

بررسی فراوری و ارزیابی پتانسیل اقتصادی ذخیره معدنی آندالوزیت شرق فریمان

فرشته رنجبرمقدم*، خسرو ابراهیمی نصرآبادی، سیدمسعود همام

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله: ۹۰/۱/۲۸، نسخه نهایی: ۹۰/۷/۱)

چکیده: رخنمون گسترده‌ی سنگ‌های دگرگونی در منطقه‌ی قنداب واقع در شرق فریمان حاوی آندالوزیت شیبتهایی است که در این پژوهش پتانسیل آنها به عنوان ذخیره‌ی معدنی مورد ارزیابی قرار گرفته است. به این منظور پس از بررسی‌های مقدماتی شامل سنگ‌نگاری و ژئوشیمی و آزمایش‌های فراوری مشتمل بر جدایش گرانشی و مغناطیسی با هدف بررسی قابلیت تولید آندالوزیت مورد مصرف در صنایع نسوز اقدام شد. بررسی‌های کانی‌شناسی شامل تهیه و بررسی مقاطع نازک و آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) بوده و برای شناسایی عناصر همراه، تجزیه‌ی شیمیایی نمونه به روش XRF صورت گرفته است. نتایج بررسی‌های فراوری نشان می‌دهد که با استفاده از جداکننده‌های مغناطیسی خشک با شدت بالا و جدایش گرانشی به روش آبگون سنگینی، می‌توان محصولی با ۵۵ درصد اکسید آلومینیوم، ۱/۵ درصد اکسید آهن، ۴۲ درصد اکسید سیلیسیوم و کمتر از ۰/۵ درصد اکسیدهای پتاسیم و سدیم تهیه کرد که قابل مقایسه با استانداردهای جهانی و قابل عرضه در بازار آندالوزیت است.

واژه‌های کلیدی: فریمان؛ آندالوزیت؛ فراوری؛ جدایش گرانشی؛ جدایش مغناطیسی.

مقدمه

با اندازه‌ی طبیعی دانه‌های آن انجام می‌شود، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. جایگزینی آندالوزیت به جای مواد نسوز دیگر در صنایع مختلف به دلایل زیادی روبه افزایش است که از آن جمله می‌توان به پایین بودن بهای مواد اولیه، صرفه‌جویی در مصرف انرژی مورد نیاز در فناوری‌های تولید آجرنسوز، مقاومت آن در برابر عوامل شیمیایی و فیزیکی و مشخصات ابعادی آجرهای نسوز اشاره کرد [۲]

آجرهای نسوز آندالوزیت - سیلیمانیتی دارای خواص زیادی همچون مقاومت بسیار خوب در برابر ضربه‌های گرمایی، استحکام فشاری گرم و مقاومت خزشی بالا و نیز مقاومت در برابر حملات سربارند بنابراین آجرها در صنایع مختلف از جمله صنایع فولاد، آهن، شیشه و سیمان کاربرد گسترده‌ای دارند [۳].

چندریختی‌های کانی‌های گروه سیلیمانیت (شامل آندالوزیت، سیلیمانیت و کیانیت) دارای ترکیب شیمیایی یکسان (Al_2SiO_5) و سیستم تبلور و ساختار ملکولی متفاوت و خواص فیزیکی گوناگونند. این کانی‌ها به دلیل مقدار زیاد آلومینا (عیار متوسط Al_2O_3 کانی‌های گروه سیلیمانیت تخلیص شده ۹۶۲ درصد است) از دیر باز به عنوان ماده‌ی اولیه در تهیه نسوزهای مولایتی مطرح بوده و به خاطر خواص گرمایی و مکانیکی بسیار بالا، همچنان در صنایع جدید نسوز مورد توجه و پژوهش هستند [۱]. از میان سه کانی گروه سیلیمانیت، آندالوزیت به دلیل چگالی نسبتاً پایین، انبساط حجمی بسیار اندک در اثر گرما، معدنکاری ساده‌ی آن و اینکه تغلیظ آندالوزیت متناسب

پایداری گرمایی دیرگدازهای آلومینوسیلیکاتی همچون آندالوزیت با درصد آلومینا و ناخالصی‌هایی آنها همچون Mn, Fe, Ti ارتباط مستقیم دارد [۴]. به طور کلی کانسارهایی که عیار Al_2O_3 در آنها ۴۰٪ باشد، جزء کانسارهای غنی و کانسارهایی، کمتر از ۲۰٪ Al_2O_3 جزء کانسارهای فقیر محسوب می‌شوند. از آنجا که بیشتر کانسارهای آندالوزیت مقدار آلومینیوم کمی دارند، برای رسیدن به میزان عیار اقتصادی، لازم است روی ماده‌ی خام عملیات کانه‌آرایی صورت گیرد. [۴] بالا بودن درصد اکسیدهای Fe, Si, Ti که به عنوان عناصر زیان‌آور تلقی می‌شوند، باید در جریان کانه‌آرایی درصد این عناصر کم شده و به مقدار قابل قبولی برسد [۳]. بنابر استانداردهای اعلام‌شده، وجود حداقل ۵۴٪ Al_2O_3 و حداکثر ۱٫۵٪ اکسید آهن و ۲٪ اکسید تیتانیوم و یا ۲٪ اکسیدهای قلیایی مانند سدیم، پتاسیم و کلسیم در مواد اولیه آندالوزیتی برای تهیه نسوزهای مولایتی ضروری هستند [۵، ۶].

در ایران ذخایر پراکنده‌ای از آندالوزیت وجود دارد که از نوع فقیر و بسیار فقر (با عیار آندالوزیت ۲۰٪ و کمتر) هستند و منطقه‌ی مورد بررسی در جنوب شرقی فریمان یکی از این معدود ذخایر است.

این منطقه در ۱۱۰ کیلومتری جنوب شرقی مشهد و ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی فریمان، به مختصات $35^{\circ}24'$ تا $28^{\circ}35'$ شرقی و $60^{\circ}02'$ تا $60^{\circ}07'$ شمالی قرار گرفته است. این مجموعه‌ی دگرگونی در گستره‌ای به پهنای تقریبی ۴ کیلومتر در راستای شمال غربی - جنوب شرقی بیرون زدگی دارد و شامل مجموعه‌ای از میکاشیست‌های حاوی آندالوزیت، سیلیمانیت، کوردیریت و گارنت است. طول پورفایروبلاست‌های آندالوزیت در این میکاشیست‌ها در بعضی قسمت‌ها به بیش از ۱۰ سانتیمتر می‌رسد.

در این مجموعه لایه‌هایی با پراکندگی نامنظم از کوارتزیت، آهک‌های به شدت دوباره متبلور شده و ماسه سنگ‌های رس دار دگرگون شده حاوی بیوتیت، مسکویت، فیبرولیت و گارنت قرار دارند. در واقع متاپلیت‌ها بخش مهم سنگ‌های دگرگون منطقه را شامل می‌شوند و سنگ‌های کوارتزیتی و شیست‌های کوارتز فلدسپاتی به صورت پراکنده، میان لایه‌های این متاپلیت‌ها را تشکیل می‌دهند.

این سنگ‌ها در سمت شمال با واسطه‌ی گسلی در مجاور

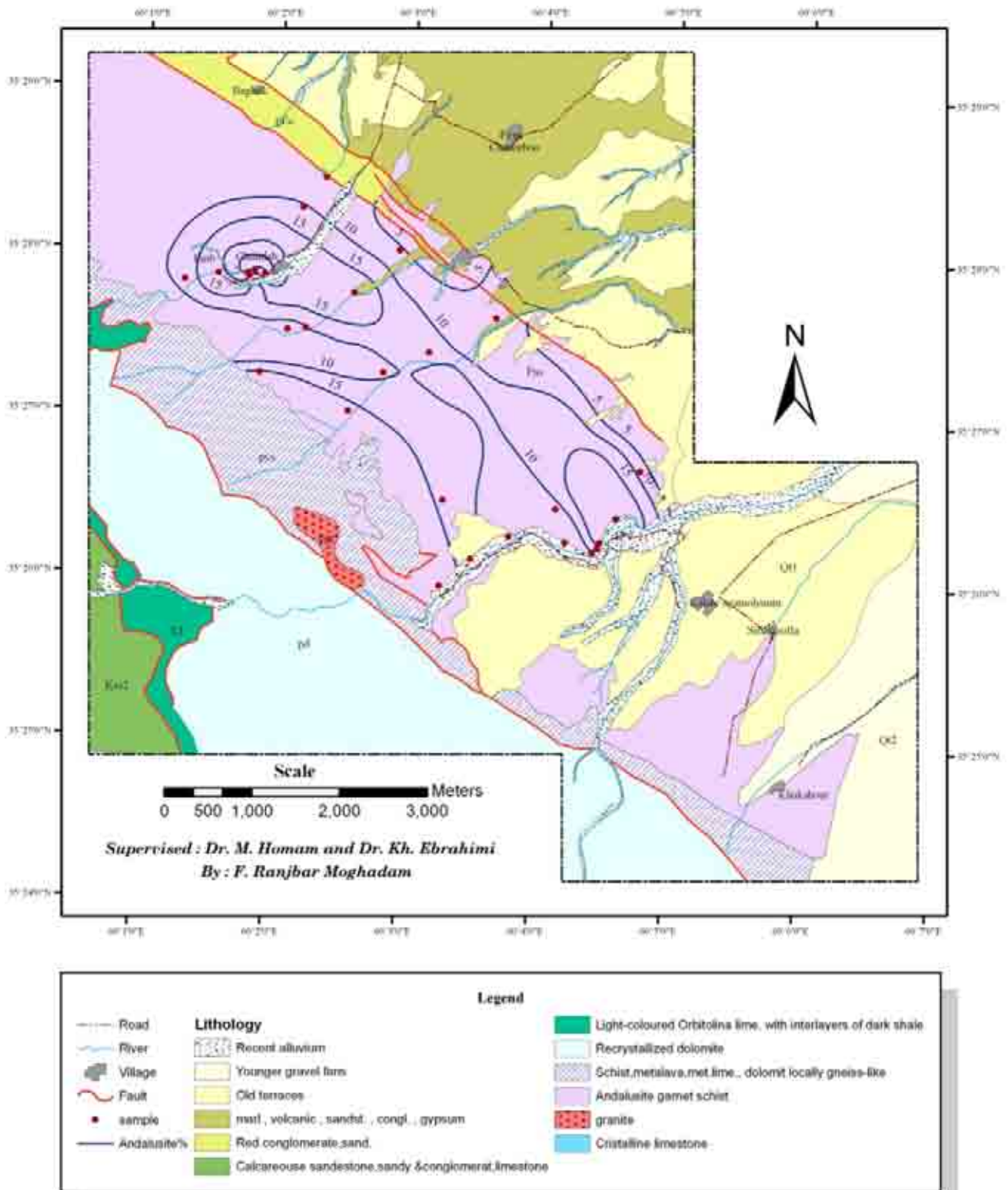
مجموعه‌ای متشکل از ماسه سنگ‌های توفی و گریواکی، ژیبس، مارن، کنگلومرا و سنگ‌های آتشفشانی کرتاسه قرار گرفته‌اند. این مجموعه خود با رسوب‌های پلیو - پلیستوسن و در نهایت آبرفت‌های کواترنر پوشیده شده است. در جنوب نیز مجموعه‌ی شیستی در تماس گسل با مجموعه‌ی آتشفشانی - رسوبی (همبافت سیبک) هستند که شامل کربنات‌های دوباره تبلور یافته، سنگ‌های آتشفشانی دگرگون شده‌ی اسیدی و بازی و گرانیت‌هایی که به‌طور منطقه‌ای بافت گنیسی از خود نشان می‌دهند.

روش کار

برای آزمایش‌های فرآوری، با توجه به نتایج عیارسنجی انجام‌شده روی نمونه‌های آندالوزیت‌شیست جنوب شرقی فریمان (اندازه‌گیری درصدکانی آندالوزیت در نمونه‌های دستی و در مقاطع نازک) (شکل ۱)، نمونه‌برداری به صورت سیستماتیک و در اندازه‌های بزرگ با جرمی بیش از ۲ کیلوگرم از شیست‌های منطقه‌ی قنداب که دارای بیشترین میزان عیار آندالوزیت در منطقه مورد بررسی هستند، انجام شد. جهت تعیین هویت ماده‌ی معدنی و انجام آزمایش‌های فرآوری، نمونه‌ها به مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران (کرج) ارسال شدند.

در این مرکز نخست بررسی‌های کانی‌شناسی و شیمیایی، شامل بررسی‌های سنگ‌نگاری، آنالیزهای شیمیایی به روش XRF و پراش پرتوایکس (XRD) انجام گرفت، و برای بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانی‌شناختی، مقاطع صیقلی و نازک صیقلی از نمونه‌های ارسالی تهیه و با میکروسکوپ نوری قطبشی با نور بازتابی و نور عبوری مورد بررسی قرار گرفتند که به دلیل رعایت ایجاز، خلاصه‌ی نتیجه‌ی این بررسی‌ها در اینجا ارائه می‌شود.

بررسی‌های انجام شده روی مقاطع صیقلی نشان می‌دهد که بیشترین کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی نمونه شامل کوارتز، آندالوزیت و بیوتیت‌اند. آندالوزیت در آندالوزیت شیست‌های مورد بررسی به صورت پورفایروبلاست‌های کشیده و در اندازه‌های ۰٫۲ تا ۴۰ میلی‌متر به چشم می‌خورد. دگرسانی به طور محدود در این کانی مشاهده می‌شود که در اثر آن کانی موسکویت تشکیل شده‌است. تشکیل و رشد ثانویه موجب به



شکل ۱ نقشه‌ی منحنی‌های هم‌عیار آندالوزیت در گستره‌ی بررسی‌های جنوب شرقی فریمان [۱۰].

کوارتز، آلپیت، سیلیمانیت و موسکویت را نام برد. در برخی از موارد گرافیت نیز در این کانی دیده می‌شود. گرافیت در برخی

دام افتادن دیگر کانی‌ها در بلورهای درشت آندالوزیت شده است. از کانی‌هایی که در این بلور به چشم می‌خورد می‌توان

مواقع در درون و یا به همراه آندالوزیت یافت، و گاهی نیز به صورت پراکنده در نمونه دیده می‌شود.

بیشتر کوارتزهای مشاهده شده در مقاطع نازک فاقد شکل بوده و دارای مرزهای مشترک زیاد و بافت متراکم‌اند. این کوارتزها با خاموشی مستقیم و موجی در نمونه‌ها قابل مشاهده هستند، ولی بیشتر آنها دارای خاموشی موجی هستند. اندازه‌ی بلورهای کوارتز دامنه‌ی گسترده‌ای از ۰/۲ تا ۱ میلی‌متر شامل می‌شود. بیوتیت به صورت صفحه‌های کوچک در بیشتر نقاط نمونه مشاهده شد. سمتگیری از ویژگی‌های اصلی این کانی در این نمونه‌هاست. این کانی در اطراف پورفایروبلست‌های آندالوزیت نیز سمتگیری نشان می‌دهد. در اطراف این کانی در برخی نمونه‌ها بر اثر دگرسانی اکسیدهای آهن به صورت هاله تشکیل شده‌اند. بلورهای سیلیمانیت به صورت میله‌ای و استوانه‌ای در درون و حاشیه آندالوزیت‌ها دیده شدند. طول این بلورها کمتر از ۰/۵ میلی‌متر و قطر آنها کمتر از ۰/۱ میلی‌متر است. همچنین در برخی نمونه‌ها، فیبرولیت نیز وجود دارد که به صورت هم‌رشدی با بیوتیت، مسکویت و پلاژیوکلاز، بین بلورهای کوارتز و فلدسپات قلیایی و در مجاورت و روی آندالوزیت‌ها و گارنت‌ها مشاهده می‌شوند در اکثر موارد مرز مشخصی بین کانی‌های در برگیرنده یا همراه و فیبرولیت‌ها وجود ندارد. روابط بافتی در نمونه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که بیشتر فیبرولیت‌های منطقه‌ی مورد بررسی در اثر شکست بیوتیت حاصل شده و شستشوی کاتیونی در مناطق با کرنش بالا، تمرکزی از فیبرولیت‌ها را ایجاد کرده است [۸،۷]. بلورهای گارنت در نمونه‌های مختلف مورد بررسی از نظر اندازه متفاوت‌اند از کاملاً شکل دار تا نیمه شکل‌دار متغیرند. بلورهای گارنت در این شیبست‌ها به صورت کاملاً بی‌شکل نیز دیده می‌شوند همچنین آثار شکستگی در بسیاری از بلورهای گارنت قابل مشاهده است. فلدسپارها، دیگرکانی موجود در نمونه‌ها هستند. این کانی بیشتر همراه با کوارتز و با بافت همسان دانه دیده می‌شود. دگرسانی سریسیستیک و بافت غربالی در اغلب این فلدسپات‌ها مشاهده می‌شود. اندازه‌ی فلدسپارها از ۰/۱ تا ۲ میلی‌متر در تغییر است.

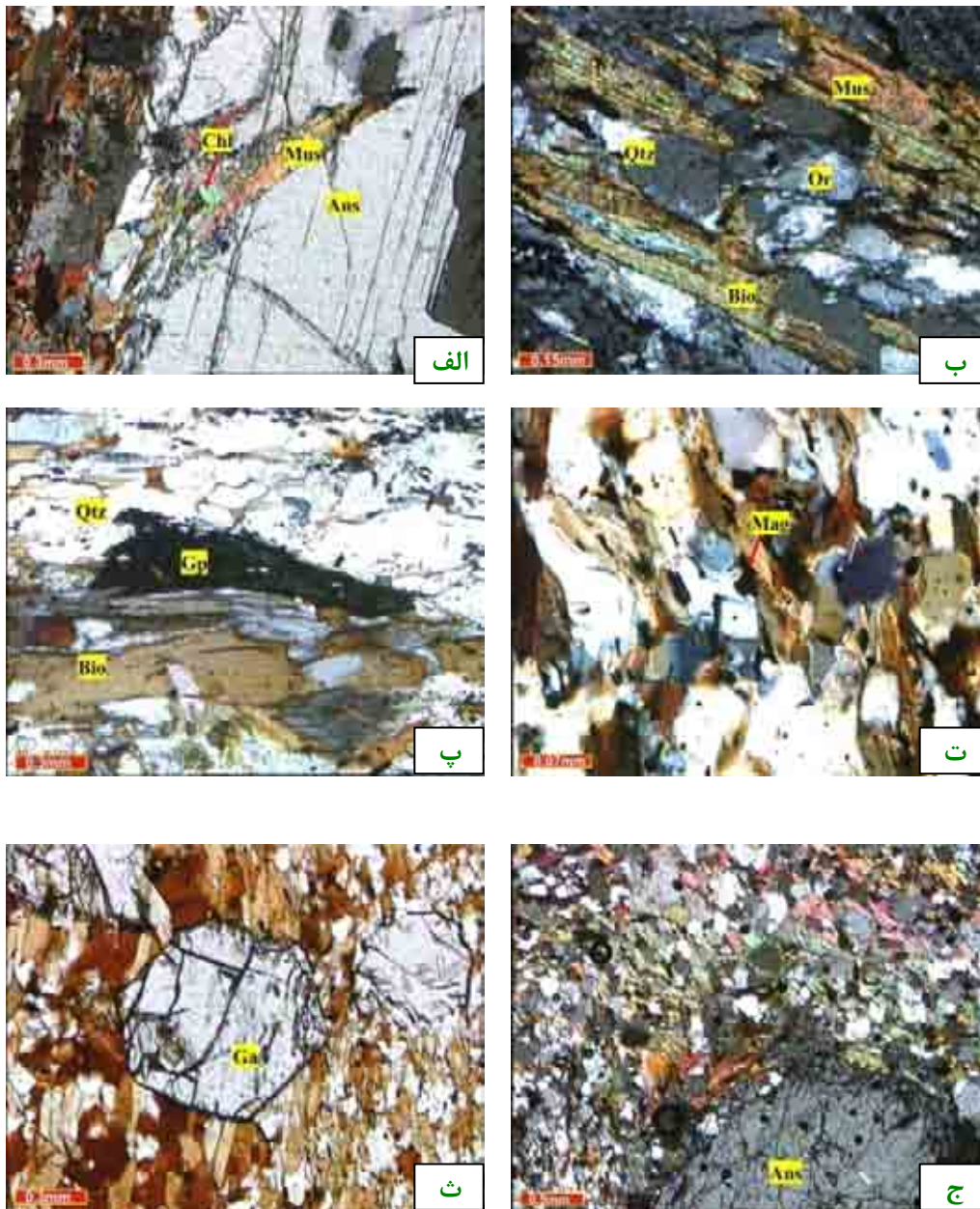
از دیگر کانی‌های موجود می‌توان به کانی‌های موسکویت اولیه و ثانویه و کلریت اشاره کرد. موسکویت به صورت صفحات

کوچک و پراکنده همراه با بیوتیت و در اطراف فلدسپارها و آندالوزیت دیده می‌شود. این کانی در اکثر موارد دارای سمت-گیری است. کلریت یا کلینوکلر که از خانواده‌ی کلریت‌هاست در مناطقی به صورت پراکنده به چشم می‌خورد. این کانی می‌تواند در اثر دگرسانی بیوتیت ایجاد شده باشد. تالک نیز در نمونه‌ها به طور پراکنده مشاهده شد. کانی‌های جزئی که در این نمونه‌ها مشاهده می‌شوند گرافیت، مگنتیت و گوتیت هستند. اندازه‌ی ذرات گرافیت در نمونه از ۰/۲ الی ۰/۷ میلی‌متر در تغییر است. مگنتیت و گوتیت به صورت ذرات بسیار ریز در حد چند صد میلی‌متر در نمونه پراکنده‌اند. در شکل (۲) تصاویری از مقاطع مورد بررسی نشان داده شده‌اند. [۱۰،۹].

از آنجا که تجزیه شیمیایی نمونه یکی از مهم‌ترین ابزارهای لازم برای بررسی و ارزیابی اولیه ماده‌ی معدنی است و می‌تواند همراه با بررسی‌های میکروسکوپی و پراش پرتو ایکس به تعیین هویت ماده‌ی معدنی کمک کند و این مسئله در پیش‌بینی روش و یا روش‌های جدایش بی‌تاثیر نیست [۱۱]، در مرحله‌ی بعد، آنالیز شیمیایی XRF روی نمونه معرف از بیش از ۱۰۰ کیلوگرم نمونه تهیه شده از منطقه‌ی پرعیار قنداب، در آزمایشگاه شیمی مجتمع فرآوری کرج انجام شد که نتیجه‌ی آنالیز در جدول (۱) ارائه شده است.

آزمایش‌های فرآوری

پژوهش‌های گوناگون در مناطق مختلف دنیا نشان داده‌اند که بهره‌برداری صنعتی از آندالوزیت با انجام کانه‌آرایی به روش‌های واسطه‌ی سنگین که با جداسازی مغناطیسی با شدت بالا برای جداسازی عنصر آهن دنبال می‌شود، امکان‌پذیر خواهد شد [۴] در این پژوهش نیز از این روش‌ها برای فرآوری آندالوزیت استفاده شده است. مراحل مختلف این آزمایش‌ها شامل آماده‌سازی و دانه‌بندی نمونه، آزمایش‌های مایع سنگین و نیز مغناطیسی بوده‌اند. پس از بررسی‌های کانی‌شناسی و شیمیایی، با بررسی فعالیت‌های قبلی روی کانسنگ آندالوزیت، دو روش رایج مایع سنگین و آزمایش مغناطیسی برای انجام فرآوری استفاده شد. در جدول (۲) مقادیر مطلوب اکسیدهای موجود در آندالوزیت‌هایی که در حال حاضر در تهیه‌ی دیرگدازها مورد استفاده قرار می‌گیرند که هدف این آزمایش‌ها دستیابی به این مقادیر بوده‌اند، ارائه شده‌اند.



شکل ۲ الف- دگرسانی بلورهای آندالوزیت به کلریت و مسکویت (XPL) ب- سمتگیری ترجیحی در بلورهای کوارتز، فلدسپار و میکا (XPL) پ- گرافیت به موازات کانی‌های کوارتز، میکا سمتگیری نشان می‌دهد (XPL) ت- بلور مگنتیت در بین بلورهای کوارتز و بیوتیت (XPL) ث- پورفیروبلاست گارنت شکل‌دار در زمینه‌ی میکایی که دارای سمتگیری ترجیحی است (PPL) ج- پورفیروبلاست آندالوزیت در زمینه‌ای از کوارتز، فلدسپار، مسکویت، کلریت، بیوتیت (XPL).

جدول ۱ نتایج آنالیز نمونه معرف.

ترکیب	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	MnO	L.O.I
مقدار	۱۸٫۳۸	۶۱٫۰۴	۸٫۵۸	۱٫۰۱	۰٫۵۸	۲٫۴۱	۱٫۱۷	۰٫۲۲	۰٫۲۰	۳٫۹۸	۰٫۱۸	۲٫۰۷

جدول ۲ مقادیر استاندارد اکسیدهای موجود در آندالوزیت مورد مصرف در صنایع دیرگداز.

(%) MgO	(%) CaO	(%) TiO ₂	(%) Fe ₂ O ₃	(%) SiO ₂	(%) Al ₂ O ₃
۰٫۱-۰٫۳	۰٫۱-۰٫۳	۱-۲	۲-۴	۳۷-۴۲	۵۴-۵۷

آنست که بتوان آن را مستقیماً برای تولید فراورده‌ی نهایی مورد استفاده قرار داد. به این علت باید کانی‌های با ارزش از باطله‌ها جدا شوند. در این پژوهش برای تعیین درجه‌ی آزادی کانه از باطله‌های همراه، از روش شمارش میکروسکوپی ذرات، استفاده شد. در این روش دانه‌های آزاد و درگیر کانه با میکروسکوپ قطبشی شمارش شدند و درجه‌ی آزادی کانه از فرمول زیر محاسبه شد:

$$Df = (n_1/n_1 + n_2) * 100$$

که در آن: df ، درجه‌ی آزادی کانه، n_1 = تعداد دانه‌های آزاد کانه، n_2 = تعداد دانه‌های درگیر کانه را نشان می‌دهند. برای بررسی‌های درجه‌ی آزادی، مقاطع نازک- صیقلی از نمونه‌های دسته‌بندی‌شده (بر حسب میکرون) در ابعاد (۱۰۰۰-۵۰۰۰)، (۵۰۰+۳۰۰)، (۱۰۰۰+۵۰۰)، (۳۰۰+۱۵۰) و (۱۵۰-۰) تهیه شدند و مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بررسی‌های درجه‌ی آزادی مقاطع در جدول (۴) دیده می‌شوند.

در آزمایش‌های انجام شده، خردکردن نمونه‌ها با سنگ‌شکن فکی صورت گرفت و این سنگ‌شکن نمونه‌ها را به ابعاد کمتر از ۵ میلی‌متر رساند و سپس با ریفل کردن، به نمونه‌های ۲ کیلوپی تقسیم شدند. سپس نمونه‌های خرد شده برای دانه-بندی سرند شدند. نتایج آنالیز سرندی نمونه‌های مورد آزمایش در جدول (۳) و نمودار آن در شکل (۳) نشان داده شده‌اند.

در این نمودار، دانه‌بندی به صورت انباشتی نشان داده شدند و محور قائم نشان‌دهنده‌ی درصد انباشت مواد گذر کرده از هر سرند (شامل مواد عبور کرده از سرندهای با دهانه بزرگتر) و محور افقی نشان‌دهنده‌ی ابعاد دانه‌هاست و به روش لگاریتمی مدرج شد. چنانکه در جدول (۳) و نمودار حاصل از آن مشاهده می‌شود، ۸۰٪ اندازه‌ی دانه‌ها در این آزمایش دارای ابعاد کمتر از ۳۰۰۰ میکرون (۳ میلی‌متر) اند و ۵۰٪ آنها در دانه‌بندی انجام شده، قطری کمتر از ۱۵۰۰ میکرون دارند. در مرحله بعد تعیین درجه آزادی روی نمونه‌های آندالوزیت انجام شد. در بیشتر کانسنگ‌ها انباشت کانی با ارزش کمتر از

جدول ۳ نتایج آنالیز کامل ابعادی دانه خردشده.

ردیف	اندازه (میکرون)	جرم		جرم انباشتی (%)
		درصد	باقیمانده	
۱	۱۰۰۰	۶۹٫۲	۶۹٫۲	۳۰٫۸
۲	۵۰۰	۸٫۸	۷۸٫۰	۲۲٫۰
۳	۳۰۰	۴٫۰	۸۲٫۰	۱۸٫۰
۴	۱۵۰	۵٫۲	۸۷٫۲	۱۲٫۸
۵	-۱۵۰	۱۲٫۸	۱۰۰	۰٫۰
جمع		۱۰۰	۲۰۰۰	



شکل ۳ نمودار آنالیز دانه بندی نمونه خرد شده.

جدول ۴ درجه‌ی آزادی آندالوزیت بر حسب درصد در نمونه.

آندالوزیت		اندازه‌ی ذرات (میکرون)	نام کانی
درگیر با کانی‌های باطله (%)	آزاد (%)		
۶۵	۳۵	+۵۰۰-۱۰۰۰	EM-TP-89-87,88
۵۴	۴۶	-۱۰۰۰+۵۰۰	EM-TP-89-89,90
۴۲	۵۸	-۵۰۰+۳۰۰	EM-TP-89-91,92
۳۰	۷۰	-۳۰۰+۱۵۰	EM-TP-89-93,94

شکل‌های (۵) تا (۷) ارائه شده است.

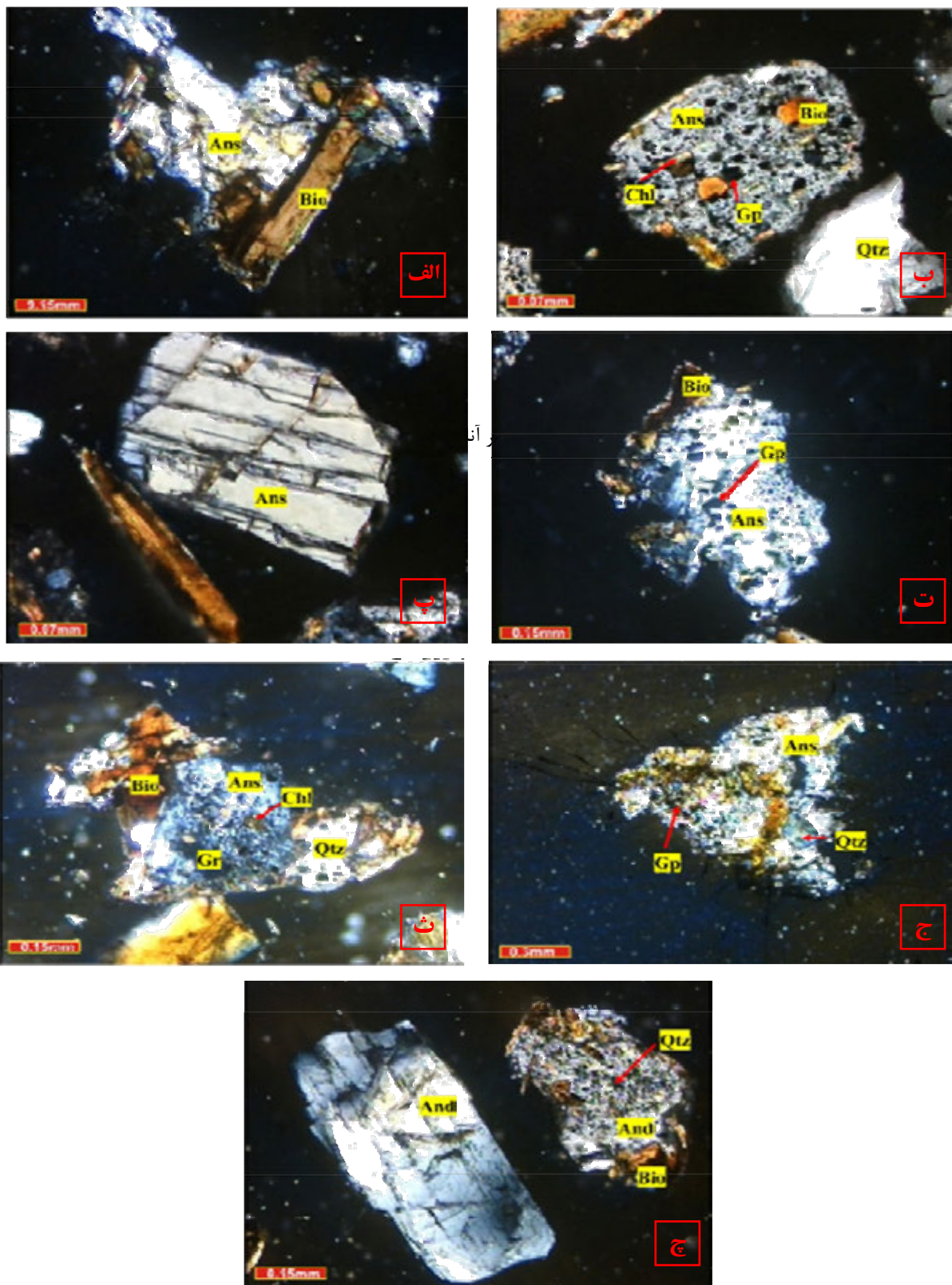
در آزمایش‌های فرآوری عیار محصول پرعیار شده و بازیابی آن پارامترهایی هستند که همراه یکدیگر برای ارزیابی فنی روش‌های پرعیارسازی استفاده می‌شوند. منظور از بازیابی (recovery) که تحت عنوان راندمان عملیات نیز گفته می‌شود نسبت وزنی عنصر (یا کانی) با ارزش در محصول پرعیار شده به مقدار آن در بار اولیه است. بازیابی با بیشترین دقت به روش محصول پرعیار شده و وزن عنصر با ارزش در بار اولیه است. چنان‌که در جدول مشاهده می‌شود میان عیار Al_2O_3 پس از آزمون مایع سنگین از عیار اولیه حدود ۱۹ درصد به حداکثر ۴۲/۴٪ و مقدار بازیابی آن به حدود ۳۸٪ رسید. میزان عیار SiO_2 و Fe_2O_3 نیز به ترتیب از مقادیر ۶۱ درصد و ۸/۵۸ درصد در نمونه‌ی اولیه به ۴۴/۵ و ۷٪ کاهش یافته‌اند.

از جداکننده‌های مغناطیسی معمولاً برای پرعیارسازی کانی‌های مغناطیسی و آهن‌زدایی بعضی از مواد معدنی استفاده می‌شود. این جداکننده‌های مغناطیسی به دو نوع جداکننده با شدت کم و با شدت زیاد رده‌بندی شده که هر یک از آنها خود به انواع خشک و تر تقسیم می‌شوند [۱۲]. در این روش از جداکننده‌ی مغناطیسی خشک دیسکی با شدت بالا استفاده شد در جدا کننده‌ی نوع دیسکی کانی‌های پارامغناطیسی نسبت به تاثیرپذیری مغناطیسی آنها جدا می‌شوند، به نحوی که دانه‌های با بیشترین تاثیرپذیری مغناطیسی اولین محصول و دانه‌های با کمترین تاثیرپذیری مغناطیسی آخرین محصول را تشکیل می‌دهند. با این جداکننده می‌توان موادی را که تاثیرپذیری مغناطیسی آنها تنها کمی با یکدیگر اختلاف دارند، با دقت زیاد از هم جدا کرد [۱۲].

این بررسی‌ها، نشان می‌دهند که بیشترین درگیری‌ها از نوع تماسی (بین بلورهای آندالوزیت، بیوتیت و کوارتز) و ادخال‌های (گرافیت، بیوتیت، کلریت و کوارتز) موجود در آندالوزیت‌ها است. (شکل ۳) اندازه‌ی بیشتر این ادخال‌ها کمتر از ۰/۰۵ میلی‌متر است. آندالوزیت و بیوتیت از حاشیه با هم درگیر هستند. کوارتز به صورت ادخال در آندالوزیت و درگیری از حاشیه‌هاست. درگیری‌ها در دسته‌های ذرات با ابعاد بزرگتر به صورت درگیری آندالوزیت با چند کانی است (کوارتز- بیوتیت- کلریت- گرافیت) و در دسته‌های با ابعاد کوچکتر تعداد کانی‌های درگیر با آندالوزیت کمتر شده است و درگیری‌ها از نوع سه‌تایی (درگیری سه کانی با هم) و دوتایی است.

با کاهش ابعاد ذرات درجه‌ی آزادی کانی‌ها افزایش یافته است. لازم به یادآوری است که ادخال‌های بسیار ریزی از کوارتز، کلریت، بیوتیت و گرافیت در آندالوزیت وجود دارند که با کاهش ابعاد ذرات از آندالوزیت جدا نشده و در کل باعث شده‌اند که درجه‌ی آزادی آندالوزیت به حد مطلوب نرسد. نوع درگیری‌ها در هر دسته، در شکل (۴) نمایش داده شده است.

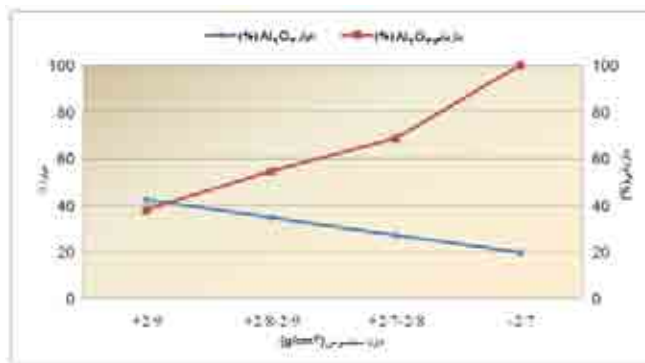
مرحله‌ی بعدی آزمایش‌های فرآوری شامل یک مرحله فرآوری به روش مایع سنگین (heavy media) و یک مرحله آزمون مغناطیسی خشک بوده است. برای آزمایش مایع سنگین، روی نمونه‌های مورد بررسی، یکی از نمونه‌های معرف ۲ کیلویی با سنگ‌شکن استوانه‌ای آزمایشگاهی به ابعاد کمتر از ۱ میلی‌متر رسانده شد. سپس یک نمونه با جرم تقریبی حدود ۵۰۰ گرمی از آن انتخاب و آزمون‌های مایع سنگین روی آن انجام گرفت. پیش از آزمایش، به علت تاثیر منفی نرمه‌ها روی جدایش مایع سنگین، نمونه‌ی مورد نظر با سرند ۳۸ میکرون شستشو داده شد. مایع سنگین انتخاب شده بروموفرم با چگالی ۲/۹ گرم بر سانتی‌مترمکعب بود. آزمون‌های اولیه در سه چگالی ۲/۷، ۲/۸، ۲/۹ انجام شد که نتایج آن در جدول (۵) و نمودارهای



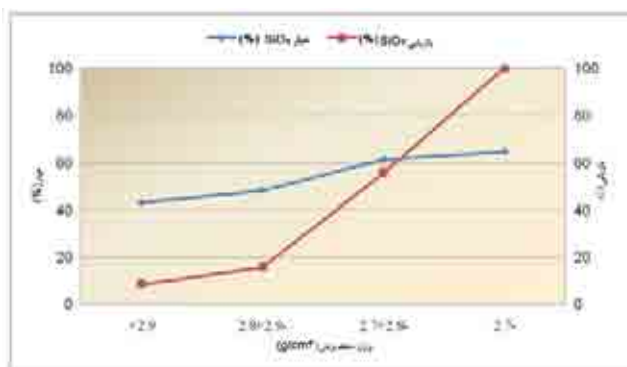
شکل ۴ الف- درگیری تماسی آندالوزیت با بیوتیت ب- ادخال‌های گرافیت، بیوتیت و کلریت در آندالوزیت پ- بلور آندالوزیت آزاد ت- درگیری تماسی آندالوزیت با بیوتیت و ادخال‌های گرافیت در آندالوزیت ث - درگیری تماسی آندالوزیت با کوارتز و بیوتیت و ادخال‌های کلریت و گرافیت در آندالوزیت ج- ادخال‌های کوارتز و گرافیت در آندالوزیت چ- بلور آندالوزیت آزاد (چپ) آندالوزیت درگیر با بیوتیت و ادخال کوارتز در آندالوزیت (راست) (تصاویر در نور عبوری XPL گرفته شده است)

جدول ۵ نتایج آزمون‌های مایع سنگین روی نمونه‌های با ابعاد ۱- میلی‌متر.

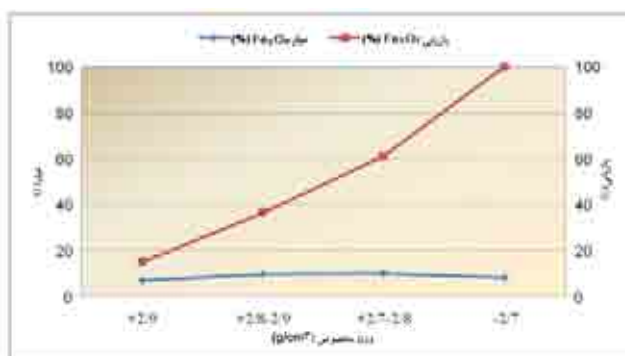
Fe ₂ O ₃ (%)		SiO ₂ (%)		Al ₂ O ₃ (%)		وزن		وزن مخصوص (g/cm ³)	ردیف
بازیابی انباشتی	عیار انباشتی	بازیابی انباشتی	عیار انباشتی	بازیابی انباشتی	عیار انباشتی	درصد	گرم		
۱۴٫۹۹	۷	۱۲٫۶۶	۴۴٫۵	۳۸٫۰۱	۴۲٫۴	۱۷٫۶	۸۴٫۹	+۲٫۹	۱
۳۶٫۲۸	۹٫۶۶	۲۳٫۱۵	۴۶٫۴۰	۵۴٫۶۳	۳۴٫۷۵	۱۳٫۲	۶۴	-۲٫۹+۲٫۸	۲
۶۱٫۰۶	۱۰٫۱۶	۴۱٫۵۹	۵۲٫۱۴	۶۸٫۵۴	۲۷٫۲۶	۱۸٫۵	۸۹٫۲	-۲٫۹+۲٫۷	۳
۱۰۰	۸٫۲۰	۱۰۰	۶۱٫۷۹	۱۰۰	۱۹٫۶۰	۵۰٫۷	۲۴۵	-۲٫۷	۴



شکل ۵ نمودار عیار و بازیابی Al₂O₃ نسبت به چگالی‌های مختلف. در این آزمون میزان عیار Al₂O₃ با افزایش چگالی ماده‌ی سنگین افزایش داشته است و به حدود ۴۱٪ رسیده است.



شکل ۶ نمودار عیار SiO₂ نسبت به چگالی‌های مختلف. در این آزمایش عیار SiO₂ چنان‌که مورد نظر بوده است با افزایش چگالی ماده‌ی سنگین از حدود ۶۲٪ به ۴۲٪ کاهش داشته است.



شکل ۷ نمودار عیار Fe₂O₃ در نسبت به چگالی‌های مختلف. در این آزمون با افزایش چگالی ماده‌ی سنگین تغییر مشخصی در عیار Fe₂O₃ ایجاد نشده است.

دست آمده با این روش برای Al_2O_3 برابر ۴۴/۹۴٪ و مقادیر عیار SiO_2 و Fe_2O_3 به ترتیب ۴۲/۸۶٪ و ۷/۲۵٪ است. تا این مرحله نتایج مورد نظر، مبنی بر دستیابی به عیار استاندارد، حاصل نشد. برای بررسی بیشتر و به ویژه مشاهده‌ی تاثیر دانه‌بندی روی فرآورده‌ها، نمونه‌های سنگین‌تر از چگالی ۲/۹، بین ۲/۹ و ۲/۸، محصول مغناطیسی و نامغناطیسی به ۳ محدوده دانه‌بندی ۵۰۰+، ۳۰۰+، ۵۰۰- و ۳۰۰- میکرون تقسیم شدند و تاثیر دانه‌بندی در این سه بخش مشاهده شد. نتایج این مرحله در جدول (۸) و شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) ارائه شده‌اند. چنان‌که در جدول (۸) مشاهده می‌شود بیشترین میزان عیار Al_2O_3 در گستره‌ی دانه‌بندی ۳۰۰+۵۰۰ میکرون و در نتیجه آزمون مایع سنگین با چگالی ۲/۹ + به دست آمد.

در این پژوهش، آزمون مغناطیسی روی نمونه‌ی اولیه کمتر از ۱ میلی‌متر انجام شد که نتیجه‌ی آن در جدول (۶) ارائه شده است. چنان‌که در نتایج ارائه شده دید می‌شود، در بخش مغناطیسی عیار Fe_2O_3 حدود ۱۸/۵٪ و میزان بازیابی ۱۷/۶٪ است. عیار Al_2O_3 نیز در محصول نامغناطیسی افزایش بسیار کمی داشته و به ۱۹/۲۸٪ رسیده است.

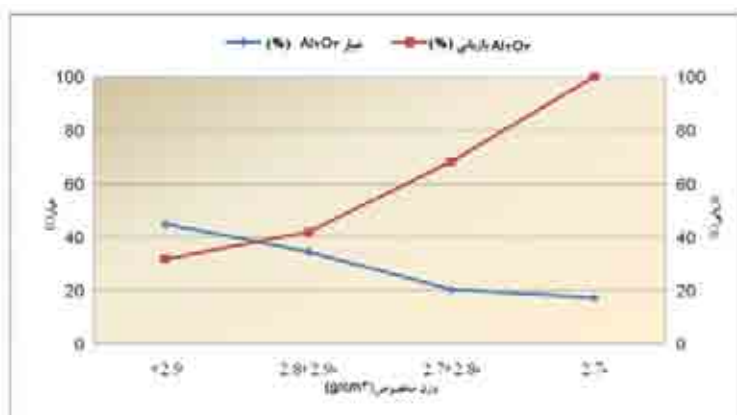
روی محصول نامغناطیسی به دست آمده آزمون‌های مایع سنگین در همان سه چگالی انجام شد که نتایج آن به صورت جدول (۷) و نمودارهای (۸) تا (۱۰) نشان داده شد. در جدول (۷) ملاحظه می‌شود که در آزمون مایع سنگین با چگالی ۲/۹ + بیشترین افزایش در عیار Al_2O_3 و بیشترین کاهش در مقادیر اکسیدهای SiO_2 و Fe_2O_3 حاصل شده است. بیشترین عیار به

جدول ۶ نتیجه تست مغناطیسی شدت بالای خشک بر روی نمونه اولیه.

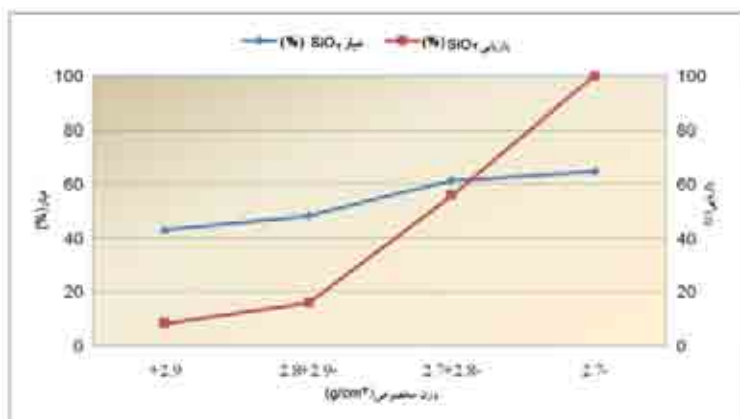
ردیف	محصول	وزن		Al_2O_3 (%)		SiO_2 (%)		Fe_2O_3 (%)	
		گرم	درصد	عیار	بازیابی	عیار	بازیابی	عیار	بازیابی
۱	مغناطیسی	۸۹٫۶	۷٫۸	۱۷٫۴	۷٫۰۹	۴۸٫۱	۶٫۰۱	۱۸٫۵	۱۷٫۶
۲	غیر مغناطیسی	۱۰۵٫۷	۹۲٫۲	۱۹٫۲۸	۹۲٫۹۱	۶۳٫۸	۹۳٫۹۹	۷٫۳	۸۲٫۳۱

جدول ۷ نتایج آزمون‌های مایع سنگین روی نمونه‌ی محصول نامغناطیسی.

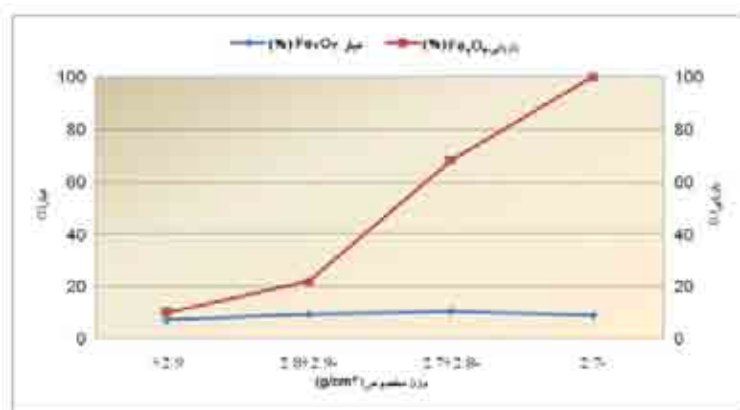
ردیف	چگالی (g/cm ³)	چگالی		Al_2O_3 (%)		SiO_2 (%)		Fe_2O_3 (%)	
		گرم	درصد	عیار انباشتی	بازیابی انباشتی	عیار انباشتی	بازیابی انباشتی	عیار انباشتی	بازیابی انباشتی
۱	+۲٫۹	۳۷	۴۲٫۴	۴۴٫۹۴	۳۱٫۹۶	۴۲٫۸۶	۸٫۲۲	۷٫۲۵	۱۰٫۰۶
۲	-۲٫۹+۲٫۸	۲۶	۳۴٫۷۵	۳۴٫۶۰	۴۱٫۸۹	۴۷٫۹۹	۱۵٫۶۸	۹٫۲۸	۲۱٫۹۲
۳	-۲٫۹+۲٫۷	۱۱۲	۲۷٫۲۶	۲۰٫۳۰	۶۸٫۲۸	۶۱٫۲۴	۵۵٫۵۷	۱۰٫۳۹	۶۸٫۱۸
۴	-۲٫۷	۱۲۴	۱۹٫۶۰	۱۷٫۴۰	۱۰۰	۶۴٫۵۰	۱۰۰	۸٫۹۲	۱۰۰



شکل ۸ عیار و بازیابی محصول نامغناطیسی نسبت به چگالی‌های مختلف. آزمون مایع سنگین روی محصول نامغناطیسی به ویژه در چگالی‌های بالاتر، باعث افزایش عیار Al_2O_3 تا حد ۴۲ درصد شده است.



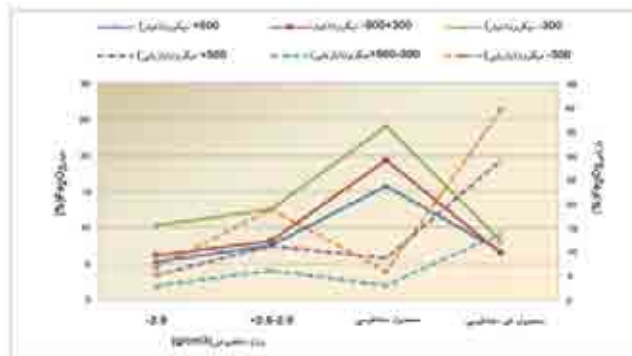
شکل ۹ عیار و بازیابی SiO_2 محصول نامغناطیسی نسبت به چگالی‌های مختلف. عیار SiO_2 در آزمون با مایع سنگین با چگالی $2/9 +$ به 41% کاهش یافته است.



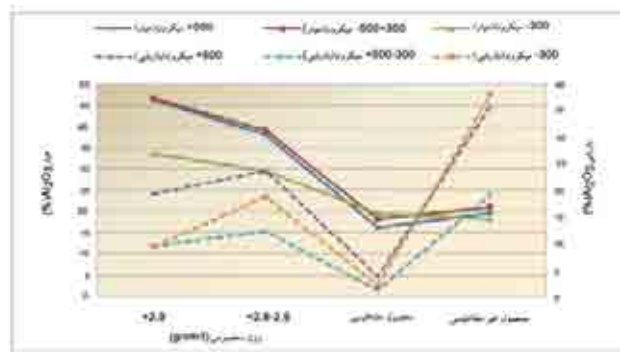
شکل ۱۰ عیار و بازیابی Fe_2O_3 محصول مغناطیسی نسبت به چگالی‌های مختلف. آزمون مایع سنگین روی عیار این محصول تاثیر زیادی نداشته است.

جدول ۸ نتایج عیارسنجی محصولات در سه محدوده ابعادی.

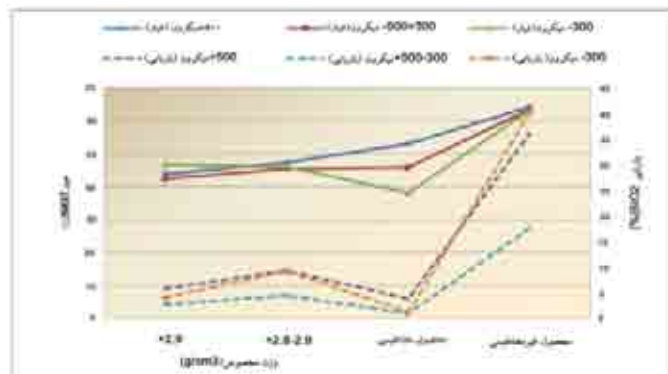
Fe_2O_3 (%)		SiO_2 (%)		Al_2O_3 (%)		وزن			دانه بندی (میکرون)	چگالی (g/cm^3)	ردیف
بازیابی (انباشتی)	عیار (انباشتی)	بازیابی (انباشتی)	عیار (انباشتی)	بازیابی (انباشتی)	عیار (انباشتی)	درصد به کل	درصد	گرم			
۵,۱۲	۵,۲۵	۵,۸۰	۴۴	۱۹,۲۵	۴۶,۲۶	۸,۲	۴۶,۳	۳۳,۶	+۵۰۰	+۲,۹	۱
۲,۹۵	۶,۱۹	۲,۷۳	۴۲,۴۱	۹,۴۷	۴۶,۶۳	۴,۰	۲۲,۶	۱۶,۴	-۵۰۰+۳۰۰		
۶,۷۵	۱۰,۳۳	۴,۱۳	۴۶,۷	۹,۳۴	۳۳,۵۱	۵,۵	۳۱	۲۲,۵	-۳۰۰		
۱۱,۱۷	۷,۵۴	۹,۳۷	۴۷,۴۲	۲۳,۶۸	۳۷,۹۶	۴,۱	۳۰,۸	۱۶,۹	+۵۰۰	-۲,۹+۲,۸	۲
۶,۱۲	۸,۲۰	۴,۵۵	۴۵,۵۷	۱۲,۳۰	۳۹,۰۵	۲,۲	۱۶,۶	۹,۱	-۵۰۰+۳۰۰		
۱۸,۸۱	۱۲,۵۱	۹,۲۳	۴۶,۱۰	۱۸,۶۹	۲۹,۵۳	۶,۹	۵۲,۶	۲۸,۸	-۳۰۰		
۸,۶۶	۱۵,۷۹	۳,۸۲	۵۳,۱۸	۳,۸۰	۱۶,۱۹	۴,۵	۵۷,۴	۴۳,۷	+۵۰۰	محصول مغناطیسی	۳
۳,۰۸	۱۹,۳۴	۰,۹۶	۴۵,۸۴	۱,۲۴	۱۸,۲	۱,۳	۱۶,۷	۱۲,۷	-۵۰۰+۳۰۰		
۵,۹۵	۲۴,۰۸	۱,۲۴	۳۸,۱۷	۲,۰۵	۱۹,۴۲	۲,۰	۲۵,۹	۱۹,۷	-۳۰۰		
۲۸,۹۶	۶,۷۵	۳,۶۱۴	۶۴,۳۵	۳۵,۸۸	۱۹,۵۴	۳۵,۱	۳۸,۱	۶۷,۲	+۵۰۰	محصول غیر مغناطیسی	۴
۱۳,۸۴	۶,۵۲	۱۷,۶۵	۶۳,۵۱	۱۹,۱۲	۲۱,۰۴	۱۷,۴	۱۸,۹	۳۷,۷	-۵۰۰+۳۰۰		
۳۹,۵۱	۸,۱۵	۴,۰۲۰	۶۳,۳۴	۳۷,۹۱	۱۸,۲۷	۳۹,۷	۴۳,۱	۸۶,۱	-۳۰۰		



شکل ۱۱ نمودار توزیع و عیار بازیابی Fe_2O_3 محصولات مختلف دانه‌بندی شده. در گستره‌ی ابعادی $500 +$ میکرون و در چگالی $2/9 +$ بیشترین کاهش در عیار Fe_2O_3 حاصل شده و به حدود 5% رسیده است.



شکل ۱۲ نمودار توزیع عیار و بازیابی Al_2O_3 محصولات مختلف دانه‌بندی شده. در گستره‌ی ابعادی $500 +$ میکرون و $300 + 500 -$ میکرون در آزمون مایع سنگین با چگالی $2/9 +$ عیار Al_2O_3 به حدود 47% افزایش یافته است.



شکل ۱۳ نمودار توزیع عیار و بازیابی SiO_2 فراورده‌های مختلف دانه‌بندی شده. بیشترین کاهش در عیار SiO_2 در گستره‌ی ابعادی $300 + 500 -$ میکرون و در چگالی $2/9 +$ مایع سنگین بوده و به حدود 41% رسیده است.

برداشت

مشاهده و بررسی نتایج آزمون‌های انجام شده و نیز گزارش کانی‌شناسی، تأیید کننده‌ی این است که فرآوری اقتصادی آندالوزیت‌های منطقه قنداب واقع در جنوب‌شرقی فریمان امکان‌پذیر است و روش مناسب برای فرآوری نمونه آندالوزیت برای رسیدن به عیار موردنظر (حدود 54%) به این صورت در نظر گرفته شد که نخست نمونه‌ی اولیه برای رسیدن به درجه-

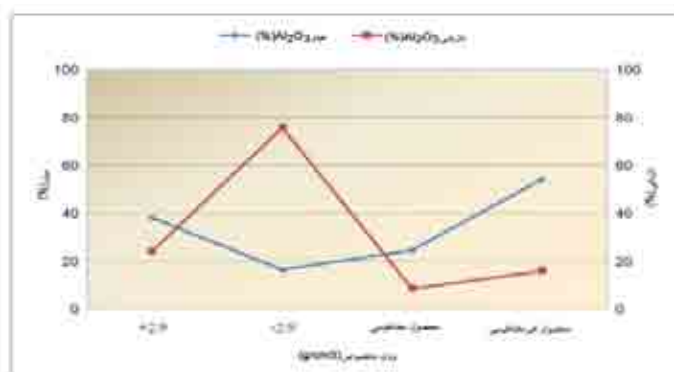
ی آزادی مناسب تا اندازه‌ی کمتر از 500 میکرون خرد شد، و سپس برای افزایش عیار آندالوزیت روی نمونه با استفاده از مایع سنگین با چگالی $2/9$ گرم بر سانتی‌متر مکعب آزمون مایع سنگین انجام شده و در مرحله‌نهایی برای حذف ترکیب‌های آهن روی محصول سنگین، آزمون مغناطیس خشک با شدت بالا انجام شود. نتایج این آزمون‌ها در جدول (۹) و شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) نمایش داده شده‌اند. چنان‌که در جدول (۹)

نظر گرفته شده جهانی (جدول ۲) همخوانی دارد. تغییرات دیگر در اکسیدهای عناصر شامل کاهش مشخص در مقدار درصد اکسیدهای CaO و Na₂O و K₂O است به طوری که مقدار CaO از ۰/۵۸٪ به ۰/۳۱٪، Na₂O از ۱/۱۷٪ به ۰/۲۵٪ و K₂O از ۳/۹۸٪ به ۰/۳۷٪ تقلیل یافته است. کنسانتره آندالوزیت با ویژگی خواسته شده حدود ۵ درصد خوراک اولیه و بخش نامغناطیسی آن حدود ۶ درصد نمونه‌ی اولیه را تشکیل می‌دهد. آندالوزیت مناسب حدود ۱۶ درصد محتوای خوراک اولیه و بخش مغناطیسی آن حدود ۸ درصد خوراک اولیه و مجموعاً ۲۴ درصد محتوای آندالوزیت اولیه را تشکیل می‌دهد.

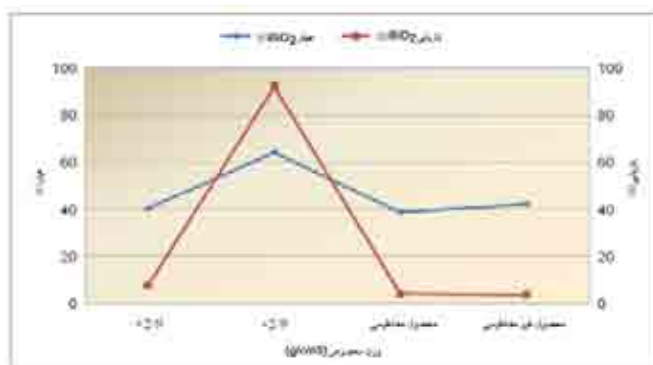
مشاهده می‌شود با آزمون مایع سنگین با چگالی +۲/۹ عیار Al₂O₃ به ۳۸/۰۵٪ افزایش یافته است. پس از آزمون مغناطیسی خشک محصول نامغناطیسی نهایی دارای عیار بیشینه‌ی (۵۴/۱۳٪) Al₂O₃ بوده است. عیار SiO₂ در این محصول به ۴۲/۱۵٪ و عیار Fe₂O₃ به ۱/۵۱٪ کاهش یافته است. با توجه به جدول (۱۰) ملاحظه می‌شود که نتایج XRF روی محصول نامغناطیسی نهایی نشان‌دهنده‌ی این است که میزان Al₂O₃ از ۱۸/۳۸٪ در محصول اولیه به بیش از ۵۴٪ افزایش یافته و عیار Fe₂O₃ از ۸/۵۸٪ به حدود ۱/۵٪ و عیار SiO₂ از ۶۱/۰۴٪ در محصول اولیه به حدود ۴۲٪ در محصول نهایی کاهش داشته‌اند که این مقادیر با استانداردهای در

جدول ۹ نتایج آزمون‌های مایع سنگین با چگالی ۲/۹ گرم بر سانتیمتر مکعب و مغناطیسی خشک با شدت بالا.

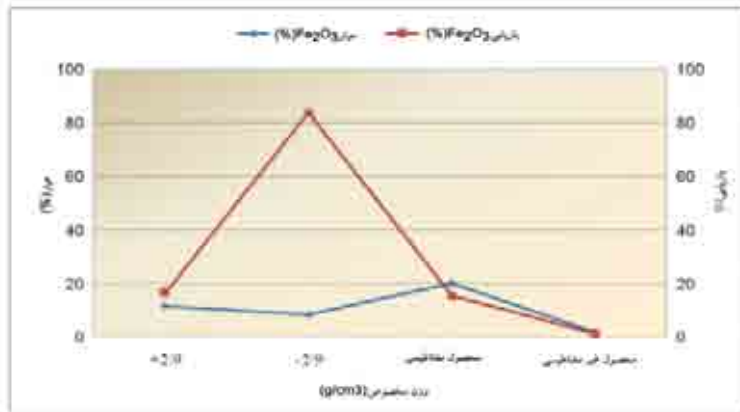
Fe ₂ O ₃ (%)		SiO ₂ (%)		Al ₂ O ₃ (%)		جرم		چگالی (g/cm ³)	ردیف
بازیابی	عیار	بازیابی	عیار	بازیابی	عیار	درصد	گرم		
۱۶/۲۵	۷/۸۹	۷/۸۹	۴۰/۳۱	۲۴/۲۲	۳۸/۰۵	۱۲	۲۴	+۲/۹	۱
۸۳/۷۵	۸/۰۷	۹۲/۱۱	۶۴/۲	۷۵/۷۸	۱۶/۲۴	۸۸	۱۷۶	-۲/۹	۲
۱۵/۲۷	۱۹/۹۶	۴/۱۰	۳۸/۷۵	۸/۳۹	۲۴/۳۹	۶/۴۹	۶	محصول مغناطیسی	۳
۰/۹۸	۱/۵۱	۳/۷۹	۴۲/۱۵	۱۵/۸۳	۵۴/۱۳	۵/۵۱	۵/۱	محصول غیر مغناطیسی (نهایی)	۴



شکل ۱۴ نمودار توزیع عیار و بازیابی Al₂O₃ محصولات مختلف. بیشترین میزان عیار Al₂O₃ در بخش نامغناطیسی حاصل از آزمون نمونه‌ی مغناطیسی و برابر ۵۴/۱۳٪ است.



شکل ۱۵ نمودار توزیع عیار و بازیابی SiO₂ فرآورده‌های مختلف. میزان عیار SiO₂ پس از آزمایش مایع سنگین، در محصول مغناطیسی و نامغناطیسی حاصل از تست مغناطیس تفاوت زیادی ندارد و حدود ۴۱٪ است.



شکل ۱۶ نمودار توزیع عیار و بازیابی Fe₂O₃ محصولات مختلف. میزان عیار Fe₂O₃ در بخش غیرمغناطیسی حاصل از تست مغناطیسی.

جدول ۱۰ آنالیز کامل محصول نامغناطیسی (نهایی).

L.O.I.(%)	MnO(%)	K ₂ O(%)	P ₂ O ₅ (%)	Na ₂ O(%)	CaO(%)	Cr ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)
۰٫۷۵	۰٫۱۵	۰٫۳۷	۰٫۲۰	۰٫۲۵	۰٫۳۱	۰٫۱۹	۱٫۵۱	۴۲٫۱۵	۵۴٫۱۳

beneficiation", metal mine 1994, 213(3) : 36-42 (in chiness)

[۷] همام م.، قائمی ف.، "سازوکار تشکیل فیبرولیت در هاله دگرگونی گرانیت مشهد"، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۱ (۱۳۸۷) ص ۱۶۸-۱۵۹

[۸] موذن م.، همام م.، قادری زفره ع.، "بررسی مسئله فیبرولیت و شرایط تشکیل آن در هاله دگرگونی گابرو- دیوریت چاه قند، شمال شرق نی ریز"، مجله باور شناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۱ (۱۳۸۴) ص ۱۲۸-۱۳۱

[۹] امیرچخماقی ز.، "بررسی پتروژنز سنگ‌های دگرگونی غرب و شمال غرب قنداب با نگرشی ویژه بر پتانسیل اقتصادی آندالوزیت شیست‌ها"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد. (۱۳۹۰).

[۱۰] رنجبر ف.، "پتروژنی و پتروژنز سنگ‌های دگرگونی شرق و جنوب شرق قنداب با نگرشی ویژه بر پتانسیل اقتصادی آندالوزیت شیست‌ها"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۸۹)

[۱۱] نعمت‌اللهی ح.، "کانه آرائی (جلد ۲)", انتشارات دانشگاه تهران، (۱۳۸۱)

[۱۲] رضایی ب.، "تکنولوژی فرآوری مواد معدنی (پریارسازی به روش مغناطیسی)", انتشارات دانشگاه صنعتی (۱۳۷۸).

قدردانی

نگارندگان مقاله، از مدیر و کارشناسان محترم موسسه فرآوری مواد معدنی ایران (کرج) آقایان مهندس عسکرزاده، مهندس کریمی و مهندس آرام به خاطر آزمایش‌های فرآوری، تشکر و قدردانی می‌کنند.

مراجع

[۱] کوهساری ا.، مجتهدزاده ح.، دهقانی احمدآباد م.، "کانی-شناسی و نحوه تشکیل کانسارهای نسوز میشدوان بافق، ایران مرکزی"، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۲ (۱۳۸۹) ص ۲۵۵-۲۶۶.

[۲] حسینی ع.، "مواد اولیه فرآورده‌های نسوز"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۸۶).

[۳] شوله و.، "مواد دیرگداز، سرامیک‌های دیرگداز"، ترجمه محمودیان، ط. نشر جانان. (۱۳۷۸).

[4] Zhang Z., Sang S., Yang D., Yang D., "Dense medium seperation of coarse andalusite using waste iron powder as solid medium", Department of resources engineering wuham university of sciences & technology, 2004.

[5] Ling-chu Z., Yi-min "Flotation seperation of XiXia andalusite ore", College of resources and Environmentaly engineering Wuham university of sciences & technology ,29 october,2010

[6] Shao-Zhu X., Qi-Gai F., Rou-Zhou H., Yo Z., "andalusite family mineral resources and