

ISSN: 2821-157X		https://www.jasd.khadu.ir	
	Journal of Aerospace Defense Volume 5 Issue ... Season Year P.P 28-49		
Research Paper; 			
Effect of Mechanical Activation of Andalusite on Mullitization and Sintering Behavior of Mullite-Based Ceramics for Aerospace and Advanced Thermal Applications Mohammad Sadegh Abdi Maghsoudlou^{1,2} 1. Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering,Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: msabdim@gmail.com 2. Department of Nanotechnology and Nanomaterials, Faculty of of Interdisciplinary Science and Technology, Malayer University, Malayer, Iran. E-			
Article Information		Abstract	
Accepted: 2026/04/28	Introduction: Mullite is a key high-temperature ceramic phase widely recognized for its outstanding properties in advanced refractory and structural applications. Accordingly, it has attracted considerable attention for the development of advanced high-temperature structural and refractory ceramics. Methods: In this study, the synthesis and sintering behavior of mullite ceramics derived from Iranian andalusite through mechanical activation were investigated. After initial characterization, the andalusite powder was subjected to 60 h of high-energy ball milling, and its phase evolution, microstructural development, and densification behavior over the temperature range of 800-1500 °C were compared with those of the untreated sample. Findings: The XRD results showed that 60 h of mechanical activation completely disrupted the crystalline structure of andalusite and significantly increased its structural microstrain. Heat treatment in an electric furnace revealed that mechanical activation lowered the onset temperature of mullite formation by approximately 400 °C, so that mullite formation started at 800 °C and became the dominant phase above 1200 °C. The crystallite size, calculated using the Scherrer equation, remained within the nanocrystalline range of approximately 8-13 nm. In addition, Williamson-Hall analysis indicated that the lattice microstrain was about 0.55 at 1000 °C and gradually decreased with increasing temperature, approaching nearly zero at 1500 °C. SEM observations of the samples sintered at 1500 °C showed that mechanical activation promoted the formation of finer, more elongated, and more uniformly distributed needle-like mullite crystals, with an aspect ratio of approximately 8-15, along with a denser microstructure compared with the untreated sample. As a result, the mechanically activated powder exhibited more stable densification behavior and achieved higher relative density at lower temperatures. Conclusion:Overall, the findings demonstrate that mechanical activation is an effective approach for producing fine-grained and homogeneous mullite ceramics and offers strong potential for high-temperature aerospace and defense applications.		
Receieved: 2026/02/22			
Keywords:			
Andalusite , Mechanical activation , Mullitization , Phase evolution , Sintering behavior , High-temperature ceramics			
Corresponding Author: Mohammad Sadegh Abdi Maghsoudlou Email: msabdim@gmail.com			
Mohammad sadegh abdi maghsoudlou(2026)Effect of Mechanical Activation of Andalusite on Mullitization and Sintering Behavior of Mullite-Based Ceramics for Aerospace and Advanced Thermal Applications. Journal of Aerospace Defense, Vol2 (Issue5), Page28-49			



فصلنامه علمی دفاع هوافضایی

دوره ۵، شماره ۲
بهار ۱۴۰۵
صفحات ۴۹-۲۸



مقاله پژوهشی؛

اثر فعال سازی مکانیکی آندالوزیت بر مولایت زایی و رفتار تفجوشی سرامیک های

پایه مولایتی برای کاربرد در صنایع هوافضا و سامانه های حرارتی پیشرفته

محمدصادق عبدی مقصودلو^{۱،۲}

۱- گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر

۲- گروه نانو فناوری و نانو مواد، دانشکده علوم و فنون بین رشته ای، دانشگاه ملایر، ملایر

چکیده

اطلاعات مقاله

مقدمه: مولایت یکی از فازهای مهم سرامیکی در دماهای بالا است که به دلیل خواص برجسته اش در کاربردهای نسوز و سازه ای پیشرفته، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. از این رو، این فاز برای توسعه سرامیک های پیشرفته سازه ای و نسوز در دماهای بالا اهمیت ویژه ای دارد.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۱۲/۰۳

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۲/۰۸

کلیدواژه ها:

روش: در این پژوهش، سنتز و رفتار زیسترینگ سرامیک های مولایتی حاصل از آندالوزیت ایرانی از طریق فعال سازی مکانیکی بررسی شد. پس از مشخصه یابی اولیه، پودر آندالوزیت به مدت ۶۰ ساعت تحت آسیاب کاری پراثرزی قرار گرفت و تغییرات فازی، تکامل ریزساختاری و رفتار چگالش آن در محدوده دمایی ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد با نمونه ی تیمار نشده مقایسه شد.

آندالوزیت، فعال سازی
مکانیکی، مولایت زایی،
تحولات فازی، تفجوشی،
سرامیک های دما بالا

یافته ها: نتایج XRD نشان داد که ۶۰ ساعت فعال سازی مکانیکی، ساختار بلوری آندالوزیت را به طور کامل تخریب کرده و میکروگرانش ساختاری آن را به طور قابل توجهی افزایش داده است. عملیات حرارتی در کوره الکتریکی نشان داد که فعال سازی مکانیکی دمای آغاز تشکیل مولایت را حدود ۴۰۰ درجه سانتی گراد کاهش داد، به طوری که تشکیل مولایت از ۸۰۰ درجه سانتی گراد آغاز شد و در دماهای بالاتر از ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد به فاز غالب تبدیل گردید. اندازه بلورک محاسبه شده با معادله شرر در محدوده نانوبلوری و حدود ۸ تا ۱۳ نانومتر باقی ماند. همچنین، تحلیل ویلیامسون-هال نشان داد که میکروگرانش شبکه در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد حدود ۰.۵۵ بوده و با افزایش دما به تدریج کاهش یافته و در ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد به نزدیک صفر رسید. بررسی های SEM از نمونه های زیستریخته در ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد نشان داد که فعال سازی مکانیکی موجب تشکیل بلورهای سوزنی شکل مولایت با اندازه های ظریف تر، کشیده تر و یکنواخت تر، با نسبت طول به قطر حدود ۸ تا ۱۵، و نیز ایجاد ریزساختاری متراکم تر نسبت به نمونه شاهد شد. در نتیجه، نمونه فعال شده رفتار چگالش پایدارتری نشان داد و در دماهای پایین تر به چگالی نسبی بالاتری دست یافت.

نویسنده مسئول:

ایمیل:

msabdim@gmail.com

نتیجه گیری: به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می دهد که فعال سازی مکانیکی روشی مؤثر برای تولید سرامیک های مولایتی ریزدانه و همگن است و می تواند ظرفیت بالایی برای کاربردهای دمای بالا در حوزه های هوافضا و دفاعی داشته باشد.

۱- مقدمه

در سامانه‌های پیشرفته هوافضایی و دفاعی، قطعات سازه‌ای غالباً در معرض شرایط کاری بسیار سختی از جمله گرادیان‌های شدید دمایی، بارهای مکانیکی متناوب، اتمسفرهای اکسیدکننده و محیط‌های خورنده قرار دارند. لذا توسعه موادی که بتوانند هم‌زمان پایداری ابعادی، استحکام ساختاری و دوام عملکردی خود را در این شرایط حفظ کنند، از الزامات اساسی فناوری‌های نوین بشمار می‌رود. سرمایه‌های پیشرفته به دلیل چگالی نسبتاً پایین، پایداری حرارتی بالا و مقاومت مناسب در برابر خوردگی و شوک حرارتی، به‌عنوان گزینه‌هایی مهم برای کاربردهای دمابالا مطرح شده‌اند [۳-۱]. مولایت یکی از مهم‌ترین سرمایه‌های مهندسی در سامانه آلومینا-سیلیکا است که به دلیل ضریب انبساط حرارتی پایین، مقاومت مناسب در برابر شوک حرارتی، پایداری ریزساختاری در دماهای بالا، مقاومت خزشی مطلوب و خواص دی‌الکتریک پایدار، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است [۴]. این ویژگی‌ها موجب شده‌اند مولایت به‌عنوان ماده‌ای مناسب برای ساخت قطعات دمابالا، پوشش‌های محافظ حرارتی و اجزای مقاوم به شوک حرارتی مورد توجه قرار گیرد. با توجه به کمیاب بودن مولایت طبیعی، تأمین این ماده عمدتاً از طریق سنتز مصنوعی انجام می‌شود [۵-۶]. برای تولید مولایت، روش‌های مختلفی از جمله واکنش در حالت جامد، سل-ژل، هم‌رسوبی و هیدروترمال گزارش شده است [۷-۹]. هرچند روش‌های شیمیایی معمولاً منجر به تولید پودرهایی با خلوص و همگنی بالا می‌شوند، اما هزینه بالای پیش‌ماده‌ها و پیچیدگی فرایند، استفاده گسترده از آن‌ها را در مقیاس صنعتی با چالش مواجه می‌کند. از این‌رو، بهره‌گیری از کانی‌های طبیعی آلومینوسیلیکاتی به‌عنوان پیش‌ماده، رویکردی اقتصادی و در دسترس تلقی می‌شود. در این میان، آندالوزیت به دلیل ترکیب شیمیایی مناسب، نسبت مطلوب آلومینا به سیلیکا و دسترسی به منابع آن، یکی از گزینه‌های مناسب برای سنتز مولایت به‌شمار می‌رود [۲-۳]. آندالوزیت یک ترکیب آلومینوسیلیکاتی است که به‌دلیل داشتن سختی بالا، پایداری حرارتی مناسب و ترکیب شیمیایی مناسب، مورد توجه صنایع دمابالا مانند صنعت دیرگداز و صنایع دفاعی است. ذخیره معدنی مذکور در اثر حرارت‌دهی در دماهای بالاتر از حدود 1250°C دچار تحول فازی شده و به مولایت و فاز سیلیسی آمورف تبدیل می‌شود [۱۶]. این تبدیلات معمولاً با انبساط حجمی همراه هستند که می‌توانند بر پایداری ابعادی قطعه تأثیر بگذارند و در تبدیل‌های زیاد و سریع می‌توانند میکروترک‌هایی در نمونه ایجاد نمایند [۵، ۴]. ویژگی‌های محصول نهایی، علاوه بر آنالیز شیمیایی اولیه پودر، به‌شدت تحت تأثیر پارامترهای فیزیکی و ساختاری پودر اولیه (اندازه و توزیع ذرات، مساحت سطح ویژه، میزان عیوب بلوری و درجه بلورینگی) و همچنین شرایط فرایند تولید (دمای پخت، زمان نگهداری و نرخ گرمایش) قرار دارد [۶-۷]. در روش متداول واکنش در حالت جامد، به‌دلیل محدود بودن سرعت نفوذ، تشکیل مولایت معمولاً به دماهای بالا و زمان‌های پخت طولانی نیاز دارد؛ موضوعی که علاوه بر افزایش مصرف انرژی، می‌تواند به رشد بیش از حد دانه‌ها و افزایش تخلخل باقی‌مانده منجر شود. مورفولوژی و اندازه ذرات و دمای تشکیل مولایت حاصل از فرایند تجزیه آندالوزیت به‌شدت به فرایند آماده‌سازی اولیه و به‌ویژه

به اندازه ذرات پودر آندالوزیت و ترکیب شیمیایی سنگ مادر وابسته است [۱۵-۱۶]. نتایج نشان می‌دهند که اندازه دانه تأثیر بسیاری روی مورفولوژی و در نتیجه روی خواص تکنولوژیکی زیتر و مکانیکی قطعات دارد. در این راستا، جهت مطالعه این پارامتر، فعال‌سازی مکانیکی به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر پیش‌تیمار پودرها برای کاهش اندازه ذرات و همچنین راهکاری مناسب برای بهبود سینتیک واکنش و تسهیل تشکیل مولایت مورد توجه قرار گرفته است. در این فرایند، انرژی مکانیکی ناشی از برخورد گلوله‌ها علاوه بر ریزش ذرات و افزایش سطح ویژه، موجب ایجاد کرنش شبکه‌ای، افزایش چگالی عیوب ساختاری و کاهش درجه بلورینگی می‌شود [۹-۱۱]. این تغییرات واکنش‌پذیری پودر را افزایش داده و امکان تشکیل مولایت و تفجوشی در دماهای پایین‌تر را فراهم می‌کنند. در نتیجه، فعال‌سازی مکانیکی می‌تواند ضمن کاهش دمای سنتز، از رشد شدید دانه‌ها جلوگیری کرده و دستیابی به ریزساختاری یکنواخت‌تر را امکان‌پذیر سازد [۷، ۱۳-۱۴] برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر تبدیل حرارتی آندالوزیت به مولایت یا بررسی خواص نهایی سرامیک‌های مولایتی متمرکز بوده‌اند، در این پژوهش نقش فعال‌سازی مکانیکی به‌عنوان مرحله آماده‌سازی اولیه در تغییر رفتار واکنشی آندالوزیت، تکامل فازی و رفتار تفجوشی به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته است. عملکرد نمونه‌های فعال‌شده و فعال‌نشده در شرایط یکسان فرآوری به‌صورت مقایسه‌ای ارزیابی شده تا تأثیر فعال‌سازی مکانیکی بر افزایش واکنش‌پذیری، بهبود تراکم‌پذیری و توسعه ریزساختار مناسب مشخص شود. نتایج این پژوهش می‌تواند راهکاری عملی برای تولید اقتصادی سرامیک‌های پایه‌مولایتی با دمای فرآوری پایین‌تر و قابلیت استفاده در سامانه‌های حرارتی پیشرفته و کاربردهای دمابالای صنایع هوافضا و دفاعی فراهم نماید.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از آندالوزیت استخراج‌شده از معادن منطقه زمان‌آباد شهرستان ملایر به‌عنوان ماده اولیه برای سنتز مولایت استفاده شد. نمونه خام به‌صورت کلوخه جمع‌آوری و پس از شست‌وشو با آب به‌منظور حذف ناخالصی‌های سطحی، به‌وسیله سنگ‌شکن فکی آزمایشگاهی خرد شد. سپس، برای کاهش بیشتر اندازه ذرات، پودر حاصل تحت فرایند آسیاکاری تر معمولی با استفاده از آسیاب و گلوله‌های آلومینایی قرار گرفت تا ابعاد ذرات به کمتر از ۳۲۵ میکرون برسد. ترکیب شیمیایی پودر آندالوزیت اولیه نیز به‌وسیله آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (XRF) تعیین شد تا خلوص شیمیایی و نوع ناخالصی‌های احتمالی آن ارزیابی شود. جهت بررسی تأثیر انرژی مکانیکی بر رفتار سنتز و تفجوشی مولایت، پودر آندالوزیت تحت فرایند فعال‌سازی مکانیکی قرار گرفت. این عملیات با استفاده از آسیاب سیاره‌ای پرانرژی Retsch PM400 و در زمان‌های ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ساعت انجام شد. نسبت گلوله به پودر ۱ به ۲۰ و سرعت چرخش آسیاب پرانرژی ۳۰۰ دور بر دقیقه انتخاب شد. گلوله‌های استفاده‌شده در این تحقیق از جنس WC بودند و قطر آن‌ها ۲۰ میلی‌متر بود. برای جلوگیری از چسبندگی و کلوخه‌شدن ذرات در حین آسیاکاری، مقدار یک درصد وزنی اسید استئاریک

به عنوان عامل کنترل فرایند (PCA) به نمونه‌ها افزوده شد. همچنین، به منظور مقایسه، از پودر آندالوزیت بدون فعال سازی مکانیکی به عنوان نمونه شاهد استفاده شد. پس از پایان فرایند فعال سازی مکانیکی، نمونه‌های فعال شده و نمونه شاهد به صورت قرص‌هایی با قطر ۱۰ میلی متر و با استفاده از پرس تک محوره تحت فشار ۱۰۰ مگاپاسکال شکل دهی شدند. سپس نمونه‌های خام حاصل برای انجام فرایند سنتز و تفجوشی، در کوره الکتریکی و در اتمسفر هوا، در محدوده دمایی ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ °C حرارت دهی شدند. به منظور شناسایی فازهای تشکیل شده و بررسی تحولات بلوری پودرها و نمونه‌های تفجوشی شده و اندازه بلورک‌ها و تنش‌های پسماند در نمونه‌های زینتر شده، از دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) مدل Siemens ۵۰۰D استفاده شد. همچنین، بررسی ریزساختاری و مورفولوژی پودرهای فعال شده و نمونه شاهد و همچنین ریزساختار نمونه‌های تفجوشی شده، با مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با دستگاه میکروسکوپ الکترونی مدل VEGA-MV Tescan ۲۳۰۰ انجام شد. علاوه بر این، خواص فیزیکی نمونه‌های تفجوشی شده شامل چگالی ظاهری، تخلخل ظاهری و جذب آب، مطابق با استاندارد ASTM ۲۰-۸۷ و به روش غوطه‌وری در آب مقطر اندازه گیری شد. به منظور تضمین تکرارپذیری آزمون‌ها و افزایش اعتبار نتایج، ارزیابی خواص تکنولوژیکی (شامل چگالی ظاهری، تخلخل و استحکام خمشی) بر روی ۵ نمونه مجزا به ازای هر دمای پخت انجام شد. نتایج تجربی به صورت میانگین داده‌ها همراه با انحراف معیار گزارش شده و مقادیر پراکندگی داده‌ها در نمودارها به صورت میله‌های خطا نمایش داده شده است. فلوچارت انجام این پژوهش در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱. فلوچارت مراحل آماده سازی، فعال سازی مکانیکی، شکل دهی و تفجوشی نمونه های آندالوزیت

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشخصه یابی شیمیایی و فازی پودر آندالوزیت اولیه

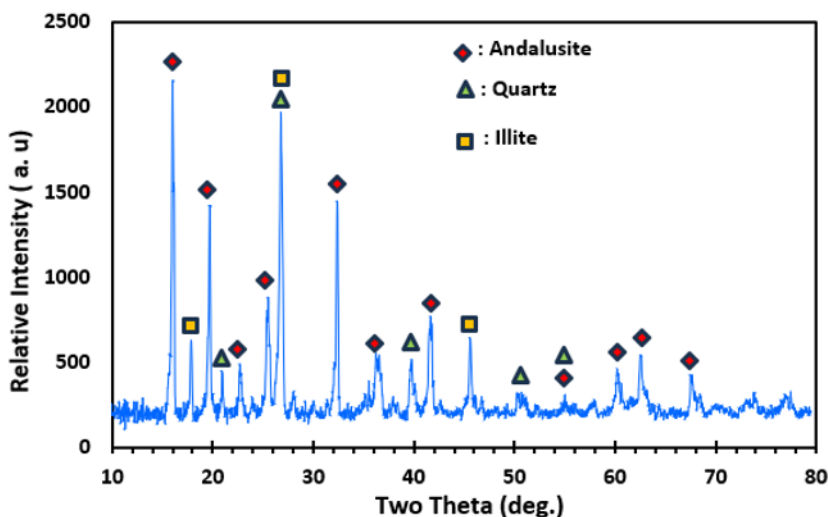
نتایج حاصل از آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (XRF) پودر آندالوزیت ایرانی در جدول (۱) ارائه شده است. مطابق با این نتایج، میزان اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) و اکسید سیلیسیم (SiO_2) به ترتیب برابر با ۴۴.۹۹ و ۴۴.۶۳ درصد وزنی است. با توجه به فرمول شیمیایی تئوری آندالوزیت (Al_2SiO_5) که حاوی حدود ۶۲.۹ درصد Al_2O_3 و ۳۷.۱ درصد SiO_2 است، کمتر بودن نسبت

آلومینا به سیلیس در نمونه مورد مطالعه نسبت به حالت تئوری، بیانگر حضور کانی‌های ناخالصی مانند سیلیس و ترکیبات سیلیکاتی در کنار فاز اصلی آندالوزیت است.

جدول ۱. آنالیز شیمیایی اکسیدهای تشکیل‌دهنده آندالوزیت ایرانی تعیین‌شده با آزمون XRF

اکسید	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	L.O.I
درصد وزنی	۴۴.۹۹	۶۳.۴۴	۱۷.۲	۳۹.۰	۱۴.۰	۵.۰	۳۳.۲	۵۲.۰	۷۵.۱

حضور اکسیدهای قلیایی مانند K₂O (۲.۳۳ درصد) و Na₂O (۰.۵۲ درصد) در ترکیب شیمیایی، نشان‌دهنده وجود کانی‌های میکایی یا فلدسپاتی است که در فرآیند زینتر می‌توانند منجر به تشکیل فاز مذاب در دماهای پایین‌تر شده و چگالش نمونه و همچنین خواص ترموکانیکی را تحت تأثیر قرار دهند. همچنین میزان اکسید آهن (Fe₂O₃) برابر با ۲.۱۷ درصد اندازه‌گیری شده است که این اکسید می‌تواند بر ویژگی‌های نوری و رفتار حرارتی محصول نهایی اثرگذار باشد [۱]. میزان افت وزنی ناشی از پخت (L.O.I) نیز ۱.۷۵ درصد گزارش شده که مربوط به خروج آب ساختاری کانی‌های هیدراته است. مقایسه ترکیب شیمیایی آندالوزیت اولیه ایرانی با نمونه‌های فرانسوی و آفریقای جنوبی دامرک نشان می‌دهد که نمونه ایرانی از خلوص کمتری نسبت به این دو ذخیره برخوردار بوده و میزان آلومینا (Al₂O₃) پودر آندالوزیت ایرانی نسبت به دو مورد دیگر کمتر است. این امر می‌تواند تأثیر قابل‌توجه و منفی بر خواص سیستم‌های طراحی‌شده برای کاربردهای دمایی بالا بگذارد [۷، ۱۵].

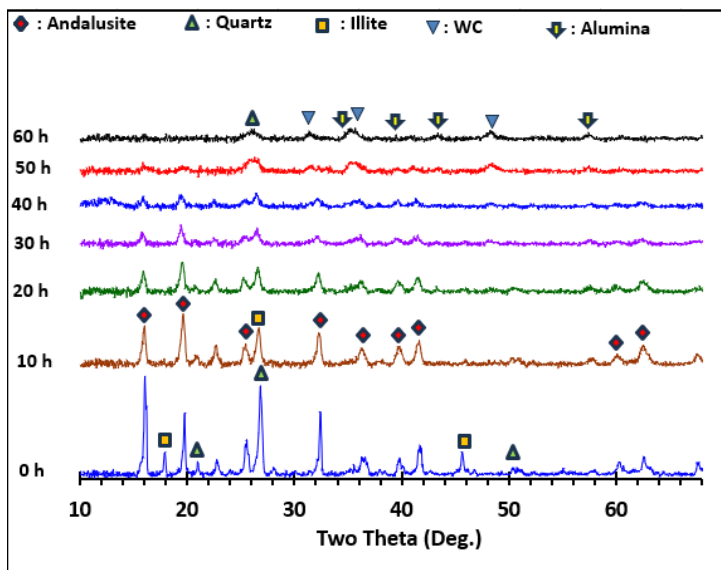


شکل ۲. الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) پودر آندالوزیت ایرانی استفاده‌شده در این تحقیق

الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) پودر اولیه در شکل ۲ نمایش داده شده است. تحلیل فازی نشان می دهد که فاز بلوری اصلی در ماده اولیه، آندالوزیت است که پیک های شاخص آن در زوایای حدود ۱۵.۸، ۲۳.۳ و ۳۳ درجه با شدت بالا مشاهده می شود. در کنار فاز اصلی، حضور فاز ثانویه کوارتز در زاویه حدود ۲۶.۶ درجه به وضوح قابل تشخیص است که تأییدی بر بالا بودن میزان کوارتز در نتایج XRF است. همچنین، حضور فاز ایلیت به عنوان یک هیدروسیلیکات آلومینیوم و پتاسیم، علت وجود اکسید پتاسیم (K_2O) در آنالیز شیمیایی را تبیین می کند. حضور کانی های مذکور در ذخایر آندالوزیت طبیعی ایران (منطقه ملایر) متداول بوده و در فرآیند مولایت زایی، نقش مهمی در تشکیل فاز شیشه ای و تسهیل نفوذ اتمی در طی فرآیند زینتر ایفا می کنند [۴]. وجود فاز ایلیت در نمونه های خارجی نیز قابل مشاهده است که علت این امر به فرایند تشکیل این ذخیره معدنی مربوط می شود [۱۶].

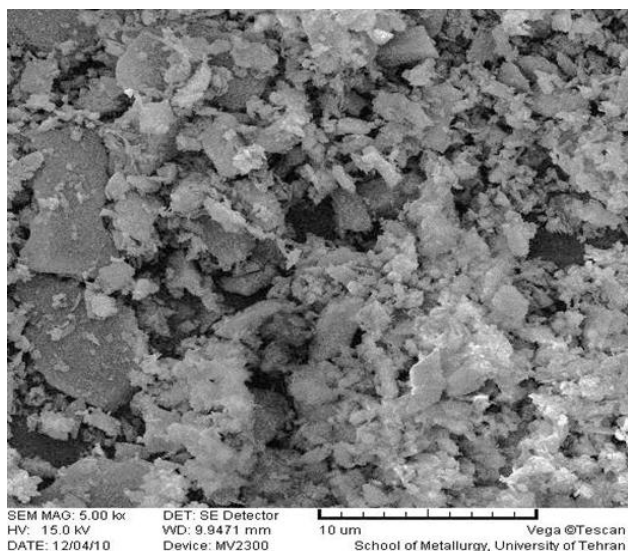
۲-۳- فعال سازی مکانیکی پودر آندالوزیت

پودر آندالوزیت پس از شستشو و خردایش اولیه تحت آسیاب پرانرژی در زمان های مختلف قرار گرفت. الگوهای پراش پرتو ایکس پودر پس از زمان های مختلف فعال سازی مکانیکی (۰ تا ۶۰ ساعت) در شکل ۳ ارائه شده است. همان طور که نتایج ارائه شده در شکل مذکور نشان می دهند، با افزایش زمان آسیاکاری، ساختار بلوری اولیه به تدریج دچار تخریب شده و به سمت حالت شبه آمورف حرکت می کند. در نمونه اولیه، پیک های تیز و پر شدت مربوط به آندالوزیت، کوارتز و ایلیت بیانگر ماهیت بلوری ماده خام هستند؛ اما با افزایش زمان آسیاکاری، شدت این پیک ها کاهش یافته و پهنای آن ها افزایش می یابد که این امر نشان دهنده کاهش اندازه بلورک ها، افزایش کرنش شبکه و تجمع انرژی ذخیره شده در ساختار است. بیشترین نرخ تغییرات در بازه ۰ تا ۲۰ ساعت مشاهده می شود که بیانگر فروپاشی سریع ساختار اولیه آندالوزیت است، در حالی که از ۴۰ تا ۶۰ ساعت روند تغییرات به حالت نزدیک به اشباع می رسد. در این مرحله، ظهور هاله آمورف در محدوده تقریبی ۲۰ تا ۳۵ درجه مؤید تخریب نظم دوربرد و افزایش قابل توجه واکنش پذیری پودر است؛ وضعیتی که می تواند نیروی محرکه لازم برای تشکیل مولایت در دماهای پایین تر را فراهم سازد. در زمان های آسیاکاری طولانی تر، به ویژه در ۶۰ ساعت، پیک های ضعیفی از آلومینا و تنگستن کاربید نیز ظاهر می شوند که ناشی از سایش محفظه و گلوله های آسیاب هستند. اگرچه تنگستن کاربید به عنوان آلودگی ناخواسته وارد سیستم شده است، اما می تواند با ایجاد مراکز فعال جوانه زنی، در تسهیل تشکیل مولایت نیز نقش داشته باشد [۱]. همچنین حذف سریع تر ایلیت نسبت به سایر فازها و تضعیف شدید پیک های آندالوزیت نشان می دهد که فعال سازی مکانیکی به طور مؤثر ساختار اولیه را بی نظم کرده و پودر را در وضعیت پرانرژی قرار داده است.

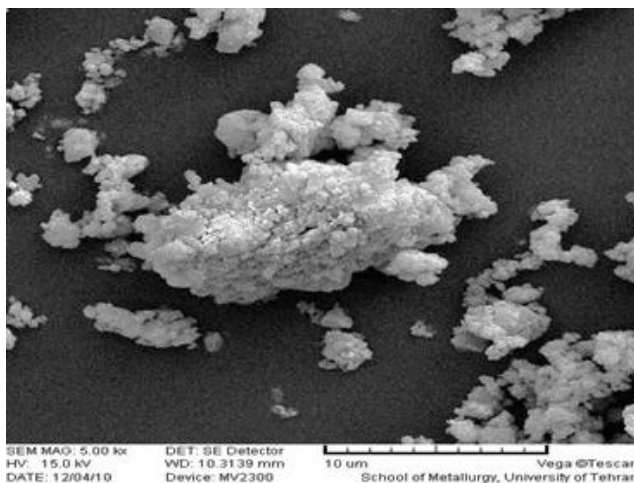


شکل ۳. الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) پودر آندالوزیت ایرانی پس از فعال سازی در زمان های مختلف

بر این اساس، می توان نتیجه گرفت که فعال سازی مکانیکی، به ویژه در زمان ۶۰ ساعت، با افزایش انرژی داخلی، کاهش بلورینگی و ایجاد نقص های ساختاری، شرایط را برای کاهش دمای آغاز مولایت زایی و بهبود رفتار تفجوشی فراهم می کند. مدت زمان لازم برای فعال سازی مکانیکی و تخریب کامل ساختار پودر اولیه، به خواص فیزیکی و شیمیایی آن، به ویژه سختی اولیه و اندازه ذرات، وابسته است؛ به طوری که زمان مورد نیاز برای فعال سازی پودرهای نرم تری نظیر کوردیریت [۱۰] و کائولن [۱۳] به ترتیب برابر ۶ ساعت و ۱۵ ساعت است که در مقایسه با پودر سخت آندالوزیت که ۶۰ ساعت به طول انجامیده، بسیار کمتر است.



شکل ۴. ذرات آندالوزیت اولیه قبل از فرایند فعال سازی مکانیکی



شکل ۵. اندازه و مورفولوژی پودر آندالوزیت پس از ۶۰ ساعت فعال سازی مکانیکی

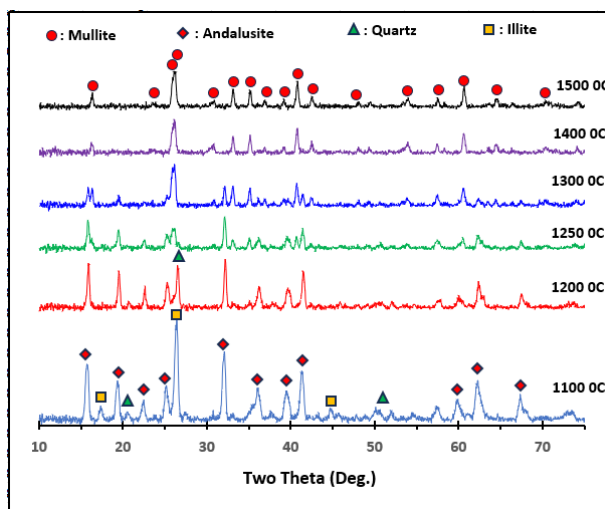
تأثیر فعال سازی مکانیکی بر مورفولوژی ذرات پودر آندالوزیت، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در شکل های ۴ و ۵ مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه تصاویر مربوط به پودر اولیه (شاهد) و نمونه فعال شده به مدت ۶۰ ساعت، حاکی از تغییرات بنیادین در مورفولوژی، ابعاد و رفتار تجمع ذرات است که در اثر ضربات مکانیکی گلوله ها ایجاد شده است. مطابق شکل ۴، پودر اولیه متشکل از ذراتی درشت (در محدوده ۵ تا ۲۰ میکرومتر) با هندسه ای نامنظم، لبه های کاملاً تیز و سطح شکست های زاویه دار (Angular) است که توزیع اندازه بسیار گسترده و ناهمگنی دارند. در مقابل، پس از ۶۰ ساعت آسیاکاری پرنرژی، فرایند خردایش مداوم و ضربات شدید، منجر به تخریب

لبه‌های تیز ذرات شده و مورفولوژی آن‌ها را از حالت گوشه‌دار به سمت فرم‌های کروی و گردگوشه (Rounded) سوق داده است. در این نمونه، ذرات اولیه به ابعاد زیرمیکرون (زیر ۱ تا ۲ میکرومتر) رسیده‌اند؛ با این حال، به دلیل افزایش چشمگیر انرژی آزاد سطحی و بار الکتریکی، این ذرات ریز به‌طور خودبه‌خودی تجمع یافته و آگلومره‌های ثانویه تشکیل داده‌اند که ناشی از برقراری تعادل دینامیکی ایجادشده در حین آسیاکاری است. ذرات آگلومره مذکور از نوع ذرات آگلومره نرم هستند که توسط پیوندهای ضعیفی به هم متصل شده و در حین ساخت و شکل‌دهی قطعات از بین می‌روند. بررسی دقیق‌تر نمونه فعال‌شده به مدت ۶۰ ساعت در شکل ۵ نشان می‌دهد که اگرچه پودر در سطح کلان به‌صورت آگلومره درآمده، اما یکنواختی ابعاد «ذرات اولیه» (Primary Particles) درون این خوشه‌ها به مراتب بیشتر از پودر اولیه است. این همگنی ریزساختاری، در کنار افزایش قابل‌توجه سطح ویژه که موجب اتصال ضعیف ذرات نسبت به هم شده است، عامل اصلی بهبود واکنش‌پذیری شیمیایی پودر است. نتایج XRD نیز این مشاهدات را تأیید می‌کند؛ به‌طوری که انرژی مکانیکی اعمال‌شده، ضمن کاهش نظم بلوری و القای فاز آمورف، با ریزکردن مؤثر ذرات و حذف ساختارهای لایه‌ای گوشه‌دار، مسیرهای نفوذ در طی تفجوشی را کوتاه‌تر کرده و زمینه را برای کاهش دمای مولایت‌زایی و بهبود چگالش نهایی فراهم آورده است. همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد، در مدت زمان ۶۰ ساعت، بخش عمده پودر آندالوزیت در اثر ضربات گلوله‌ها به‌طور کامل تخریب شده و پس از گذشت این زمان، فاز سیلیس باقی‌مانده مشاهده می‌شود. این سیلیس می‌تواند از پودر اولیه سیلیس موجود در ذخیره معدنی ناشی شده باشد یا در حین فروپاشی آندالوزیت در آسیاب پرانرژی ایجاد شده باشد. تشکیل آلومینا را می‌توان در این فرایند ناشی از تجزیه آندالوزیت به سیلیس و آلومینا دانست. WC مشاهده‌شده در نمودار پراش پرتو ایکس نمونه پودر نیز ناشی از سایش گلوله و محفظه آسیاب پرانرژی می‌باشد.

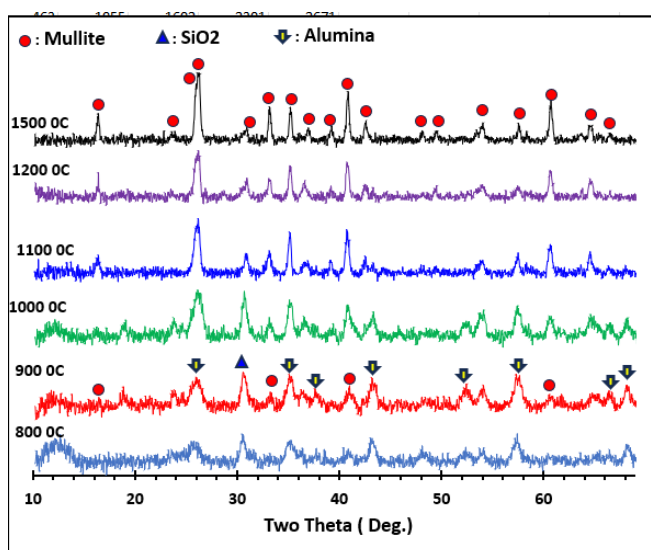
۳-۳- تأثیر فعال سازی مکانیکی بر تحولات فازی آندالوزیت در حین عملیات حرارتی

فعال‌سازی مکانیکی پودرهای معدنی با استفاده از آسیاب‌های پرانرژی و معمولی، از طریق تخریب ساختار بلوری، کاهش اندازه ذرات و افزایش سطح ویژه، تأثیر بسزایی بر تحولات فازی و دمای انجام واکنش‌ها دارد. در مقالات علمی، نتایج پژوهش‌های مربوط به کوردیریت و کائولن به‌عنوان شواهدی برای تأیید این موضوع مورد استناد قرار گرفته‌اند [۱۰، ۱۳]. نتایج تأثیر فعال‌سازی مکانیکی و حرارت‌دهی انجام‌شده بر روی نمونه‌های آندالوزیت استفاده‌شده در این پژوهش، در الگوهای پراش پرتو ایکس شکل‌های ۶ و ۷ منعکس شده است. الگوهای XRD مذکور در هر دو شکل نشان می‌دهد که فعال‌سازی مکانیکی اثر زیادی بر تحولات فازی آندالوزیت در حین عملیات حرارتی داشته است. در نمونه شاهد که یک نمونه پودر اولیه آندالوزیت می‌باشد، ساختار آندالوزیت تا دمای 1100°C باقی مانده و نخستین نشانه‌های تشکیل مولایت تنها از حدود 1200°C مشاهده می‌شود که مقدار آن نیز بسیار کم می‌باشد. پودر آندالوزیت استفاده‌شده در این تحقیق همانند سایر

پودرهای آندالوزیت معمولی به فاز مولایت در بازه $1500-1600^{\circ}\text{C}$ تبدیل می شود، مگر اینکه اکسیدهای MgO یا CaO یا اکسید ایتریا بتوانند مسیر واکنش را تغییر داده و دمای تشکیل مولایت را کاهش دهند و میزان مولایت تشکیل شده را افزایش دهند [۱۶]. در پژوهش انجام شده توسط آن یولانگ و همکارانش با افزودنی اکسید ایتریوم نشان داده شده است که تشکیل فاز سیلیکات ایتریوم باعث تسریع تجزیه آندالوزیت و کاهش دمای تبدیل آن به مولایت به دمای 1400°C شده است [۴]. در مقابل، مطابق آنچه که شکل (۷) نشان می دهد، در نمونه فعال شده مکانیکی این تحقیق که فاقد هرگونه افزودنی است، پیک های مولایت از 800°C ظاهر شده و در 1200°C به تک فاز غالب مولایت تبدیل می شوند. این نتایج نشان می دهد که فعال سازی مکانیکی دمای شروع مولایت زایی را حدوداً 400°C و دمای تکمیل تبدیل فازی را حدود $200-300^{\circ}\text{C}$ کاهش داده است. این رفتار را می توان به آمورف شدن نسبی ساختار، افزایش انرژی ذخیره شده، ریزش ذرات، افزایش سطح ویژه و در نتیجه کوتاه شدن مسیر نفوذ گونه های آلومینا و سیلیکا نسبت داد. بنابراین، فعال سازی مکانیکی نه تنها سینتیک واکنش را به طور مؤثر تسهیل می کند، بلکه امکان سنتز مولایت را در دماهای پایین تر و با بازده فازی بالاتر فراهم می سازد.

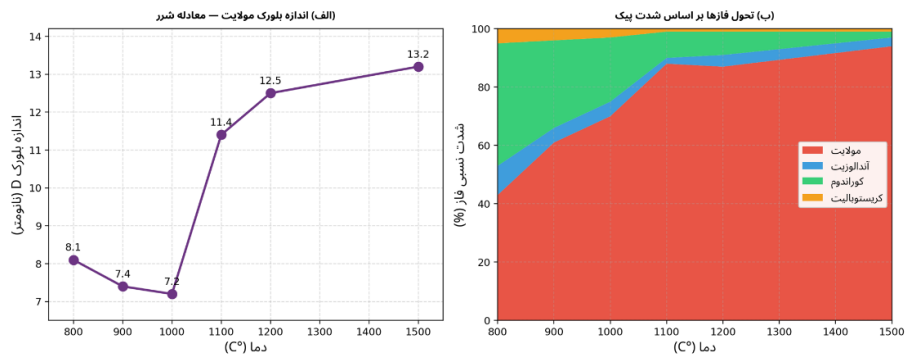


شکل ۶. تأثیر حرارت بر تحولات فازی پودر آندالوزیت اولیه بدون فعال سازی مکانیکی



شکل ۷. الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) پودر آندالوزیت فعال سازی شده مکانیکی به مدت ۶۰ ساعت پس از حرارت دهی در دماهای مختلف

نتایج حاصل از الگوهای پراش پرتو ایکس نشان داد که فعال سازی مکانیکی آندالوزیت اثر تعیین کننده ای بر رفتار فازی این ماده در حین عملیات حرارتی دارد. در نمونه غیرفعال، ساختار آندالوزیت تا دمای 1100°C باقی ماند و شروع تشکیل مولایت تنها از حدود 1200°C مشاهده شد، در حالی که تبدیل کامل یا نزدیک به کامل این فاز به مولایت در دماهای 1400°C تا 1500°C رخ داد. این رفتار بیانگر آن است که در نمونه معمولی، دگرگونی آندالوزیت عمدتاً به انرژی حرارتی زیاد و زمان کافی برای نفوذ و بازآرایی ساختاری وابسته است. در مقابل، در نمونه فعال شده مکانیکی، نخستین پیک های مولایت از 800°C ظاهر شد و در حدود 1200°C مولایت به فاز غالب تبدیل گردید. این کاهش چشمگیر در دمای شروع و تکمیل مولایت زایی نشان می دهد که فعال سازی مکانیکی، مسیر واکنش را از نظر سینتیکی و ترمودینامیکی تسهیل کرده است. به عبارت دیگر، آسیاکاری پرانرژی با آمورف سازی نسبی، افزایش انرژی ذخیره شده در ساختار، ایجاد نقص های بلوری، کاهش اندازه ذرات و افزایش سطح ویژه، موانع تشکیل مولایت را به طور قابل توجهی کاهش داده است. الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) پودر آندالوزیت فعال شده پس از حرارت دهی به مدت ۳ ساعت در دماهای 800°C ، 900°C ، 1000°C ، 1100°C و 1200°C مورد تحلیل کمی قرار گرفت. اندازه بلورک با استفاده از معادله شرر (Scherrer) بر اساس پهنای کامل در نیم حداکثر (FWHM) قله اصلی مولایت در حدود 26.1 درجه محاسبه شد. نتایج در شکل (۸-الف) نشان می دهد که اندازه بلورک مولایت از حدود 8.1 نانومتر در 800°C به 13.2 نانومتر در 1500°C افزایش یافته است. با این حال، در تمامی دماها اندازه دانه ها در محدوده نانوبلور باقی می ماند.



شکل ۸. (الف) تغییرات اندازه بلورک مولایت و (ب) فازهای تشکیل شده در پودر آندالوزیت فعال سازی شده مکانیکی به مدت ۶۰ ساعت پس از حرارت دهی در دماهای مختلف

کرنش شبکه و اندازه بلورک با روش ویلیامسون-هال (Williamson-Hall) تخمین زده شد و نتایج در جدول (۲) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، اندازه دانه اولیه مولایت سنتز شده برابر با ۷ نانومتر است که با افزایش دما به ۱۰٫۸ نانومتر تغییر می کند. اختلاف موجود بین محاسبات شرر با روش ویلیامسون-هال را می توان با در نظر گرفتن کرنش باقی مانده در پودر آسیاب شده توجیه کرد.

جدول ۲. محاسبات میکروکرنش و اندازه بلورک با روش ویلیامسون-هال در دماهای مختلف

اندازه WH (nm)	میکروکرنش تقریبی (%)	دما (°C)
۷٫۰	۰٫۵۵	۱۰۰۰
۹٫۵	۰٫۲۲	۱۲۰۰
۱۰٫۸	۰٫۰۲	۱۵۰۰

مطابق داده های جدول (۲)، میکروکرنش شبکه در نمونه فعال سازی شده در دمای 1000°C برابر با ۰٫۵۵ است که به تدریج با افزایش دما به ۰٫۲۲ کاهش یافته و سپس در 1500°C به نزدیک صفر می رسد که نشان دهنده تکامل و کاهش نقص های شبکه بلوری است. درصد نسبی فازها نیز بر اساس شدت انتگرالی قله های مشخصه محاسبه شد و این نتایج در شکل (۸-ب) به صورت شماتیکی نشان داده شده است. مطابق این منحنی، با افزایش دما، فاز مولایت به طور پیوسته افزایش یافته و از حدود ۴۳٪ در 800°C به حدود ۹۴٪ در 1500°C می رسد، در حالی که سهم فازهای آندالوزیت باقی مانده و کوراندوم به شدت کاهش می یابد. در دمای 1500°C ، مولایت به عنوان فاز غالب و تقریباً خالص مشاهده شد و مقدار فازهای کریستوبالیت و کوراندوم آزاد ناچیز بود که نشان دهنده ورود بخش عمده سیلیس و آلومینا به ساختار مولایت است. مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین

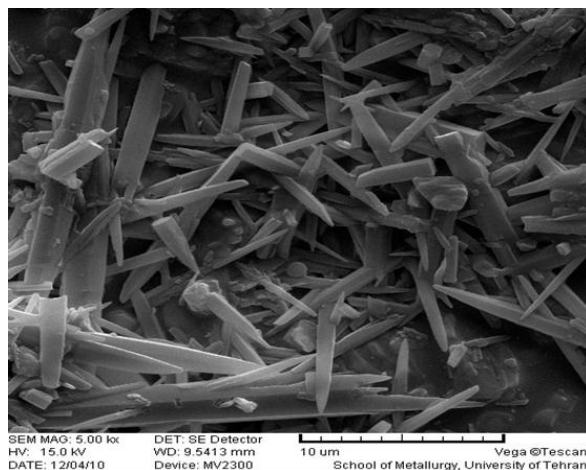
نشان می‌دهد که فعال‌سازی مکانیکی آندالوزیت، همسو با یافته‌های گزارش‌شده برای سایر آلومینوسیلیکات‌ها، مسیر مولایت‌زایی را به‌طور مؤثری تسهیل می‌کند. به‌عنوان نمونه، عبدی و عبادزاده [۹] با ترکیب فعال‌سازی مکانیکی و زینترینگ مایکروویو، تشکیل مولایت را در دماهای پایین‌تر مشاهده کردند. همچنین عبادزاده [۱۳] در مورد کائولن و تامبورنه و همکاران [۱۰] در مورد کوردیریت نشان دادند که آسیاکاری پراورزی با افزایش سطح ویژه و ایجاد عیوب ساختاری، دمای سنتز را کاهش می‌دهد. در پژوهش حاضر نیز کاهش حدود ۴۰۰ درجه‌ای دمای آغاز مولایت‌زایی و دستیابی به فاز غالب مولایت در حدود 1200°C ، با این روند کلی سازگار است. با این حال، تمایز اصلی این کار در بررسی هم‌زمان تحول فازی کمی (اندازه بلورک، کرنش شبکه و درصد نسبی فازها)، ریزساختار سوزنی‌شکل مولایت و خواص تکنولوژیکی بدنه‌های زینترشده بر پایه آندالوزیت ایرانی است که تصویر جامع‌تری از ارتباط فعال‌سازی مکانیکی با رفتار تفجوشی ارائه می‌دهد.

۳-۴- تاثیر فعال سازی مکانیکی بر ریز ساختار نمونه های زینتر شده در دمای

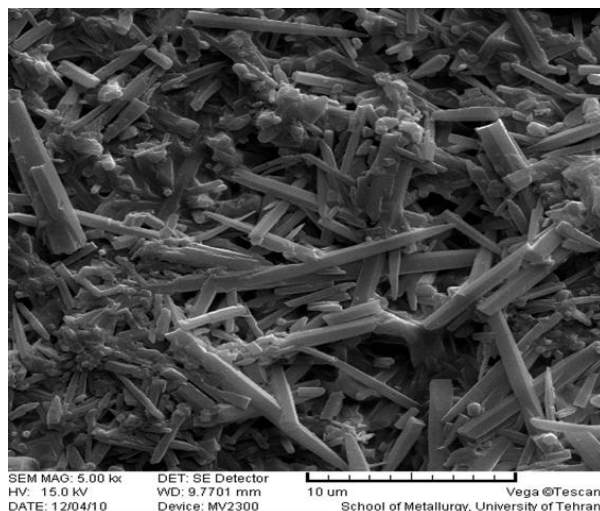
1500°C

بررسی و مقایسه تصاویر SEM نمونه‌های شاهد و فعال‌سازی‌شده پس از زینتر در دمای 1500°C به مدت ۳ ساعت (شکل‌های ۹ و ۱۰) نشان می‌دهد که ریزساختار هر دو نمونه عمدتاً از بلورهای سوزنی‌شکل مولایت تشکیل شده است. با این حال، تفاوت‌های مشخصی از نظر ابعاد بلورها، نسبت طول به قطر و میزان فشردگی ریزساختار میان دو نمونه مشاهده می‌شود. در نمونه شاهد، بلورهای مولایت عموماً درشت‌تر بوده و توزیع اندازه آن‌ها ناهمگن‌تر است. همچنین تخلخل میان‌دانه‌ای بیشتری در این نمونه دیده می‌شود. ابعاد تقریبی بلورهای مولایت در این نمونه در محدوده قطر ۰٫۸ تا ۱٫۸ میکرومتر و طول ۳ تا ۸ میکرومتر قرار دارد و نسبت طول به قطر آن‌ها حدود ۴ تا ۸ برآورد می‌شود. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که در نمونه غیرفعال، تشکیل مولایت در دماهای بالاتر آغاز شده و رشد بلورها نسبت به هسته‌زایی غالب بوده است. در مقابل، نمونه فعال‌سازی‌شده دارای ریزساختاری یکنواخت‌تر و متراکم‌تر است و از بلورهای مولایت ظریف‌تر و در هم‌تنیده‌تر تشکیل شده است. در این نمونه، قطر بلورها حدود ۰٫۴ تا ۱ میکرومتر و طول آن‌ها در محدوده ۵ تا ۱۲ میکرومتر قرار می‌گیرد؛ در نتیجه نسبت طول به قطر بلورها در بازه ۸ تا ۱۵ برآورد می‌شود. کاهش قطر بلورها همراه با افزایش نسبت کشیدگی و یکنواختی بیشتر در توزیع اندازه، نشان‌دهنده آن است که فعال‌سازی مکانیکی با افزایش تعداد مراکز هسته‌زایی و محدود کردن رشد دانه، شرایط مناسب‌تری برای تشکیل مولایت فراهم کرده است. این فرایند نه تنها دمای مولایت‌زایی را کاهش می‌دهد، بلکه از طریق ایجاد ریزساختاری ظریف‌تر و فشرده‌تر، چگالش نهایی نمونه را نیز بهبود می‌بخشد. اندازه بلورک محاسبه‌شده از الگوهای XRD با معادله شرر در محدوده حدود ۸ تا ۱۳ نانومتر قرار دارد. این مقدار بسیار کوچک‌تر از ابعاد بلورهای سوزنی‌شکل مشاهده‌شده در تصاویر SEM (در مقیاس میکرومتر) است. چنین اختلافی طبیعی به‌نظر می‌رسد، زیرا SEM اندازه فیزیکی

بلورها/ذرات را نشان می‌دهد، در حالی که XRD اندازه حوزه‌های هم‌دوس پراش (بلورک) را اندازه‌گیری می‌کند. بنابراین هر بلور سوزنی میکرومتری مشاهده‌شده در SEM، خود از تعداد زیادی بلورک نانومتری تشکیل شده است. در مجموع، نتایج SEM و XRD هر دو تأیید می‌کنند که فعال‌سازی مکانیکی نقش مؤثری در تسهیل تشکیل مولایت، کنترل رشد دانه و بهبود ویژگی‌های ریزساختاری نمونه‌های زینترشده ایفا می‌کند.



شکل ۹. تصویر SEM ریزساختار نمونه شاهد (بدون فعال‌سازی مکانیکی) پس از زینتر در دمای 1500°C به مدت ۳ ساعت

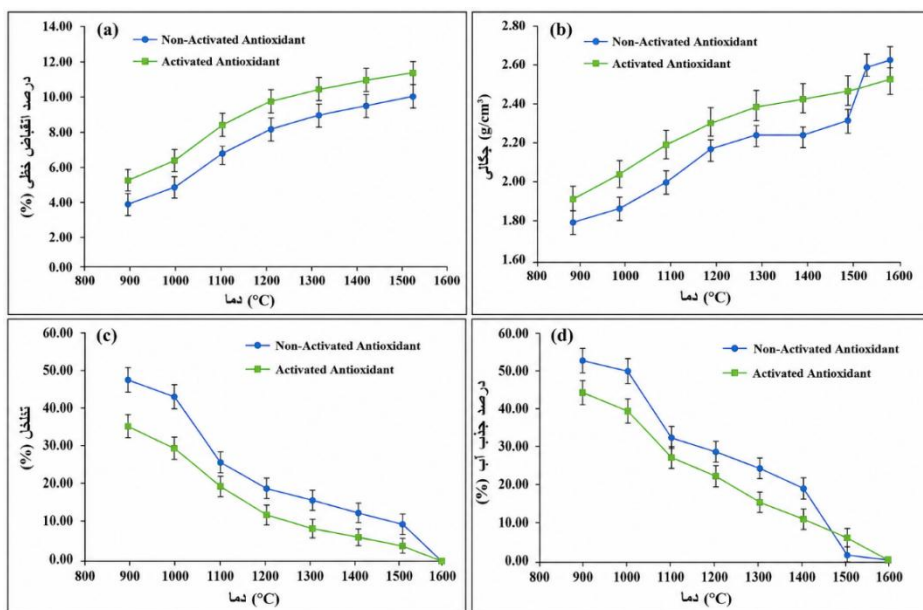


شکل ۱۰. تصویر SEM ریزساختار نمونه فعال‌سازی مکانیکی شده به مدت ۶۰ ساعت پس از زینتر در دمای 1500°C به مدت ۳ ساعت

۵-۳- تأثیر فعال سازی مکانیکی بر رفتار و خواص تکنولوژیکی بدنه های زینتر شده

فعال سازی مکانیکی، علاوه بر تأثیر بر تبدیلات فازی، می تواند در حین حرارت دهی بر خواص تکنولوژیکی مواد معدنی نیز اثر قابل توجهی بگذارد. به منظور بررسی این اثر، خواص تکنولوژیکی پودر شاهد و پودر فعال سازی شده با فرایند مکانوشیمیایی در محدوده دمایی 950°C تا 1500°C در کوره الکتریکی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این مقایسه و ارزیابی تأثیر فعال سازی بر خواص تکنولوژیکی آندالوزیت در شکل ۱۱ ارائه شده است.

نتایج بررسی تغییرات چگالی، انقباض خطی، تخلخل ظاهری و جذب آب نشان داد که فعال سازی مکانیکی آندالوزیت به مدت ۶۰ ساعت، تأثیر معناداری بر رفتار زینترینگ این ماده دارد. در مقایسه با نمونه شاهد، نمونه فعال شده در بخش عمده ای از بازه دمایی مورد مطالعه، چگالی بالاتر، انقباض بیشتر، تخلخل ظاهری کمتر و جذب آب پایین تری از خود نشان داد. هم خوانی این چهار شاخص بیانگر آن است که فعال سازی مکانیکی موجب تسریع سینتیک چگالش و آغاز زودتر زینترینگ شده است. این رفتار را می توان به کاهش اندازه ذرات، افزایش سطح ویژه، افزایش انرژی ذخیره شده و ایجاد عیوب ساختاری در اثر آسیاب کاری پراورزی نسبت داد که در مجموع، نیروی محرکه لازم برای انتقال جرم و چگالش را افزایش می دهند. همچنین، کاهش تخلخل ظاهری و جذب آب در نمونه فعال شده نشان می دهد که حذف تخلخل باز و تکامل ریزساختار متراکم در این نمونه با کارایی بیشتری صورت گرفته است. با این حال، در دماهای بالاتر، اختلاف میان دو نمونه کاهش می یابد و نمونه شاهد به تدریج به مقادیر چگالی نزدیک یا حتی اندکی بالاتر دست پیدا می کند. این موضوع نشان می دهد که اثر اصلی فعال سازی مکانیکی، عمدتاً در تسریع مراحل اولیه و میانی زینترینگ و کاهش دمای مؤثر چگالش بروز می یابد. در مجموع، نتایج حاکی از آن است که فعال سازی مکانیکی ۶۰ ساعته، روشی مؤثر برای بهبود رفتار زینترینگ آندالوزیت و دستیابی به بدنه ای متراکم تر در دماهای پایین تر است. نتایج مشابهی نیز در نمونه های کائولن فعال سازی شده به مدت ۲۰ ساعت [۱۳]، آندالوزیت فعال سازی مکانیکی شده به مدت ۶۰ ساعت تحت فرایند زینترینگ مایکروویو [۹] و نیز در سایر پودرهای سرامیکی فعال سازی شده، از جمله کوردیریت [۱۰]، گزارش شده است. این نتایج نشان می دهد که بهبود رفتار زینترینگ در اثر فعال سازی مکانیکی، عمدتاً ناشی از افزایش سطح ویژه و انرژی ذخیره شده در ذرات است.



شکل ۱۱. تأثیر حرارت دهی و فعال سازی مکانیکی بر خواص تکنولوژیکی (انقباض خطی، چگالی، تخلخل و جذب آب) قطعات مولایتی زینتر شده در دماهای مختلف.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر فعال سازی مکانیکی آندالوزیت ایرانی به مدت ۶۰ ساعت آسیاب کاری پرانرژی بر سنتز و رفتار زینترینگ سرامیک های مولایتی بررسی شد. نتایج نشان داد که این فرایند، از طریق ایجاد بی نظمی ساختاری، افزایش انرژی سطحی و آمورف شدن بخشی از پودر، دمای آغاز تشکیل مولایت را به طور چشمگیری از حدود 1200°C در نمونه شاهد به حدود 800°C در نمونه فعال شده کاهش می دهد. این کاهش دما بیانگر نقش مؤثر فعال سازی مکانیکی در تسهیل واکنش پذیری و تسریع فرایند مولایت زایی است. بررسی های ریز ساختاری نیز نشان داد که نمونه های حاصل از پودر فعال شده، ریز ساختاری متراکم تر، یکنواخت تر و متشکل از سوزن های ریزتر مولایت دارند. این ویژگی ها نشان می دهد که فعال سازی مکانیکی نه تنها بر مسیر تشکیل فاز اثر گذار است، بلکه در تکامل ریز ساختار نهایی نیز نقش تعیین کننده ای ایفا می کند. افزون بر این، نتایج نشان داد که رفتار زینترینگ در نمونه فعال شده هموارتر و کنترل پذیرتر از نمونه شاهد است. در حالی که نمونه شاهد در اثر تجزیه آندالوزیت در محدوده دمایی 1200°C تا 1400°C رفتاری ناهمگن و همراه با احتمال ایجاد تنش و ترک از خود نشان داد، نمونه فعال شده به دلیل حذف یا تضعیف فاز آندالوزیت اولیه، زینترینگی تدریجی تر و پایدارتر را تجربه کرد. در مجموع، می توان نتیجه گرفت که فعال سازی مکانیکی، راهکاری مؤثر برای کاهش دمای مولایت زایی، بهبود رفتار زینترینگ و دستیابی به

ریزساختاری متراکم‌تر و یکنواخت‌تر در سرامیک‌های مولایتی مبتنی بر آندالوزیت است. از این‌رو، این روش می‌تواند از منظر فنی و انرژی، گزینه‌ای مناسب برای بهینه‌سازی فرایند تولید قطعات سرامیکی دمابالا به‌شمار رود. برای تکمیل این مسیر پژوهشی، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، اثر افزودنی‌های اکسیدی مختلف، از جمله اکسید ایتریوم، بر تسریع بیشتر مولایت‌زایی و افزایش میزان مولایت تشکیل‌شده بررسی شود. همچنین، ارزیابی خواص مکانیکی، مقاومت به شوک حرارتی در دماهای بالا، و نیز امکان‌سنجی به‌کارگیری روش‌های زینترینگ سریع مانند SPS برای پودرهای فعال‌شده، می‌تواند در توسعه کاربردی این سامانه مفید باشد.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان از کارکنان مرکز اطلاع‌رسانی دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص) که منابع سخت-افزاری لازم را جهت اجرای شبیه‌سازی‌های این مقاله در اختیار گذشتند تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۶- تعارض منافع

نویسنده(گان) اعلام می‌دارند که در مورد انتشار این مقاله تضاد منافع وجود ندارد. علاوه بر این، موضوعات اخلاقی شامل سرقت ادبی، رضایت آگاهانه، سوء رفتار، جعل داده‌ها، انتشار و ارسال مجدد و مکرر توسط نویسندگان رعایت شده است.

۷- دسترسی آزاد

این نشریه دارای دسترسی باز است و اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هر شکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی بر اساس محتوا) را می‌دهد.

۷-مراجع

- [1] H. Schneider, J. Schreuer, B. Hildmann, Structure and properties of mullite: a review, *Journal of European Ceramic Society* 28 (2008) 329–344.
- [2] Yingchao Dong, Xuyong Feng, Xuefei Feng, Yanwei Ding, Xingqin Liu, Guangyao Meng, Preparation of low-cost mullite ceramics from natural bauxite and industrial waste fly ash, *Journal of Alloys and Compounds* 460 (2008) 599–606.
- [3] D.J. Duval, S.H. Risbud, J.F. Shackelford, Mullite, in: J.F. Shackelford, R.H. Doremus (Eds.), *Ceramic and Glass Materials: Structure, Properties and Processing*, Springer, 2008, pp. 27–48.
- [4] Yulong An, Jianmin Chen , Huidi Zhou , Guang Liu, Fast transformation of andalusite into mullite by addition of yttria, *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica*, 58(2019) 142-150
- [5] S.K. Haldar, *Introduction to Mineralogy and Petrology* (Second Edition), Elsevier, 2020, Pages 1-51.
- [6] Marie-Laure Bouchetou, Jean-Pierre Ildefonse, Jacques Poirier, Pierre Daniellou, Mullite grown from fired andalusite 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* 31 (2005) 999–1005.
- [7] M. Ghassemi Kakroudi, M. Huger, C. Gault, T. Chotard, Aniso- tropic behavior of Andalusite particle, *Journal of European Ceramic Society* 29 (2009) 571–579.
- [8] Ibram Ganesh, Jose´ M.F. Ferreira, Influence of raw material type and of the overall chemical composition on phase formation and sintered

microstructure of mullite aggregates, *Ceramics International* 35 (2009) 2007–2015.

[9] M.S. Abdi, T. Ebadzadeh, Mullitization, microstructure and physical properties of mechanically activated andalusite sintered by microwave, *Ceramics International* 39 (2013) 1451-1454.

[10] S. Tamborenea, A.D. Mazzoni, E.F. Aglietti, Mechanochemical activation of minerals on the cordierite synthesis, *Thermochimica Acta* 411 (2009) 571–579.

[11] N. Behmanesh, S. Heshmati-Manesh, A. Ataie, Role of mechanical activation of precursors in solid state processing of nano-structured mullite phase, *Journal of Alloys and Compounds* 450 (2008) 421–425.

[12] Teresa Wala, Bronisław Psiuk, Jerzy Kubacki, Katarzyna Stec, Jacek Podwórny, Mullitization process of andalusite concentrates – Role of natural inclusions, *Ceramics International* 40 (2014) 5129–5136.

[13] T. Ebadzadeh, Effect of mechanical activation and microwave heating on synthesis and sintering of nano-structured mullite, *Journal of Alloys and Compounds* 489 (2010) 125–129.

[14] P. Prigent, M.L. Bouchetou, J. Poirier, Andalusite: An amazing refractory raw material with excellent corrosion resistance to sodium vapours, *Ceramics International* 37 (2011) 2287-2296.

[15] Dafei Ding , Guotian Ye , Na Li , Guihua Liao , Xuekun Tian , Liugang Chen, Andalusite transformation and properties of andalusite-bearing refractories fired in different atmospheres, *Ceramics International* 45 (2019) 3186-3191.

[16] Hosseini Moradi, S A and alborznia, H . (2023). Protecting electronic equipment against electromagnetic waves of ku band using single and multilayer plasma. *Aerospace Defense*, 2(2), 1-16.

[17] Yazdan Panah, M R , Hosseini Moradi, S A , Hatami, M and Jouladeh Roodbar, H . (2021). Designing and Manufacturing Recyclable Metal

Based Nanocomposites for Purification of Chemically Contaminated Waters. Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran, 40(2), 51-59.

[18] H. Pooladvand, S. Baghshahi, B. Mirhadi, A. R. Souri & H. arabi, Effect of MgO and CaO on Transformation of Andalusite to Mullite. J. of Materi Eng and Perform 21(2012) 1637–1644.

[19] GHOBADI, N., Hosseini Moradi, S.A., & AMIRZADE, M.. (2022). SYNTHESIS AND STRUCTURAL, MAGNETIC, AND ELECTROMAGNETIC CHARACTERIZATION OF COBALT FERRITE / REDUCED GRAPHENE OXIDE COMPOSITE. ADVANCED MATERIALS IN ENGINEERING (ESTEGHLAL), 40(4), 69-83. SID. <https://sid.ir/paper/1042817/en>