

فرآوری کانسنگ آندالوزیت میشدوان بافق به منظور مولایت‌زایی

افشین نمیرانیان^۱، مهدی کلانتر^۲، سید حسین مجتهدزاده^۲، علی دهقانی^{۳*}

۱- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه یزد؛ Email: afs_namiranian@yahoo.com

۲- استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۳- استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد؛ Email: a.dehghani@yazduni.ac.ir

(دریافت ۳ اسفند ۱۳۸۸، پذیرش ۱۲ آبان ۱۳۸۹)

چکیده

کانی‌های گروه آندالوزیت از مواد مناسب برای ساخت آجرهای دیرگداز هستند که عمدتاً در ساخت آستر کوره‌ها به کار می‌روند. با توجه به افزایش روزافزون مصرف آجرهای دیرگداز آلومینو سیلیکاتی از نوع پر آلومینا (بیش از ۵۰ درصد Al_2O_3)، شناسایی و استخراج کانسارهای آندالوزیتی و مطالعات فرآوری و مولایت‌زایی ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق امکان فرآوری و مولایت‌زایی کانسنگ آندالوزیت میشدوان بافق بررسی شد. این کانسار در سال ۱۳۷۹ اکتشاف نیمه تفصیلی شده و ذخیره‌ای بالغ بر ۱/۶ میلیون تن، با عیار حدود ۲۰ درصد Al_2O_3 برای آن اعلام شده است. پس از نمونه‌برداری، با توجه به مطالعات خردایش و مقاطع نازک، برای فرآوری نمونه‌های اولیه به دو محدوده ابعادی تقسیم شدند. برای افزایش میزان Al_2O_3 در محدوده ابعادی ۳۵۵-۱۵۰ میکرون از روش ثقلی (میز لرزان) و در محدوده ابعادی ۱۵۰-۷۵ میکرون از روش فلوتاسیون استفاده شد. برای کاهش میزان Fe_2O_3 به کمتر از ۱ درصد از جداکننده مغناطیسی شدت بالا استفاده گردید. با استفاده از روش‌های فوق، تولید کنسانتره‌ای با حدود ۵۶ درصد Al_2O_3 امکان‌پذیر است که کیفیت مناسب برای فرایند مولایت‌زایی را دارد. عملیات مولایت‌زایی با تغییر سه پارامتر دما ($1600^{\circ}C - 1400^{\circ}C$)، زمان ($3/5 - 1$ ساعت) و دانه‌بندی ($300 - 150 - 75 - 38$ میکرون) انجام شد. مطالعه محصولات عملیاتی حرارتی مولایت‌زایی با SEM و XRD و محاسبه درصد تراکم‌پذیری برای دماهای مختلف نشان داد که در دماهای بین ۱۵۵۰-۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت و دانه‌بندی ۳۸ میکرون تحول مولایت‌زایی کامل شده است و تخلخل نیز به حداقل مقدار خود می‌رسد. وجود کروندم در نمونه اولیه آندالوزیت باعث کاهش فاز شیشه در نمونه دیرگداز می‌شود و از نکات مثبت این نمونه ماده معدنی است.

کلمات کلیدی

آندالوزیت، میشدوان، مولایت‌زایی، فرآوری، فلوتاسیون، میز لرزان.

* نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات

۱- مقدمه

به آزمایشگاه ارسال شد. نتایج مطالعات XRD و میکروسکوپی نشان داد که کانی‌های تشکیل‌دهنده اغلب شامل: کوارتز، سیلیمانیت، میکا (بیوتیت و مسکویت)، آلبیت، کیانیت، استئارولیت، آندالوزیت و کانی‌های اوپاک است (جدول شماره ۱)؛ به عنوان مثال نمونه ای از طیف XRD کیفی در شکل شماره ۱ نشان داده شده است. قسمت عمده سنگ را کوارتز تشکیل می‌دهد که به همراه کانی‌های ورقه‌ای مسکویت و بیوتیت تحت تأثیر فشار جهت‌دار شده و باعث پیدایش بافت لپیدوبلاستیک و ساخت شستی در سنگ شده است (شکل ۲، الف). همچنین اکثر سیلیمانیت‌ها حاوی آنکلوژین‌های مواد آلی به صورت ادخال‌های منظمی به شکل صلیب می‌باشند که کیاستولیت را به وجود آورده‌اند (شکل ۲، ب). آندالوزیت‌های منطقه نیز در اثر پیشرفت درگرونی در حال تبدیل به سیلیمانیت هستند (شکل ۲، ج). جدول شماره ۲ نیز میانگین نتایج آنالیز XRF حاصل از فعالیت‌های اکتشافی را نشان می‌دهد. مطابق جدول، مقدار Al_2O_3 به‌طور متوسط ۲۵ درصد بوده و مقدار اکسید آهن و SiO_2 نیز زیاد است. همچنین مقدار عناصر قلیایی نیز بیش از ۲ درصد است. از این رو، قبل از کاربرد ماده معدنی برای مولایت‌زایی، فرآوری کانه ضروری به- نظر می‌رسد.

جدول ۱: کانی‌های شناخته شده در نمونه‌های اکتشافی با روش

XRD	
کانی‌های اصلی	کوارتز، کیانیت، مسکویت، کلینوکلر، آلبیت، استئارولیت
کانی‌های فرعی	پیروفیلیت، کلسیت، کائولینیت، آندرادیت، آنورتیت، گراسولار، هالیت، تامسونیت، شاموزیت، فلوگوپیت، اوژیت، ژپس، باسانیت، پاراگونیت

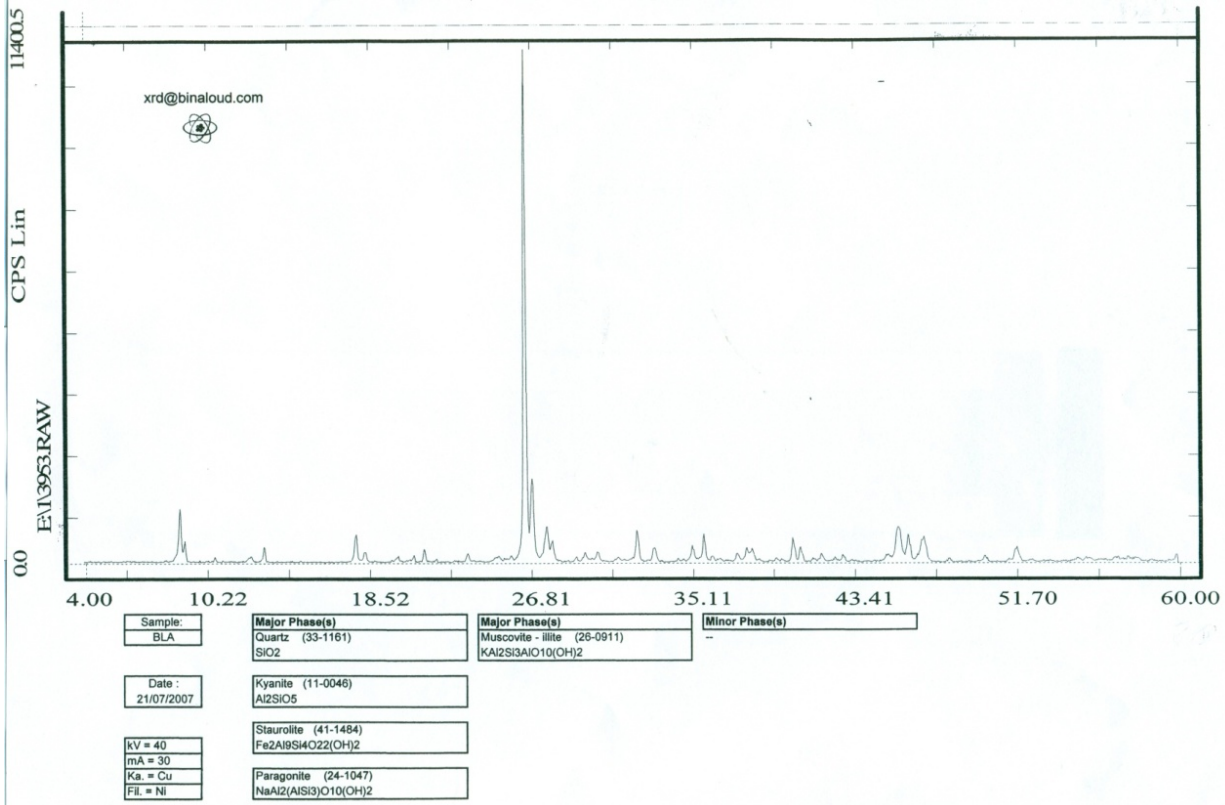
۳- مطالعات فرآوری

در این تحقیق پس از عملیات نمونه‌برداری، خردایش و آماده‌سازی، مطالعات تعیین درجه آزادی به روش مقاطع نازک و دانه‌شماری در محدوده‌های ابعادی^۱ مختلف انجام گرفت. ضمناً در مورد ذرات درگیر کانی با ارزش و گانگ در حد کمتر از ۱۰ درصد ذره به عنوان آزاد تلقی گردید. کانی‌های گروه آندالوزیت در محدوده ابعادی ۳۵۵- میکرون به درجه آزادی مناسب ۸۲ درصد رسیدند که نتایج حاصل در جدول شماره ۳ آمده است. همچنین در شکل‌های ۳، الف و ب تصاویر میکروسکوپی تهیه شده از بعضی تیغه‌ها ارائه شده است. مطابق

با توجه به مصرف زیاد آجرهای دیرگداز آلومینوسیلیکاتی از نوع پرآلومینا و رشد مصرفی سالانه بیش از ۱۰ درصد و این‌که کانی‌های گروه سیلیمانیت (آندالوزیت، سیلیمانیت و کیانیت) مناسب‌ترین مواد اولیه تشخیص داده شده‌اند [۶-۱]، شناسایی و استخراج ذخایر آندالوزیتی ضروری به نظر می‌رسد، به‌خصوص این‌که در مورد ذخایر آلومینادار دیگر چون ذخایر بوکسیتی، محدودیت بیشتری وجود دارد. طبق استانداردهای اعلام شده وجود حداقل ۵۴ درصد اکسید آلومینیوم، حداکثر ۱/۵ درصد اکسید آهن، ۲ درصد اکسید تیتانیم و ۲ درصد اکسیدهای قلیایی چون سدیم، پتاسیم و کلسیم برای مواد اولیه آندالوزیتی به‌منظور فرایند مولایت‌زایی ضروری است [۱]. در حالی‌که در اکثر مواد معدنی، درصد اکسید آلومینیوم بین ۲۰-۱۰ تغییر می‌کند که ضرورت فرآوری را با روش‌ها و شرایط مناسب می‌طلبد. هدف از این پروژه بررسی امکان قابلیت فرآوری و مولایت‌زایی کانسنگ آندالوزیت میشدوان باقی است. شایان ذکر است این معدن در مقایسه با دیگر منابع گروه سیلیمانیتی در ایران که اغلب آندالوزیتی هستند [۷ و ۸] بیشتر از کانی‌های سیلیمانیت و کیانیت تشکیل شده به همین دلیل فرآوری با روش ثقلی بازیابی بالاتری نسبت به فلوتاسیون نشان می‌دهد [۱۳-۷]. این کانسار در فاصله ۱۰۰ کیلومتری شرق شهرستان یزد و ۲۵ کیلومتری معدن سنگ آهن چغارت در محلی موسوم به میشدوان واقع شده است. این کانسار در سال ۱۳۷۹ اکتشاف نیمه تفصیلی شده است و پس از مشخص شدن ۴ بخش کانی سازی شده مجزا، در مجموع ذخیره‌ای بالغ بر ۱/۶ میلیون تن با عیار متوسط ۲۰ درصد برای آن تعیین شد [۱۴].

۲- مطالعات شناسایی نمونه

کلیه حفاری‌های انجام گرفته در منطقه شامل ۱۲ ترانشه و ۶ چاهک است. برای مطالعات کانی شناسی نمونه‌هایی از رخنمون‌های سطحی، ترانشه‌ها و چاهک‌ها در یکی از بخش‌های کانی‌سازی شده با کیفیت بهتر برداشت شد. این نمونه‌ها در مجموع به وزن تقریبی ۳۰۰ کیلوگرم به صورت سیستماتیک تهیه و پس از آماده سازی لازم با هم مخلوط گردید. با استفاده از ریفل، ۳۲ کیلوگرم نمونه برای مطالعات فرآوری تهیه شد و سپس این نمونه با روش چهار قسمتی به نمونه‌های کوچک‌تر برای آزمایش‌های مختلف تقسیم شد. از میان نمونه‌های تهیه شده، ۱۶ نمونه برای تهیه و مطالعات مقاطع نازک و ۱۹ نمونه نیز برای آنالیزهای XRD ($\lambda = 1.792 \text{ \AA}$) و XRF با فیلتر نیکلی و آندکالتی با $\lambda = 1.792 \text{ \AA}$ و ۴۰ KV



شکل ۱: نمونه‌ای از طیف XRD کیفی حاصل از یکی از نمونه‌های به‌دست آمده در فعالیت اکتشافی

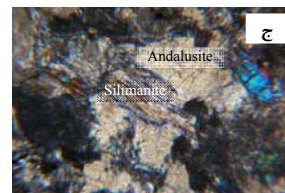
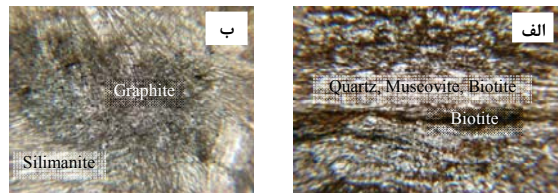
جدول ۲: میانگین نتایج آنالیز XRF نمونه‌های اکتشافی برداشت شده

LOI	SO ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaO	MnO	TiO ₂	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	اکسید
۵/۹	-	۷/۶	۲/۵	۱/۰۸	۰/۰۶	۰/۸۱	۱/۹۲	۱/۴	۱/۸	۲۵/۱	۵۱/۶	%

جدول ۳: درجه آزادی برای محدوده‌های ابعادی مختلف

درجه آزادی (درصد)	اندازه ذرات (میکرون)	اندازه ذرات* (مش)	ردیف
۴۳	۱۴۰۰-۲۰۰۰	۱۴-۱۰	۱
۵۴	۱۰۰۰-۱۴۰۰	۱۸-۱۴	۲
۶۰	۷۱۰-۱۰۰۰	۲۵-۱۸	۳
۷۰	۵۰۰-۷۱۰	۳۵-۲۵	۴
۷۵	۳۵۵-۵۰۰	۴۵-۳۵	۵
۸۲	۲۵۰-۳۵۵	۶۰-۴۵	۶
۹۵	۱۸۰-۲۵۰	۸۰-۶۰	۷

*استاندارد ASTM



شکل ۲: الف - جهت یافتگی کانی‌های کوارتز، بیوتیت و مسکویت (XPL, ×40)؛ ب - تجمع گرافیت در سیلیمانیت بر جا مانده از کیاستولیت دیده می‌شود (XPL, ×40). ج) در این مقطع کانی آندالوزیت به سیلیمانیت تبدیل شده است (XPL, ×40).

نبوده است، بلکه کاملاً درگیر با کانی‌های گروه سیلیمانیت هستند، بنابراین از مرحله سایش صرف‌نظر شد.

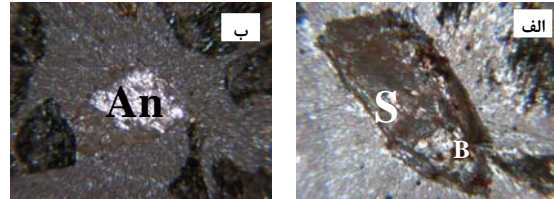
۳-۲- پرعیارسازی به روش مغناطیسی

کنسانتره حاصل از میز لرزان برای کاهش درصد Fe_2O_3 مورد جدایش مغناطیسی شدت بالا به روش خشک قرار گرفت که شدت جریان و زاویه تیغه انتخابی به ترتیب ۴/۸ آمپر و ۷۰ درجه بود (جدول ۷). محصول میانی حاصل از جدایش مغناطیسی برای افزایش بازیابی بار دیگر مورد جدایش مغناطیسی قرار گرفت (جدول ۸) که در نهایت با مخلوط کردن کنسانتره اول و کنسانتره دوم درصد Al_2O_3 ۵۷/۲۸ به دست می‌آید (جدول ۹).

۳-۳- پرعیارسازی به روش فلوتاسیون

دانه‌بندی مورد استفاده در آزمایش فلوتاسیون با توجه به مطالعات کانی‌شناسی و نیز درجه آزادی به دست آمده، ۱۵۰-۷۵ میکرون در نظر گرفته شد.

وزن خوراک اولیه ۵۰۰ گرم بود که با افزودن آب، درصد جامد پالپ مورد استفاده در این آزمایش به حدود ۲۵ درصد رسانده شد. آنالیز XRF خوراک اولیه در جدول شماره ۱۰ آمده است. با توجه به هدف آزمایش و نوع کانی‌های مزاحم، از فلوتاسیون معکوس (شناورسازی گانگ و جمع‌آوری آن در بخش کف) برای حذف آهن و میکا استفاده شد، بنابراین از کلکتورهای FS-2، AERO 825 و AERO 801 و کف ساز MIBC استفاده گردید. همچنین برای تنظیم pH از اسید سولفوریک ۵ درصد استفاده شد. ابتدا با افزودن ۴۵۰۰ gr/t اسید سولفوریک به سلول فلوتاسیون (مدل دنور)، pH محیط از ۸/۳ به ۲/۷ کاهش یافت. سپس با افزودن AERO825 و AERO801 هر کدام به مقدار ۱۰۰۰ gr/t به عنوان کلکتور و MIBC ۱۵۰ gr/t به عنوان کف‌ساز به سلول، آماده سازی به مدت ۴ دقیقه انجام گرفت و کف‌گیری مرحله اول به مدت ۳ دقیقه انجام شد. مجدداً AERO825 و AERO801 هر کدام به مقدار ۱۰۰۰ gr/t و MIBC ۱۵۰ gr/t به سلول اضافه گردید و پس از ۲ دقیقه آماده سازی، کف‌گیری مرحله دوم به مدت ۳ دقیقه انجام گرفت. سپس مقدار FS-2 ۱۰۰۰ gr/t به عنوان کلکتور به سلول اضافه گردید و پس از ۳ دقیقه آماده سازی، MIBC ۳۰۰ gr/t به عنوان کف‌ساز اضافه شد و پس از آماده سازی مجدد به مدت ۱ دقیقه، کف‌گیری مرحله سوم نیز به مدت ۳ دقیقه انجام شد.



شکل ۳: الف- درگیری بیوتیت با سیلیمانیت در ابعاد ۳۵۵-۵۰۰ میکرون (XPL, $\times 100$)، S: سیلیمانیت، B: بیوتیت؛ ب- آزاد شدن کامل آندالوزیت از کانی‌های درگیر در ابعاد ۲۵۰-۳۵۵ میکرون (XPL, $\times 100$)، An: آندالوزیت

نتایج مطالعات درجه آزادی، نمونه‌ها برای آزمایش‌های فرآوری، به دو محدوده ابعادی تقسیم شدند. برای افزایش درصد Al_2O_3 در محدوده ابعادی ۱۵۰-۳۵۵ میکرون (۶۶ درصد از نمونه اولیه) از روش ثقلی (میز لرزان) و جداکننده مغناطیسی شدت بالا و در محدوده ابعادی ۷۵-۱۵۰ میکرون (۲۰ درصد از نمونه اولیه) از روش فلوتاسیون استفاده شد. بقیه مواد زیر ۷۵ میکرون (۱۴ درصد از نمونه اولیه) بود که به علت کم بودن آن نسبت به خوراک اولیه و ایجاد مزاحمت در فلوتاسیون و امکان ناپذیری فرآوری با روش‌های معمول، کنار گذاشته شدند.

۳-۱- پرعیارسازی به وسیله میز لرزان

در پرعیارسازی به روش میز لرزان (مدل هولمن ویفلی) دو پارامتر شیب و فرکانس متغیر انتخاب شدند. پارامترهای دبی آب (۱۲ لیتر بر دقیقه)، درصد جامد پالپ (۴۵ درصد)، دامنه نوسان (۱۵ میلی‌متر) و وزن خوراک (۵۰۰ گرم) ثابت نگه داشته شدند. آنالیز XRF خوراک اولیه میز لرزان در جدول شماره ۴ آمده است.

در ابتدا آزمایش‌های فرآوری در شیب‌های ۶، ۱۰ و ۱۴ درجه با در نظر گرفتن فرکانس ثابت ۶۰ هرتز انجام شد که با توجه به درصد Al_2O_3 (۴۰/۵ درصد) شیب ۱۴ درجه به عنوان شیب بهینه در نظر گرفته شد (جدول ۵).

برای تعیین فرکانس بهینه میز لرزان آزمایش‌های فرآوری با در نظر گرفتن شیب بهینه ۱۴ درجه، در فرکانس‌های ۵۰، ۶۰ و ۷۰ هرتز انجام شد که براساس نتایج به دست آمده فرکانس ۵۰ هرتز به عنوان فرکانس بهینه انتخاب شد (جدول ۶). درصد Al_2O_3 و میزان بازیابی آن در فرآوری به روش میز لرزان به ترتیب ۴۲/۹۱ و ۳۹/۳ درصد به دست آمد. با توجه به مطالعه مقاطع، کانی‌های آهن‌دار به صورت پوشش سطحی

جدول ۴: نتایج XRF بر حسب ترکیب درصد برای خوراک اولیه میز لوزان

L.O.I	SO ₃	P ₂ O ₅	MnO	TiO ₂	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	اکسید
۵/۷۳	-	۰/۳۷	۰/۰۶	۰/۸۱	۱/۱۶	۲/۴۷	۱/۷۱	۱/۱۵	۶/۶۵	۲۷/۳۵	۵۲/۰۹	%

جدول ۵: آزمایش‌های میز لوزان در شیب‌های مختلف برای مواد با محدوده ابعادی ۳۵۵-۱۵۰ میکرون با فرکانس ثابت ۶۰ هرتز

درصد اکسیدها					نوع محصول	بازیابی (%) Al ₂ O ₃	وزن باطله (%)	وزن محصول میانی (%)	وزن کنسانتره (%)	شیب عرضی میز (درجه)	شماره آزمایش
K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂							
۱/۴۵	۱/۲۱	۸/۴	۳۲/۹	۴۹/۲	کنسانتره	۴۷/۱۹					
۱/۷۱	۱/۴	۶/۳۲	۲۲/۹	۵۴/۱	میانی	۱۸/۹۰	۴۲/۵	۲۱	۳۶/۵	۶	۱
۳/۴۴	۲/۱۳	۵/۳	۲۰/۳	۶۱/۲۴	باطله	۳۳/۹۱					
۱/۲۲	۱/۲۳	۷/۳۵	۳۶/۱	۴۷/۴۴	کنسانتره	۴۴/۶۶					
۱/۸	۱/۵۴	۶/۸۵	۳۰	۵۲/۵	میانی	۲۷/۴۳	۴۰/۷	۲۵/۲	۳۴/۱	۱۰	۲
۳/۵۵	۲/۲۴	۶/۳۴	۱۸/۹	۶۰/۱	باطله	۲۷/۹۱					
۱/۱۷	۱/۰۵	۷/۵۳	۴۰/۵	۴۲	کنسانتره	۳۴/۹۲					
۱/۷۶	۱/۵	۷/۱۸	۳۳/۱۴	۴۹/۱	میانی	۳۰/۰۲	۵۱/۲	۲۵	۲۳/۸	۱۴	۳
۳/۴۹	۲/۶	۵/۷	۱۸/۹	۶۲/۱	باطله	۳۵/۰۶					

جدول ۶: آزمایش‌های میز لوزان در فرکانس‌های مختلف برای مواد با محدوده ابعادی ۳۵۵-۱۵۰ میکرون با شیب بهینه ۱۴ درجه

درصد اکسیدها					نوع محصول	بازیابی بر حسب درصد Al ₂ O ₃	درصد وزنی باطله	درصد وزنی محصول میانی	درصد وزنی کنسانتره	فرکانس (هرتز)	شماره آزمایش
K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂							
۱/۳۲	۱/۲۴	۷/۴۳	۴۲/۹۱	۳۹/۲۵	کنسانتره	۳۹/۳					
۱/۸۹	۱/۴۴	۷/۱۵	۳۴/۵۱	۴۵/۸۷	میانی	۲۲/۷۰	۵۶/۷	۱۸/۱	۲۵/۲	۵۰	۱
۳/۸	۲/۱	۵/۹۶	۱۸/۴۴	۶۰/۶	باطله	۳۸/۰۰					
۱/۵۱	۱/۳۵	۷/۲۴	۳۶/۹	۴۵/۱۵	کنسانتره	۲۷/۴۸					
۱/۹۱	۱/۵	۷/۱۶	۳۱/۵۱	۴۸/۸۷	میانی	۳۱/۵۸	۴۷/۵۵	۳۰/۳	۲۲/۱۵	۶۰	۲
۳/۵۵	۲/۱۷	۵/۸	۲۵/۶	۵۳/۴	باطله	۴۰/۹۴					
۱/۸	۱/۳۷	۶/۷	۳۳/۵۷	۴۸/۱۱	کنسانتره	۳۲/۱۳					
۲	۱/۴۸	۷/۲۴	۳۲/۴	۴۹/۹	میانی	۳۱/۴۴	۳۹/۷۹	۳۰/۳۱	۲۹/۹	۷۰	۳
۳/۱	۱/۶۲	۷/۰۱	۲۸/۶	۵۰/۲	باطله	۳۶/۴۳					

جدول ۷: نتایج آزمایش مغناطیسی روی کنسانتره حاصل از میز لوزان به وزن ۵۰۰ گرم در شرایط بهینه با ابعاد ۳۵۵-۱۵۰ میکرون

درصد اکسیدها					بازیابی بر حسب درصد Al ₂ O ₃	درصد وزنی	نوع محصول	زاویه تیغه (درجه)	شدت جریان (آمپر)
Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃					
۰/۴۴	۰/۷۹	۰/۵۱	۳۲/۱	۶۲/۱۲	۲۶/۵۶	۲۰/۵۳	کنسانتره		
۱/۱	۱/۱۹	۵/۵۲	۳۷/۱	۴۹/۶۱	۶۲/۴۱	۶۰/۴	میانی	۷۰	۴/۸
۳/۷۱	۱/۱۸	۳۴/۶۹	۲۳/۸۱	۲۷/۷۵	۱۱/۰۳	۱۹/۰۷	باطله		

جدول ۸: نتایج آزمایش مغناطیسی روی محصول میانی حاصل از جدایش مغناطیسی به وزن ۳۰۰ گرم

درصد اکسیدها					درصد بازبایی برحسب Al ₂ O ₃	درصد وزنی	نوع محصول	زاویه تیغه (درجه)	شدت جریان (آمپر)
Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃					
۰/۸۷	۰/۹۵	۱/۱	۴۰/۱۹	۵۲/۵۵	۲۳/۵۲	۲۱	کنسانتره	۸۰	۴/۸
۱/۴	۱/۳	۳/۵۱	۴۰	۴۸/۵۹	۶۷/۵۳	۶۵/۲	میانی		
۴/۱۲	۱/۱۹	۱۸/۲۲	۳۷/۶۹	۳۰/۴۳	۸/۹۵	۱۳/۸	باطله		

جدول ۹: نتایج حاصل از مخلوط دو کنسانتره حاصل از جدایش مغناطیسی

Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	اکسید
۰/۶۶	۰/۸۷	۰/۸۱	۳۶/۱۹	۵۷/۲۸	%

جدول ۱۰: نتایج XRF بر حسب ترکیب درصد برای خوراک فلوتاسیون

L.O.I	SO ₃	P ₂ O ₅	MnO	TiO ₂	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	اکسید
۵/۵۹	-	۴/۸	۰/۰۶۴	۰/۸	۱/۵	۱/۴۳	۲/۰۱	۱	۸/۴۹	۲۶/۹۵	۴۶/۸۸	%

است؛ به طوری که درصد Al₂O₃ در کنسانتره به دست آمده نزدیک به مراجع ارائه شده در جدول ۱۳ است. در نهایت با توجه به مجموع مطالعات به دست آمده، فلوشیت نهایی فرآوری به صورت نمودار شکل شماره ۴ پیشنهاد می‌گردد. بالانس جرمی بر اساس وزن بار اولیه و نیز میزان بازبایی و درصد Al₂O₃ در هر مرحله در این فلوشیت ارائه گردیده است.

۴- فرایند مولایت‌زایی

مواد اولیه مورد استفاده برای تولید دیرگدازهای مولایتی بر اساس درجه دیرگدازی و مقاومت به خوردگی مورد نیاز متفاوت است. در کاربردهای متداول و دماهای نسبتاً پایین (حداکثر ۱۳۰۰°C) از مواد معدنی رسی چون کائولینیت (Al₂O₃.2SiO₂.2H₂O)، پیروفیلیت (Al₂O₃.4SiO₂.H₂O) و دیگر کانی‌های هم خانواده استفاده می‌شود؛ اما برای کاربردهای دمای بالا که شرایط خوردگی نیز حاد است، استفاده از مواد اولیه با آلومینای بالاتر با حداقل Al₂O₃ ۵۶ درصد ضروری است. از جمله این مواد، می‌توان به مواد معدنی گروه سیلیمانیت (Al₂O₃.SiO₂) اشاره نمود که در صورت خلوص بالا می‌تواند تا ۶۳ درصد اکسید آلومینیوم داشته باشد و می‌تواند مواد اولیه مناسبی برای تولید دیرگدازهای پر آلومینا با حداقل ۹۰ درصد فاز مولایت باشد. با انجام دادن عملیات

بار دیگر با افزودن FS-2 ۵۰۰ gr/t و آماده‌سازی به مدت ۲ دقیقه، مرحله چهارم کفگیری به مدت ۲ دقیقه انجام شد. بنابراین در پایان آزمایش پالپ موردنظر به دو بخش کنسانتره و باطله راه یافته بود که بعد از فیلتر و خشک کردن نمونه، نمونه‌ای معرف از آن‌ها تهیه و به منظور بررسی محتوای عیاری، نمونه‌ها به آزمایشگاه مربوطه ارسال شد. نتایج آنالیز XRF روی کنسانتره به دست آمده، عیار Al₂O₃ را ۴۶/۳ درصد و بازبایی بر حسب Al₂O₃ را ۴۷/۵۶ درصد تخمین زد (جدول شماره ۱۱). از آنجایی که کنسانتره حاصل از جداکننده مغناطیسی پرعیار بوده (۵۷/۲۸ درصد Al₂O₃) و عیار کنسانتره حاصل از فلوتاسیون (۴۶/۳ درصد Al₂O₃) پایین‌تر بود و از طرفی درصدی از مواد اولیه که در محدوده ابعادی مناسب برای فلوتاسیون یعنی ۷۵-۱۵۰ میکرون قرار می‌گیرد به طور قابل توجهی کمتر از درصدی از موادی است که در محدوده ابعادی مناسب برای جداکننده مغناطیسی است، به همین دلیل برای تهیه کنسانتره‌ای با قابلیت مولایت‌زایی، ۴۵۰ گرم کنسانتره حاصل از جداکننده مغناطیسی با ۵۰ گرم کنسانتره حاصل از فلوتاسیون مخلوط گردید که آنالیز XRF آن در جدول شماره ۱۲ آمده است. اگر وزن بالاتری از کنسانتره فلوتاسیون استفاده شود درصد Al₂O₃ کنسانتره و محدوده مجاز ناخالصی‌ها خاصه K₂O در خارج از محدوده استاندارد آن برای استفاده به عنوان مواد اولیه در دیرگدازها قرار می‌گیرد. ترکیب عیار کنسانتره حاصل برای فرایند مولایت‌زایی مطابق جدول ۱۳ با نتایج دیگران قابل مقایسه

جدول ۱۱: شرایط انجام یافتن آزمایش‌های فلوتاسیون و نتایج حاصل از آن‌ها

شماره آزمایش	نوع کلکتور	PH	نوع محصول	وزن (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	بازیابی Al ₂ O ₃ (%)	نوع فرآیند
۱	AERO 825 و AERO 801	۴/۷	کنسانتره	۴۹	۴۷/۵	۳۶/۳۳	۲/۹۷	۱/۲	۱/۳	۵۸/۳۶	معکوس
			باطله (کف)	۵۱	۵۰/۸۵	۲۴/۹	۹/۷۲	۱/۵۵	۲/۶۵	۴۱/۶۴	
۲	FS-2	۴/۹	کنسانتره	۳۲	۴۶/۴۳	۴۰/۲	۲	۱/۱۸	۱/۱	۴۸/۳۶	معکوس
			باطله (کف)	۶۸	۵۰/۸۸	۲۰/۲	۱۵/۲۶	۱/۶۵	۳/۰۵	۵۱/۶۴	
۳	AERO 825 و AERO 801 و FS-2	۲/۷	کنسانتره	۲۸/۲۵	۴۲/۴	۴۶/۳	۰/۹	۱/۱۸	۰/۴۷	۴۷/۵۶	معکوس
			باطله (کف)	۷۱/۷۵	۴۵/۱۴	۲۰/۱	۲۱/۱	۲/۱۷	۲/۷	۵۲/۴۴	

جدول ۱۲: ترکیب کنسانتره مورد استفاده برای آزمون مولایت‌زایی

اکسید	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O
درصد	۵۶/۱۸	۳۶/۸۱	۰/۸۲	۰/۹۰	۰/۶۴

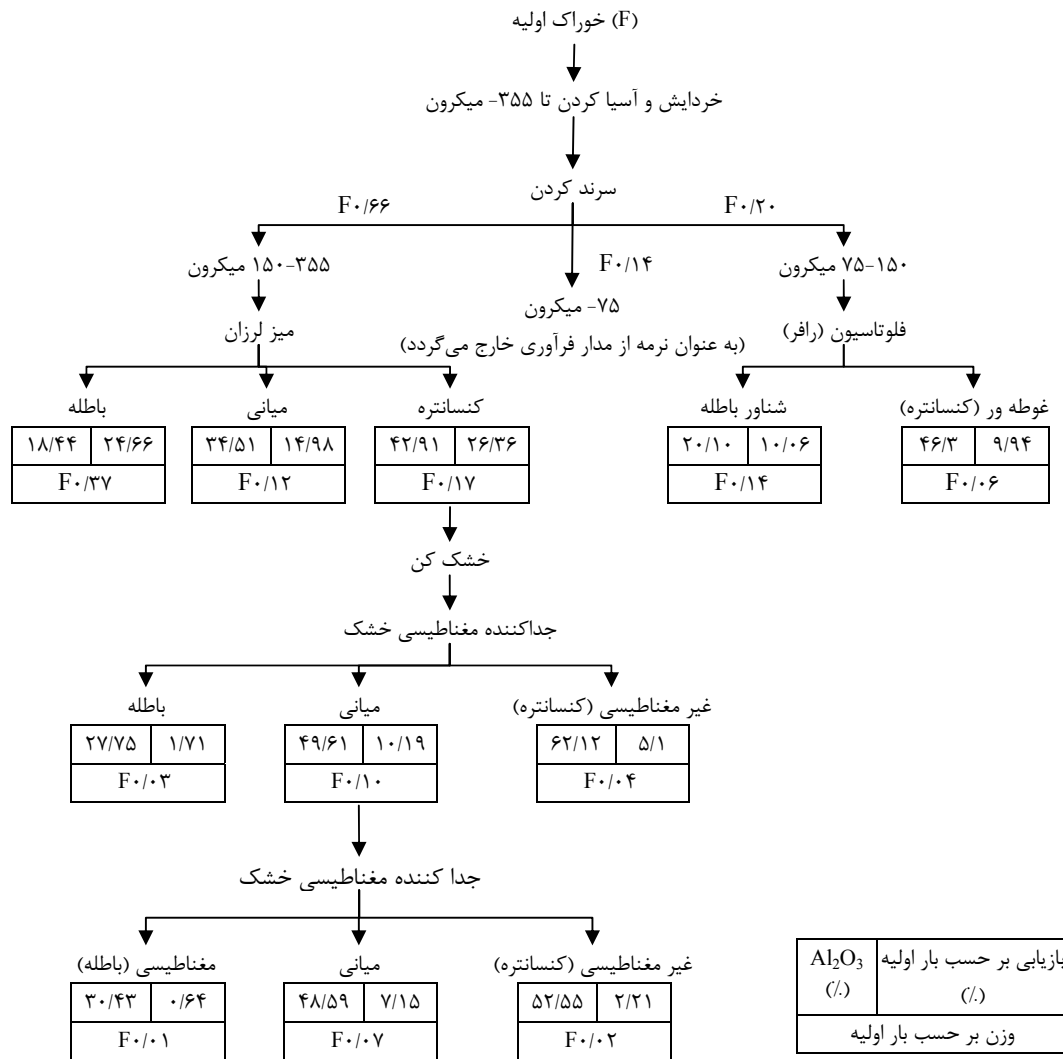
جدول ۱۳: ترکیب درصد کنسانتره‌های به دست آمده از نتایج کار

مربوط به مراجع دیگر

درصد اکسیدها	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O
بدیعی، سید حسین [۱۵]	۵۹/۲	۳۸/۸۷	۰/۴	۰/۱۴	۰/۲۴
خیاطی مطلق، افشین [۱۶]	۵۷/۹۵	۳۶/۹۷	۱/۳۷	۰/۱۹	۰/۳۲
Tripathi, H, S. [۱۷]	۵۷/۶	۴۰/۳	۰/۳۱	۰/۰۲	-
کنسانتره به دست آمده در این تحقیق	۵۶/۱۸	۳۶/۸۱	۰/۸۲	۰/۹۰	۰/۶۴

شرایط عملیات حرارتی (دما، زمان، اتمسفر)، نوع و میزان مواد افزودنی و درجه پراکندگی آن در کنسانتره آندالوزیت و دیگر عوامل در درجه مولایت‌زایی و کیفیت بدنه دیرگداز مولایتی تولید شده متفاوت خواهد بود. این مقاله به‌طور عمده به بررسی و مطالعه قابلیت مولایت‌زایی کانی‌های گروه سیلیمانیت در شرایط مختلف دمایی، زمانی و دانه‌بندی می‌پردازد. دانه‌بندی کنسانتره آندالوزیت اولیه نسبتاً درشت دانه است، بنابراین برای افزایش قابلیت تراکم‌پذیری رز نمودن آن ضروری است. عملیات نرم کردن با استفاده از آسیای پرشتاب^۳ انجام شد و مواد در چهار گروه دانه‌بندی ۳۸μm، ۷۵μm، ۱۵۰μm و ۱m تهیه شدند. آسیای پرشتاب مورد استفاده از نوع آسیای گلوله‌ای ساخت داخل بوده که حجم محفظه آن ۳۰۰cc و ۳۰۰-تهیه شدند. آسیای پرشتاب مورد استفاده از نوع آسیای جنس گلوله‌ها آلومینایی و ساخت داخل است. همچنین پودر کردن به حالت خشک انجام شد و نسبت حجم پودر به گلوله ۱ به ۱ بود. نمونه‌های فشرده به شکل قرص استوانه‌ای به جرم ۵ گرم، ضخامت ۶mm، قطر ۲۰mm و دانسیته ظاهری متوسط ۲/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب که معادل حدود ۶۰ درصد دانسیته تئوری است با استفاده از قالبی از جنس فولاد SPK و دستگاه پرس ۲۰ تنی و اعمال فشارهای در محدوده ۶۰MPa- ۲۰ تهیه شدند. آزمایش‌های عملیات حرارتی در شرایط مختلف دمایی (۱۶۰۰-۱۴۰۰)، زمانی (۳/۵-۱ ساعت) و دانه‌بندی (۳۰۰-۳۸ میکرون) با استفاده از کوره کربولایت از نوع HTF 18/15 قادر به افزایش دما تا ۱۸۰۰C و قابلیت برنامه‌ریزی برای اجرای سیکل‌های مختلف دما- زمان است. درصد مولایت نمونه‌های زینتر شده با استفاده از آنالیز کمی XRD تعیین شد، به‌طوری‌که شدت بلندترین پیک مربوط به فاز مولایت

حرارتی، کانی‌های سیلیمانیتی تجزیه شده و به مولایت (3Al₂O₃.2SiO₂) تبدیل می‌شوند (جدول شماره ۱۴) که پایداری شیمیایی (مقاومت به خوردگی) و حرارتی، دیرگدازی (۱۸۵۰C) و مقاومت به شوک حرارتی بالایی دارد. مکانیزم مولایت‌زایی براساس نفوذ داخلی یون‌های اکسیژن، آلومینیم و سیلیسیم و انجام دادن واکنش‌های جامد- جامد و یا مکانیزم انحلال- نفوذ- رسوب (SDP)^۴ در حضور فاز مایع است. عوامل زیادی چون دما، زمان، دانه‌بندی و ناخالصی مواد اولیه، اتمسفر کوره و... بر سینتیک این فرآیند دخالت دارند [۲۴-۱۵]. بسته به خلوص کنسانتره آندالوزیت از نظر نسبت Al₂O₃/SiO₂، نوع و میزان ناخالصی‌ها، دانه‌بندی آن، میزان تراکم اولیه،



شکل ۴: فلوشیت پیشنهادی فرآوری

برای نمونه مورد مطالعه با شدت بلندترین پیک معادل برای نمونه مولایت خالص (نمونه استاندارد) مقایسه شده است. شایان ذکر است که بالاترین شدت پیک XRD برای گروه صفحات {۲۱۰} با $2\theta = 26/267^\circ$ و $d = 3/38 \text{ \AA}$ است.

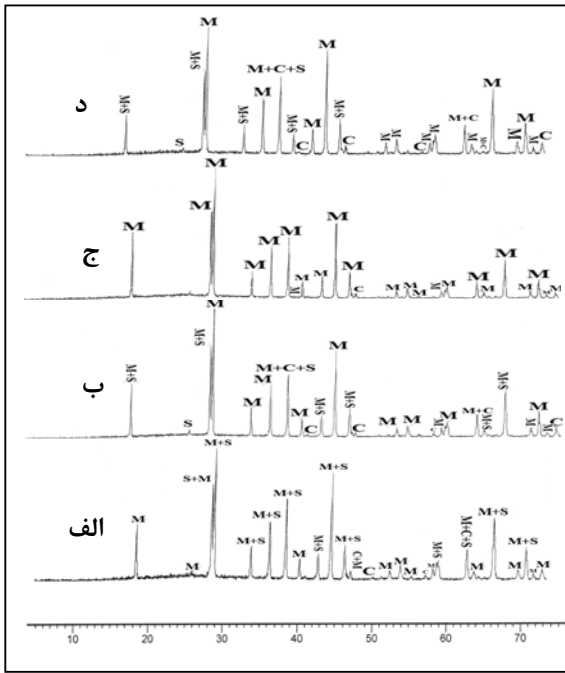
۴-۱- تأثیر دما بر درجه مولایت‌زایی

تبدیل کیانیت به مولایت از دماهای حدود ۱۲۵۰ شروع می‌شود و تا دماهای ۱۵۵۰°C ادامه می‌یابد [۱۸ و ۱۹]. لذا در این پژوهش برای افزایش سرعت مولایت‌زایی و کاهش زمان پخت، اولین دما برای فرایند مولایت‌زایی ۱۴۰۰°C انتخاب شد. در هر مرحله نیز برای کنترل نتایج نمونه‌های به دست آمده به وسیله

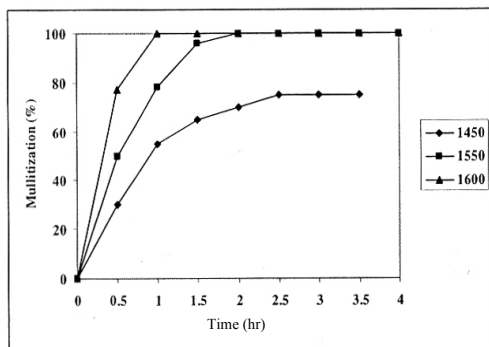
جدول ۱۴: جزئیات تجزیه کانی‌های گروه سیلیمانیت و مولایت

مشخصات	کیانیت	آندالوزیت	سیلیمانیت	مولایت
سیستم تبلور	تری کلینیک	ارتورومبیک	ارتورومبیک	ارتورومبیک
چگالی (gr/cm ³)	۳/۵۳-۳/۶۵	۳/۱۳-۳/۱۶	۳/۲۳-۳/۲۷	۳/۰۶-۳/۱۵
دمای تجزیه (°C)	۱۴۱۰	۱۵۰۰	۱۶۲۵	—
درصد تغییرات حجمی	۱۵	۴	۸	—
نوع سیلیس	کریستوبالیت	آمورف	آمورف	—

انتخاب و زمان‌های از ۱ الی ۳/۵ ساعت مطالعه شد. طبق نتایج مشاهدات میکروسکوپی الکترونی در زمان‌های طولانی‌تر از ۱/۵ ساعت درشت‌دانه‌گی ایجاد می‌شود و هرچند میزان تخلخل کاهش می‌یابد، اما تخلخل‌های نسبتاً بزرگی ظاهر می‌شود (شکل ۹ الف، ب، ج و د) که می‌تواند به دلیل پخت بیش از حد و انبساط حباب‌ها در فاز شیشه و بادکردگی آن باشد. با وجود این مولایت‌زایی در دمای 1550°C بعد از ۲ ساعت تکمیل می‌شود (شکل شماره ۶).

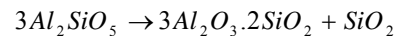


شکل ۵: طیف XRD برای کنسانتره کیانیتی زینتر شده در شرایط مختلف: الف) - $3\mu\text{m}$ و 1400°C ، ب) - $3\mu\text{m}$ و 1550°C ، ج) - $3\mu\text{m}$ و 1550°C و د) - $30\mu\text{m}$ و 1550°C در زمان ثابت ۲ ساعت
M: مولایت، S: سیلیمانیت، C: کروندم



شکل ۶: درصد مولایت‌زایی به‌عنوان تابعی از زمان پخت در دماهای مختلف برای دانه‌بندی معین $3\mu\text{m}$

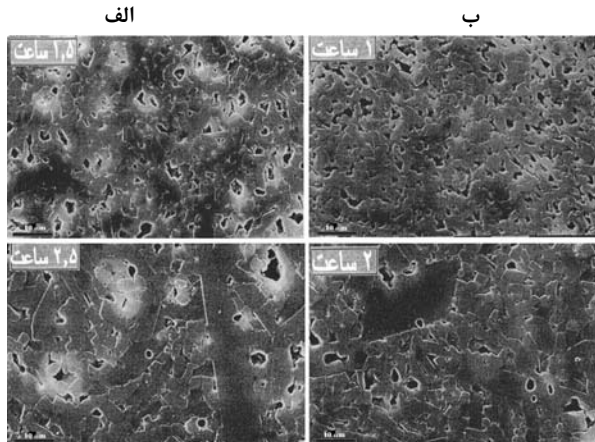
XRD ($3\mu\text{m}$ ، 40KV با فیلتر نیکلی و آندکالتی با $\lambda=1/1792\text{\AA}$) مطالعه فازی شدند. نتایج XRD نشان می‌دهد که در دمای زیر 1400°C مولایت‌زایی کامل نبوده است و پیک‌هایی از سیلیمانیت دیده می‌شود (شکل ۵ الف). وجود پیک‌های سیلیمانیت می‌تواند در نتیجه تغییرات فازی آندالوزیت و کیاستولیت در کنسانتره باشد که به دلیل دمای ناکافی نتوانسته‌اند به مولایت تبدیل شوند. وجود پیک‌های کروندم مربوط به وجود کروندم آزاد در کنسانتره اولیه است که می‌تواند به حالت کریستالیزه باقی بماند، زیرا سیلیس آزاد شده در نتیجه تجزیه آندالوزیت با ناخالصی‌ها وارد واکنش می‌شود و تشکیل فاز شیشه می‌دهد. مطابق طیف XRD مولایت‌زایی در دمای 1500°C (شکل ۵ ب) به مدت ۲ ساعت هنوز کامل نیست و پیک‌هایی از سیلیمانیت دیده می‌شوند. در دماهای بالاتر (1550°C) مولایت‌زایی تکمیل می‌شود (شکل ۵ ج). به این ترتیب با مقایسه نتایج XRD مربوط به آزمایش‌ها در دماهای مختلف، می‌توان چنین نتیجه گرفت که با افزایش دما، شدت پیک‌های اصلی مولایت افزایش می‌یابد (شکل ۵ ج-د در مقایسه با ۵-الف). مطابق شکل ۶، درجه مولایت‌زایی در دمای 1550°C تکمیل می‌شود. در دمای 1600°C سرعت مولایت‌زایی بالاتر است، اما به دلیل شکل‌گیری جدی‌تر فاز مذاب، درصد فاز شیشه در نمونه زینتر-شده افزایش می‌یابد. بنابراین دمای بهینه برای مولایت‌زایی همان 1550°C است.



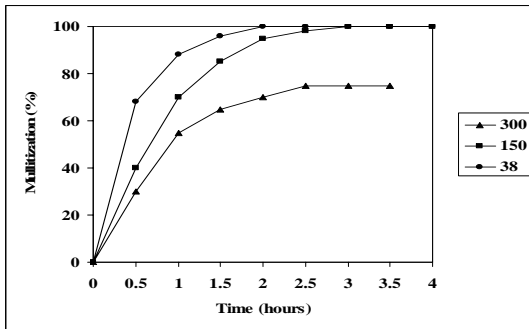
مشاهدات میکروسکوپ الکترونی (SEM PhilipsXL30) برای نمونه پخت شده در دماهای 1400°C و کمتر از آن، ساختار فشرده‌ای را نشان نمی‌دهد (شکل ۷ الف) که به دلیل ناکافی بودن دمای زینترینگ است. در دماهای بالاتر به تدریج تخلخل کاهش می‌یابد، در مقابل به میزان فاز شیشه^۴ افزوده می‌شود (شکل ۷ ب و ج). نمونه تهیه شده در شرایط زینترینگ 1550°C به مدت ۱ ساعت، حکاکی شیمیایی^۵ قوی (محلول ۲۰٪ HF و زمان حکاکی معادل ۶۰ ثانیه) می‌شود به طوری که فاز مرز دانه‌ای و دانه‌های ریز هم محور مورد انحلال قرار می‌گیرد به این ترتیب دانه‌های سوزنی و کشیده مولایت به خوبی ظاهر می‌شوند (شکل ۸).

۴-۲- تأثیر زمان

برای بررسی تاثیر زمان بر فرایند مولایت‌زایی، دمای 1550°C



شکل ۹: تصاویر SEM برای نمونه پخت شده در دمای 1550°C در زمان های مختلف الف: ۱ ب: ۱/۵ ج: ۲/۵:د: ۲ ساعت



شکل ۱۰: درصد مولایت‌زایی به عنوان تابعی از زمان پخت برای دانه‌بندی‌های مختلف در دمای ثابت 1550°C

جدول ۱۵- دانسیته و سختی متوسط برای نمونه‌های زیرتر شده با دانه‌بندی متفاوت در دما و زمان ثابت (1550°C ، ۱/۵ ساعت)

دانه بندی	درصد تراکم پذیری بر حسب دانسیته تئوری	سختی (ویکرز)	درجه مولایتی شدن (%)
$< 38 \mu\text{m}$	۹۵	۴۰۰	۷۸/۷
$< 75 \mu\text{m}$	۹۲	۳۸۵	۷۶/۴
$< 150 \mu\text{m}$	۸۹	۳۵۶	۷۲/۵
$< 300 \mu\text{m}$	۸۵	۳۳۰	۶۴/۵

۵- نتیجه‌گیری

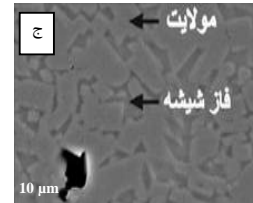
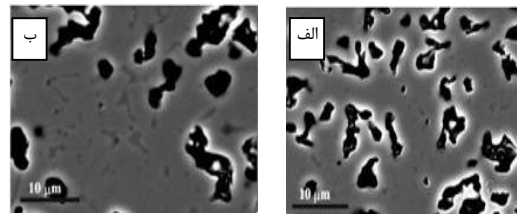
نتایج مطالعات و آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق به شرح زیر ارائه می‌شود:

- بر اساس نتایج مطالعات XRD و کانی‌شناسی نوری، کانی‌های اصلی تشکیل دهنده ماده معدنی عمدتاً کوارتز،

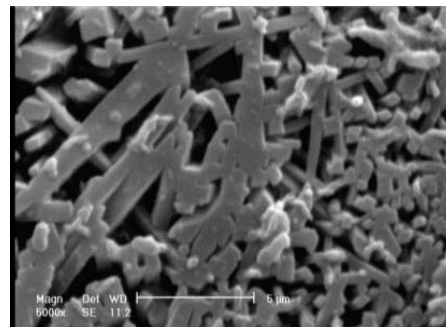
۴-۳- تاثیر دانه‌بندی

در این مطالعه، آزمایش‌های مولایت‌زایی برای چهار دانه‌بندی مختلف $38\mu\text{m}$ ، $75\mu\text{m}$ ، $150\mu\text{m}$ و $300\mu\text{m}$ در دمای 1550°C به مدت ۱/۵ ساعت آزمایش شد. مطابق نتایج XRD، در دانه‌بندی ۳۰۰ میکرون هنوز فازهای سیلیمانیت وجود دارد (شکل ۵ د). به طوری که برای ۳۰۰ میکرون حتی بعد از ۳/۵ ساعت درصد مولایت‌زایی به ۷۰ درصد می‌رسد؛ درحالی‌که برای اندازه ذرات زیر ۳۸ میکرون بعد از ۲ ساعت مولایت‌زایی تکمیل شده است (شکل شماره ۱۰).

نتایج اندازه‌گیری سختی ویکرز و دانسیته (روش ارشمیدس) برای نمونه‌های با دانه‌بندی مختلف نشان می‌دهد که در دانه‌بندی کمتر از ۳۸ میکرون، سختی و دانسیته نمونه‌ها نسبت به ۳۰۰ میکرون به مراتب بالاتر است (جدول ۱۵).



شکل ۷: تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه پخت شده الف- 1400°C ب- 1500°C ج- 1550°C با حکاکی حرارتی تحت شرایط 1500°C - 1300°C به مدت ۱ ساعت



شکل ۸: تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM برای نمونه تهیه شده در شرایط زینترینگ 1550°C به مدت ۱ ساعت و حکاکی شیمیایی در شرایط محلول HF ۲۰ درصد و زمان حکاکی ۶۰ ثانیه

مسکویت، بیوتیت، آلبیت، استئارولیت و کانی‌های گروه سیلیمانیت است.

- عیار مواد مزاحم مانند ترکیبات آهن و قلیایی‌ها ($Fe_2O_3 = 7/6$ درصد و $Na_2O+K_2O = 4$ درصد) در ماده معدنی زیاد بوده و حذف آن‌ها در مرحله فرآوری ضروری است.

- پس از مطالعات فرآوری روی نمونه اولیه با عیار ۱۰ درصد سیلیمانیت به روش میز لرزان در محدوده ابعادی ۱۵۰-۳۵۵ میکرون، شیب بهینه میز ۱۴ درجه و فرکانس بهینه ۵۰ هرتز به دست آمد و عیار Al_2O_3 از ۲۷ درصد به ۴۲ درصد افزایش یافت و بازیابی عملیات بر حسب Al_2O_3 به ۳۹ درصد رسید.

- کنسانتره حاصل از میز لرزان جدا کردن کانی‌های آهن‌دار مورد جدایش مغناطیسی شدت بالا به روش خشک قرار گرفت و با انتخاب بهینه زاویه تیغه ۷۰ درجه و شدت جریان ۴/۸ آمپر، درصد Al_2O_3 از ۴۲ درصد به ۶۲ درصد رسید و محصول میانی جداکننده مغناطیسی مجدداً با زاویه تیغه ۸۰ درجه و شدت جریان ۴/۸ آمپر مورد جدایش مغناطیسی قرار گرفت و درصد Al_2O_3 به ۵۲ درصد رسید که در نهایت با مخلوط دو کنسانتره به دست آمده، درصد متوسط Al_2O_3 به ۵۷ درصد رسید.

- خوراک اولیه در محدوده ابعادی ۱۵۰-۷۵ میکرون با کلکتورهای AERO825، AERO801 و FS-2 مورد آزمایش‌های فلوتاسیون قرار گرفت و درصد Al_2O_3 از ۲۶ درصد به ۴۶/۳ درصد افزایش یافت و بازیابی حاصل از عملیات بر حسب Al_2O_3 به ۴۷/۵۶ درصد رسید.

- عملیات حرارتی مولایت‌زایی در دماهای $1400-1600^{\circ}C$ انجام گرفت که نتایج نشان می‌دهد در دمای ۱۵۵۰ درجه سانتی‌گراد، تحول مولایت‌زایی کامل می‌شود و تخلخل به حداقل مقدار خود می‌رسد. نکته مهم وجود پیک‌های کروندم در طیف XRD در شرایط فوق است که دیرگدازی، استحکام و مقاومت به سایش دیرگداز را افزایش می‌دهد.

- نتایج عملیات مولایت‌زایی در زمان‌های مختلف ۳/۵-۱ ساعت نشان می‌دهد که در زمان ۲ ساعت تحول مولایت‌زایی کامل می‌شود؛ اما برای زمان‌های طولانی‌تر مطابق تصاویر SEM علاوه بر درشت شدن ریز ساختار (رشد دانه‌های کریستالی) تخلخل‌های درشتی در ریز ساختار ظاهر می‌شود که می‌تواند بر خواص مکانیکی سرد و گرم آن اثر منفی داشته باشد. دلیل آن می‌تواند پخت بیش از حد و متورم شدن فاز ویسکوز شیشه‌ای باشد.

- مطالعه دانه‌بندی کنسانتره برای فرآیند مولایت‌زایی در محدوده‌های ۳۰۰-، ۱۵۰-، ۷۵- و ۳۸- میکرون انجام شد و

نتایج نشان داد که در دانه‌بندی زیر ۳۸ میکرون فرآیند مولایت‌زایی در ۱۵۵۰ درجه سانتی‌گراد کامل می‌شود درحالی که برای ۳۰۰ میکرون هنوز چند پیک ضعیف از سیلیمانیت مشاهده می‌شود. در ضمن برای دانه‌بندی ریزتر درصد تراکم‌پذیری و خواص مکانیکی (سختی) بالاتر حاصل می‌شود.

۶- تشکر و قدردانی

از شرکت تحقیقات و کاربرد مواد معدنی ایران به جهت تامین منبع مالی طرح پژوهشی و دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد به جهت در اختیار گذاشتن آزمایشگاه‌های مربوطه تقدیر و تشکر می‌گردد.

منابع

- [1] Lepezin, G.G., Perepelitsyn, V., A., and Pokusaev, V., I.; 1996; "Prospects for organizing industrial production of Kyanite concentrates in the Urals", *Refractories and industrial ceramics*, Vol. 37, No. 8, p. 271.
- [2] Heberto, B. R., Enrique, R., R., and Elizabeth, R., G., 2004; "Dense Mullite from attrition-milled Kyanite and Aluminum metal", *J. of the Am. Ceram. Soc.*, Vol. 87, No. 1, p.144.
- [3] Tripathi, H.S., and Banerjee, G.; 1998; "Synthesis and mechanical properties of mullite from beach sand silimanite: Effect of TiO_2 ", *J. of the European Ceramic Society*, Vol. 18, pp. 2081-2087.
- [4] Mazel, F., Gonon, G., and Fantozzi, G.; 2002; "Manufacture of mullite substrates from andalusite for the development of thin film solar cells", *J. of the Euro. Ceram. Soc.*, Vol. 22, pp. 453-461.
- [5] James, F., Shockelford, and Robert, H.; 2008; Doremus, "Ceramic and glass materials: Structure, Properties and Processing", Springer
- [6] Potter, M., J.; 2001; "Materials review: Kyanite", *Am.; Ceram. Soc. Bull.*, Vol. 80, No. 8, pp. 77-79.
- [۷] پور قهرمانی، پرویز، اولیاء زاده، منوچهر و روح شهباز، جمشید؛ ۱۳۷۵؛ "فرآوری آندالوزیت خراسان (سر تل)", پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
- [۸] ساطعی، علی و اولیاء زاده، منوچهر؛ ۱۳۷۳؛ "فرآوری آندالوزیت همدان"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

- [18] Defonse, J., P.; 1997; "Mullitization of Andalusite in refractory bricks", Key Engineering Materials, Vols. 132-136, pp. 1798-1801.
- [19] Marie-Laure, Bouchetou; 2005; "Mullite grown from fired anadaluite grains: the role of impurities and of the high temperature liquid phase on the kinetics of mullitization and consequences on thermal shocks resistance", Ceramics International, Vol. 31, pp. 99-1005.
- [20] Joaquin, A., S., Ricardo, C., A., Heberto, B., R., and Bradt R., C., 2002; "Mechanical activation of the decomposition and sintering of Kyanite", J. of the Am. Ceram. Soc., Vol. 85 No. 10, pp. 2425.
- [21] Bradt, C., R., Joaquin, A., S., and Heberto, B., R., 2005; "Nano-milling of the Sillimanite mineral, Kyanite, and its reaction with alumina to form mullite", J. of Ceram. Processing Research, Vol. 6, No. 4, pp. 271-275.
- [22] Takesshita, M., Matsuda, O., Watari, T., and Torikai, T., 1993; "Sintering and mullite formation from Kyanite-glass system", J. of composition", Geochimica et cosmochimica Acta, Vol. 63, No. 6, pp. 785-797.
- [23] Sainz, M., A., Serrano, F., J., Amigo, J., M., Bastida, J., and Caballero, A., 1997; "Microstructural evolution and growth of crystallite size of mullite during thermal transformation of kyanite", J. of the European Ceramic Society, Vol. 17, issue 11, pp. 1277-1284.
- [24] Tomba, A., Camerucci, M., A., Urretavizcaya, G., Cavalierri, A., L., Sainz, M., A., and Caballero, A., 1999; "Elongated mullite crystals obtained from high temperature transformation of sillimanite", Ceramic International, Vol. 25 pp. 245-252.
- [9] Bulut G., and Yurtsever, C.; 2004; "Flotation behavior of Bitlis kyanite ore", International Journal of Mineral Processing, Vol. 73, pp. 29-36.
- [10] Prabhakar, S., Bhaskar, R., and Subba, R., 2006; "Beneficiation of sillimanite by column flotation- apilot scale study", International Journal of Mineral Processing, Vol. 81, pp. 159-165.
- [11] Eric, H., Oelkers, and Jacques, Schott; 1999; "Experimental study of kyanite dissolution rates as a function of chemical affinity and solution composition", Geochimica et cosmochimica Acta, Vol. 63, No. 6, pp. 785-797.
- [12] Fatama, Deniz, and Halime, Abakay; 2005; "Removal of hematite from Bitlis-Hurmus kyanite for producing concentrates suitable for the refractory industry", Mineral Processing and Extractive Metallurgy, Vol. 114, P. C47.
- [13] Amanullah, S., Rao, S., and Satayanarayana, K., 1990; "Beneficiation of Mica-Quartz-bearing Kyanite", 9th Industrial Minerals International Congress, Sydney 1990, No 271, p. 24.
- [۱۴] شرکت مهندسان مشاور معدنکاو؛ ۱۳۸۷؛ "عملیات اکتشافی آندالوزیت منطقه میشیدوان بافق"، سازمان صنایع و معادن استان یزد.
- [۱۵] بدیعی، سید حسین، عباد زاده، تورج، گلستانی فرد، فرهاد، یزدانی راد، رحیم؛ آذر ۱۳۸۳؛ "اثر افزودن MgO بر کاهش دمای مولایت زایی آندالوزیت فرآوری شده ایران و کاهش انرژی اکتیواسیون"، پنجمین کنگره سرامیک ایران.
- [۱۶] خیاطی مطلق، افشین و آماده احمد علی؛ ۱۳۸۰؛ "فرآیند مولایت زایی معدن آندالوزیت سر تل نهبندان استان خراسان"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران.
- [17] Tripathi, H., S., and Banerjee, G., 1999; "Effect of chemical composition on sintering and properties of Al₂O₃-SiO₂ system derived from sillimanite beach sand", Ceramic International, Vol. 25 pp. 19-25.

پی نوشت

- ¹ Fraction
- ² Solution-Diffusion-Precipitation
- ³ Fast-Mill
- ⁴ Glassy phase
- ⁵ Etching
- ⁶ Overfiring