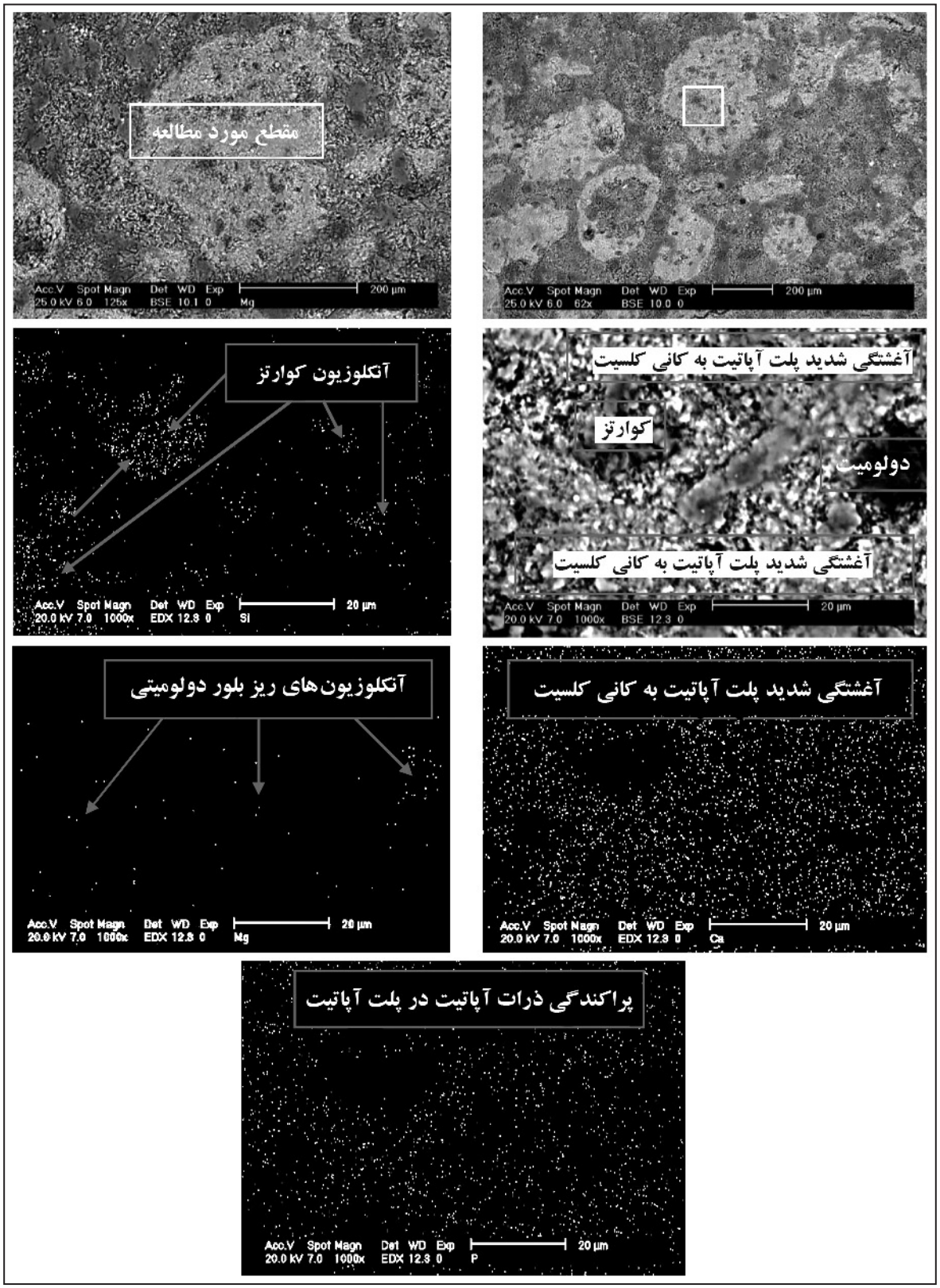
شکل ۳- ب) پلت به نسبت سالم (بدون حاشیه‌خوردگی در اثر فرایندهای دیاژنتیک) و درگیری تنگاتنگ و میکرونی آن با چرت ریز بلور (کوارتز)، چندین دانه کوچک‌تر فسفاته که بیشتر بی‌شکل هستند در متن دیده می‌شود. همگی دانه‌ها در یک زمینه متشکل بر سیدریت (کربنات‌های آهن‌دار) قرار گرفته است. عکس نور عادی (عکس راست) و عکس نور پولاریزه (عکس چپ) و مقطع نازک تهیه شده است.



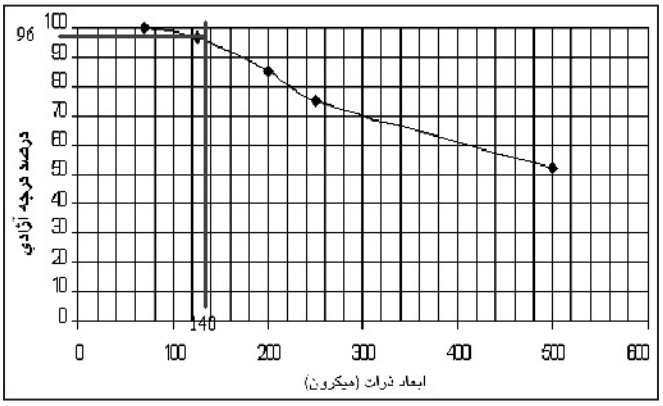
شکل۴ - قطعات فسفاتی با حاشیه‌خورده شده و حاوی باطله (گانگ) درون‌زاد از جنس کوارتز و ریز بلور چرت در یک زمینه متشکل از کربنات‌های آغشته به آهن به رنگ قهوه‌ای. الف) نور عادی و ب) نور پلاریزه. بخش سیاه رنگ شامل قطعات بی‌شکل و پلت‌های گردشده تا نیمه‌گردشده فسفات آغشته به مواد آلی و قطعات درشت زیست‌آواری است که در زمینه دولومیتی و کلسیتی با بافت موزاییکی واقع شده است و به شدت آغشته به ماده آلی هستند (مقطع نازک).



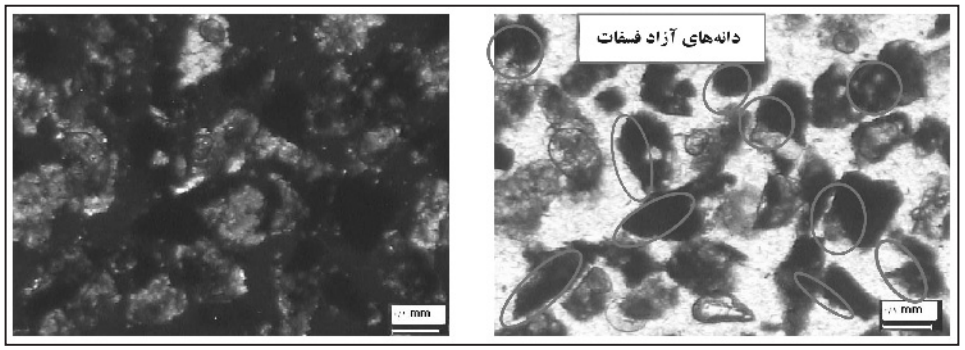
شکل ۵- قطعه زیست‌آواری فسفاته با بافت تیغه‌ای دارای باطله درون‌زاد از جنس کوارتز (چرت) و کلسیت در زمینه‌ای سیدریتی و یا کربنات‌های آهن‌دار. الف) نور عادی و ب) نور پولاریزه. (مقطع نازک)



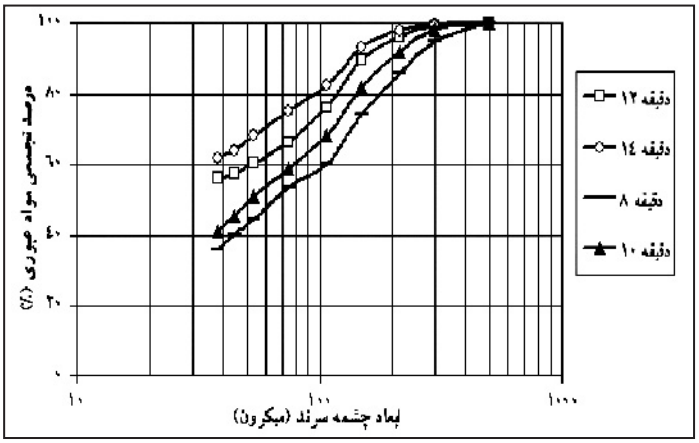
شکل ۶- نمایی از وضعیت یک پلیت فسفاتی در یک نمونه نشان داده شده است. دیده می‌شود که ابعاد کوارتز میان‌بار در محدوده ابعادی ۵۰-۲ میکرون تا بسیار ریز وجود دارد. در پلت آپاتیت میان‌بارهای کلسیت و به مقدار ناچیزی دولومیت وجود دارد.



شکل ۷- درجه آزادی نسبت ابعاد ذرات حاصل از بررسی‌های دانه شماری



شکل ۸- نمایی از کانی‌های فسفاتی آزاد شده و درگیر در فراکسیون ابعادی ۱۰۰+۱۲۵- میکرون در نور عادی (عکس راست) و نور پلاریزه (عکس چپ).



شکل ۹- پراکندگی دانه‌بندی نمونه فسفات دلیر پس از خردایش توسط آسیای گلوله‌ای تر در زمان‌های مختلف

کتابنگاری

نمدمالیان، ع. و ملک زاده، ل.، ۱۳۶۳- گزارش اکتشافی کانسار دلیر (بررسی‌های نیمه تفضیلی)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور- طرح اکتشافات فسفات.

امینی، ا.، عبداللهی، ه. و شمسی، پ.، ۱۳۸۶- بررسی امکان پرعیار سازی فسفات موندون-گروه کانه آرایی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

References

Abouzeid, A.M. , 2008- Physical and thermal treatment of phosphate ores an overview, Int. J. Miner. Process 85, VOL. 59–84,

Emigh, D. C., 2007- Phosphate Rock, Industrial Minerals and Rocks", 7th Edition,

Hikmet, S., 2002- Enhancing flotation recovery phosphate ores using nonionic surfactants, Doctor of Philosophy thesis in mineral processing, department of energy –and geo environmental engineering, The Pennsylvania state university.

Mobbs, P. M., Wallace, G. J., Wilburn, D. R. & Yager, T. R., 2007- The Mineral Industries of the Middle East, U.S. Geological Survey, Minerals Yearbook.