

## زمین‌شناسی و کانی‌شناسی کانسار آلونیت هفت‌صدوق (شمال‌غرب تاکستان): با نگرشی بر ظرفیت برداشت آلومینا و پتابس از آن

مجید قاسمی سیانی<sup>۱\*</sup>، بهروز کریمی شهرکی<sup>۲</sup>

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، ایران

۲- مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۲/۱۱، نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۴/۱۴)

چکیده: کانسار آلونیت هفت‌صدوق در شمال‌غرب تاکستان (۶۰ کیلومتر قزوین) واقع بوده و بخشی از ذخیره بزرگ آلونیت تایکند در ایران است. بررسی‌های کانی‌شناسی و زمین‌شناسی صحرایی نشان داد که یک منطقه‌بندی در پهنه‌های دگرسانی کانسار هفت‌صدوق و پیرامون آن شامل بخش‌های سیلیسی در مرکز و بخش‌های کوارتز-آلونیتی (کوارتز آلونیت)، کائولینیتی و پروپیلیتی به سمت بیرون وجود دارد. کوارتز و آلونیت کانی‌های مهم آلونیت کوارتزیت هستند. شناسایی پهنه‌های دگرسانی اسید-سولفات می‌تواند برای پی جویی کانسارهای فراگرمایی-پورفیری تشکیل شده همراه با فعالیت ماقمایی سنوزوئیک در ایران مفید باشد. آلونیت ذخیره‌ای برای جایگزینی منابع پتابسیم و آلومینا در نظر گرفته شده و قدم اصلی در استخراج پتابسیم و آلومینا تجزیه آلونیت است. از این رو در این پژوهش تجزیه آلونیت به روش گرماسنجی افتراکی (DTA)، گرما وزن سنجی (TGA) و پراش پرتوی ایکس (XRD) بررسی شد. منحنی DTA آلونیت سه قله گرمگیر در دماهای ۵۴۶، ۷۸۷/۹ و ۱۱۹۵/۴ درجه سانتیگراد و یک قله گرمزا در دمای ۷۳۷/۲ درجه سانتیگراد نشان داد. قله گرمگیر نخست نشان‌دهنده از دست دادن آب و تشکیل آلونیت آبزدایی شده،  $KAl_3O_3(SO_4)_2$ ، است. قله گرمزازی دوم مربوط به تشکیل شکل بلوری جدید سولفات آلومینیوم پتابسیم،  $KAl(SO_4)_2$ ، است. قله گرمگیر سوم به گوگردادار شدگی گسترده و تشکیل یک شکل سولفات آلومینیوم پتابسیم پایه،  $KAIO.SO_4$ ، نسبت داده می‌شود. قله گرمگیر چهارم نیز نشان‌دهنده تشکیل اکسید آلومینیوم ( $Al_2O_3$ ) و لوسيت ( $KAISi_2O_6$ ) است.

واژه‌های کلیدی: کانی‌شناسی؛ آلونیت؛ آلومینا؛ فرآوری؛ هفت‌صدوق.

آلومینیوم است، آلونیت را می‌توان کانسار آلومینیوم بشمار آورد [۵]. کود پتابس و اسید سولفوریک از دیگر فراورده‌های فرعی آلونیت برآمده از فرآوری آن هستند [۶].

آلونیت در محیط‌های متنوع زمین‌شناسی چون محیط‌های دگرگونی، آذرین و رسوبی تشکیل شده است [۷]. آلونیت به صورت رگه‌ای و توده‌ای همراه با کانسارهای فراگرمایی-پورفیری (به ویژه نوع سولفیدشده بالا) می‌تواند در میزان سنگ‌های آتشفسانی و نفوذی تشکیل شود [۷]. به عبارتی، مهمترین منبع آلونیت بر پایه جانشینی و دگرسانی اسید سولفات در سنگ‌های آتشفسانی بوده که به صورت توده‌ای و

### مقدمه

آلونیت با ترکیب  $6KAl_3(SO_4)_2(OH)_2$  دارای ۱۱/۳۷ درصد  $K_2O$ ، ۳۶/۹۲ درصد  $Al_2O_3$  و ۳۸/۶۶ درصد  $H_2O$  درصد  $SO_3$  است و تا اواخر قرن گذشته برای تهیه زاج و سولفات آلومینیوم استفاده می‌شد [۲، ۱]. در طبیعت، سدیم می‌تواند جانشین پتابسیم شود و در صورتی که نسبت اتمی سدیم به پتابسیم برابر با یک یا بزرگ‌تر باشد، کانی را ناترو آلونیت و زمانی که این نسبت بیش از ۳ باشد، آن را آلونیت سدیمی می‌نامند [۳، ۴]. در حال حاضر، آلونیت برای تولید آلومین مورد توجه است. از آنجا که آلومین منبع با ارزشی برای

\*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۸۹۲۹۹۴۷، پست الکترونیکی: m.ghasemi@knu.ac.ir

برداشت در نظر گرفته می‌شوند. از کانسارهای مهم در این پهنه می‌توان به کانسارهای بزرگ تاکند، زاجکان، زاجکندی، یوزباشی چای، زایلیک (قلندر)، مشکین‌شهر، سیردان و حسن-آباد اشاره کرد [۱۰]. ایالت فلززایی طارم-هشتجمین در البرز غربی بهدلیل دارا بودن منابع متعدد از کانی سازی فراگرمایی همراه با سنگ‌های آتشفسانی-نفوذی یکی از مناطق مهم آلونیت‌زایی ایران است [۱۲]. ایالت فلززایی طارم-هشتجمین از پویاترین مناطق ماقمایی ایران در دوره ائوسن-الیگوسن محسوب می‌شود. پهنه‌های دگرسانی مهم در طارم و همچنین هشتجمین تشکیل شده‌اند که بخشی از این دگرسانی‌ها از نوع دگرسانی اسید سولفات هستند. شدت دگرسانی در این ایالت چنان شدید بوده که از آن به عنوان پهنه دگرسانی محور تاکستان-جلفا یاد شده است [۱۳].

فعالیت ماقمایی ائوسن پسین و الیگوسن سبب افزایش درجه زمین‌گرمایی در منطقه طارم-هشتجمین شده و توده‌های خطی سینیتی و گرانیتی را در عمق کم تزیریق نموده است. در اثر این فرآیند، محلول‌های گرمایی در بردارنده مقادیر بالای یون سولفات، دگرسانی گسترده‌ای را ایجاد کرده‌اند. پهنه‌های برشی منطقه به عنوان مجرایی برای عبور محلول‌های گرمایی عمل کرده، به طوری که در اثر واکنش این محلول‌ها با سنگ‌های آتشفسانی، استوک‌ها و دایک‌های نفوذی پورفیری سبب پیدایش و گسترش پهنه‌های دگرسان شده‌اند (شکل ۱ الف). این پهنه‌های دگرسان در بخش‌های مختلف از نظر ترکیبی مشابه بوده و شامل دو نوع دگرسانی اسید سولفاتی-درونزاد (شامل پهنه‌های سیلیسی، آلونیتی، آرژیلی پیشرفت، سرسیتی و پروپیلیتی) و اسید سولفاتی-برونزاد (با حضور کانی‌هایی از جمله ژاروسیت، آلونیت، کائولینیت، لیمونیت، گوتیت، هماتیت، سولفور طبیعی و سنگ گچ) هستند [۱۴]. حاج علیلو [۱۵] پنج پهنه بزرگ دگرسانی کجل-شمس آباد، مندجین، گاو-کمر، نیمه هیل و جیزووان را شناسایی کرد. در هریک از این پهنه‌های دگرسان، هفت پهنه دگرسانی سرسیتی، آرژیلی پیشرفت، آرژیلی حدواسط، گرابیزی، پروپیلیتی، آلونیتی و سیلیسی تشخیص داده شده است [۱۵]. پهنه آرژیلی پیشرفت دگرسانی اسید-سولفات در ایالت فلززایی طارم-هشتجمین گسترش بیشتری دارد و شامل کانی‌های آلونیت، ژاروسیت، ناتروژاروسیت و کائولینیت است (شکل ۱ ب). پژوهش‌هایی پیرامون برخی از کانسارهای آلونیت و کائولینیت تشکیل شده در شمال غرب ایران انجام شده است [۱۶-۱۸]. کانسار هفت صندوق در منطقه طارم از ایالت فلززایی طارم-هشتجمین واقع بوده که در این پژوهش، زمین‌شناسی و کانی شناسی آن بررسی شده است.

عدسی تشکیل شده‌اند. همچنین، آلونیت یا ناتروآلونیت گرهکی در سنگ‌های رسوبی چون شیل، شیسته‌های میکادر و لایه‌های رسی یافت می‌شود. تبخیری‌ها و دریاچه‌های سور از دیگر منابع مهم برای آلونیت محسوب می‌شوند [۸]. کانسار هفت‌صدوق در نزدیکی روستای هفت‌صدوق به فاصله ۲۴ کیلومتری شمال‌غرب تاکستان واقع بوده و بخشی از ذخیره بزرگ آلونیت تاکند است. ذخیره آلونیت تاکند در ایالت فلززایی طارم-هشتجمین مهمترین ذخیره آلونیت ایران است. اکنون در صنعت آلومینیم جهان، مهمترین منبع برای تأمین آلومینیوم ذخایر بوکسیت هستند. یکی از روش‌های بازیابی پتاسیم و آلومینا از آلونیت تجزیه گرمایی و در پی آن فروشی اب فلزکاری است [۸]. در روش‌های آب فلز کاری، نخست آلونیت با عملیات تکلیس به نمک پتاسیم محلول ( $K_2SO_4$ ) و نمک‌های آلومینا تبدیل شده و با فروشی و پالایش، عنصر پتاسیم از نمک‌های آلومینا جداسازی می‌شود [۸]. چنان‌که بیان شد، آلونیت برای تولید آلومینا و کود پتاس به ویژه در کشورهایی که ذخایر بوکسیت و همچنین منابع نمک‌های پتاسیم محلول ندارند، ارزشمند است. روش‌های مختلف برای برداشت آلومینا و پتاس از آلونیت ارائه شده است که هر یک معایب و مزایایی دارد. در حال حاضر در کشورهای دیگر روش‌های جدیدی نیز برای برداشت این دو فراورده مهم بکار می‌رود [۹]. با توجه به منابع محدود پتاس محلول و بوکسیت در ایران در این پژوهش، بررسی‌های کانی‌شناسی کانسار آلونیت هفت‌صدوق برای تعیین آثار گرمایی و چگونگی تشکیل آلومینا و پتاس از آلونیت انجام شد. تکلیس و بررسی رفتار گرمایی آلونیت، در اصل با دی‌هیدروکسیل زدایی و گوگرد زدایی صورت گرفت.

ایالت فلززایی طارم-هشتجمین و آلونیت‌زایی در آن آلونیت در سنگ‌های آتشفسانی دانه‌ریز یا دانه درشت‌تر نیمه-آتشفسانی و یا در سنگ‌های نفوذی کم‌عمق بر اثر دگرسانی اسید-سولفات تشکیل می‌شود. ذخیره‌های بسیاری از آلونیت در نقاط مختلف ایران و اغلب بر محوری با راستای شمال‌غرب-جنوب‌شرق از تاکستان قزوین تا مرز ایران و جمهوری‌های آذربایجان و ارمنستان گزارش شده است [۱۰]. مناطق عمده‌ی تمرکز آلونیت در شمال شرق زنجان، غرب منجیل، پیرامون مشکین شهر، اهر و شرق جلفا گزارش شده است [۱۱، ۱۰]. بهترین و بزرگترین انباسته‌های آلونیت ایران در ایالت فلززایی طارم-هشتجمین و کمربند ماقمایی اهر-ارسباران واقع هستند. بعلت فراوانی ماده آلونیت در ایران، فقط عیارهای بیش از ۳۰ درصد و متوسط ۳۵ تا ۴۵ درصد آن بعنوان ماده‌یمعدنی قابل

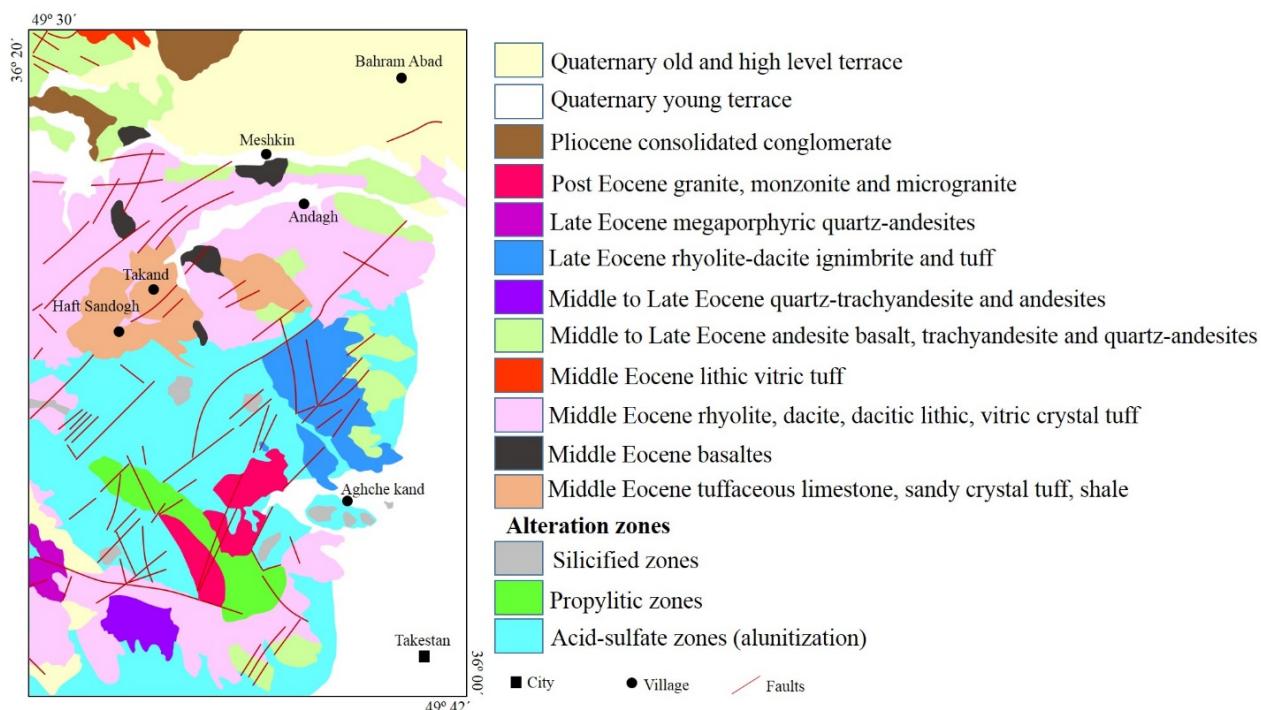


شکل ۱ (الف) پهنه‌های برشی که به عنوان مجرایی برای عبور محلول‌های گرمابی عمل کرده اند و (ب) گستردگی پهنه‌های دگرسانی اسید-سولفات در ایالت فلززایی طارم-هشت‌جین.

و آذرآواری تشکیل شده و ترکیب عمدۀ آنها بازالت، ریولیت، داسیت، آندزیت، تراکی‌آندزیت، آندزیت بازالت و کوارتز آندزیت‌های پورفیری همراه با توف‌های بلوری و شیشه‌ای با ترکیب حدوداً میانی تا اسیدی است [۱۹] (شکل ۲). گستردگی این ترکیب حدوداً میانی تا اسیدی است، ریولیت و توف بلوری شیشه‌ای واحد زمین‌شناسی از داسیت، ریولیت و توف بلوری شیشه‌ای تشکیل شده است. در گستره کانسار آلونیت هفت‌صدوق، اغلب واحدهای آندزیتی و ریولیت-داسیت با بافت پورفیری (درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و کوارتز خلیجی در یک زمینه شیشه‌ای و ریزبلور) و جریانی همراه با توف ریولیتی با بافت پورفیری آواری رخمنون دارند آنها به عنوان سنگ اولیه کانسار آلونیت هفت‌صدوق محسوب می‌شوند که در اثر محلول‌های گرمابی دگرسان شده و پهنه آلونیتی را تشکیل داده‌اند (شکل ۳). رخمنون‌هایی از واحدهای میکروگرانیتی، گرانیتی و مونزونیتی با بافت پورفیری، ریزدانه‌ای در نزدیکی آقچه‌کند دیده شده که به احتمال بسیار خاستگاه محلول‌های گرمابی بوده و باعث دگرسانی گستردگی اسید-سولفات (آلونیت) در تاکند و آقچه‌کند شده است (شکل ۲). در نزدیکی کانسار هفت‌صدوق واحد مونزونیت پورفیری رخمنون دارد که کانی-شناسی آن شامل پلاژیوکلاز (با فراوانی ۴۰ تا ۴۵ درصد)، فلدسپار قلیایی (با فراوانی ۴۰ تا ۴۵ درصد) و کوارتز (۶ تا ۶ درصد) است. بیوتیت و آمفیبول کانی‌های مافیک و زیرکن و اسفن کانی‌های فرعی تشکیل دهنده مونزونیت پورفیری هستند.

**روش بررسی**  
بررسی‌های سنگ‌نگاری برای ۲۰ مقطع نازک از پهنه‌های آلونیتی کانسار آلونیت هفت‌صدوق و همچنین ۵ مقطع نازک از بخش‌های با دگرسانی کمتر و سنگ‌های آتشفسانی بدون دگرسانی در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران با میکروسکوپ نوری-بازتابی زایس مدل 2 Axioplan انجام شد. برای کانی‌شناسی کانسٹرکت آلونیت کانسار هفت‌صدوق، نمونه‌ای از پهنه آلونیتی تا اندازه کوچکتر از ۶۰ میکرون پودر گردید و با پراش سنج پرتوی ایکس (XRD) فیلیپس مدل Xpert-pro Co K $\alpha$  با پرتوی ایکس با طول موج ۱.۷۸۹۰۱ Å و ولتاژ و شدت جریان ۴۰ kV و ۳۵ mA و همچنین با طیف سنج فلورسانس پرتوی ایکس (XRF) در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران آزمایش شدند. به منظور بررسی رفتار گرمابی گرماسنجی احتراقی (DTA) و گرماسنجی (TGA) نیز با دستگاه Netzsch STA 409PC در آن مرکز انجام شد. تجزیی گرمابی نمونه‌ها در ۱۲۰۰ °C با نرخ گرمایش ۱۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه بر ۷۰ میلی‌گرم نمونه انجام شد. آزمایش DTA/TGA در محیط گازی هوای معمولی انجام شد و آلومینا به عنوان ماده مرجع استفاده گردید. به منظور بررسی تغییرات فازی، نمونه‌ها در دماهای مختلف به مدت یک ساعت در کوره گرمادهی شده و سپس با طیف‌سنج XRD شناسایی گردیدند.

**زمین‌شناسی صحرایی**  
از نظر زمین‌شناسی، منطقه مورد بررسی از واحدهای آتشفسانی



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی ساده شده پهنه‌های دگرسانی و واحدهای سنگی در ارتباط با آن (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱۰۰۰۰۰۰ تاکستان). [۱۹]

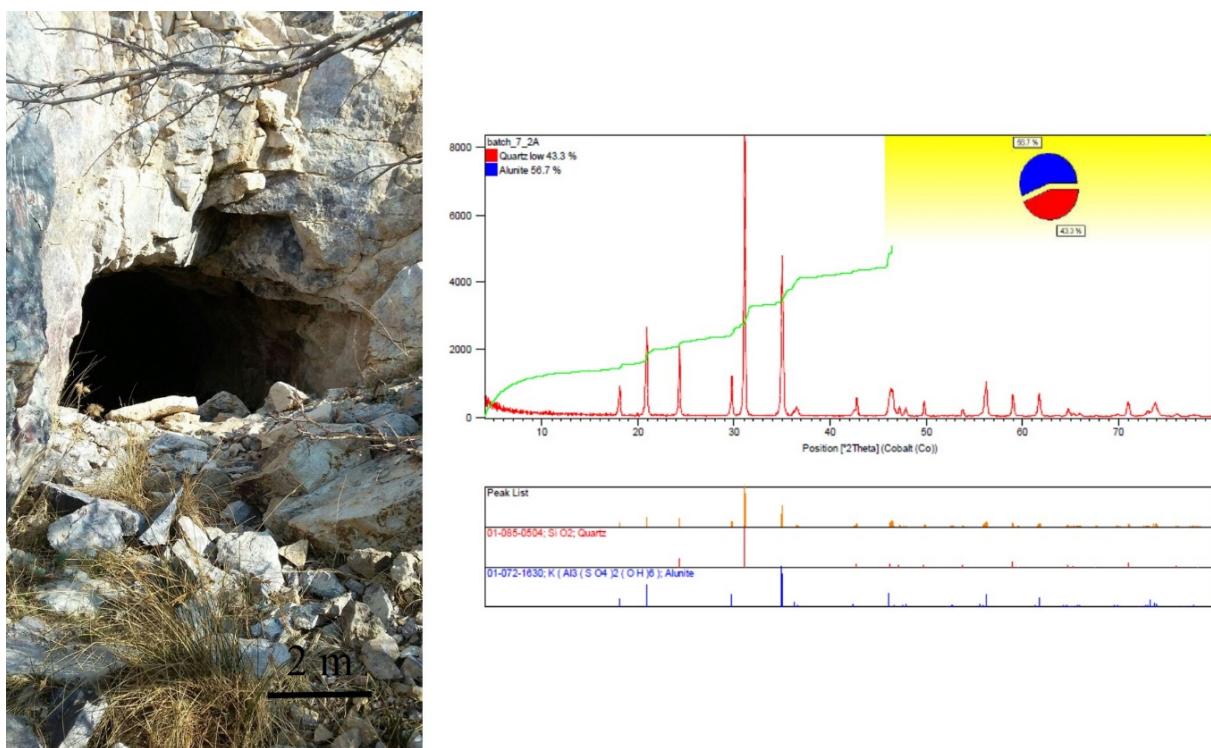


شکل ۳ نفوذ توده نفوذی با ترکیب مونزونیت پورفیری در واحدهای آتشفسانی با ترکیب عمده داسیت-ریولیت (سمت چپ تصویر)، و آندزیتی و توفی پیرامون واحد داسیتی-ریولیتی (در شکل دیده نمی‌شود). تصویر میکروسکوپی از واحدهای برداشت شده در گوشه شکل نشان داده شده است. (Afs: فلدسپار قلیایی، Pl: پلاژیوکلاز، Am: آمفیبول، Qtz: کوارتز و Alu: آلونیت).

کائولینیت در ارتفاعهای و بخش‌های بالایی قطعه غربی هفت‌صدوق تشکیل شده است. بخش آلونیت-کوارتز که گستردۀ ترین بخش پهنه دگرسانی بوده شامل کوارتز، آلونیت همراه با مقادیر فرعی کائولینیت، دایکیت و هماتیت است. بخش آلونیت-کوارتز زیر بخش سیلیسی تشکیل شده و دارای ساخت برشی آذرآواری است. عیار آلونیت از ۴۰ تا ۶۳ درصد متغیر بوده و میانگین آن در این بخش ۴۸ درصد است. براساس مقادیر بالای کوارتز همراه با آلونیت، می‌توان این بخش را کوارتز آلونیت نیز نامید. شکل ۴ بخش آلونیت-کوارتز همراه با مقدار آلونیت و کوارتز در آن را نشان می‌دهد. مرز بین بخش‌های کوارتز-آلونیت و سیلیسی به صورت تدریجی است. بخش کائولینیت در پایین کانسار به ویژه مرز بین قطعه‌های شرقی و غربی قرار دارد. در بخش کائولینیتی، کائولینیت به صورت ذرات ریزدانه در متن سنگ‌های آلونیتی و سیلیسی منتشر شده و بخش عده کائولن درون درزه‌ها و شکستگی‌ها دیده شده است. در مقیاس ناحیه‌ای، این بخش‌ها توسط دگرسانی پروپیلیتی در بر گرفته شده‌اند که بیشتر در واحدهای آندزیتی رخ داده است. به سمت ارتفاعهای، کوارتز غالب شده و بخش سیلیسی را تشکیل داده است (شکل ۵).

سنگ‌نگاری پهنه‌های آلونیت‌زایی در کانسار هفت‌صدوق پهنه‌های دگرسانی در منطقه شامل پهنه‌های دگرسانی پروپیلیتی (اپیدوتی‌شدن)، اسید-سولفات (آرژیلی و آلونیت) و سیلیسی‌شدن بوده که مطابق با منطقه‌بندی در کانسارهای آلونیت در این ناحیه هستند [۱۰]. در نزدیکی کانسار آلونیت هفت‌صدوق، کانسار فراگرمایی نیکوئیه تشکیل شده که نشان دهنده حجم بالای فعالیت‌های گرمابی و کانی‌سازی در ارتباط با این پهنه‌های دگرسانی است [۲۰، ۲۱]. پهنه آلونیتی هفت‌صدوق دارای روند کلی شمال‌غربی-جنوب‌شرقی موازی با روند ساختاری در ایالت فلزیای طارم-هشت‌چین است. گسل-هایی با راستای کلی شمال‌غرب-جنوب‌شرق تقریباً موازی روند کلی کانسار در بخش شمالی کانسار باعث بالا آمدن توده کانسار شده‌اند. از نظر زمین‌شناسی، کانسار هفت‌صدوق به دو قطعه شرقی و غربی تقسیم می‌شود که در مرز بین آن‌ها یک قطعه کائولینیتی و توف اسیدی قرار دارد. پهنه آلونیتی در واحدهای اسیدی ریولیتی-داسیت از گسترش بیشتری نسبت به واحدهای آندزیتی برخوردار است.

پهنه دگرسانی آلونیتی منطقه‌بندی نشان می‌دهد و شامل سه بخش سیلیسی، کوارتز-آلونیت و کائولینیتی است. بخش‌های سیلیسی با کانی‌های شاخص کوارتز و کلسدونی همراه با

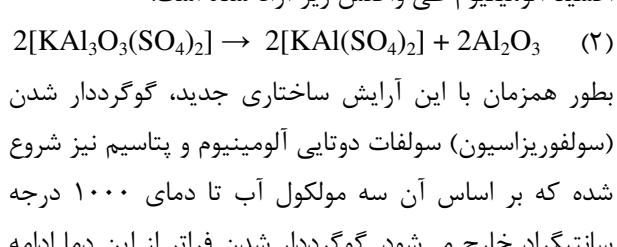
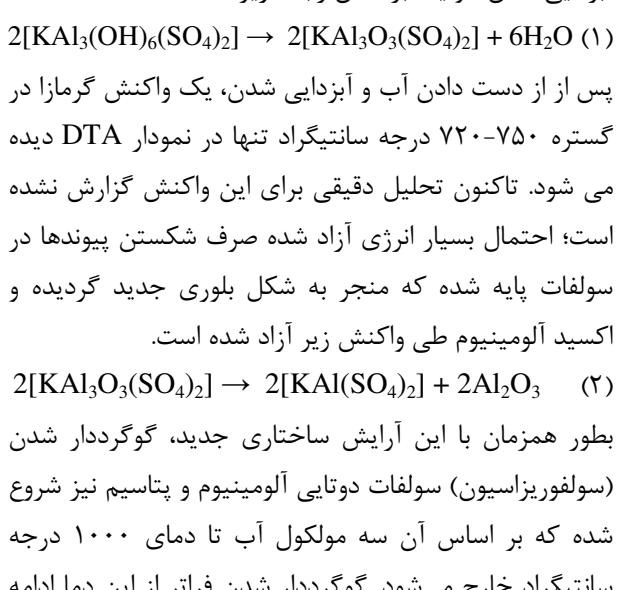


شکل ۴ بخش کوارتز-آلونیتی در دهانه تونل A که براساس طیف پراش پرتو ایکس، نمونه برداشت شده از این قسمت دارای ۵۶٪ درصد آلونیت و ۴۳٪ درصد کوارتز است.



شکل ۵ نمایی باز از کانسار هفت صندوق با بخش‌های داسیتی-ریولیتی آلونیتی شده با شدت‌های مختلف و واحدهای آندزیت پروپیلیتی شده در آن به سمت ارتفاع‌ها و بخش‌های سیلیسی، مقدار کوارتز بتدریج افزایش یافته و آلونیت کاهش می‌یابد.

گرم‌گیر در دمای ۵۴۶ درجه سانتیگراد، یک قله گرم‌گار در ۷۳۷/۲ درجه سانتیگراد، دو قله گرم‌گیر در ۷۸۷/۹ و ۱۱۹۵/۴ درجه سانتیگراد رخ داده است (شکل ۷). این نتایج با نمودار DTA/TG از یک آلونیت خالص که تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد، شامل دو واکنش گرم‌گیر و یک واکنش گرم‌گار است [۲۲] همخوانی دارد. منحنی‌های تجزیه گرمایی نشان می‌دهند که در گستره‌ی ۵۰۰-۶۴۰ درجه سانتیگراد در آلونیت کاهش وزن رخ می‌دهد که مربوط به از دست دادن شش مولکول آب و آبزدایی شدن آلونیت براساس رابطه زیر است [۲۲]:



در بخش کوارتز-آلونیت (کوارتز آلونیت)، کوارتز و آلونیت مهمترین و اصلی‌ترین کانی‌های تشکیل دهنده نمونه‌ها هستند. فراوانی تقریبی کوارتز ۳۰ تا ۶۰ درصد و آلونیت ۴۰ تا ۶۳ درصدی است. مقادیر جزئی کانی‌های کدر (هم به صورت کانی‌های پراکنده و هم آغشتگی‌های اکسید و هیدروکسید آهن) و کانی‌های رسی همراه با کوارتز و آلونیت وجود دارند (شکل‌های ۶ الف و ب). کوارتز و آلونیت ریزلولور هستند و اغلب همیافت با هم دیده می‌شوند. همیافتی کوارتز و آلونیت به چنان شدید است که در خردایش کانسنگ تا اندازه ۷۵ میکرون نیز کوارتز و آلونیت با هم دیده می‌شوند (شکل ۶ پ) و جدایشی بین آنها رخ نداده است. گاهی شکستگی‌های سنگ میزبان با آلونیت پر شده است (شکل ۶ الف). در بخش‌های نزدیک به پهنه سیلیسی، مقدار آلونیت کاهش یافته در حالی که فراوانی کوارتز افزایش نشان داده است (شکل ۶ ت).

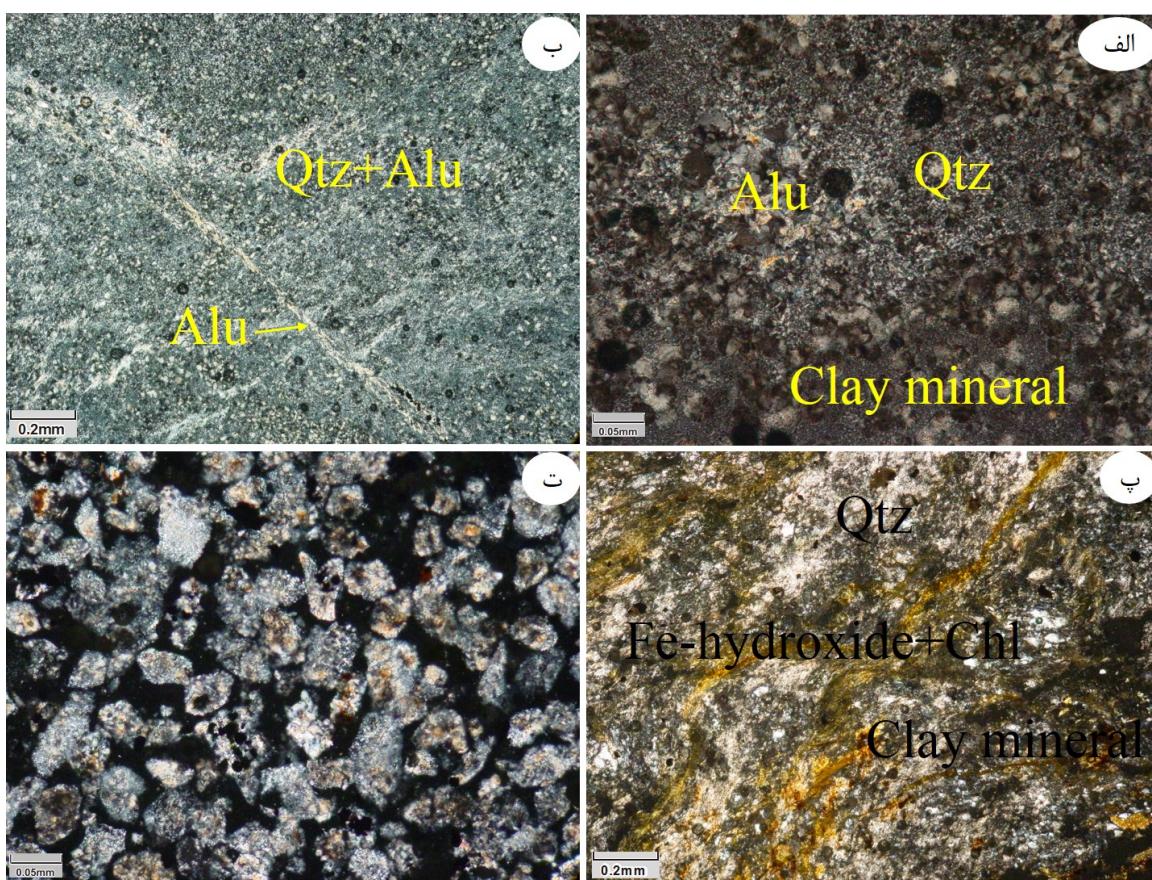
**آبزدایی و گوگرداری آلونیت کانسار هفت‌صندوق**  
برای بررسی رفتار گرمایی کانسنگ آلونیت، یک نمونه آلونیت با ترکیب شیمیایی  $\text{Na}_2\text{O}_{44/38}, \text{SiO}_2_{1/48}, \text{Al}_2\text{O}_3_{21/23}$  درصد  $\text{K}_2\text{O}_{3/66}$  و  $\text{SO}_3_{20/55}$ ، با مقدار تقریبی ۵۶۳ درصد آلونیت و ۴۳/۷ درصد کوارتز انتخاب شد. نتایج DTA نمونه نشان داد که در اثر گرمادهی با نرخ ۱۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه، یک قله اصلی

اما در باقیمانده تجزیه، در عمل  $K_2O$  خالص وجود ندارد. بررسی‌های کانی‌شناسی نشان داد که آلونیت با کوارتز و کانی‌های رسی همراه بوده و در نتیجه،  $K_2O$  بدست آمده با  $SiO_2$  و  $Al_2O_3$  همراه است که منجر به تشکیل آلومینوسیلیکات‌هایی چون  $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$  می‌شود. حضور ناخالصی کوارتز همراه با آلونیت روند تجزیه را تغییر داده و باعث تشکیل فازهای جدیدی شده است. این در حالی است که آلونیت خالص سرانجام به  $K_2O$  تبدیل می‌شود. براساس ترکیب شیمیابی نمونه‌های آلونیت هفت‌صدوق، سدیم جانشین پتانسیم در ساختار آلونیت شده است. جانشینی سدیم با پتانسیم با یافته‌های تجزیه شیمیابی به روش ریزپردازش الکترونی نیز تایید شد (نتایج منتشر نشده است). با این حال، وجود ناخاصی‌هایی چون سدیم در نمونه منجر به تشکیل فاز آفتیالتیت شده،  $NaK_3(SO_4)_2$  است.

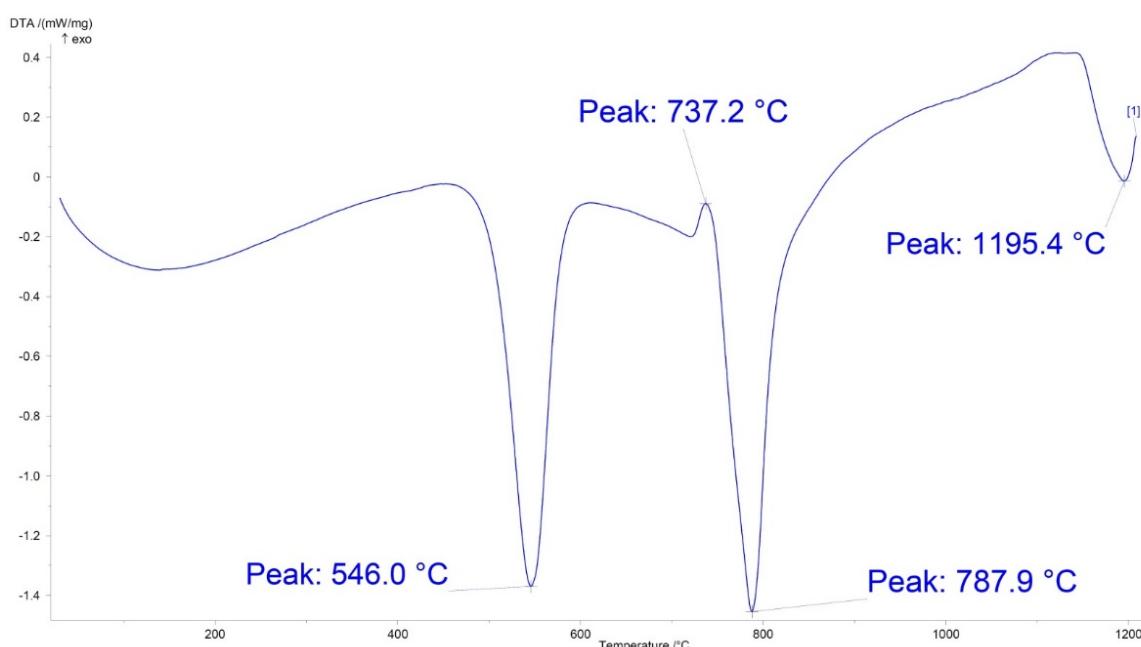
یافته و حتی تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد نیز کامل نمی‌شود. از این‌رو، تشخیص این که کدام مرحله از گوگرددار شدن آلونیت حد وسط است بر پایه منحنی تجزیه گرمایی مشکل است. در بخش اول، یک گوگرددار شدگی گستردگی در گستره دماهی DTA نزدیک رخ داده که با یک قله گرمایگیر در منحنی مشخص می‌شود؛ طی آن، حدود دو مولکول  $SO_3$  حذف شده و سپس با یک گوگرددار شدگی جزئی ادامه یافته است. این مرحله میانی را ( $640-800^{\circ}C$ ) می‌توان با واکنش زیر توضیح داد که یک سولفات آلومینیوم و پتانسیم پایه تشکیل می‌شوند:

$$2[KAl(SO_4)_2] \rightarrow 2(KAlO.SO_4) + 2SO_3 \quad (3)$$

پس از این گوگرددار شدگی گستردگی، در دمای بیش از  $800^{\circ}C$  واکنش زیر که منجر به تشکیل  $Al_2O_3$  و  $K_2O$  می‌شود، باید رخ دهد:

$$2(KAlO.SO_4) \rightarrow 2SO_3 + (Al_2O_3, K_2O) \quad (4)$$


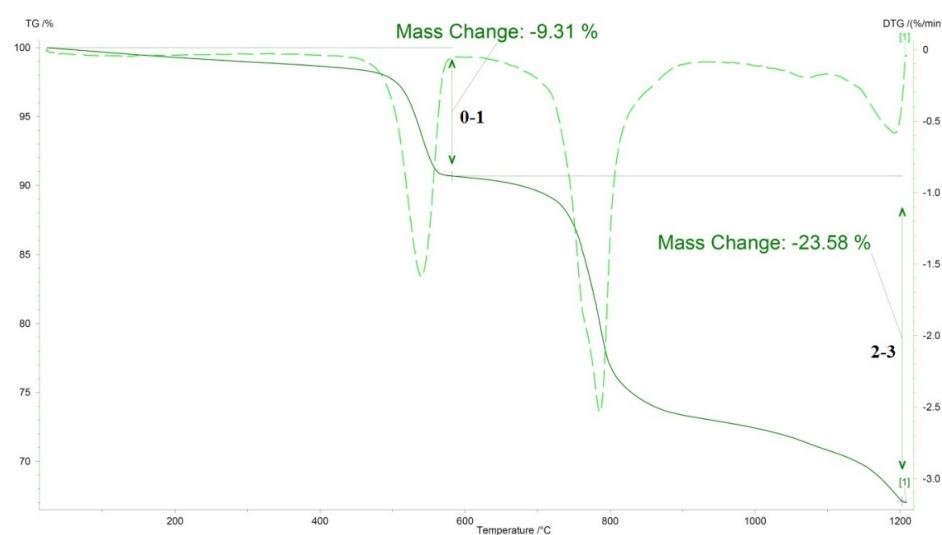
شکل ۶ (الف) آلونیت کوارتزیت شامل کوارتز و آلونیت همراه با رگه‌های آلونیت، (ب) کوارتز و آلونیت که کانی‌های اصلی بخش آلونیتی شده هستند، (پ) افزایش مقدار کوارتز و کانی‌های رسی به سمت بخش سیلیسی، (ت) خردایش کانسنگ تا ۷۵ میکرون که کوارتز و آلونیت همیافت هستند. (Chl: کلریت، Qtz: کوارتز و Alu: آلونیت).



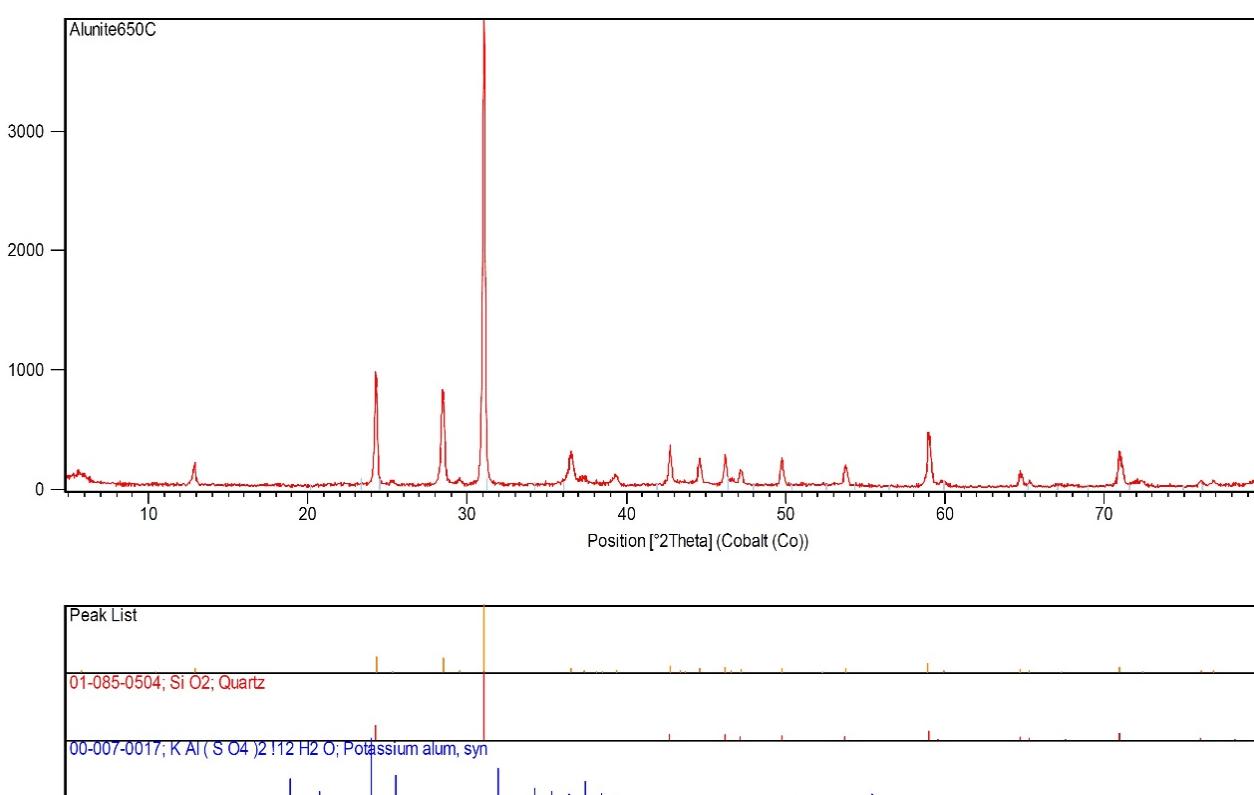
شکل ۷ نمودار گرماسنجی احتراقی (DTA) نمونه تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد با نرخ ۱۰ درجه بر دقیقه که نشان دهنده سه قله گرمایی و یک قله گرمایز است.

۹۰۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد انتخاب شدند که با اطمینان که واکنش هر مرحله در این دماها به پایان رسیده باشد. سپس نمونه در کوره لنتون آلمان تا این دماها با نرخ ۱۰ درجه سانتیگراد در دقیقه و ماندگاری در کوره به مدت ۲ ساعت گرمادهی شد پس از هر مرحله، طیف پراش پرتو ایکس نمونه‌ها تهیه شد (شکل‌های ۹ تا ۱۱) که با نتایج DTA همخوانی دارد.

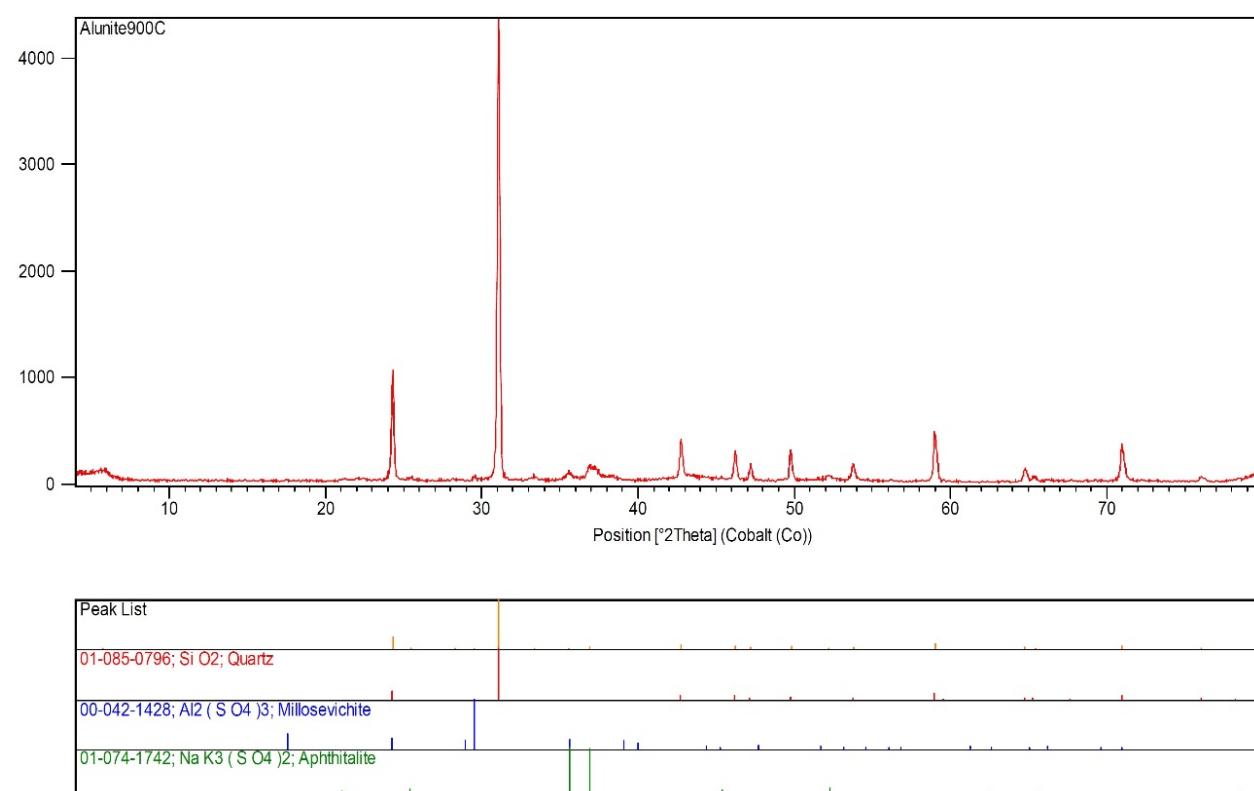
در نمودار گرما وزن سنجی (TGA) نمونه، دو مرحله قابل تشخیص است (شکل ۸). در مرحله ۱، آب جذب شده و نیز گروه OH کل شبکه حذف شده که حدود ۹ درصد افت وزن رخ داده است و در مرحله ۲-۳ نیز، گوگرددار شدگی و خروج گاز  $\text{SO}_3$  رخ داده که حدود ۲۴ درصد افت وزن دیده شده است. برای اطمینان از درستی واکنش‌های که انجام شده، در پایان هر یک آزمایش پراش‌سنجدی اشعه ایکس بر نمونه انجام شد. برای این منظور، بر اساس نمودار تجزیه گرمایی، دماهای



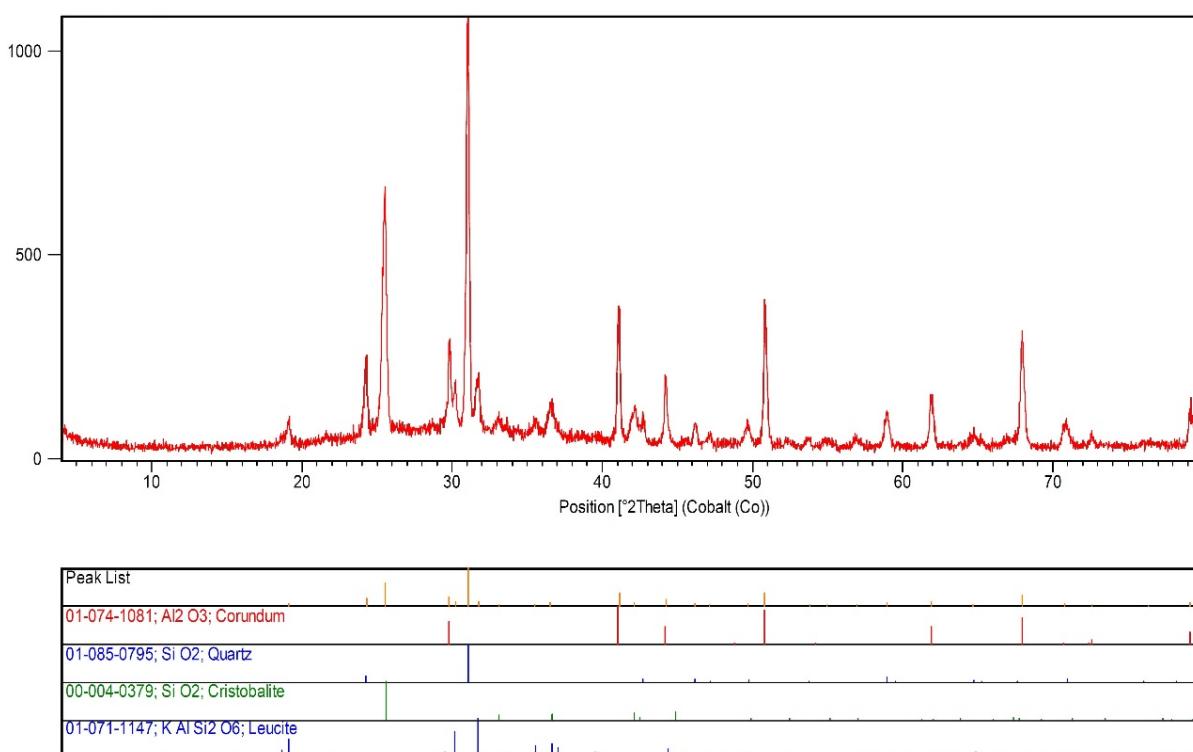
شکل ۸ نمودار گرما وزن سنجی وزنی (TGA) نمونه که دو مرحله آبزدایی (مرحله ۱-۰) و گوگردزدایی (مرحله ۲-۳) را نشان می‌دهد.



شکل ۹ طیف پراش پرتو ایکس نمونه پس از گرمادهی تا دمای ۶۵۰ درجه سانتیگرادکه باعث آبزدایی آلونیت شده است.



شکل ۱۰ طیف پراش پرتو ایکس نمونه پس از گرمادهی تا دمای ۹۰۰ درجه سانتیگرادکه باعث تشکیل فاز آفتیتالیت  $\text{NaK}_3(\text{SO}_4)_2$  شده است.



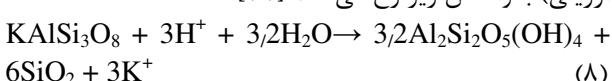
شکل ۱۱ طیف پراش پرتو ایکس نمونه پس از گرمادهی تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد.

دمای کمتر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد در اثر واکنش با سنگ‌های غنی از پتاسیم و آلومینیوم انجام می‌شود [۲۳]. در کانسار هفت صندوق و نواحی پیرامون آن، یک منطقه‌بندی در پهنه‌های دگرسانی دیده می‌شود (شکل ۲)، بخش‌های سیلیسی در نزدیکی توده‌های نفوذی و در ارتفاعها تشکیل شده و به سمت پیرامون تبدیل به بخش‌های کوارتز-آلونیتی (آلونیت کوارتزیت) و سرانجام بخش‌های کائولینیتی با گستردگی کمتر و بخش‌های پروپیلیتی در فاصله دورتر شده است. همچنانی وجود گسل‌های متعدد و پهنه‌های برشی به عنوان کنترل‌کننده تشکیل پهنه‌های دگرسانی نشان می‌دهد که آلونیت‌زایی در منطقه هفت‌صدوق و پیرامون آن به صورت درونزاد رخ داده است. از دیگر عوامل کنترل کننده دگرسانی، نقش سنگ میزبان است [۲۳]. بررسی‌های صحرایی نشان داد که در بخش‌هایی که داسیت و ریولیت به عنوان سنگ میزبان هستند، به دلیل بالا بودن مقدار فلدسپات و شیشه در ترکیب آنها، مقدار آلومینیوم و پتاسیم بالاست بوده و بخش‌های آلونیت کوارتزیتی در آنها گسترش بیشتری دارد. کائولینیتی شدن در سنگ میزبان آندزیتی بیشتر دیده شده است. بر پایه پژوهش‌های پیشین پیرامون کانسارهای کائولینیتی شمال‌غرب ایران نیز،

## بحث

آلونیت به عنوان یک سنگ دیواره دگرنهاده است که اغلب سنگ‌های آتشفسانی حدواتسط تا اسیدی هستند و در بیشتر کانسارهای فراگرمایی تا پورفیری تشکیل می‌شود [۲۳]. آلونیت به عنوان منبع جدید صنعتی برای برداشت آلومینا، سولفات‌پتاسیم برای کود پتاس، اسید سولفوریک و فراورده‌های متنوع دیگر شناخته می‌شود؛ از این‌رو پی‌جوبی این کانسارها اهمیت بسیاری دارد [۵، ۶]. آلونیت در محیط‌های زمین‌شناسی به صورت درونزاد و برونزاد تشکیل می‌شود. آلونیت درونزاد در اثر صعود محلول‌های گرمابی در راستای گسل‌ها و پهنه‌های برشی تشکیل شده، در حالی‌که آلونیت برونزاد در اثر نفوذ آب باران و زیرزمینی در محیط‌های نزدیک به سطح شکل می‌گیرد [۲۴]. آلونیت همچنانی می‌تواند در اثر دگرنهادی جانبی از مرکز به سمت پیرامون خود تشکیل شود [۲۵]. اکسایش نقش مهمی در تکامل محلول‌های دارای سولفات‌دارد، زیرا نرخ تشکیل آلونیت وابسته به گریزندگی اکسیژن جو زمین است [۲۳]. آلونیت اسید سولفات (آلونیت و کائولینیت) توسط محلول‌های اسیدی با فعالیت بالای سولفات در شرایط اکسایشی و

شرايط اسيدي تر ( $\text{PH} < 2$ ), در اثر جذب بخارهای داغ اسيدي توسيط آبهای زيرزميني و تبديل  $\text{SO}_2$  به اسييد سولفوريك پنهنه سيليسى تشکيل می‌شود [۲۹]. در اين شرايط، افزون بر عناصر قلوياني، آلومينيوم نيز از محيط خارج شده و پنهنه سيليسى به تنهاي شكل می‌گيرد [۳۰]. با کاهش حالت اسيدي در فواصل دورتر از توده نفوذی، کاولينيت و سپس بخش پروبيليت تشکيل می‌شود. کاولينيت‌شدن (دگرسانی آرژيلی) با واکنش زير رخ می‌دهد [۳۱].

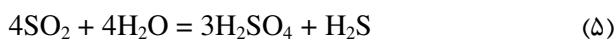


ايران در کمربيند الپ-هيماليا واقع بوده و شرايط تشکيل کانسارهای فراگرمایي-پورفیری را داراست و همچنین پي جوبي اين کانسارها بر اساس پنهنه‌های اكتشافي امری معقول است. از اين رو، يافتن پنهنه‌های اسييد سولفات و همچنین دگرسانی‌های آرژيلی (کاولينيت) می‌تواند در زمينه منابع صنعتی آلونیت و کاولینيت [۳۲] و نيز کانسارهای فلزی دارای اهمیت باشد [۳۳]. در بخش‌هایي از ايران بهويژه در منطقه مکران، همراه با فعالیت آتشفسان‌های بزمان و تفتان [۳۴]، آلونیت بروزداد نيز بخش‌های گسترهای را فرا گرفته که می‌تواند نگاه آكتشافي به آنها داشت.

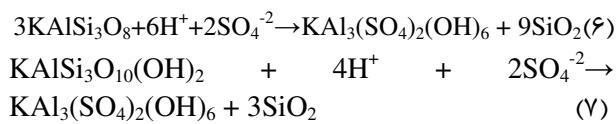
کانسارهای آلونیت از آنجا برای تولید آلومينا و کود پتاس به ويژه در کشورهای با ذخایر آلومینيوم بوکسیت ضعیفي پي جوبي آنها اهمیت چند برابر دارد کاربرد فراوانی داشته [۳۲]. بر اين اساس، تجزیه گرمایي آلونیت نيز می‌تواند از روش‌های کاربردی باشد [۳۷-۳۵] که در اين پژوهش بررسی شد براساس يافته‌های اين پژوهش، آلونیت در دمای ۵۰۰ تا ۶۴۰ درجه سانتيگراد واکنش گرمaza داشته، آب از دست داده و آبزدایي شده است. مقدار افت وزن نمونه در اين مرحله ۹ درصد است. طی آبزدایي آلونیت در فرآيند تکليس، با شکسته شدن پيوندهای  $\text{Al-OH}$  و  $(\text{Al})\text{O-H}$ ، ترکيب  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$  به ترکيب  $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$  است. آلونیت در دمای ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتيگراد گوگرد از دست داده و يا گوگرددزایي در آن رخ داده است. مقدار افت وزن در اين مرحله ۲۴ درصد است. در ادامه با گرمادهی نمونه تا ۱۲۰۰ درجه سانتيگراد، آلونیت تجزیه شده و آلومينا ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) و لوسيت ( $\text{KAlSi}_2\text{O}_6$ ) تشکيل شده است. تشکيل لوسيت به دليل وجود مقادير بالاي ناخالصی کوارتز همراه با کانسگ آلونیتي بوده است. اگر نمونه کوارتز نداشته باشد،  $\text{K}_2\text{O}$  شکل

سنگ ميزبان بيشتر اين ذخایر از نوع آندزیت و تراکی آندزیت است [۱۶-۱۸]. بررسی پنهنه‌های دگرسانی پیرامون کانسارهای فراگرمایي در ايران نيز نشان داده که دگرسانی آرژيلی (تشکيل کاولينيت) بيشتر با سنگ ميزبان آندزیتی همراه بوده و دگرسانی آرژيلی پیشرفت (آلونیت‌زایي) بيشتر در سنگ‌های داسیتی و ریولیتی رخ داده است [۲۶-۲۸].

ترکيبات ماجمایي  $\text{H}_2\text{S}$  و  $\text{SO}_2$  نقش مهمی را در سامانه‌های ماجمایي-گرمایي برای تشکيل محیط‌های سولفاتی، به‌ويژه پنهنه‌های اسييد-سولفات و همچنین کانی‌سازی سولفید فلزی دارند [۲۳]. در نتيجه، اسييد سولفوريك می‌تواند در اثر واکنش زير تشکيل شود [۲۵]:



در نزديکي سطح زمين، اين واکنش بهدليل گريزنده‌گي اکسيژن بالا سرعت گرفته و با کاهش دما در نزديکي سطح زمين نيز واکنش شيميايي برای توليد گوگرد سولفاتي و همچنین تشکيل آلونیت تسریع می‌شود [۲۵]. بنابراین گريزنده‌گي بالاي اکسيژن باعث اکسايش  $\text{H}_2\text{S}$  شده و در نتيجه تشکيل اسييد سولفوريك، محيط نيز به شدت اسيدي شده است. اين شرايط باعث می‌شود که فلدسيپات موجود در سنگ‌های ميزبان ریولیتی-داسیتی کانسار هفت‌صدوق ناپايدار شده و براساس واکنش‌های زير به آلونیت تبديل شود:



همچنین، شيشه آتشفسانی در ترکيب اين سنگ‌ها نخست به کاولينيت و سريسيت تبديل و سپس به آلونیت تبديل می‌شود [۲۵]. براساس واکنش‌های بالا، کوارتز می‌تواند در اثر تبديل فلدسيپات به آلونیت آزاد شود. نتایج کانی‌شناسی وجود کوارتز فراوان را با آلونیت نشان داده و از اين رو، نام آلونیت کوارتزيت به آن داده شده است. البته، دليل وجود سيليس باعث مشخص نیست که آيا اين سيليس آزاد شده از واکنش باعث تشکيل کوارتز شده و يا سيليس به طریقی توسط کمپلکس‌های مختلف از محلول‌های گرمایي به محیط افزوده شده است. تشکيل آلونیت از فلدسيپات‌ها و يا کاولينيت و سريسيت در يك محیط به شدن اسيدي ممکن بوده و در منطقه هفت‌صدوق نيز به دليل حجم بالاي فعالیت‌های ماجمایي گستره است. کانی‌سازی فراگرمایي در ارتباط با آنها در ایالت فلزایي طارم-هشتتجين امکان‌پذير شده است. با نزديک‌شدن به توده نفوذی و

ایران نیاز بسیار به ساخت یک کارخانه تولید آلومینا، کود پتاس و همچنین اسید سولفوریک و دیگر فراورده‌های مهم از آن دارد. با توجه به گسترش بسیار آلونیت در ایران، می‌توان آلومینا را از این منابع به روش تجزیه گرمایی و یا روش‌های مرسوم و کاربردی دیگر تولید کرد. در روش‌های آب فلز کاری، نخست آلونیت تکلیس شده و به نمک پتاسیم محلول ( $K_2SO_4$ ) و نمک‌های آلومینا تبدیل می‌گردد. سپس و با عملیات فروشوبی و پالایش، پتاسیم از نمک‌های آلومینا شده و طی گوگردهی در مرحله بعد آلومینا تشکیل می‌شود. از فرآیندهای تجزیه آلونیت می‌توان برای تفسیر مسائل زمین‌شناسی نیز استفاده کرد.

واپاشی کانی‌های آلونیت از نتایج دیگر مهمی این پژوهش نقش گرما در سرزمین‌های دگرگونی، و تشکیل آلومینا یا یاقوت است. از این رو، شناسایی سرزمین‌های دگرگونی در بردارنده ترکیب‌های اولیه آلونیت و آلومینوسیلیکات، می‌تواند برای پی‌جویی سنگ‌های قیمتی یاقوت مفید باشد.

#### مراجع

- [1] Molina A.Z., Soto J.A., Rosale M.M., Toledo R.R., "Ammonium Alunite and Basic Aluminum Sulfate: Effect of Precipitant Agent", *International Journal of Materials Science and Applications* 4 (2015) 96–100.
- [2] Becerril J.J., Sosa I.G., Rivero I.A., "Synthesis of basic aluminum sulfate assisted by microwave heating", *Ceramics International* 37 (2011) 3627–3630.
- [3] Frost R.L., Wills R.A., Weier M.L., Martens W., Kloprogge J.T., "A Raman spectroscopic study of alunites", *Journal of Molecular Structure* 785 (2006) 123–132.
- [4] Bayliss P., Kolitsch U., Nicke E.H., Pring A., "Alunite supergroup: recommended nomenclature", *Mineralogical Magazine* 74 (2010) 919–927.
- [5] Altaner S.P., Fitzpatrick J.J., Krohn M.D., Brethke P.M., Hayba D.O., Goss J.A., Brown Z.A., "Ammonium in alunites", *American Mineralogist* 73 (1988) 145–152.
- [6] Zhong Y., Gao J., Meng L Guo L., "Phase transformation and non-isothermal kinetics studies on thermal decomposition of alunite", *Journal of Alloys and Compounds* 710 (2017) 182–190.

می‌گیرد. در دماهای کمتر از ۹۰۰ درجه سانتیگراد، کوارتز واکنش نداشته و در دمای بالای ۹۰۰ درجه سانتیگراد، فاز کریستوبالیت و لوسیت تشکیل شده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که برای تولید کود پتاس باید کانسینگ آلونیتی خالص بی‌جویی شود. البته گفتتنی است که با وجود روش‌های بسیار پیشنهاد شده برای تولید آلومینا و کود پتاس از آلونیت، هنوز در ایران کارخانه‌ای برای منظور بهویژه در مناطقی با امکان بالای آلونیت‌زایی چون ایالت فلز‌زایی طارم-هشتجمین ساخته نشده است و تنها از ذخایر کائولینیتی بی‌جویی شده استفاده اقتصادی و صنعتی می‌شود.

#### برداشت

دگرسانی‌های اسید-سولفاتی در اثر بخارهای جدا شده از آبگون‌های در حال جوشش غنی از کلرید وابسته به مناطق عمیق تشکیل شده است.  $H_2S$  جدادشده از این آبگون‌ها در اثر فرایند جوشش با حرکت روبه بالا در سطح آبهای زیرزمینی اکسید شده، اسید سولفوریک تشکیل داده و منجر به این دگرسانی‌ها شده است. براساس پیروی دگرسانی‌ها از روند شکستگی‌ها و ساختارهای زمین‌ساختی، همراهی قاطع با سنگ‌های آتشفشاری و آذرآواری، نبود کانی‌های آدولاریا و کلسیت، همخوانی مقدار سیلیس و آلومین سنگ‌های دگرسان با نوع گرمایی، لکه‌های باقی مانده سنگ مادر، همسایگی با توده‌های نفوذی و بسیاری شواهد دیگر، دگرسانی‌های هفت-صدوق و پیرامون آنها از نوع گرمایی است. بررسی‌های کانی-شناسی و زمین‌شناسی صحرایی نشان داد که دگرسانی اسید-سولفات (آلونیت‌زایی) در منطقه هفت‌صدوق دارای منطقه-بندی مشخص دیده شده برای سامانه‌های گرمایی است و کوارتز و آلونیت مهمترین کانی‌های تشکیل دهنده پهنه کوارتز-آلونیت و یا به عبارتی آلونیت کوارتزیت هستند. ایالت فلز‌زایی طارم-هشتجمین در شمال غرب ایران به از مناطق مهم کانی‌سازی فراگرمایی است. از آنجا که در شمال غرب ایران (پهنه اهر-ارسباران) مانند کمربند ارومیه-دختر، پهنه مکران و البرز غربی، فعالیت ماغمایی سنوزوئیک گسترش بسیاری دارد، بی‌جویی دگرسانی اسید-سولفات (آلونیتی‌شدن و کائولینیتی-شدن) می‌تواند خود منجر به کشف کانسارهای فراگرمایی-پورفیری شود. با توجه به اینکه تنها کارخانه تولید آلومینا از آلونیت در دنیا در جمهوری آذربایجان و نزدیک شهر گنجه است و از انباسته‌های آلونیت معدن داشکسن استفاده می‌کند،

- [16] Alipour V., Abedini A., Alipour S., "Mineralogy and geochemistry of the Avin kaolin deposit, northeast of Mianeh, East-Azabaidjan Province, NW Iran", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 28 (2020) 633–644.
- [17] Abedini A., "Mineralogy and geochemistry of the Hizeh-Jan kaolin deposit, northwest of Varzegan, East-Azabaidjan Province, NW Iran (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 24 (2016) 647-660.
- [18] Abedini A., "The mineralogical and geochemical control on distribution and mobilization of trace and rare earth elements during development of argillic alteration zone: A case study from northeast of Kharvana, NW Iran", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 25 (2017) 353–366.
- [19] Mahabadi S.A., Fonoudi M., "Geological map of the Takestan at the scale 1:100000", Geological Survey of Iran, 1993.
- [21] Aghajani S., Emami M.H., Lotfi M., Gholizadeh K., Ghasemi Siani M., "Source of polymetal epithermal veins at Nikuyeh district (West of Qazvin) based on mineralogy, alteration and fluid inclusion studies", Scientific Quarterly Journal, Geosciences 25 (2016) 157–168.
- [21] Aghajani S., Ghasemi Siani, M., Emami, M.H., Lotfi, M., Gholizadeh, K., "Petrography, geochemistry, magmatic evolution and tectenomagmatic setting of igneous rocks associated with Nikuyeh epithermal mineralization (west of Qazvin)", Kharazmi Journal of Earth Science 6 (1) (2020) 1–20.
- [22] Todor D.N., "Thermal analysis of minerals", Abacus Press Tunbridge Wells, Kent, England, 1976, Chp. 5, 99–110.
- [23] Hedenquist J.W, Arribas A., Gonzalez-Urien E., "Exploration for epithermal gold deposits", Society of Economic Geology 13 (2000) 245–277.
- [24] Vdovets A.Z., "Epochs of alunite formation in the Earths history, Dokl", Earth Science 358 (1998) 26–29.
- [25] Heald P., Foley N.K., Hayba D.O., "Comparative anatomy of volcanic-hosted
- [7] Dill H.G., "The geology of aluminum phosphate and sulphates of the alunite group minerals: A review", Earth Science Review 53 (2001) 35–93.
- [8] Long D., Fegan N.E., McKee G.D., Lyons W.B., Hines M.E., "Formation of alunite, jarosite and hydrous iron oxides in a hypersaline system: Lake Tyrrell, Victoria, Australia", Chemical Geology 96 (1992) 183–202.
- [9] Taghiyev I., Tagijev E., Agajeva L., "Cost Effective Technology of Alunite Ore Processing", International Journal of Chemistry 11 (2019) 36, DOI: 10.5539/ijc.v11n1p36.
- [10] Hosseini M., "Petrology of alunite-bearing argillasied rocks in volcanic suits and economic significance of alunites(an example Tarom NW. of Iran)", Ph.D thesis, Moscow State, University, 202 p (1997).
- [11] Ooroji H., Calagari A.A., Ferdowsi R., Siahcheshm K., "Mineralogy and geochemistry characterizations of Kojnagh Kaolinite and alunite, NW Meshkinshahr, Ardabil Province", Journal of Advanced Applied Geology 10 (2014) 19–32.
- [12] Ghasemi Siani M., Lentz D.R., Nazarian M., "Geochemistry of igneous rocks associated with mineral deposits in the Tarom-Hashtjin metallogenetic province, NW Iran: an analysis of the controls on epithermal and related porphyry-style mineralization", Ore Geology Reviews 126, 103753, 2020. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103753.
- [13] Kowsari A., "Evaluation of Geochemical Anomalies north of Astamal (northwest of East Azerbaijan)", Geological and Mineral Exploration Survey of Iran, Tehran, 1996, 98p.
- [14] Hadizadeh H., Calagari A., Abedini A., "Mineralogy, type, and metallogenetic potential of alteration zones in Barandagh quadrangle, NE Zandjan, Iran", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 14 (1) (2006) 27–42.
- [15] Hajalilo B., "Tertiary metallogeny of western Alborz-Azerbaijan (Mianeh), in particular Hashtjin district", Ph.D. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 2000, 298p.

- [32] Dill H.G., Bosse H.R., Kassbohm J., "Mineralogical and chemical studies of volcanic relate argillaceous industrial minerals of the Central America Cordillera (Western Salvador)", Economic Geology 95 (2000) 517–538.
- [33] Cunningham C.G., Rye R.O., Steven T.A., Mehnert H.H., "Origins and exploration significance of replacement and vein-type alunite deposits in the Marysvale volcanic field, West Central Utah", Economic Geology 79 (1984) 50–71.
- [34] Najaran M., Mehrabi, B., Ghasemi Siani M., "Mineralogy, hydrothermal alteration, fluid inclusion, and O–H stable isotopes of the Siah Jangal-Sar Kahno epithermal gold deposit, SE Iran", Ore Geology Review 125, 103689, DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103689.
- [35] Apte N.G., Kiran E., Chernosky J.V., "Thermal decomposition of aluminium-bearing compounds", Journal of Thermal Analysis 34 (1988) 975–981.
- [36] Kato E., Daimon K., Nanbu M., "Decomposition of two aluminiumsulphates and characterization of the resultant aluminas", Journal of American Ceramic Society 64 (1981) 436–443.
- [37] Sugita S., Contreras C., Juárez H., Aguilera A., Serrato J., "Homogeneous Precipitation and Phase Transformation of Mullite Ceramic Precursor", International Journal of Inorganic Materials 3 (2001) 625–632.
- [32] Dill H.G., Bosse H.R., Kassbohm J., "epithermal deposite: acid-sulfate and adularia-sericite type", Economic Geology 82 (1987) 1–26.
- [26] Mehrabi, B., Tale Fazel E., Ghasemi Siani M., Eghbali M.A., "Investigation on mineralization and genetic model of Gulojeh Cu-Au vein deposit (north of Zanjan), using mineralogical, geochemical and fluid inclusion data", Journal of Science 35 (4), 185–199.
- [27] Mehrabi B., Ghasemi Siani M., "Mineralogy and economic geology of Cheshmeh Hafez polymetal deposit, Semnan Province, Iran", Journal of Economic Geology 2 (1), (2010) 1–20.
- [28] Tale Fazel E., Mehrabi, B., Ghasemi Siani M., "Epithermal systems of the Torud–Chah Shirin district, northern Iran: Ore-fluid evolution and geodynamic setting", Ore Geology Reviews 109 (2019) 253–275.
- [29] Hedenquisit J.W., Arribas A., Reynolds J.R., "Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far southeast lepanto porphyry and Epithermal Cu-Au Deposite, Philipines", Economic Geology 91 (1998) 373–404.
- [30] Storr M., Koster H.M., Kromer H., Hilz M., "Minerale der Crandallit-Reihe im Kaolin von Hirschau-Schnaittenbach, Oberpfalz", Zeitschrift für Geologische Wissenschaften 19 (1991) 677–683.
- [31] Montoya J.W., Homely J.J., "Activity relations and stabiles in alkali feldespar and mica alteration re actions", Economic Geology 70 (1975) 577–594.