

## فراوری آندالوزیت سرتل جنوب خراسان

منوچهر اولیازاده

استادیار گروه مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

پرویز پورقهرمانی

مریی گروه معدن - دانشگاه سهند

(تاریخ دریافت ۷۶/۷/۲۳، تاریخ تصویب ۷۶/۹/۲۲)

### خلاصه

کانی آندالوزیت، به خاطر خصوصیات دیرگدازی ویژه اش می تواند نقش مهمی را در صنعت روبه رشد فولاد و نیز تولیدات فلزات غیرآهنی ایفاء کند. ذخایر پراکنده زیادی از آندالوزیت در کشور ما وجود دارند که در سالهای اخیر فعالیتهای اکتشافی زیادی برای شناسایی و ارزیابی آنها انجام شده است، اما فراوری و کاربرد آن هنوز در کشور ما تجربه نشده است. در این مقاله، مطالعات انجام شده برای شناسایی و فراوری ذخیره آندالوزیت سرتل واقع در جنوب خراسان ارائه شده است. هدف از این مطالعات بررسی قابلیت تولید آندالوزیت مورد مصرف در صنایع نسوز بوده است که با شناسائی کامل نمونه های آندالوزیت آغاز و بر روی پرعیار سازی آن با روشهای متداول فراوری مانند ثقلی و مغناطیسی متمرکز گردیده است. نتایج کانی شناسی نشان داد که عیار آندالوزیت به طور متوسط در دویخش شرقی و غربی ناحیه مرکزی ذخیره معدنی به ترتیب ۸ و ۱۰ درصد می باشد. کانیهای باطله اصلی کوارتز، میکا و اکسیدهای آهن میباشند. نتایج فراوری آندالوزیت سرتل نشان داد که ذرات کوچکتر از ۵۰۰ میکرون نرمه محسوب شده و باید کاملاً از بلورهای آندالوزیت جدا شوند. برای اینکار علاوه بر سرنده کردن باید از عملیات سایش نیز بهره جست. سایش ماده معدنی باعث جدا شدن ذرات میکا و شیسست از سطوح کانی آندالوزیت شده و جدایش آندالوزیت را در عملیات بعدی بهبود می بخشد. با استفاده از جداکننده مغناطیسی با شدت زیاد و جدایش ثقلی پس از جدایش نرمه می توان محصولی با ۵۵ درصد اکسید آلومینیم، ۱/۱ درصد اکسید آهن و کمتر از ۱ درصد اکسیدهای سدیم و پتاسیم تولید کرد، که قابل عرضه در بازار آندالوزیت است. درخاتمه فلوشیت مناسب برای فراوری آندالوزیت سرتل پیشنهاد گردیده است.

کلید واژه ها: آندالوزیت، فراوری، جدایش ثقلی، فلوتاسیون

### مقدمه

از کل تولید دنیا، ۶۵ درصد به آندالوزیت، ۳۲ درصد به کیانیت و تنها ۳ درصد به سیلمانیت اختصاص داشته است.

بزرگترین تولیدکنندگان آندالوزیت در دنیا، آفریقای جنوبی، با حدود ۸۳ درصد کل تولید و فرانسه با ۱۶ درصد هستند. ایران تاکنون تولیدی از این گروه کانیهای دیرگداز نداشته است [۱].

قیمت آندالوزیت با ۵۷/۵ درصد اکسید آلومینیم در سال ۱۹۹۴، هر تن ۱۵۰ دلار بوده و در پایان ۶ ماهه اول سال

آندالوزیت از کانیهای گروه کیانیت است که به علت خاصیت دیرگدازی، مقاومت زیاد در حرارتها و بالا و ضریب انبساط حرارتی کم از جایگاه خاصی در صنعت مواد نسوز برخوردار است و به همین خاطر مصرف آن در صنایع آهن و فولاد، شیشه، سرامیک و سیمان روز به روز افزایش یافته است.

در سالهای اخیر، بازار کانیهای گروه کیانیت در دنیا از رشد خوبی برخوردار بوده است. تولید آن از ۲۵۷ هزار تن در سال ۱۹۷۳ به ۴۶۵ هزار تن در سال ۱۹۸۸ رسیده است.

شناسایی شده اند.

مطالعه حاضر، به منظور ارزیابی و فرآوری کانسار آندالوزیت سرتل، واقع در جنوب خراسان، انجام شده است. هدف اصلی، فرآوری کانسنگ سرتل برای تولید محصول پرعیار و مناسب برای صنایع دیرگداز بوده است، هرچند چون این مطالعات با عملیات اکتشافی ذخیره قرینه بود، از مطالعات فرآوری برای ارزیابی تکنولوژیکی بخشهای مختلف ذخیره معدنی نیز استفاده گردیده است. آندالوزیت بسندرت در طبیعت به طور خالص یافت می شود. معمولاً کانیهای مانند کوارتز، میکا، و اکسیدهای آهن به همراه آن یافت می شوند. برای استفاده از آندالوزیت در صنعت نسوز باید این ناخالصیها از آن جدا شوند. به غیر از مقدار بالای آلومین و درصد محدود بعضی اکسیدها مانند  $Fe_2O_3$ ،  $TiO_2$ ، خواص مهم دیگری مانند دانه بندی، درجه دیرگدازی و ضریب انبساط در کیفیت نهایی آندالوزیت اهمیت دارند. جدول (۱) مشخصات کنسانتره های مختلف آندالوزیت را نشان می دهد. نوع الف، استاندارد بین المللی بوده و انواع دیگر، محصول تولیدی چند معدن مختلف در کشور چین می باشند [۲].

با توجه به اختلاف وزن مخصوص و حساسیت مغناطیسی آندالوزیت و کانیهای باطله همراه مانند کوارتز و کانیهای آهن دار می توان از روشهای ثقلی، مغناطیسی و فلوتاسیون برای پرعیارکردن آندالوزیت استفاده کرد.

در فرآیند پرعیارسازی آندالوزیت، ذرات کوچکتر از ۵۰۰ یا ۶۰۰ میکرون نرمه محسوب شده و از خوراک جدا می شوند. این قسمت معمولاً شامل بخش عمده کانیهای میکا و آهن است و مقدار آندالوزیت در آن کم است.

قبل از فرآوری، ماده معدنی باید خرد و دانه بندی شود.

۱۹۹۵ به ۱۶۰ تا ۱۸۰ دلار رسیده است و بهای آندالوزیت ترانسوال افریقای جنوبی با ۵۹/۵ درصد اکسید آلومینیم، بین ۱۸۰ تا ۲۰۰ دلار درهتن بوده است [۱]. دانه بندی آندالوزیت مورد عرضه در بازار بین ۵/۵ تا ۵ میلیمتر است. در سالهای اخیر، به علت رشد فزاینده صنعت فولادسازی و نیز تولید فلزات غیر آهنی، مصرف مواد دیرگداز در کشور ما نیز افزایش چشمگیری یافته است. آندالوزیت به خاطر خصوصیات ویژه اش، می تواند نقش مهمی را در این زمینه ایفاء نماید.

کانی آندالوزیت، ۶۳ درصد اکسید آلومینیم و ۳۷ درصد اکسید سیلیسیم در ترکیب شیمیایی خود دارد. ملاک در کاربرد نسوزهای آلومین دار، میزان تشکیل مولیت  $Al_2O_3$ ،  $SiO_2$  است. مولیت در طبیعت کمیاب است و به همین دلیل آن را باید با حرارت دادن کانیهای آلومین دار به دست آورد. مولیت ۷۱/۸ درصد اکسید آلومینیم دارد و بنابراین بسیار دیرگداز است. هرچند از کانیهای مختلفی مانند کائولن می توان مولیت تولید کرد، اما مناسبترین کانیها برای این منظور، کانیهای گروه کیانیت هستند. آندالوزیت در دماهای کمی بالاتر از ۱۳۸۰ - ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد، تغییر می کند و چون افزایش حجم کمی دارد، می توان آن را بدون حرارت دادن اولیه (تکلیس) در محل مصرف حرارت داده و بکار برد، در حالی که کیانیت به دلیل انبساط زیاد، باید قبل از استفاده تکلیس شود که بالتبع هزینه بیشتری باید صرف شود.

با توجه به اهمیت آندالوزیت در صنعت مواد دیرگداز، در سالهای اخیر، فعالیتهای اکتشافی زیادی برای شناسایی کانسارهای کیانیتی در ایران انجام شده است و کانسارهایی در همدان، سلطان آباد و دهسلم در جنوب خراسان

جدول ۱ - مشخصات چند محصول فرآوری شده آندالوزیت

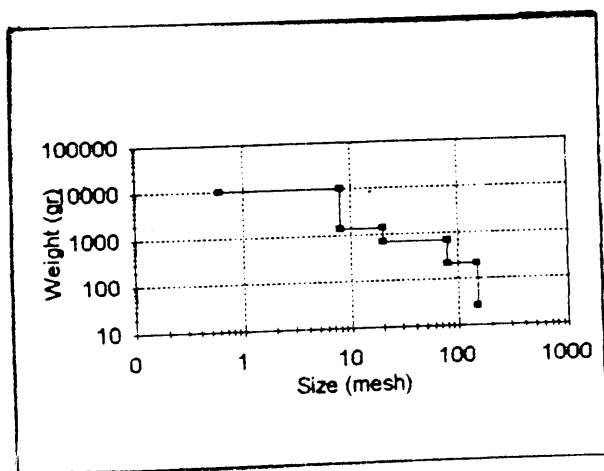
نوع	ترکیب شیمیایی (%)							
	$Na_2O$	$K_2O$	$MgO$	$CaO$	$TiO_2$	$Fe_2O_3$	$Al_2O_3$	$SiO_2$
الف	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱/۵	<۱/۵	۵۵-۶۰	<۴۲
ب	۰/۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۳	۱/۳۸	۰/۸	۵۸/۴۱	۳۷/۰۰
ج	۰/۰۳	۰/۱	۰/۰۶	۰/۰۵	۱/۴	۰/۵	۵۸/۰۰	۴۱/۰۰
د	۰/۱۱	۰/۲۸	۰/۱۶	۰/۲۳	۰/۲	۱/۴۴	۵۸/۷۲	۳۶/۷۲
ر	۰/۱۱	-	۰/۱	۰/۲۹	۰/۰۸	۰/۶۵	۵۷/۸۱	۴۰/۴۲

ساخت کانسنگ متمایز می‌باشند. کانسنگ قسمت شرقی شیستوزیته خفیف و بافت توده‌ای و کانسنگ قسمت غربی دارای شیستوزیته بهتری است. بلورهای آندالوزیت قسمت غربی نسبت به قسمت شرقی، درشت‌تر و کشیده‌تر هستند. با توجه به ارزیابی زمین‌شناسی ناحیه معدنی، فرآوری قسمت‌های شرقی و غربی بخش جنوبی به طور جداگانه و یا توأم در اولویت قرار گرفت، و مطالعات فرآوری بر روی نمونه‌هایی از این قسمت‌ها انجام گرفت. براساس نتایج اولیه و کیفیت مطلوب‌تر ماده معدنی در قسمت غربی، مطالعات تفصیلی فرآوری بر روی این قسمت متمرکز شد.

### فرآوری آندالوزیت سرتل

تهیه نمونه

نمونه برداری براساس نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۰۰۰ ناحیه، در امتداد عمود بر طول کانسار به فاصله‌های ۳۰۰ متری و به روش سپری و از رخنمون سنگی برجا در قسمت‌های شرقی و غربی کانسار انجام شد. برای تهیه نمونه متوسط، نمونه‌های گرفته شده از هر بخش کاملاً باهم مخلوط شدند. این نمونه‌ها با شماره‌های ۱ (مربوط به قسمت شرقی) و ۲ (مربوط به قسمت غربی) مشخص شدند.



شکل ۱ - الف: نمودار تهیه نمونه شرقی آندالوزیت سرتل.

برای خردکردن آندالوزیت، معمولاً از سنگ شکن غلتکی و یا ضربه‌ای استفاده می‌شود. ماده معدنی خرد شده سائیده می‌شود تا سطوح بلورهای آندالوزیت تمیز شوند. آندالوزیت‌ای که به اندازه کافی تحت عملیات سایش قرار نگرفته است دارای آلومین کمتر و آهن بیشتری است. تأثیر دیگر سایش، متفرق ساختن ذرات نرم میکا و شیل است. چنانچه این ذرات جدا نشوند، در جدایش واسطه سنگین تولید اشکال کرده و گرانروی واسطه را افزایش می‌دهند. برای این منظور، از دستگاه ساینده و یا آسیای نیمه خودشکن استفاده می‌شود.

با توجه به وزن مخصوص آندالوزیت (۳/۱ تا ۳/۲ گرم بر سانتیمتر مکعب) و کانیهای باطله (۲/۶ تا ۲/۸ گرم بر سانتیمتر مکعب) از روشهای ثقلی به خصوص واسطه سنگین برای پرعیارسازی آندالوزیت استفاده می‌شود. برای جداکردن کانیهای آهن معمولاً از جداکننده مغناطیسی با شدت بالا استفاده می‌شود (۳). چون برای ذرات کوچکتر از ۵/۰ میلی‌متر نمی‌توان از جدایش ثقلی استفاده کرد و در بعضی شرایط، باید کانسنگ تا حد بیشتری خرد شود، و لذا استفاده از روش فلوتاسیون در بعضی موارد اجتناب ناپذیر است. معمولاً با استفاده از کلکتورهای کاتیونی در محیط اسیدی، ناخالصیهای کانیهای آهن و میکا را همزمان و یا جداگانه می‌توان جدا کرد. برای شناور کردن کانیهای کیانیت از کلکتورهای آنیونی در محیط اسیدی استفاده می‌شود. به طور مثال در معدن هان‌شان چین، مسکوئیت، پیروفیلیت و کائولن موجود در سنگ را با استفاده از روغن کاج، کانیهای آهن و تیتانیوم را در pH خنثی با کربوکسیل کلسیم و کانیهای گروه کیانیت را با کربوکسیل سدیم شناور می‌کنند. در هند، برای جدایش کانیهای میکا از یک کلکتور استات آمین چرب و برای کانیهای کیانیت از سولفات نفتی سدیم در محیط اسیدی استفاده شده است (۴ و ۵).

کانسار آندالوزیت سرتل در ۳:۱ کیلومتری جنوب غربی شهرستان نهبندان قرار دارد. بر مبنای گزارش زمین‌شناسی، وسعت ناحیه معدنی بیش از ۴۵۰ هکتار است. کانسار در امتداد طولی به سه بخش شمالی (A)، مرکزی (B) و جنوبی (C) تقسیم بندی شده است. در بخشهای B و C، دو قسمت شرقی و غربی از نظر بافت و

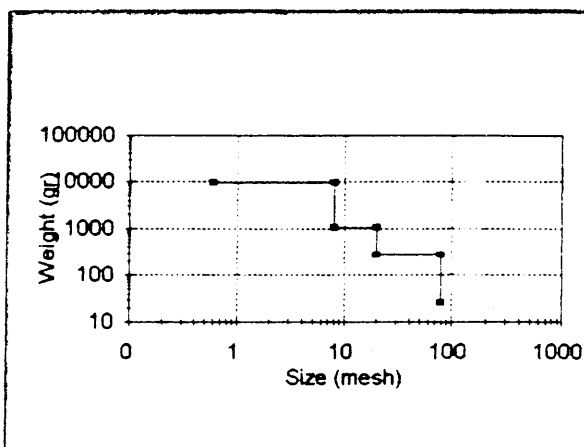
شده و با میکروسکوپ نوری مطالعه شدند. عیار آندالوزیت را به علت همراهی با سایر سیلیکاتها مانند میکا، فلدسپات، نمی توان براساس ترکیب شیمیایی سنگ به سهولت تعیین کرد. یکی از راههای شناسایی و تعیین کمی آندالوزیت، روش پراش اشعه ایکس می باشد که برای نمونه های سرتل از این روش به طور کیفی و هم کمی استفاده شد. از روشهای شیمیایی دستگاهی برای تعیین اکسیدهای مختلف نمونه های سرتل استفاده شد. وزن مخصوص ظاهری و واقعی نمونه (۲) بترتیب برابر ۱/۵ و ۲/۷۱ گرم بر سانتیمتر مکعب تعیین شد. وزن مخصوص آندالوزیت خالص در نمونه سرتل، ۳/۰۴۵ گرم بر سانتیمتر مکعب تعیین شد.

#### آماده سازی نمونه

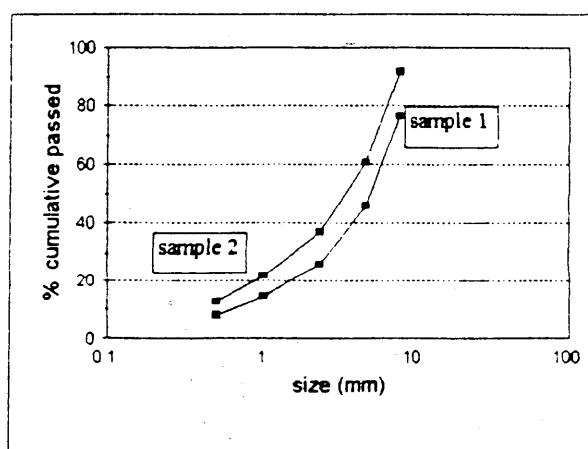
ابعاد کنسانتره آندالوزیت اهمیت زیادی در کیفیت آن در بازار دارد. هرچه بلورهای آندالوزیت درشتتر باشند مناسبترند. لذا باید سعی شود از خردایش بیش از حد بلورهای آندالوزیت در عملیات فرآوری جلوگیری شود. برای تعیین حد بهینه خردایش نمونه سرتل، چهارنمونه تا ابعاد -۴، -۸، -۱۲، و -۲۴ مش خرد شده و تحت شرایط مشابهی سائیده شدند و بخش نرمه حاصل از سایش جدا و توزین شد. برای انجام عملیات سایش از سلول و همزن مخصوص ماشین فلوتاسیون دنور استفاده شد. در سری دوم آزمایشها، سه نمونه تا ابعاد -۴، -۸، و -۱۶ مش خرد شده و سائیده شدند و پس از نرمه گیری (جداشدن بخش ابعادی ۵۰۰- میکرون)، هر سه نمونه دوبار از جداکننده مغناطیسی عبور داده شدند. بخش مواد غیرمغناطیسی هر نمونه به درون مایع سنگینی با وزن مخصوص ۲/۶۹ ریخته شد و بخش غوطه ور شده به مایع سنگین دیگری و با وزن مخصوص ۳/۱۵ ریخته شده و هر دو بخش غوطه ور و شناور توزین و عیارسنجی شدند. در عملیات سایش، عوامل موثر مانند غلظت جامد پالپ، سرعت گردش همزن نیز مطالعه شدند.

#### فرآوری

مطالعات فرآوری آندالوزیت سرتل در ۲ بخش متمرکز



شکل ۱ - ب: نمودار تهیه نمونه غربی آندالوزیت سرتل.



شکل ۲: توزیع دانه بندی نمونه های شرقی (۱) و غربی (۲) آندالوزیت سرتل.

سپس نمونه های کلی تهیه شده با خردایش بیشتر تا ابعاد ۱۵- میلیمتر (در مورد نمونه های شرقی تا ۱۱- میلیمتر) همگن شده و به نمونه های کوچکتر تقسیم شدند. این نمونه ها برای آزمایشهای مقدماتی کنار گذاشته شده و بقیه نمونه ها، پس از همگن سازی مجدد تا ۸- مش خرد شدند و سپس به نمونه های کوچک تقسیم شدند. مراحل آماده سازی و تهیه نمونه متوسط در شکل ۱ آورده شده است. توزیع دانه بندی نمونه های خرد شده در شکل ۲ آمده است. نتایج، نشان دهنده شکنندگی بیشتر نمونه شرقی نسبت به نمونه غربی، می باشد.

#### شناسایی نمونه ها

برای مطالعه کانی شناسی نمونه ها، از هر نمونه و از بخشهای سرندهی آنها، مقطع های صیقلی و نازک تهیه

سنگین معمولاً قابل اتکاء و قابل استفاده در طراحی مسیرهای صنعتی جدایش واسطه سنگین هستند.

### نتایج

نتایج شناسایی نمونه

مطالعات کانی شناسی نشان داد:

- مقدار اسلیت در نمونه غربی بیشتر از نمونه شرقی است اما سهم سنگهای شیبستی و هورنفلسی در نمونه شرقی بیشتر از نمونه غربی است.

- کانیهای عادی تشکیل دهنده هر دو نمونه عبارتند از: کوارتز، فلدسپات و کانیهای کدر و کانیهای فرعی نمونه غربی و شرقی به ترتیب، سریسیت، آلبیت، کلسیت، کلریت، گارنت و سریسیت، گارنت، کلریت و سلیمانیت می باشند.

- شدت دگرسانی نمونه غربی به مراتب بیشتر از نمونه شرقی است. کانیهای دگرسانی نمونه شرقی، عمدتاً سریسیت و نمونه غربی، علاوه بر سریسیت، کلریت و کانیهای رسی می باشند.

- شکل درگیری کانیها در نمونه غربی عمدتاً حاشیه‌ای بوده ولی در نمونه شرقی، عمدتاً به صورت پوششی است.

- میزان درگیر بودن کانی دگرگونی نمونه غربی نسبت به نمونه شرقی در تمام بخشهای سرنده، کمتر است. حدود ۹۰ درصد ذرات آندالوزیت در نمونه غربی در ابعادی حدود ۵۰۰ میکرون آزادند و در همین ابعاد، درجه آزادی نمونه شرقی، حدود ۳۵ درصد می باشد.

- از نظر توزیع عیاری می توان گفت که در بخشهای ابعادی درشتتر عیار آندالوزیت نمونه غربی، بیشتر از نمونه شرقی است. به طور متوسط عیار آندالوزیت در نمونه غربی با روش میکروسکوپی حدود ۱۰ درصد و در نمونه شرقی حدود ۸ درصد تخمین زده شد. آندالوزیت در هر دو نمونه در بخش +۸ مش تمرکز یافته است. جدولهای ۲ و ۳ توزیع آندالوزیت را در بخشهای مختلف سرنده نشان می دهد.

نتایج پراش اشعه ایکس با نتایج کانی شناسی میکروسکوپی انطباق خوبی داشته و عیار آندالوزیت در

گردید: بخش درشت دانه (+۵۰۰ میکرون) و بخش ریزدانه (-۵۰۰ میکرون) مواد کوچکتر از ۵۰۰ یا ۶۰۰ میکرون، در صنعت فرآوری آندالوزیت "نرمه" محسوب شده و دور ریخته می شوند. در سالهای اخیر، توجه بیشتری به ذرات ریزدانه آندالوزیت معطوف شده و سعی می شود آندالوزیت موجود در بخش نرمه تا حد ممکن بازیابی شود. به علت کاهش کارایی اکثر روشهای فرآوری به خصوص روشهای ثقلی برای پرعیارکردن ذرات ریز، بهترین روش مطرح، فلوتاسیون است. هرچند به علت سهولت و سادگی روشهای ثقلی و عدم آلودگی محیط زیست، روشها و تجهیزات جدید ثقلی به بازار معرفی شده‌اند که کارایی خوبی برای ذرات ریز دارند. در همین رابطه، تلاشهایی برای پرعیارکردن بخش نرمه آندالوزیت سرتل انجام شد که نتایج در جای دیگری خواهد آمد.

### جدایش مغناطیسی

بخشهای مختلف ابعادی نمونه، یعنی ۸-۱۴، ۱۴-۳۵، ۳۵-۵۰ و ۵۰-مش از یک جداکننده خشک دیسک و نوار باکس مگ عبور داده شدند. شدت جریان هر دیسک، پس از انجام آزمایشهای اولیه، ۲/۵ آمپر انتخاب و تنظیم گردید. عوامل موثر در جداکننده مانند شدت جریان، نرخ خوراک دهی، ارتفاع دیسکها از سطح نوار بررسی شدند که در نتایج فقط به ذکر شرایط بهینه جدایش اکتفا خواهد شد.

### جدایش ثقلی

برای ارزیابی قابلیت جدایش ثقلی (واسطه سنگین) آندالوزیت سرتل، آزمایشهای غوطه ور- شناور در یک سری پیوسته از مایعات سنگین با جرم مخصوصهای ۲/۸، ۲/۹۶، ۳، ۳/۱ و ۳/۱۵ گرم بر سانتیمتر مکعب برای دو بخش ابعادی ۸-۱۴ و ۱۴-۳۲ مش انجام شد. مایعات سنگین مورد استفاده عبارت بودند از: دی برمومتان و تترا برمومتان که به کمک استون، مایعات سنگین با چگالی‌های متفاوت تهیه شدند.

از کنساتره جدایش مغناطیسی بعنوان خوراک در این آزمایشها استفاده شد. نتایج آزمایش استاندارد مایع

شدت زیاد نشان می دهد. با ریزش خوراک، کارایی جدایش کاهش می یابد. بهترین نتایج جدایش مغناطیسی برای دانه بندی ۵/۰ تا ۱۶/۱ میلیمتر است که کنسانتره آندالوزیتی با ۳۷ درصد آندالوزیت و بازیابی ۹۳/۳ درصد تولید می نماید. مقدار اکسید آهن در بخش مغناطیسی ۲ تا ۳ برابر اکسید آهن موجود در کنسانتره آندالوزیت است. کاهش عیار  $K_2O$  در کنسانتره آندالوزیت نیز قابل ملاحظه است که نشان می دهد بخشی از کانیهای میکا به بخش مغناطیسی منتقل شده است. حدود ۷۸/۸ تا ۸۸ درصد اکسید آهن در بخشهای مختلف ابعادی در اثر جدایش مغناطیسی حذف میشود. در حالی که فقط ۱ تا ۲ درصد آندالوزیت به هدر می رود.

با توجه به کاهش مقدار خوراک آندالوزیت برای فرآیندهای بعدی و کاهش اکسید آهن، به نظر می رسد استفاده از جداکننده های مغناطیسی برای فرآوری آندالوزیت سرتل ضروری باشد.

#### نتایج جدایش ثقلی

نتایج آزمایشهای انجام شده با مایعات سنگین برای دو بخش ابعادی در جدولهای ۸ و ۹ آورده شده اند. با افزایش وزن مخصوص جدایش، درصد  $Al_2O_3$  و عیار آندالوزیت در محصول غوطه ورافزایش می یابد، به طوری که در مایع سنگین با وزن مخصوص بیش از ۳/۱ گرم بر سانتیمتر مکعب می توان کنسانتره ای با عیار بیش از ۹۰ درصد آندالوزیت تولید کرد. آنچه مسلم است با افزایش چگالی، عیار کنسانتره بیشتر شده ولی از میزان بازیابی کلی آندالوزیت کاسته می شود. درصد  $Fe_2O_3$  در محصول غوطه ور، کمتر از ۱ درصد می باشد.

نتایج حاصله برای دو بخش ابعادی تقریباً یکسان بوده و می توان آنها را با جداکننده های واسطه سنگین پرعیار کرد.

#### نتیجه گیری آرایش بخش درشت دانه

هرچند عملیات سایش انجام شده باعث افزایش عیار کنسانتره نمی شود، ولی باعث تمیز شدن سطوح بلورهای آندالوزیت شده و بخشی از ناخالصیهای رسی و میکا را جدا می کند. بنابراین برای آماده سازی خوراک، فرآیند جدایش مفید و ضروری است به این منظور می توان از

نمونه غربی، حدود ۱۲ درصد و در نمونه شرقی حدود ۷ درصد تخمین زده شد. نتایج تجزیه شیمیایی دو نمونه شرقی و غربی در جدول ۴ آمده است. همانطور که نتایج نشان می دهند مقدار اکسید آلومینیم در هر دو نمونه پایین می باشد. اکسیدهای سدیم و پتاسیم دلالت بر مقدار قابل توجهی کانیهای میکا و یا فلدسپار دارند. مقدار اکسید آهن نیز زیاد است. مطالعات فوق بیانگر آن است که علاوه بر اختلافات کانی شناسی، دگرسانی و ادخالها در نمونه شرقی و غربی، اختلاف فاحشی در ساخت و بافت، درجه آزادی و قابلیت خردشوندگی آنها وجود دارد. لذا فرآوری تکمیلی جداگانه نمونه ها، نسبت به اختلاط و فرآوری آنها ارجح می باشد و در همین ارتباط برای انجام مطالعات فرآوری تکمیلی در اولین قدم، نمونه غربی انتخاب گردید.

#### نتایج خردایش نمونه

جدولهای (۵) و (۶) نتایج دو مسیر انتخاب شده برای آماده سازی آندالوزیت سرتل را نشان می دهند. بدیهی است با خردایش بیشتر، مقدار ذرات نرمه (۵۰۰- میکرون) افزایش می یابد به نحوی که در روش اول میزان نرمه از حدود ۳۳ درصد در خردایش نمونه تا حد ۴- مش، به ۷۷ درصد در خردایش نمونه تا ۲۵- مش می رسد. مقدار  $Al_2O_3$  و  $SiO_2$  در بخش درشت دانه، تفاوت زیادی نشان نمی دهد. در روش دوم، به مقدار تولید نرمه اکتفا نشده بلکه محصولات مختلف خردایش فرآوری شدند. بهترین حد خردایش ۸- مش است که بالاترین درصد بازیابی  $Al_2O_3$  و آندالوزیت را دارا است. این نتیجه با نتایج مسیر اول همخوانی دارد.

آزمایشهای سایش نشان دادند که شرایط بهینه (براساس نسبت اکسید آلومینیم به اکسید سیلیسیوم در کنسانتره و نسبت اکسید پتاسیم کنسانتره به باطله) عبارتند از: غلظت جامد خوراک ۶۸ درصد، زمان سایش ۲۰ دقیقه، دور موتور ۱۵۰۰ دور در دقیقه. این شرایط در آزمایشهای بعدی اعمال شدند.

#### نتایج جدایش مغناطیسی

جدول ۷ نتایج جدایش مغناطیسی بخشهای مختلف ابعادی آندالوزیت سرتل را با جداکننده مغناطیسی با

جدول ۲: توزیع آندالوزیت در نمونه غربی براساس مطالعات میکروسکوپی

اندازه (میلیمتر)	درصد وزنی	عیار آندالوزیت (%)	توزیع آندالوزیت (%)	توزیع تجمعی آندالوزیت (%)
۸/۰۰	۲۳/۵۵۷	۵	۱۲/۹۵	۱۲/۹۵
۴/۷۶	۳۰/۲۵۵	۷	۲۳/۳	۳۶/۲۵
۲/۳۶	۲۰/۰۶	۲۰	۴۴/۱۳۲	۸۰/۳۸۲
۱/۰۰	۱۱/۶۱۸	۱۰	۱۲/۷۷	۹۳/۱۵۲
۰/۵	۶/۴۲۷	۵	۳/۵۳	۹۶/۶۸
-۰/۵	۸/۰۸	۴	۳/۴۷	۱۰۰/۱

جدول ۳: توزیع آندالوزیت در نمونه شرقی براساس مطالعات میکروسکوپی

اندازه (میلیمتر)	درصد وزنی	درصد تخمینی آندالوزیت	توزیع آندالوزیت (%)	توزیع تجمعی آندالوزیت (%)
۸/۰۰	۸/۲۱۶	۴	۳/۶۷۲	۳/۶۷۲
۴/۷۶	۳۱/۰۲	۷	۲۵/۸۴	۲۹/۵۱۲
۲/۳۶	۲۳/۵۲۶	۱۵	۴۲/۱۱	۷۱/۶۲۲
۱/۰۰	۱۵/۵۱۴	۵	۹/۲۵	۸۰/۸۷
۰/۵	۹/۰۶	۱۲	۱۲/۹۵	۹۳/۸۲۲
-۰/۵	۱۲/۶۷۷	۴	۶	۹۹/۸

جدول ۴: نتایج آنالیز شیمیایی نمونه های متوسط

نمونه	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%FeO	%TiO <sub>2</sub>	%CaO	%MgO	%MnO <sub>2</sub>	%Na <sub>2</sub> O	%K <sub>2</sub> O	%SO <sub>3</sub>
(۲)	۶۱/۱۴	۱۸/۴	۲/۴۳	۴/۰۵	۰/۸۶	۰/۸۶	۲/۰۲	۰/۱۲	۱/۱۹	۳/۳۷	۳/۵۱
(۱)	۶۱/۱۱	۱۹/۳۱	۲/۳۴	۴/۰۷	۰/۸۴	۰/۴۳	۱/۹۱	۰/۱۲	۱/۴۵	۳/۵۵	۳/۴۶

جدول ۵: نتایج انتخاب دانه بندی مناسب برای خریدایش نمونه غربی سرتل

ابعادمش (میلیمتر)	وزن نرمه قبل از سایش %	وزن نرمه بعد از سایش %	درصد وزنی کل نمونه		آنالیز شیمیایی (برحسب درصد)				
			بخش ذرات	درصد	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
-۴ (-۴/۷۶)	۱۶/۰۹	۱۶/۶۹	۶۷/۲۲	۳۲/۸۷	۶۳/۸۷	۱۹/۱۲	۶/۷۲	۱/۴۸	۳/۳۰
-۸ (-۲/۳۶)	۲۷/۱۸	۱۵/۵۸	۵۷/۲۴	۴۲/۷۶	۶۳/۶۴	۱۹/۴۹	۶/۸۴	۱/۴۸	۳/۴۲
-۱۶ (-۱)	۴۱/۰۶	۱۲/۹۷	۴۵/۹۷	۵۴/۰۳	۶۳/۶۲	۱۹/۳۵	۶/۷۶	۱/۵۳	۳/۲۱
-۲۵ (-۰/۷۱)	۵۸/۸۴	۱۸/۱۹	۲۳	۷۷	۶۳/۴۶	۱۹/۲۰	۶/۷۰	۱/۴۳	۳/۲۰

جدول ۶: نتایج آزمایشهای مایع سنگین دانه بندیهای مختلف نمونه غربی سرتل

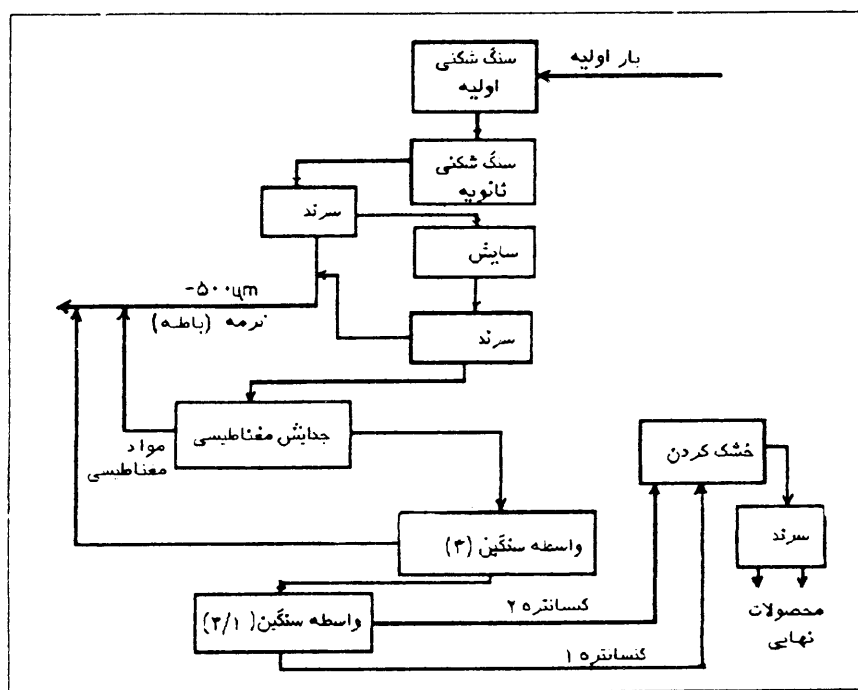
ابعاد مش (میلیمتر)	جرم مخصوص جدایش	وزن %	تجزیه شیمیایی					درصد بازایی بر مبنای آندالوزیت
			%K <sub>2</sub> O	%Na <sub>2</sub> O	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%SiO <sub>2</sub>	
-۴	-۲/۹۶	۸۶/۴	۳/۳۰	۱/۵۸	۶/۳۸	۱۵/۲۷	۶۶/۷۳	≤۲
			۰/۷۱	۰/۴۰	۱/۵۷	۵۳/۱۶	۴۱/۹۸	۸۳
			۰/۱۷	۰/۱۱	۰/۵۷	۵۸/۱۳	۳۶/۸۳	≥۹۵
-۸	-۲/۹۶	۶۳/۶	۲/۵	۱/۷۳	۴/۳۱	۱۲/۷۹	۶۹/۵۶	≤۱
			۰/۷۱	۰/۴۰	۱/۴۶	۵۳/۰۰	۴۲/۷۲	۸۳
			۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۳۹	۶۰/۲۸	۳۶/۶۰	≥۹۵
-۱۶	-۲/۹۶	۸۰/۷	۲/۷۷	۱/۶۰	۵/۰۶	۱۳/۸۶	۶۲/۲۳	≤۱
			۰/۵۹	۰/۲۸	۱/۱۸	۵۵/۸۶	۴۰/۵۵	۸۵
			۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۵۴	۶۰/۱	۳۶/۱۰	≥۹۸

دارد. برای تولید کنسانتره با عیار بالا، باید از واسطه‌ای با چگالی بیش از ۳ گرم بر سانتیمتر مکعب استفاده کرد. بدیهی است افزایش عیار با کاهش بازیابی همراه است و نقطه بهینه عیار و بازیابی تحت تاثیر مسائل اقتصادی تعیین می شود.

نتایج نهایی نشان می دهد که به ازای بازیابی ۸۷ درصد کنسانتره‌ای با ترکیب شیمیایی زیر قابل تولید است:  
 $Al_2O_3 = 55\%$   $Fe_2O_3 = 1/1\%$   $Na_2O = 0/4\%$   
 $SiO_2 = 41\%$   $K_2O = 0/65\%$

اسکراهای دوار و یا مخزنهای همزن دار استفاده کرد. - در جدایش مغناطیسی، به طور قابل ملاحظه‌ای عیار آندالوزیت افزایش یافته و بخش قابل توجهی از ناخالصیهای همراه جدا می شوند. کاهش وزن نمونه، در ظرفیت فرآیند بعدی اثر مثبتی دارد.

- روش جدایش واسطه سنگین بهترین روش برای پری‌عیار کردن کانسنگ آندالوزیت سرتل می باشد و امکان تولید محصول آندالوزیتی با عیار مطلوب با این روش وجود



شکل ۳: فلوشیت فرآوری نمونه غرب آندالوزیت سرتل.



یک یا دو مرحله سایش در نظر گرفته شده است که خوراک سائیده شده مجدداً توسط یک سرند ارتعاشی، طبقه بندی شده و ذرات کوچکتر از ۵۰۰ میکرون جدا می شوند. خوراک بزرگتر از ۵۰۰ میکرون، از یک جداکننده مغناطیسی با شدت زیاد عبور داده شده و محصول غیرمغناطیسی به یک جداکننده واسطه سنگین (سیکلون و یا دیانوپرپول) فرستاده می شود. باطله مغناطیسی و باطله جداکننده واسطه سنگین اولیه، دور ریخته می شوند. برای تولید محصول درجه یک، مواد غوطه ور شده، به جداکننده واسطه سنگین دیگری با چگالی جدایش ۳/۱ گرم بر سانتیمتر مکعب وارد می شود. بخش غوطه ور کنسانتره نهایی و بخش شناور محصول درجه ۲ آندالوزیت را تشکیل می دهد. هردو محصول آندالوزیت، خشک شده و دانه بندی می شوند.

برای کاهش مقدار اکسید آهن به کمتر از ۱ درصد باید وزن مخصوص واسطه را به ۳/۱ گرم بر سانتیمتر مکعب افزایش داد. این افزایش، موجب افزایش عیار و کاهش بازیابی خواهد شد. با توجه به بازار آندالوزیت، می توان یکی از دو محصول، با عیار آهن کم و آهن بیش از حد مجاز تولید کرد. بررسی اقتصادی بر مبنای این سه پارامتر برای تعیین بهترین کنسانتره (عیار و بازیابی آندالوزیت و درصد اکسید آهن) لازم است. براساس نتایج آزمایشگاهی، فلوشیت فرآوری برای آندالوزیت سرتل پیشنهاد شده است که در شکل ۳ دیده می شود.

مسیر فرآوری شامل دو مرحله خردایش با سنگ شکن فکی و سنگ شکن استوانه ای است. محصول خردشده بر روی یک سرند ارتعاشی، دانه بندی شده و بخش ۵۰۰- میکرون از خوراک جدا می شود. در مرحله بعد،

جدول ۷: نتایج آزمایشهای جداکننده مغناطیسی بخشهای ابعادی مختلف نمونه غربی سرتل

ابعاد مش (میلیمتر)	درصد وزنی مواد مغناطیسی	درصد وزنی کسانتره	تجزیه شیمیایی					درصد بازیابی بر مبنای آندالوزیت	
			%K <sub>2</sub> O	%Na <sub>2</sub> O	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%SiO <sub>2</sub>		
۸- تا ۱۴+ (۲۳۶- تا ۱۱۶/۱)	۷۳/۵	۲۶/۵	۱/۱۶	۱/۸۹	۳/۴۵	۲۷/۵۱	۶۲/۲	۳۹/۴	۹۱/۵
			≤ ۱	۱/۵۹	۳/۵۶	۱۴/۹۶	۶۴/۰۶		
۱۴- تا ۲۵+ (۱۶۰- تا ۵۵/۰)	۷۲/۷	۲۷/۳	۱/۱۹	۱/۶۷	۲/۸۶	۲۸/۲۵	۵۹/۱۴	۴۰/۳۸	۹۳/۳
			≤ ۱	۱/۲۸	۳/۱۶	۱۵/۳۷	۶۴/۱۹		
۲۵- تا ۵۰+ (۵۵- تا ۰/۳۳)	۶۳/۲	۳۶/۹	۱/۱۸	۲/۰۷	۴/۰۴	۲۶/۶۶	۶۵/۴۴	۴۹/۳۲	۹۲/۸
			< ۱	۱/۵۸	۳/۸۹	۸/۸۳	۱۵/۹۹		

جدول ۸: نتایج آزمایشات مایع سنگین بخش ابعادی ۱۴- تا ۳۵+ مش نمونه غربی سرتل

جرم مخصوص	وزن %	تجزیه شیمیایی نمونه ها					عیار آندالوزیت	وزن X عیار بر مبنای آندالوزیت	
		%K <sub>2</sub> O	%Na <sub>2</sub> O	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%SiO <sub>2</sub>		%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	آندالوزیت
-۲/۸	۴۰	۱/۸۹	۱/۶	۳/۳۸	۹/۲۸	۷۳/۷۸	≤ ۱	۳۷۱/۲	۴۰
۲/۸-۲/۹۶	۱۹/۴	۳/۱۰	۱/۴۷	۴/۸۲	۱۳/۶۱	۶۵/۵۲	≤ ۱	۲۶۴/۰۳	۱۹/۴
۲/۹۶-۳/۰	۳/۸۲	۳/۰۹	۱/۴۶	۴/۰۴	۲۴/۰۸	۵۷/۳۳	۱۵	۹۱/۹۹	۵۷/۳
۳-۳/۱	۷/۹	۱/۵۵	۰/۸۰	۲/۱۶	۲۵/۳۱	۲۶/۹۱	۵۵	۳۵۷/۹۵	۴۳۴/۵
۳/۱-۳/۱۵	۲۸/۳	۰/۳	۰/۱۷	۰/۸	۵۸/۳۸	۳۹/۲۲	≥ ۹۰	۱۶۵۲/۱۵	۲۵۴۷
+۳/۱۵	۰/۵۸	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۶۶	۵۹/۱۶	۳۴/۱۵	≥ ۹۳	۳۴/۳	۵۳/۹۴

ادامه جدول ۸: نتایج آزمایشات مایع سنگین بخش ابعادی ۱۴- تا ۳۵+ مش

بخش تجمعی شناور شده بر مبنای						بخش تجمعی غوطه ور شده بر مبنای					
عیار $Al_2O_3$			عیار $Al_2O_3$			عیار آندالوزیت			عیار $Al_2O_3$		
درصدوزن	وزنXعیار	درصد	درصدوزن	وزنXعیار	وزن	درصدوزن	وزنXعیار	درصد	درصدوزن	وزنXعیار	درصد
	وزن	بازیابی		وزن	بازیابی		وزن	بازیابی		وزن	بازیابی
۴۰	۹/۲۸	۱۳/۴	۴۰	۱	۱/۲۶	۴۰	۱	۱۳/۴	۹/۲۸	۱۰/۶۹	۵۹/۴
۵۹/۴	۱۰/۶۹	۲۲/۹۲	۱۵۹/۴	۱	۴۰/۶	۳۶/۷۸	۳/۷	۱/۸۵	۶۳/۲۲	۲۶/۲۳	۱۱/۵
۶۳/۲۲	۱۱/۵	۲۶/۲۳	۶۳/۲۲	۱/۸۵	۳/۷	۳۶/۷۸	۳/۷	۱/۸۵	۶۳/۲۲	۲۶/۲۳	۱۱/۵
۷۱/۱۲	۱۵/۲۵	۳۹/۱۵	۷۱/۱۲	۷/۷۵	۱۷/۵	۲۸/۸۸	۲۸/۸۸	۷/۷۵	۷۱/۱۲	۳۹/۱۵	۱۵/۲۵
۹۹/۴۲	۲۷/۵۳	۹۸/۸	۹۹/۴۲	۳۱/۱۶	۹۸/۳	۰/۵۸	۰/۵۸	۳۱/۱۶	۹۹/۴۲	۹۸/۸	۲۷/۵۳
۱۰۰	۲۷/۷۱	۱۰۰	۱۰۰	۳۱/۵۲	۱۰۰	۰	۰	۳۱/۵۲	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۹: نتایج آزمایشات مایع سنگین بر روی بخش ابعادی ۸- تا ۱۴+ مش نمونه غربی سرتل

وزن X عیار بر مبنای آندالوزیت	درصد عیار آندالوزیت به روش نهمین میکروسکوپی	تجزیه شیمیایی نمونه ها					درصد وزنی	دامنه جرم مخصوص	
		%K <sub>2</sub> O	%Na <sub>2</sub> O	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%SiO <sub>2</sub>			
۳۳/۶۲	۲۹۲/۸۳	≤ ۱	۱/۶۶	۱/۷۳	۳/۴۲	۸/۷۱	۷۶/۹۷	۳۳/۶۲	-۲/۸
۴۹/۸	۳۶۲/۳	≤ ۲	۳/۳۹	۱/۷۰	۵/۵۷	۱۴/۵۵	۶۴/۳۰	۲۴/۹	۲/۸-۲/۹۶
۱۰۶/۵	۱۷۱/۱۱	۱۵	۳/۰۸	۱/۴۶	۴/۵۲	۲۴/۱۰	۵۹/۵۶	۷/۱	۲/۹۶-۳
۴۱۸	۳۳۵/۴۶	۵۵	۱/۴۴	۰/۹۲	۲/۳۹	۴۴/۱۴	۴۹/۲۴	۷/۶	۳-۳/۱
۲۳۱۴/۳	۱۴۹۵/۱۵۵	≥ ۸۸	۰/۴۷	۰/۲۶	۱/۰۵	۵۶/۸۵	۴۰/۱۶	۲۶/۳	۳/۱-۳/۱۵
۴۵/۶	۲۷/۵	≥ ۹۵	۰/۱۴	۰/۰۹	۰/۸۴	۵۷/۲۹	۳۵/۹۰	۰/۴۸	+۳/۱۵

ادامه جدول ۹: نتایج آزمایشات مایع سنگین بخش ابعادی ۸- تا ۱۴+ مش

بخش تجمعی شناور شده بر مبنای						بخش تجمعی غوطه ور شده بر مبنای					
عیار $Al_2O_3$			عیار $Al_2O_3$			عیار آندالوزیت			عیار $Al_2O_3$		
درصدوزن	وزنXعیار	درصد	درصدوزن	وزنXعیار	وزن	درصدوزن	وزنXعیار	درصد	درصدوزن	وزنXعیار	درصد
	وزن	بازیابی		وزن	بازیابی		وزن	بازیابی		وزن	بازیابی
۳۳/۶۲	۲۹۲/۸۳	۸/۷۱	۳۳/۶۲	۳۳/۶۲	۱/۱۳	۳۳/۶۲	۳۳/۶۲	۱۰/۹	۳۳/۶۲	۳۳/۶۲	۳۳/۶۲
۵۸/۵۲	۶۵۵/۱۳	۱۱/۱۹	۵۸/۵۲	۸۳/۴۲	۲/۸۱	۵۸/۵۲	۸۳/۴۲	۲۴/۴	۵۸/۵۲	۸۳/۴۲	۲۴/۴
۶۵/۶۲	۸۲۶/۲۴	۱۲/۵۹	۶۵/۶۲	۱۸۹/۹۲	۶/۴	۶۵/۶۲	۱۸۹/۹۲	۳۱/۰۹	۶۵/۶۲	۱۸۹/۹۲	۳۱/۰۹
۷۳/۲۲	۱۱۶۱/۱۷	۱۵/۸۷	۷۳/۲۲	۶۰۷/۹۲	۲۰/۴۸	۷۳/۲۲	۶۰۷/۹۲	۴۳/۷۸	۷۳/۲۲	۶۰۷/۹۲	۴۳/۷۸
۹۹/۵۲	۲۶۵۶/۸۵	۲۶/۷	۹۹/۵۲	۲۹۲۲/۳۲	۹۸/۸۶	۹۹/۵۲	۲۹۲۲/۳۲	۹۸/۹۷	۹۹/۵۲	۲۹۲۲/۳۲	۹۸/۹۷
۱۰۰	۲۶۷۴/۳۵	۲۶/۸۴	۱۰۰	۲۹۶۷/۹۲	۲۹/۶۸	۱۰۰	۲۹۶۷/۹۲	۲۶/۸۴	۱۰۰	۲۹۶۷/۹۲	۲۶/۸۴

## مراجع

- 1 - McCracken, W. H. (1996). "Andalusite Review." *Industrial Minerals*, 53-54.
- 2 - Overbeek, P. W. (1989). "Andalusite in South Africa." *J. of the South African, Inst. of Mining & Metallurgy*, 89(6), 151-171.
- 3 - Amanollah et. al., S. (1988). "Benefication of Mica - quartz Bearing Kyanite." *Industrial Minerals Processing Supplement., IBM*, 24-28.
- 4 - "The Benefication Tests on Canadian Refractory Silicate Minerals." (1995). *CIM bul.*, 87-89.
- 5 - Guanghuan, W. (1990). "Chinese Resources & Processing Technology For Kyanite Minerals." *Industrial Minerals*, March, 95-98.