



مطالعات خواص سنجی و تعیین درجه آزادی کانسنگ اورانیوم معدن خشومی (بلوک یک)

مهدی پاکدل*^۱، بهرام رضائی^۱، رضا عسگری^۲، کامران نظری^۲

۱- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۱۵۹۱۴، تهران-ایران

۲- دفتر اکتشاف و استخراج، شرکت تولید مواد اولیه و سوخت هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران-ایران

چکیده: مطالعات خواص سنجی و تعیین درجه آزادی کانسنگ‌ها اولین مراحل کانه‌آرایی می‌باشند. این مطالعات جهت تعیین شرایط بهینه خردایش، انتخاب فرایندهای جدایش اولیه و تعیین روش‌های پرعیارسازی از اهمیت زیادی برخوردارند. کانسنگ اورانیوم معدن خشومی با عیار متوسط ۱۵۴۰ ppm در حدود ۱۵۰ کیلومتری شمال شرقی یزد واقع شده است. مطالعات خواص سنجی و کانی‌شناسی بلوک یک این کانسنگ با روش XRD و مطالعات میکروسکوپی انجام گرفت. درجه آزادی کانی‌ها نیز با استفاده از مطالعات میکروسکوپی و محلول‌های سنگین تعیین شد. برای انجام مطالعات میکروسکوپی سه نمونه پودری، دوازده مقطع نازک و دوازده مقطع صیقلی از نمونه‌های سنگی و فراکسیون‌های تجزیه سرندی تهیه شد. بر اساس مطالعات انجام شده کانی‌های اصلی فلدسپات-آلکالن (اورتوز)، پلاژیوکلاز (آلبیت)، بیوتیت، کلریت، کربنات و کانی‌هایی فرعی اسفن، زیرکن، آپاتیت، اکتینولیت، تریمولیت، پیچ بلند و بتافیت که در حاشیه و یا به صورت ادخال در برخی از کانی‌های اصلی همچون بیوتیت قرار داشتند، شناسایی شدند. همچنین بر اساس مطالعات میکروسکوپی و محلول‌های سنگین درجه آزادی کانی‌های اورتوز، آلبیت و بیوتیت به ترتیب ۳۲، ۲۹۰ و ۱۹۰ میکرون و درجه آزادی کانی‌های اورانیوم حدود ۱۱۰ میکرون بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: خواص سنجی، درجه آزادی، مقاطع میکروسکوپی، مابعات سنگین، اورانیوم و خشومی

Characterization and Determination of Liberation Degree of Khoshoomi Uranium Ore (Block 1)

M. Pakdel*¹, B. Rezaei¹, R. Asgari², K. Nazari²

1- Mining and Metallurgy Engineering Department, Amir Kabir University, P.O. Box: 15914, Tehran - Iran

2- Deputy of Exploration, Exploration and Preparation of Raw Material of the Nuclear Industry Company, AEOI, P.O. Box: 14155-1339, Tehran - Iran

Abstract: Characterization studies and determination of liberation degree are first stages of mineral processing. These studies are very important for determination of optimum comminution conditions, selection of pre-separation process and determination of suitable processing methods. Khoshoomi mine with the average uranium grade of 1540ppm, is located at 150km northeast of Yazd. The characterization studies of this ore are made by XRD method and microscopic study, also degree of liberation studies are made by microscopic section. These studies are done by three powder samples, twelve thin sections and twelve polished sections. The major minerals such as Feldspar (Albite), Plagioclase (Orthoclase), Biotite, Chlorite, Carbonate and minor minerals such as Sphe, Zirconium, Actinolite, Tremolite, Pitchblende and Betafite were identified based on the results of these studies. Accordingly, by microscopic studies and heavy media method, the liberation degree of Orthoclase, Albite, Biotite and Uranium minerals were determined as 320, 290, 190 and 110 micron, respectively.

Keywords: Mineralogy, Degree of Liberation, Microscopic Sections, Heavy Media, Uranium and Khoshoomi

*email: minpakdel@gmail.com



۱- مقدمه

انرژی هسته‌ای حداقل برای ۵۰ سال آینده یکی از مهمترین بخش‌های انرژی ترکیبی در سرتاسر جهان خواهد بود. در سال ۱۹۹۹ حدود ۶۱۵۰۰ تن اورانیوم در صنعت هسته‌ای جهان مورد استفاده قرار گرفت. پیش بینی می‌شود که در سال ۲۰۵۰ به طور متوسط ۱۷۷۰۰۰ تن اورانیوم برای تولید انرژی هسته‌ای مورد نیاز باشد. در این راستا مطالعه و بررسی روش‌های فراوری و تغلیظ اورانیوم بسیار ضروری است. روش‌های فراوری و تغلیظ اورانیوم شامل روش‌های ثقلی، مغناطیسی، الکترواستاتیکی، فلو تاسیون، لیچینگ، استخراج حلالی و غیره می‌باشند. استفاده از این روش‌ها به نوع کانی اورانیوم، کانی‌های همراه، نحوه درگیری کانی‌ها، درجه آزادی کانی‌ها و سایر پارامترهای کانسنک بستگی دارد. در این موارد انجام مطالعات کانی‌شناسی و خواص سنجی از نخستین و مهمترین مراحل مطالعات تحقیقاتی است [۲۰]. ارتفاع متوسط این منطقه از سطح دریا حدود ۱۲۵۰ متر بوده و از نظر آب و هوایی در منطقه بیابانی گرم و خشک واقع شده است.

۲- مطالعات خواص سنجی

۲-۱ آماده سازی نمونه

جهت تهیه نمونه معرف برای انجام دادن آزمایش‌ها، یک نمونه معرف ۶۰ کیلوگرمی کانسنک که در سازمان انرژی اتمی موجود بود، به روش چهار قسمتی ابتدا به دو نمونه ۳۰، سپس به دو نمونه ۱۵ کیلوگرمی تقسیم شد. در ادامه آزمایش، یکی از نمونه‌های ۱۵ کیلوگرمی به وسیله سنگ‌شکن استوانه‌ای تا ابعاد زیر ۵ میلی‌متر خرد شده و به وسیله جعبه تقسیم به سه نمونه ۵ کیلوگرمی تقسیم شد [۳]. نمونه‌های ۵ کیلوگرمی برای انجام دادن آزمایش‌ها ذخیره شدند.

۲-۲ خردایش و آنالیز سرندهی

برای تعیین زمان خردایش مطلوب، بعد از خردایش نمونه به وسیله سنگ‌شکن استوانه‌ای تا زیر ۵ میلی‌متر، پنج نمونه به وسیله آسیای میله‌ای تر با سرعت ۳۰ دور در دقیقه به مدت ۲، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه خرد شدند. سپس با سرندهای سری استاندارد ASTM و به روش تر تجزیه سرندهی شدند. در شکل ۱، درصد تجمع ذرات عبور کرده نشان داده شده است [۴].

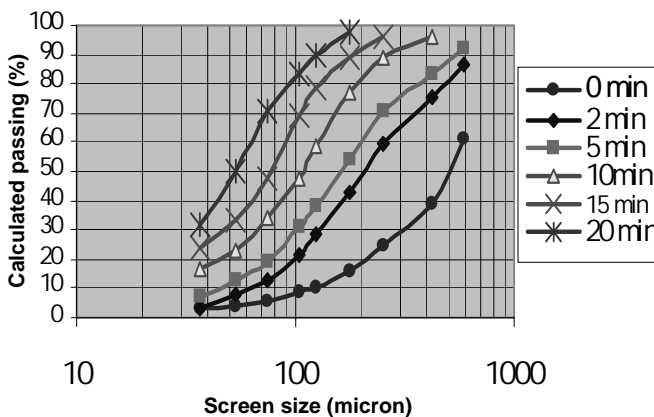
۲-۳ مطالعات آنالیز شیمیایی و عیارسنجی کانسنک

برای مطالعات عیارسنجی و تعیین میزان عناصر موجود در کانسنک از آنالیز XRF استفاده شد [۵]. نتایج آنالیز در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود عیار اورانیوم با کاهش ابعاد ذرات افزایش پیدا کرده و در ریزترین فراکسیون به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

۲-۴ مطالعات کانی‌شناسی کانسنک

۲-۴-۱ آنالیز XRD

جهت شناسایی فازها و کانی‌های موجود در نمونه ابتدا از آنالیز XRD استفاده شد [۵]. بر اساس نتایج آنالیز XRD کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز (آلبیت)، فلدسپات - آلکان (اورتوز)، میکا (بیوتیت) و کلسیت شناسایی شدند. در آنالیز XRD با توجه به نوع کریستالیزاسیون کانی‌ها، چنانچه درصد آنها از یک حدی کمتر باشد، (۱ درصد برای کانی‌هایی با شبکه کریستالی خوب و ۳ تا ۵ درصد با شبکه کریستالی ضعیف) شناسایی نمی‌شوند [۴]. بنابراین کانی‌های اورانیوم‌دار و برخی دیگر از کانی‌های احتمالی موجود، به دلیل مقدار کم آنها با آنالیز XRD اولیه شناسایی نشدند. برای شناسایی این کانی‌ها نمونه مورد نظر با استفاده از مایعات سنگین تغلیظ شده و بخش کنسانتره مجدداً به روش XRD آنالیز شد. بر اساس نتایج این آنالیزها کانی‌های بتافیت، کافینیت، زیرکن، آپاتیت، اسفن و تریمولیت نیز شناسایی شدند (شکل ۲).

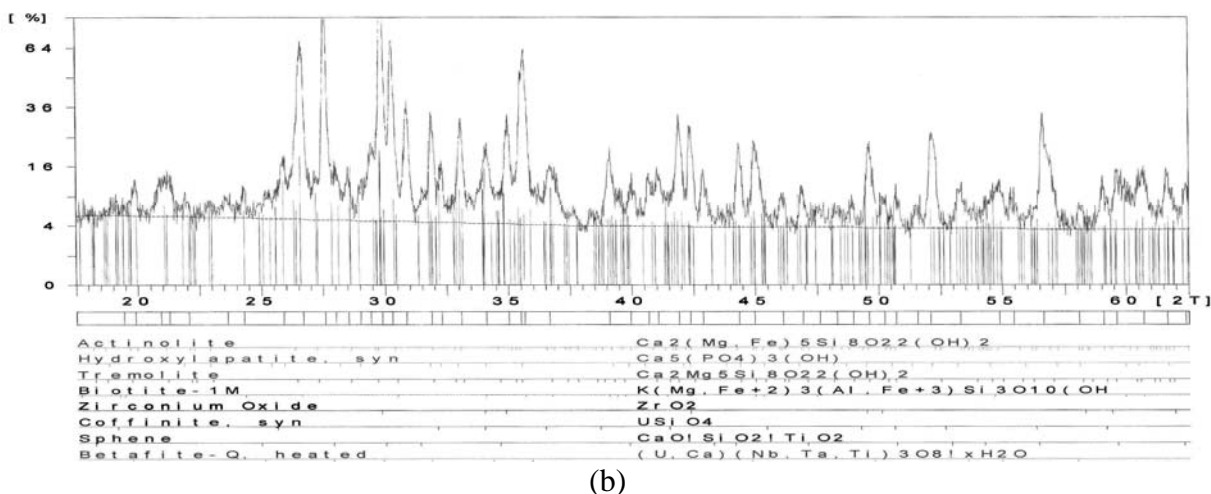
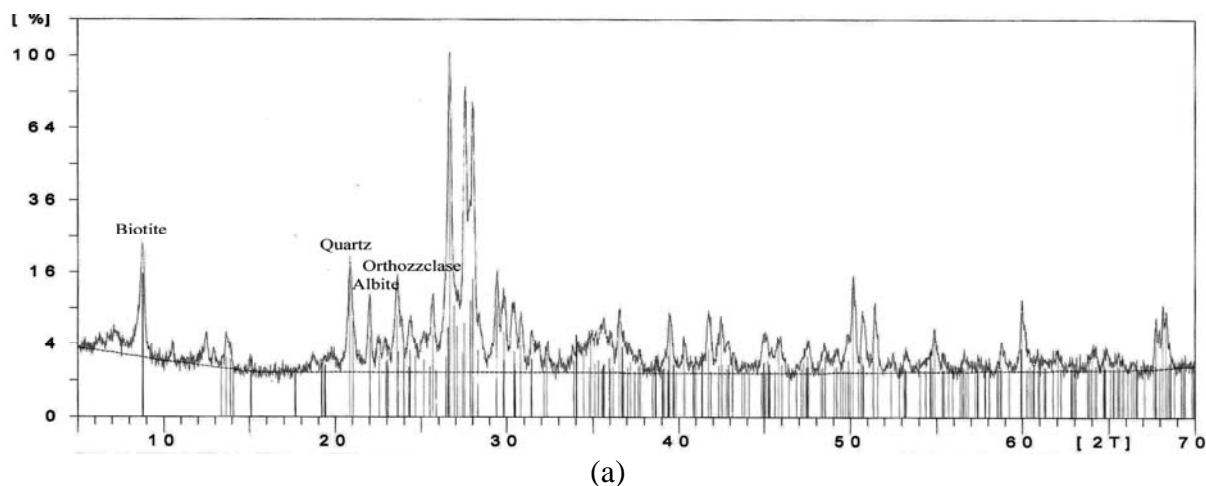


شکل ۱- نمودار درصد تجمع ذرات عبور کرده از سرندها در زمان‌های مختلف.



جدول ۱- نتایج آنالیز XRF فراکسیون‌های تجزیه سردی.

ردیف	فراکسیون (میکرون)	جرم %	U	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	غیره
۱	+۵۹۰	۷/۶۸	۰/۰۴۰۵	۱۵/۱۷	۳/۱۰	۰/۲۹	۰/۰۶	۳/۲۱	۲/۷۷	۱/۰۱	۵/۲۲	۰/۰۷	۶۸/۹۰	۰/۱۶
۲	-۵۹۰+۴۲۰	۸/۹۵	۰/۰۶۵۳	۱۴/۳۷	۳/۴۱	۰/۳۰	۰/۰۷	۳/۵۰	۲/۵۸	۱/۱۴	۴/۷۱	۰/۰۷	۶۹/۶۵	۰/۱۳
۳	-۴۲۰+۲۵۰	۱۲/۳۶	۰/۱۰۱۴	۱۴/۱۸	۴/۴۴	۰/۴۰	۰/۰۷	۴/۰۴	۲/۳۷	۱/۷۴	۴/۵۲	۰/۱۰	۶۷/۹۶	۰/۰۸
۴	-۲۵۰+۱۷۷	۱۷/۱۳	۰/۱۳۲۳	۱۳/۷۹	۵/۲۹	۰/۴۶	۰/۰۸	۴/۸۴	۲/۱۷	۲/۳۱	۴/۲۸	۰/۲۰	۶۶/۴۲	۰/۰۳
۵	-۱۷۷+۱۲۵	۱۵/۶۷	۰/۱۴۷۴	۱۳/۲۲	۵/۵۹	۰/۴۸	۰/۰۸	۵/۹۷	۱/۹۹	۲/۷۷	۴/۰۱	۰/۳۴	۶۵/۳۸	۰/۰۲
۶	-۱۲۵+۱۰۵	۷/۲۲	۰/۱۶۶۶	۱۲/۷۹	۵/۶۲	۰/۴۵	۰/۰۹	۶/۸۶	۱/۸۴	۳/۱۱	۳/۷۷	۰/۴۵	۶۴/۸۴	۰/۰۱
۷	-۱۰۵+۷۴	۱۲/۰۲	۰/۱۷۷۴	۱۲/۴۳	۶/۱۴	۰/۴۹	۰/۰۹	۷/۲۵	۱/۶۳	۳/۴۸	۳/۷۱	۰/۴۸	۶۴/۱۱	۰/۰۱
۸	-۷۴+۵۳	۶/۲۱	۰/۲۱۷۱	۱۲/۳۷	۶/۵۱	۰/۴۸	۰/۱۰	۷/۷۳	۱/۵۹	۳/۷۸	۳/۵۰	۰/۵۵	۶۳/۱۳	۰/۰۴
۹	-۵۳+۳۷	۵/۹۳	۰/۲۵۱۱	۱۲/۱۴	۶/۷۴	۰/۴۷	۰/۱۰	۸/۵۸	۱/۴۶	۳/۹۰	۳/۳۴	۰/۶۱	۶۲/۳۹	۰/۰۲
۱۰	-۳۷	۶/۸۳	۰/۴۶۶۸	۱۲/۱۴	۸/۵۰	۰/۵۳	۰/۱۱	۸/۷۹	۱/۴۲	۴/۳۳	۳/۰۷	۰/۴۶	۶۰/۱۵	۰/۰۳
کل	-	۱۰۰	۰/۱۵۴۰	۱۲/۳۰	۵/۵۲	۰/۴۸	۰/۰۸	۶/۱۸	۱/۶۵	۲/۷۰	۴/۰۱	۰/۲۵	۶۶/۶۷	۰/۰۱



شکل ۲ - آنالیز XRD کانسنگ بلوک یک خشومی. a: خاک اولیه؛ b: بخش تغلیظ شده.

مقاطع صیقلی و نازک جهت مطالعه کانی‌های فلزی و غیرفلزی مورد استفاده گرفتند. برای این منظور و با توجه به محدودیت در تهیه مقاطع، ۷ مقطع صیقلی و ۷ مقطع نازک از

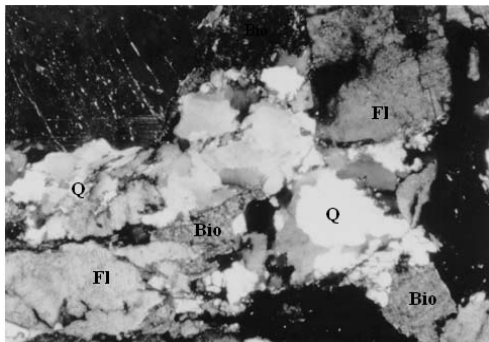
۲-۴-۲ مطالعات میکروسکوپی برای تکمیل مطالعات کانی‌شناسی، تعیین درصد و نحوه درگیری کانی‌ها، مقاطع صیقلی و نازک تهیه شد که به ترتیب



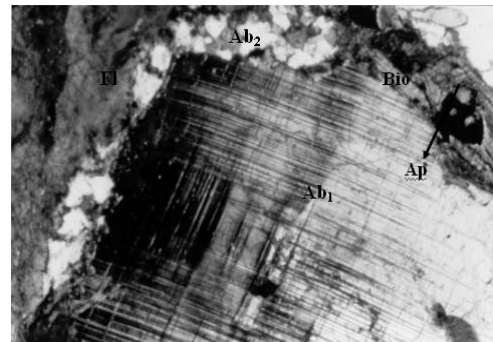
پلاژیوکلاز به صورت بلورهای آلپیت ریز و درشت در مرز بلورهای فلدسپات-آلکان، کوارتز به صورت اولیه و به صورت ثانویه در فضای بین بلوری، بیوتیت بصورت ادخال درون آلپیت و یا بصورت حاشیه‌ای در مرز بین فلدسپاتها و کوارتزها مشاهده می‌شوند. بیوتیت در برخی موارد در حال تبدیل شدن به کلریت است. در برخی از موارد اورانیوم به صورت جانیشینی در درون شبکه بلوری بیوتیت‌ها قرار گرفته است.

فراکسیون‌های $590+840$ ، $420+590$ ، $250+420$ ، $125+250$ ، $74+125$ ، $53+74$ و $37+53$ میکرون و ۵ مقطع صیقلی و ۵ مقطع نازک از نمونه‌های سنگی تهیه شد. نتایج حاصل از مطالعات میکروسکوپی به شرح ذیل است. (شکل‌های ۳ تا ۸).

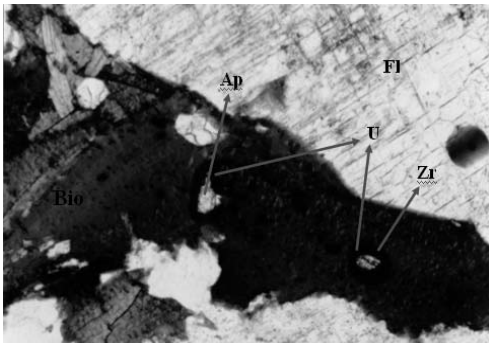
- کانی‌های اصلی تشکیل دهنده کانسنگ شامل فلدسپات-آلکان (اورتوز)، پلاژیوکلاز (آلپیت)، بیوتیت، کوارتز و کربنات (کلریت یا کربناتیت) می‌باشند. در این مقاطع فلدسپات-آلکان به صورت بلورهای درشت،



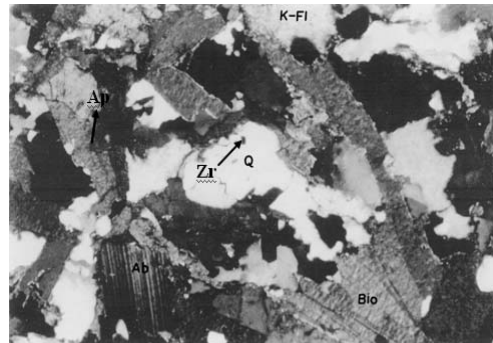
شکل ۴- کوارتز در حاشیه و مرز بیوتیت‌ها و بیوتیت‌ها در مرز و حاشیه فلدسپات‌ها (*۵۰).



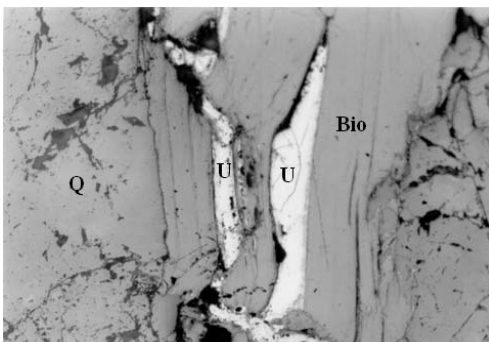
شکل ۳- آلپیت‌های اولیه (Ab_1) و ثانویه (Ab_2) در حاشیه و مرز فلدسپات-آلکان درشت بلور و بیوتیت (*۵۰).



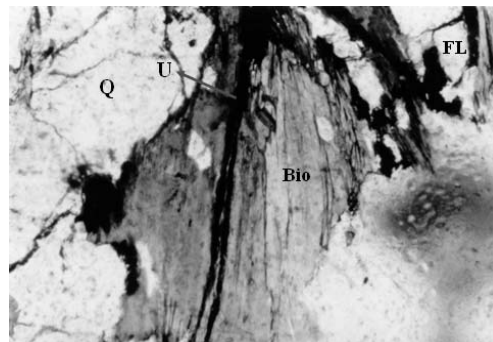
شکل ۶- ادخال کانی‌های فرعی زیرکن و آپاتیت با هاله‌های آکتیو به درون بیوتیت‌های هیدروترمال (*۵۰).



شکل ۵- بیوتیت با ادخال هائی از آپاتیت و زیرکن در مرز فلدسپات و آلپیت؛ کوارتز با ادخال هائی از زیرکن (*۵۰).



شکل ۸- کانه تیره (اوپیک) آکتیو (کانه سفید) در امتداد رخ‌های بیوتیت (*۱۰۰).



شکل ۷- کانی‌سازی آکتیو در امتداد رخ‌های بیوتیت در مرز بین فلدسپات-آلکان و کوارتز (*۵۰).

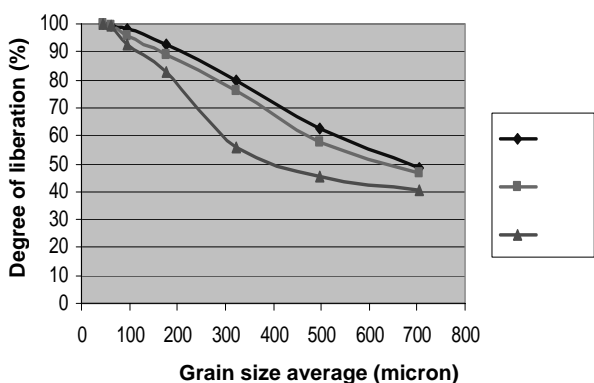
برای مطالعه و تعیین درجه آزادی کانی‌های غیرفلزی بیوتیت، اورتوز و آلپیت مقاطع نازک و برای مطالعه و تعیین درجه آزادی کانی‌های فلزی اورانیوم مقاطع صیقلی از فراکسیون‌های ۵۹۰+۸۴۰-، ۴۲۰+۵۹۰-، ۲۵۰+۴۲۰-، ۱۲۵+۲۵۰-، ۷۴+۱۲۵-، ۵۳+۷۴- و ۳۷+۵۳- میکرون تهیه و مورد مطالعه و شمارش قرار گرفت.

۳-۱-۱ مقاطع میکروسکوپی نازک

برای تعیین درجه آزادی کانی‌های اصلی بیوتیت، آلپیت و اورتوز که کانی‌های اورانیوم در حاشیه یا درون آنها، به ویژه بیوتیت قرار گرفته است، از فراکسیون‌های فوق مقاطع نازک تهیه و ذرات کانی‌های مختلف شمارش شد. با توجه به اینکه تعداد این کانی‌ها در مقاطع بسیار زیاد بود، لذا حدود ۲۰۰ ذره از هر کانی در هر مقطع بصورت آماری شمارش شد [۶]. در جدول ۲، تعداد ذرات کانی‌های اورتوز، آلپیت و بیوتیت ارائه شده است. بر اساس این جداول نمودار درجه آزادی هر سه کانی رسم شده است (شکل ۹). با توجه به این نمودارها درجه آزادی کانی‌های اورتوز، آلپیت و بیوتیت به ترتیب ۳۲۰، ۲۹۰ و ۱۹۰ بدست آمد. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ تصاویر مقاطع نازک نشان داده شده است.

۳-۱-۲ مقاطع میکروسکوپی صیقلی

برای تعیین درجه آزادی کانی‌های فلزی اورانیوم از مقاطع صیقلی استفاده شد. برای این منظور از فراکسیون‌های قبلی مقاطع صیقلی تهیه و ذرات کانی‌های آن شمارش شد. در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ تصاویری از مقاطع فلزی فراکسیون‌های



شکل ۹- تعیین درجه آزادی کانی‌های اورتوز، آلپیت و بیوتیت.

کانی‌های فرعی این کانسنگ شامل زیرکن، اسفن، آپاتیت و کانی‌های آکتیو (بتافیت، کافینیت و پیچ بلند) می‌باشند. این کانی‌ها به صورت پراکنده یا رگچه‌ای در امتداد مرز بین کانی‌های اصلی به ویژه در حاشیه رخ‌های بیوتیت قرار گرفته‌اند.

کانی‌های حاصل از آلتراسیون‌های مختلف شامل اپیدوت، کلریت، تریمولیت و اکتینولیت می‌باشند. این کانی‌ها به صورت رگچه‌ای، شعاعی و یا به صورت نقطه‌ای درون کانی‌های دیگر مشاهده می‌شوند. براساس مطالعات کانی‌شناسی، کانی‌های بیوتیت، اورتوز، آلپیت، کوارتز، کلسیت و کانی‌های فرعی دیگر به ترتیب حدود ۲۵، ۳۵، ۲۵، ۳ و ۷ درصد کانسنگ را تشکیل می‌دهند.

۳- تعیین درجه آزادی

یکی از اهداف تعیین درجه آزادی انتخاب نوع روش فراوری کانسنگ است. در این تحقیق هدف از تعیین درجه آزادی انجام مطالعات پیش فراوری (ثقلی، مغناطیسی، الکترواستاتیکی و غیره) و لیچینگ کانسنگ در مراحل بعدی بود. برای این منظور از دو روش برای تعیین درجه آزادی کانی‌ها استفاده شد. روش اول تعیین درجه آزادی به کمک تحلیل تصویری (شمارش ذره‌ای) بود که بر اساس آن درجه آزادی کانی‌های اورانیوم، همچنین کانی‌های باطله شامل اورتوز، آلپیت و بیوتیت تعیین شد. روش دوم استفاده از مایعات سنگین بود و در این روش درجه آزادی کانی‌ها به طور دقیق‌تر مورد مطالعه قرار گرفت.

۳-۱- تعیین درجه آزادی به روش شمارش ذره‌ای

برای تجزیه و تحلیل میکروسکوپی کانی‌ها و شمارش ذرات آزاد یا درگیر، با توجه به نوع کانی‌ها از نظر فلزی یا غیرفلزی (مات یا شفاف) بودن، از مقاطع صیقلی و نازک استفاده می‌شود. معمولاً در مطالعات سیستماتیک برای شمارش ذرات به منظور تعیین درجه آزادی، از رابطه (۱) استفاده می‌گردد [۶]:

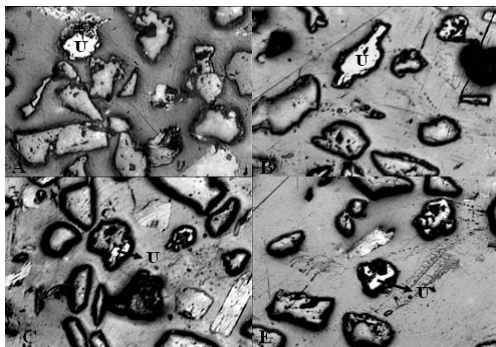
$$D = (100x) / [x + 0.5y] \quad (1)$$

D: درجه آزادی، x: تعداد ذرات با ارزش آزاد و y: تعداد ذرات با ارزش درگیر.

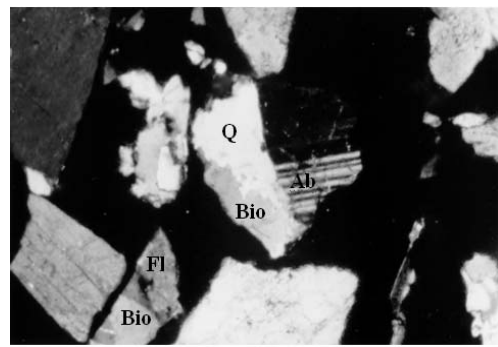


جدول ۲- تعداد ذرات کانی‌های اورتوز، آلپیت و بیوتیت جهت تعیین درجه آزادی آنها.

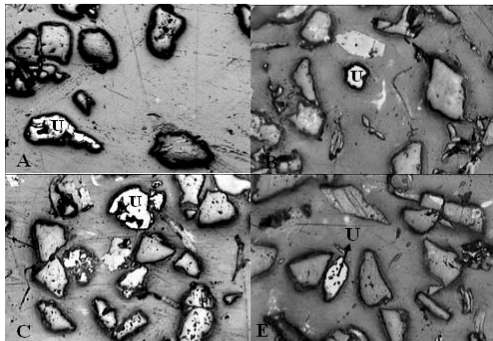
درجه آزادی (با احتساب ۸۰٪)			تعداد ذرات						میانگین ابعاد (میکرون) $\sqrt{x_1 \times x_2}$	ابعاد	
			بیوتیت		آلپیت		اورتوز			مش	میکرون
بیوتیت	آلپیت	اورتوز	آزاد	درگیر	آزاد	درگیر	آزاد	درگیر			
۴۰/۳۱	۴۶/۶۱	۴۸/۶۳	۴۷	۸۷	۸۶	۱۱۲	۷۱	۱۰۲	۷۰۴	-۲۰+۳۰	-۸۴۰+۵۹۰
۴۵/۵۹	۵۷/۵۲	۶۲/۳۶	۶۳	۹۴	۱۰۴	۹۶	۱۰۵	۹۸	۴۹۸	-۳۰+۴۰	-۵۹۰+۴۲۰
۵۵/۸۷	۷۶/۰۰	۷۹/۷۴	۷۹	۷۸	۱۵۲	۶۰	۱۴۸	۴۷	۳۲۴	-۴۰+۶۰	-۴۲۰+۲۵۰
۸۳/۰۱	۸۸/۹۰	۹۲/۵۲	۱۲۹	۳۳	۱۷۳	۱۲	۱۸۶	۲۵	۱۷۷	-۶۰+۱۲۰	-۲۵۰+۱۲۵
۹۲/۷۷	۹۵/۶۸	۹۷/۹۹	۱۹۵	۶	۱۷۶	۴	۱۹۵	۵	۹۶	-۱۲۰+۲۰۰	-۱۲۵+۷۴
۹۹/۱۵	۹۹/۲۵	۹۹/۵۸	۱۸۶	۲	۲۱۱	۲	۱۹۱	۱	۶۳	-۲۰۰+۲۷۰	-۷۴+۵۳
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۹۸	۰	۱۹۳	۰	۲۰۳	۰	۴۴	-۲۷۰+۴۰۰	-۵۳+۳۷



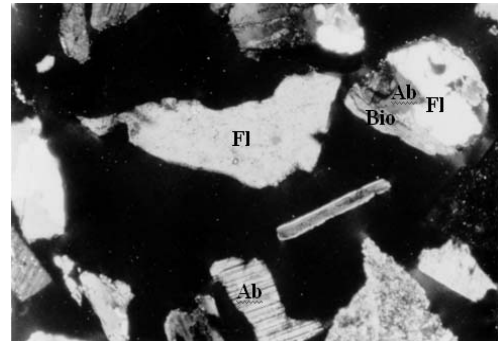
شکل ۱۳ - فراکسیون ۶۰+۱۲۰- مش فلزی: تمامی کانی فلزی (U) با کانی‌های غیرفلزی آزاد، درگیر می‌باشد (۵۰٪).



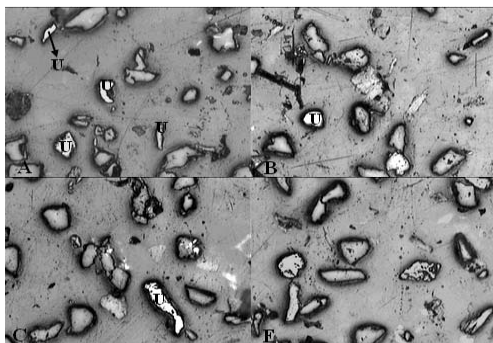
شکل ۱۰ - فراکسیون ۳۰+۴۰- مش نازک: کانی‌های بیوتیت، آلپیت و کوارتز و همچنین بیوتیت و اورتوز با هم درگیر می‌باشد (۵۰٪).



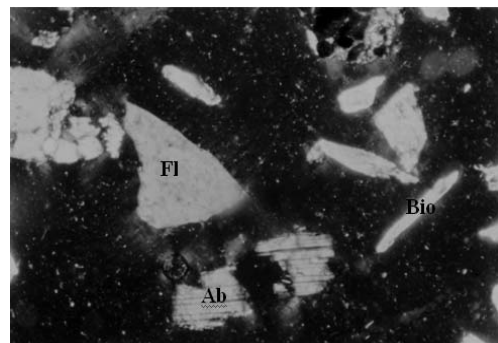
شکل ۱۴ - فراکسیون ۱۲۰+۲۰۰- مش فلزی: تقریباً تمامی کانی فلزی اورانیوم (U) آزاد می‌باشد (۱۰۰٪).



شکل ۱۱ - فراکسیون ۴۰+۶۰- مش نازک: اکثر بیوتیت‌ها درگیر با فلدسپات و پلاژیوکلاز بوده ولی اکثر فلدسپات‌ها و پلاژیوکلازها آزاد شده‌اند (۵۰٪).



شکل ۱۵ - فراکسیون ۶۰+۱۲۰- مش فلزی: در تمامی تصاویر کانی فلزی و غیرفلزی (غیربراق) موجود آزاد می‌باشد (۱۰۰٪).



شکل ۱۲ - فراکسیون ۶۰+۱۲۰- مش نازک: تمامی کانی‌های اورتوز، پلاژیوکلاز (آلپیت) و بیوتیت آزاد می‌باشند (۱۰۰٪).



مختلف نشان داده شده است. با توجه به اینکه تعداد ذرات اورانیوم در مقاطع محدود بود، لذا تمامی ذرات اورانیوم موجود در مقاطع شمارش شد. در جدول ۳ تعداد ذرات شمارش شده و درجه آزادی کانی‌های اورانیوم ارائه شده است. شمارش و محاسبه درجه آزادی کانی‌های اورانیوم نیز طبق رابطه (۱) انجام شد. بر اساس جدول ۳ نمودار درجه آزادی اورانیوم رسم شد (شکل ۱۶). با توجه به این نمودار درجه آزادی با احتساب ۵۰ و ۸۰ درصد به ترتیب ۱۳۰ (حدود ۱۲۰ مش) و ۱۰۰ میکرون (حدود ۱۴۰ مش) بدست آمد.

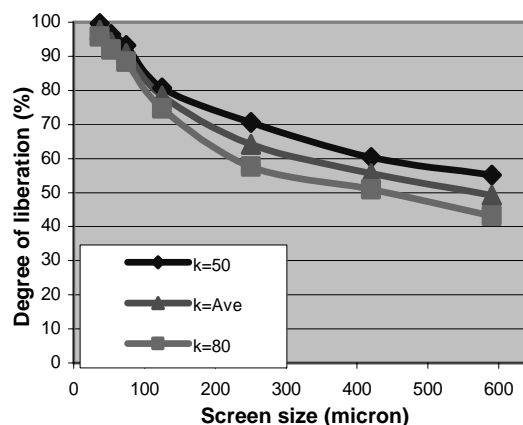
۳-۲ تعیین درجه آزادی به روش محلول‌های سنگین

جهت انجام مطالعات مایعات سنگین بر روی نمونه‌های این کانسنگ، با استفاده از محلول‌های سنگین دی‌یدومتان ($3/3 \text{ gr/cm}^3$)، تری برمومتان ($2/89 \text{ gr/cm}^3$)، تتراکلرومتان ($1/59 \text{ gr/cm}^3$) و استون ($0/79 \text{ gr/cm}^3$) محلول‌هایی با جرم مشاهده می‌گردد، با افزایش جرم مخصوص جدایش، عیار اورانیوم افزایش می‌یابد و این بیانگر این است که ذرات اورانیوم با کانی‌های سنگین همراه است. جهت تعیین درجه آزادی کانی‌های سبک (اورتوز و آلپیت) و کانی‌های سنگین (بیوتیت) شکل ۱۷ بر اساس جدول ۴ رسم شد. منحنی بالائی، وضعیت بخش شناور در جرم مخصوص $2/7 \text{ gr/cm}^3$ و منحنی پایینی بخش غرق شده در جرم مخصوص $2/8 \text{ gr/cm}^3$ و بین دو منحنی محصول حدواسط را نشان می‌دهد [۸]. کانی‌های سبک (با جرم مخصوص کمتر از $2/7$) بین ۷۰ تا ۷۵ درصد و

مختلف نشان داده شده است. با توجه به اینکه تعداد ذرات اورانیوم در مقاطع محدود بود، لذا تمامی ذرات اورانیوم موجود در مقاطع شمارش شد. در جدول ۳ تعداد ذرات شمارش شده و درجه آزادی کانی‌های اورانیوم ارائه شده است. شمارش و محاسبه درجه آزادی کانی‌های اورانیوم نیز طبق رابطه (۱) انجام شد. بر اساس جدول ۳ نمودار درجه آزادی اورانیوم رسم شد (شکل ۱۶). با توجه به این نمودار درجه آزادی با احتساب ۵۰ و ۸۰ درصد به ترتیب ۱۳۰ (حدود ۱۲۰ مش) و ۱۰۰ میکرون (حدود ۱۴۰ مش) بدست آمد.

۳-۲ تعیین درجه آزادی به روش محلول‌های سنگین

جهت انجام مطالعات مایعات سنگین بر روی نمونه‌های این کانسنگ، با استفاده از محلول‌های سنگین دی‌یدومتان ($3/3 \text{ gr/cm}^3$)، تری برمومتان ($2/89 \text{ gr/cm}^3$)، تتراکلرومتان ($1/59 \text{ gr/cm}^3$) و استون ($0/79 \text{ gr/cm}^3$) محلول‌هایی با جرم



شکل ۱۶- نمودار تعیین درجه آزادی کانی‌های اورانیوم.

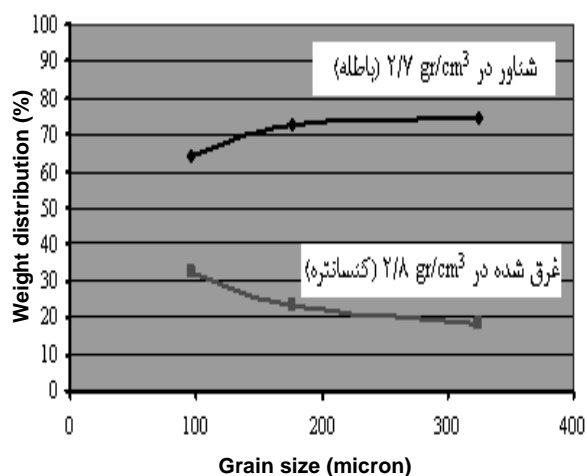
جدول ۳- تعیین درجه آزادی کانی‌های اورانیوم بر اساس شمارش ذرات.

درجه آزادی اورانیوم (%)			تعداد ذرات باطله	تعداد کانی‌های اورانیوم				ابعاد	
متوسط	K = 10	K = 50		K = 10		K = 50		مش	میکرون
-	r = 0	r = 0	درگ	آزاد	درگ	آزاد			
۴۹/۱۵	۴۳/۱۴	۵۵/۱۷	۲۴۵	۲۹	۱۱	۲۶	۱۶	-۲۰+۳۰	-۸۴+۵۹۰
۵۵/۶۴	۵۰/۹۱	۶۰/۳۸	۳۳۵	۲۷	۱۴	۲۱	۱۶	-۳۰+۴۰	-۵۹۰+۴۲۰
۶۴/۱۱	۵۷/۶۳	۷۰/۵۹	۵۵۰	۲۵	۱۷	۲۰	۲۴	-۴۰+۶۰	-۴۲۰+۲۵۰
۷۸/۴۲	۷۴/۷۰	۸۰/۷۶	۹۲۵	۲۱	۳۱	۲۰	۴۲	-۶۰+۱۲۰	-۲۵۰+۱۲۵
۹۰/۸۰	۸۸/۴۴	۹۳/۱۷	۱۲۰۰	۲۳	۸۸	۱۱	۷۵	-۱۲۰+۲۰۰	-۱۲۵+۷۴
۹۴/۱۹	۹۱/۹۵	۹۶/۴۳	۱۵۵۰	۲۱	۱۲۰	۸	۱۰۸	-۲۰۰+۲۷۰	-۷۴+۵۳
۹۷/۷۰	۹۵/۸۳	۹۹/۵۹	۱۸۰۰	۱۱	۱۲۶	۱	۱۲۰	-۲۷۰+۴۰۰	-۵۳+۳۷



جدول ۴ - نتایج آزمایشات غرق و شناورسازی کانسنگ اورانیوم خشومی.

فراکسیون (میکرون)	جرم مخصوص (gr/cm ³)	جرم شناور (%)	عیار (%)	جرم تجمعی شناور (%)	توزیع (%)	توزیع تجمعی (%)
-۴۲۰+۲۵۰	۲/۶	۲۹/۱۲	۰/۰۵۰۲	۲۹/۱۲	۱۳/۱۶	۱۳/۱۶
	۲/۷	۴۵/۰۶	۰/۰۵۷۳	۷۴/۱۸	۲۳/۲۴	۳۶/۴۰
	۲/۸	۷/۳۶	۰/۱۸۱۲	۸۱/۵۴	۱۲/۰۰	۴۸/۴۰
	۲/۹	۴/۵۲	۰/۱۷۶۲	۸۶/۰۶	۷/۱۷	۵۵/۵۷
	۳/۰	۶/۳۵	۰/۱۲۶۳	۹۲/۴۱	۱۵/۷۹	۷۱/۳۶
	غرق در ۳	۷/۵۹	۰/۲۷۶۳	۱۰۰	۲۸/۶۷	۱۰۰
-۲۵۰+۱۲۵	۲/۶	۲۹/۲۳	۰/۰۴۰۱	۲۹/۲۳	۸/۶۵	۸/۶۵
	۲/۷	۴۳/۵۳	۰/۰۳۲۷	۷۲/۷۷	۱۰/۴۸	۱۹/۱۲
	۲/۸	۴/۰۳	۰/۲۰۲۷	۷۶/۸۰	۶/۰۳	۲۵/۱۵
	۲/۹	۴/۵۸	۰/۲۳۶۷	۸۱/۳۸	۷/۹۹	۳۳/۱۴
	۳/۰	۸/۱۸	۰/۳۳۲۵	۸۹/۵۷	۲۰/۰۵	۵۳/۱۹
	غرق در ۳	۱۰/۴۳	۰/۶۰۹۴	۱۰۰	۴۶/۸۴	۱۰۰
-۱۲۵+۷۴	۲/۶	۳۶/۷۲	۰/۰۳۰۷	۳۶/۷۲	۵/۹۷	۵/۹۷
	۲/۷	۲۷/۴۲	۰/۰۲۷۰	۶۴/۱۳	۳/۹۲	۹/۸۹
	۲/۸	۳/۴۲	۰/۱۴۱۳	۶۷/۵۵	۲/۵۶	۱۲/۴۵
	۲/۹	۵/۴۲	۰/۳۱۲۵	۷۲/۹۷	۸/۹۷	۲۱/۴۲
	۳/۰	۱۱/۳۲	۰/۴۲۳۶	۸۴/۲۸	۲۵/۳۹	۴۶/۸۱
	غرق در ۳	۱۵/۷۲	۰/۶۳۹۵	۱۰۰	۵۳/۲۴	۱۰۰



شکل ۱۷ - تعیین درجه آزادی با استفاده از محلول‌های سنگین.

کانی‌های سنگین (بیشتر از ۲/۸) بین ۲۰ تا ۲۵ درصد نمونه را تشکیل می‌دهند. با در نظر گرفتن درصد کانی‌ها و بر اساس شکل ۱۷ مشاهده می‌شود در ابعاد حدود ۳۰۰ میکرون تقریباً ۷۵ درصد ذرات سبک شناور شده و در ابعاد حدود ۱۸۰ میکرون تقریباً ۲۰ درصد ذرات سنگین غرق شده‌اند. به عبارت دیگر درجه آزادی کانی‌های سبک (اورتوز و آلپیت) حدود ۳۰۰ میکرون و درجه آزادی کانی‌های سنگین (بیوتیت) حدود ۱۸۰ میکرون بدست می‌آید که این نتایج، درجه آزادی بدست آمده از طریق مطالعات میکروسکوپی را تأیید می‌نماید.



References:

1. International Atomic Energy Agency, "The uranium production cycle and the environment," International Symposium held in Vienna, 2- 6 October, 267-268 (2000).
2. T. Prasada Rao, P. Metilda, J. Mary Gladis, "Preconcentration techniques for uranium(VI) and thorium(IV) prior to analytical determination-an overview," Talanta (2005).
3. International Atomic Energy Agency, "Uranium Extraction Technology," Technical Report No. 359, pp. 39-66 (1993).
4. ح. نعمت‌اللهی، "کانه آرائی (جلد اول)،" انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، جلد اول، ۱۱-۱۳ (۱۳۷۶).
5. International Atomic Energy Agency, "Developments in Uranium Resources, Production, Demand and the Environment," proceedings of a technical committee meeting held in Vienna, 15-18 June, pp. 166 (2005).
6. Andrew L. Mular, Doug N. Halbe, Derek J. Barratt, "Mineral processing plant design, practice, and control," SME.Pub, Vol. 1, 949 (2002).
7. International Atomic Energy Agency, "Uranium Extraction Technology," Technical Report No. 359, 39 - 66 (1993).
8. ب. رضائی، "تکنولوژی فرآوری مواد معدنی (روش‌های پرعیارسازی ثقلی)،" انتشارات دانشگاه هرمزگان (۱۳۷۷).

۴- بحث و نتیجه‌گیری

- بر اساس شکل ۱ و با توجه به اینکه جرم بخش باقیمانده بر روی بالاترین سرند و همچنین جرم بخش عبور کرده از پائین‌ترین سرند نباید از ۵ درصد کل نمونه تجاوز کند [۴]، زمان بهینه خردایش مواد به وسیله آسیا جهت توزیع وزنی مناسب ذرات در فراکسیون‌ها، ۵ دقیقه در نظر گرفته شد.
- بر اساس نتایج جدول ۱ مشاهده شد، اورانیوم در تمامی فراکسیون‌ها پراکنده شده و توزیع منظمی ندارد، بنابراین به روش خردایش و دانه‌بندی نمی‌توان این کانسنگ را پرعیار کرد. همچنین عیار اورانیوم با کاهش ابعاد افزایش پیدا کرده و در ریزترین فراکسیون (۳۷- میکرون) به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این توزیع اورانیوم ممکن است دلیلی بر ثانویه بودن کانی‌های اورانیوم در کانسنگ باشد که در نتیجه خردایش سریع‌تر خرد شده و به ذرات بسیار ریز و نرمه تبدیل می‌گردند که در فرایندهای بعدی مشکل ساز خواهند بود.
- بر اساس مطالعات کانی‌شناسی، کانی‌های اصلی شامل فلدسپات-آلکالن، پلاژیوکلاز، بیوتیت، کوارتز، آمفیبول و کربنات و کانی‌های فرعی شامل زیرکن، اسفن، آپاتیت و کانی‌های آکتیو (بتافیت، کافینیت و پیچ بلند) شناسایی شدند.
- بر اساس مطالعات میکروسکوپی درجه آزادی کانی‌های اورتوز، آلپیت، بیوتیت و کانی‌های اورانیوم به ترتیب ۳۲، ۲۹۰، ۱۹۰ و ۱۱۰ میکرون بدست آمد. مطالعات مایعات سنگین این نتایج را تأیید نمود.
- بر اساس مطالعات میکروسکوپی مشخص شد که کانی‌های با ارزش به صورت پراکنده یا رگچه‌ای در امتداد مرز بین کانی‌های اصلی به ویژه در حاشیه رخ‌های بیوتیت قرار گرفته‌اند. در برخی موارد نیز اورانیوم به صورت جان‌شینی درون شبکه بلوری بیوتیت‌ها قرار گرفته است. کانی‌های فرعی اورانیوم‌دار بصورت ادخال و یا در حاشیه مرز بین کانی‌های اصلی دیده شدند.