

## **The industrial mineralogy of Shirmaghz-e-Geysur bentonite deposit (North East of Ghaen – Eastern Iran) on the basis of geology, mineralogy, satellite data, geochemistry and industrial properties**

Danial Mojoudi Firouzabadi

M.Sc in Economic Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Khosrow Ebrahimi Nasrabadi\*

Ph.D. in Industrial Mineralogy, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

[Khebrahimi@um.ac.ir](mailto:Khebrahimi@um.ac.ir)

### **Abstract:**

Shirmaghz bentonite deposit is located close to Shirmaghz village, 51 km north east of Ghaen city and 35 km south of Geysur village, Eastern Iran, in central Iran geological zone and north part of Lut block subzone. According to the field evidences, microscopic studies and based on ICP-MS chemical analysis of trace and rare earth elements (REEs), the parent rocks of Shirmaghz bentonite deposit are mainly acidic to intermediate volcanic rocks such as dacite and andesite belongs to Calc-Alkaline magmatic series along with pyroclastic tuffs. minor amounts of Basalt are also present. ASTER Satellite Images processing determined distribution of clay minerals in the investigated area.

Mineralogical analysis on Shirmaghz bentonite samples done by optical microscopy and XRD. Chemical analyses were performed by XRF and ICP-MS. The XRD results confirmed that smectite group minerals mainly of beidellite and Na-montmorillonite are the major clay minerals of the investigated area. Furthermore, The Chemical analyses of major oxides by XRF, indicates the mean values of Na<sub>2</sub>O is 2.21% and CaO is 0.77%. The chemical analysis results also shows that the high percentage of SiO<sub>2</sub>, (65-70 %) and moderate amounts of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (11-13.5%). These chemical analysis indicates that Shirmaghz bentonite deposit is Na type. The higher amounts of SiO<sub>2</sub> suggests the hydrothermal origin of this deposit which were resulted from alteration of volcanic and pyroclastic rock units that are directly in associate with fault zones.

Based on physical, chemical and industrial properties of Shirmaghz bentonite deposit, the most important industrial applications of this bentonite is in casting and iron pelletizing industries.

*Keywords: Geology, Geochemistry, industrial mineral, Bentonite, Beidellite, shirmaghz, Ghae*



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

<https://doi.org/10.22067/gemiran.2026.48065>

## کانی‌شناسی صنعتی نهشته‌ی بنتونیتی شیرمغز گیسور (شمال شرق قائن - شرق ایران) بر پایه‌ی

داده‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ماهواره‌ای، ژئوشیمیایی و تست‌های صنعتی

دانیال موجودی فیروزآبادی، کارشناس ارشد زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر خسرو ابراهیمی نصرآبادی\*، استاد کانی‌شناسی صنعتی دانشگاه فردوسی مشهد

[khebrahimi@um.ac.ir](mailto:khebrahimi@um.ac.ir)

۰۹۱۵۳۱۵۲۷۸۴

۱۴۰۴/۰۶/۱۰

### چکیده

نهشته‌ی بنتونیتی شیرمغز گیسور در نزدیکی آبادی شیرمغز، واقع در ۵۱ کیلومتری شمال شرق شهر قائن و ۳۵ کیلومتری جنوب روستای گیسور، در پهنه‌ی ایران مرکزی و قسمت شمالی زیر پهنه‌ی بلوک لوت قرار گرفته است. با توجه به شواهد صحرایی و مطالعات میکروسکوپی و براساس آنالیز عناصر کمیاب و نادر حاکی با روش ICP-MS، نمونه‌های سنگ مادر بنتونیت شیرمغز عمدتاً در محدوده‌ی داسیتی و توف‌های آذرآواری و در موقعیت سری کالک آلکالن قرار گرفته‌اند؛ اما واحدهای آندزیتی و به میزان کمتر بازالتی نیز در تولید این ذخیره‌ی معدنی نقش داشته‌اند. مجموعاً چنین به نظر می‌رسد که از دیدگاه ترکیب شیمیایی، سنگ مادر به وجودآورنده‌ی بنتونیت‌ها، عمدتاً اسیدی تا حدواسط (داسیتی تا تراکی آندزیتی) بوده است. همچنین مطالعات صورت گرفته نشان داد که سنگ‌های آذرآواری نیز منشأ مهمی برای بخشی از نهشته‌ی بنتونیتی مورد مطالعه می‌باشند. از سویی بررسی و پردازش تصاویر ماهواره‌ای ASTER، پراکندگی کانی‌های رسی را در منطقه بارزسازی نمود.

نمونه‌های بنتونیت شیرمغز، مورد آنالیزهای شیمیایی و کانی‌شناختی به روش‌های XRF، ICP-MS و XRD قرار گرفتند. نتایج حاصل از آنالیز XRD، حضور کانی‌های فیلسیلیکاته‌ی گروه اسمکتیت شامل بیدلیت و مونت‌موریونیت سدیک و کلسیک را به عنوان کانی‌های رسی اصلی این بنتونیت تایید نمود. نتایج آنالیزهای شیمیایی اکسیدهای اصلی در بنتونیت که نشان‌گر میانگین  $\text{Na}_2\text{O}$  برابر با ۲/۲۱ درصد، میانگین  $\text{CaO}$  برابر با ۰/۷۷ درصد، میزان  $\text{SiO}_2$  در حد بالا (۶۰ - ۷۵ درصد) و میزان  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در حد متوسط (۱۱ - ۱۳/۵ درصد) است، حاکی از سدیک بودن بخش مهمی از این ذخیره‌ی کانی صنعتی می‌باشد. همچنین میزان  $\text{SiO}_2$  بالا از نشانه‌های منشأ گرمایی برای این نهشته است. منشأ بنتونیت شیرمغز گیسور، دگرسانی آرژیلیک واحدهای آذرآواری و آتشفشانی منطقه می‌باشد که این دگرسانی، در ارتباط مستقیم با سیستم گسلی منطقه و خصوصاً گسل امتدادلغزی است که نوار بنتونیتی در امتداد آن رخ داده است. براساس تحقیقات کانی‌شناختی و شیمیایی صورت گرفته، مهم‌ترین کاربردهای صنعتی نهشته‌ی بنتونیتی منطقه‌ی مورد مطالعه در صنایع ریخته‌گری و گندوله‌سازی آهن می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** زمین‌شناسی، ژئوشیمی، کانی صنعتی، بنتونیت، بیدلیت، شیرمغز، قائن.

کانی‌سازی بنتونیت شیرمغز گیسور در میانه‌ی جنوب برگی ۱:۱۰۰۰۰۰ نوده [۱] در فاصله‌ی ۵۱ کیلومتری شمال شرق شهر قائن، ۹۵ کیلومتری جنوب شرق شهر گناباد و در ارتباط با سنگ‌های آتشفشانی - آذرآواری پالئوسن - ائوسن، در پهنه‌ی ایران مرکزی و زیر پهنه‌ی بلوک لوت اتفاق افتاده است. سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری پالئوسن - ائوسن در محدوده‌ی گناباد، قائن و بیرجند دارای کانی‌سازی‌های متعدد بنتونیت هستند. از جمله کانی‌سازی‌های بنتونیت در محدوده‌ی نامبرده می‌توان به معادن بنتونیت گل‌کن گناباد، گریمنج، کرغند، چاه کشمیر، چاه طالب، حسامیه، برون، اشکفتوک، بوته‌زیر و کوه‌سفید اشاره نمود [۲]. فراوانی سنگ‌های آتشفشانی سیستم پالئوژن - نئوژن، به ویژه ائوسن که بیش از نیمی از بلوک لوت را می‌پوشاند، از نکات قابل توجه می‌باشد که کانی‌سازی بنتونیت منطقه‌ی مورد مطالعه نیز در ارتباط با همین واحدها رخ داده است.

واژه‌ی بنتونیت را نخستین بار در سال ۱۸۹۸ دانشمندی به نام نایت به کار برد. این واژه از اصطلاح محلی شیل‌های بنتون واقع در ایالت وایومینگ آمریکا برگرفته شده است. بنتونیت یک ماده‌ی طبیعی است که از تجمع چند کانی رسی و تعدادی کانی غیر رسی تشکیل می‌شود. کلیه‌ی تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی که تحت تأثیر سیالات ماگمایی یا گرمایی در سنگ‌ها به وجود می‌آید، دگرسانی نام دارد. دگرسانی گرمایی نیز فرایندی بسیار پیچیده است که باعث تغییرات کانی‌شناختی، شیمیایی و بافتی در سنگ‌های اولیه می‌شود. در منطقه‌ی مورد مطالعه، آثار دگرسانی و کانی‌سازی مشهود می‌باشد که در نتیجه‌ی عمل محلول‌های گرمایی بر واحدهای سنگی منطقه رخ داده و از طریق شکستگی‌ها که نقش گذرگاه را برای محلول‌ها بازی می‌کنند، امکان‌پذیر گشته است. این گذرگاه‌ها در اثر عملکرد گسل‌های فرعی ایجاد شده‌اند [۳]. بر اساس منشأ و نحوه‌ی شکل‌گیری، نهشته‌های بنتونیتی را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم نمود: نوع اول معمولاً به شکل لایه‌ای و در مقیاس بزرگ یافت می‌شوند. مانند کانسارهایی که در مونتانا و وایومینگ ایالات متحده وجود دارند. این کانسارها به وسیله‌ی فرآیندهای دیاژنزی تشکیل می‌گردند. نوع دوم اغلب کانسارهایی عدسی شکل تا نامنظم هستند، در مقیاس کوچک تا متوسط رخ می‌دهند و غالباً منشأ گرمایی دارند. این کانسارها عمدتاً در کشورهای ایتالیا، ترکیه و یونان گزارش شده‌اند [۴] که نهشته‌ی مورد بررسی نیز از این نوع می‌باشد.

علی‌رغم پژوهش‌های بسیار در محدوده‌ی قائن و گناباد، تاکنون هیچ‌گونه مطالعات جامعی در ارتباط با منطقه‌ی شیرمغز گیسور انجام نشده است. هدف از انجام این پژوهش، ارائه‌ی اطلاعات نسبتاً جامعی پیرامون ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، پتروگرافی، ژئوشیمیایی و نیز کاربردهای صنعتی نهشته‌ی بنتونیتی شیرمغز گیسور می‌باشد.

## روش مطالعه

بررسی نهشته‌ی بنتونیتی شیرمغز گیسور و واحدهای سنگی همراه، در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده است. در بخش صحرایی، پژوهش‌های صورت گرفته برای بررسی ویژگی‌های نهشته‌ی بنتونیتی و سنگ میزبان کانی‌سازی، پیمایش‌هایی برای بررسی و تفکیک سازندهای زمین‌شناسی موجود، گسترش ذخیره و چگونگی ارتباط آن با سنگ‌های درونگیر و ویژگی‌های ظاهری نهشته‌ی بنتونیتی موجود صورت گرفته است. نمونه‌برداری از بنتونیت‌ها براساس تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی نظیر رنگ، چگالی، سختی و بافت انجام شده است. پس از انجام بررسی‌های صحرایی و نمونه‌برداری در مقیاس ۱:۵۰۰۰ از محدوده‌ای به

وسعت تقریبی ۵ کیلومترمربع، نمونه‌های مختلف به منظور مطالعات پتروگرافی و دگرسانی جمع‌آوری گردید و بیش از ۷۰ مقطع نازک از آن‌ها در کارگاه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد تهیه شد. سپس با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان، مطالعات پتروگرافی و کانی‌شناسی کاملی روی این مقاطع صورت پذیرفت. همچنین تعداد ۲۰ مقطع

نازک دوبل صیقل از نمونه‌های سنگی در کارگاه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد تهیه شد تا مطالعات کانه‌زایی فلزی در منطقه که شواهد صحرایی نشان‌گر آن‌ها بود، انجام گردد. حاصل این مطالعات، تهیه نقشه‌ی زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی منطقه بود که با مقیاس ۱:۱۴۰۰۰ تهیه شد. جهت انجام مطالعات کانی‌شناختی و ژئوشیمیایی، مجموعاً تعداد ۱۹ نمونه جمع‌آوری گردید که تمامی نمونه‌ها به منظور شناسایی کانی‌ها به روش آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) و به منظور تعیین اکسیدهای اصلی و درصد آن‌ها به روش آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (XRF)، در آزمایشگاه تجزیه‌کنندگان کانسارهای بلورین آمیتیس شرق مشهد مورد تجزیه‌ی شیمیایی قرار گرفتند. برای شناسایی کانی‌ها در آنالیز XRD، نرم افزار X'pert Highscore version 1.0d استفاده گردید. مقادیر LOI (Loss Of Ignition) در نمونه‌ها براساس اختلاف وزن آن‌ها، پیش و پس از گرما دادن به مدت یک ساعت در دمای ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتیگراد، به وسیله‌ی شرکت یاد شده تعیین شده‌اند. همچنین تعداد ۵ نمونه هم از کانی‌سازی بنتونیت و هم از سنگ میزبان مرتبط با آن، به روش Inductively Coupled Plasma-Mass Spectroscopy (ICP-MS, MA250) و با نحوه‌ی آماده‌سازی چند اسید، با هدف تعیین مقادیر عناصر جزئی و خاکی نادر در آزمایشگاه‌های شرکت ACME کشور کانادا مورد تجزیه‌ی شیمیایی قرار گرفتند. تست‌های صنعتی ذخیره‌ی بنتونیتی شیرمغز گیسور جهت سنجش کیفیت آن و تعیین کاربرد بهینه‌ی این ذخیره‌ی معدنی در صنعت، به وسیله‌ی شرکت تجزیه‌کنندگان کانسارهای بلورین آمیتیس شرق و شرکت توس خاک (تولیدکننده‌ی بنتونیت فرآوری‌شده خاص صنایع ریخته‌گری) انجام گرفت. تعداد ۴ نمونه از چاهک‌های دستی حفاری شده و یک نمونه‌ی کلی معرف جهت انجام تست‌های صنعتی انتخاب شدند. در طی این مطالعات، سه صنعت گل حفاری چاه‌های نفت و گاز، ریخته‌گری و گندوله‌سازی آهن برای تعیین کاربردهای بهینه‌ی این ذخیره‌ی کانی صنعتی مورد بررسی قرار گرفتند.

## بحث و بررسی

### ۱- زمین‌شناسی منطقه‌ای

منطقه‌ی مورد مطالعه در شمال شرق ایران، در پهنه‌ی ایران مرکزی و در شمال زیر پهنه‌ی بلوک لوت قرار دارد (شکل ۱). این بلوک که شرقی‌ترین بخش خرد قاره‌ی ایران مرکزی است، با روندی شمالی - جنوبی میان دو گسل نایبند در غرب و گسل نهپندان در شرق واقع می‌باشد و در مرز شمالی آن گسل درونه و در مرز جنوبی آن فرونشست جازموریان قرار دارد [۵]. فعالیت ماگمایی در بلوک لوت در ژوراسیک میانی (۱۶۲ - ۱۶۵ میلیون سال قبل) شروع شده و در ترشیری به اوج خود رسیده است [۶]. تکاپوهای آتشفشانی گسترده به سن پالئوژن، نئوژن و کواترنری و زمین لرزه‌های امروزی همراه با گسلش در رسوبات کواترنری، نمونه‌های روشنی از پویایی بلوک لوت هستند [۷]. ذخایر بنتونیت در ایران، بیشتر در ارتباط با فعالیت‌های آتشفشانی دوران سنوزوئیک بوده و از لحاظ مکانی به شش منطقه‌ی زمین‌شناختی سمنان-ترو، البرز-آذربایجان، شرق ایران، ایران مرکزی، تفرش-تکاب و سلسله جبال زاگرس تفکیک شده‌اند [۸].

سنگ‌های آذرین لوت شمالی که منطقه‌ی مورد مطالعه در آن واقع می‌باشد، عمدتاً از نوع گدازه‌های بازالتی، آندزیتی، داسیتی، ریولیتی و همچنین مقدار کمتری توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق هستند. واحدهای آتشفشانی بخش شمالی بلوک لوت، می‌تواند حاصل فرورائش بلوک افغان به زیر بلوک لوت باشد [۵]. این بلوک به لحاظ زمین‌ساختی، بسیار فعال می‌باشد و با بررسی گسل‌های

اصلی موجود در منطقه، مشخص می‌شود که ساختمان‌های زمین‌ساختی اصلی شامل گسل‌های راستالغز عمیق با حرکت خمیده هستند. این گسل‌ها با حرکت خود، ریخت ساختاری منطقه را شکل می‌دهند و واحدهای سنگی منطقه‌ی مورد مطالعه نیز تحت تاثیر عملکرد آن‌ها قرار گرفته است. ساختارهای زمین‌ساختی منطقه‌ی مورد مطالعه، به طور عمده تحت تأثیر فعالیت‌های گسل دشت بیاض که در غرب آن قرار دارد، ایجاد شده‌اند [۱].

## ۲- زمین‌شناسی محلی

واحدهای سنگی منطقه‌ی مورد مطالعه، عمدتاً به سن دوران سنوزویک و دوره‌ی پالئوژن هستند [۱]. این واحدها عبارتند از سنگ‌های دگرگونی با درجه‌ی پایین (حداکثر تا رخساره‌ی شایست سبز) شامل ماسه‌سنگ دگرگونه، اسلیت و فیلیت به سن ژوراسیک زیرین (معادل‌های دگرگونی گروه شمشک)، سنگ‌های آتشفشانی عمدتاً حدواسط تا مافیک و سنگ‌های آذرآواری به سن پالئوژن (پالئوسن-ائوسن)، دایک‌های دیوریت پورفیری و کوارتز دیوریت پورفیری تیره‌رنگ به سن احتمالی ائوسن (شکل ۳-۳-الف، شکل ۳-ب) و کنگلومراهای توده‌ای و ماسه‌سنگ به سن ائوسن. واحدهای سنگی تفکیک شده در منطقه‌ی مورد مطالعه از قدیم به جدید، به شرح ذیل می‌باشد (شکل ۲).

### ۲-۱- واحد ماسه‌سنگ دگرگونه و اسلیتی

این واحد عضوی از گروه شمشک می‌باشد که یکی از گسترده‌ترین واحدهای سنگی را در سطح این منطقه داراست. این سازند تحت تاثیر تأثیر دگرگونی ناحیه‌ای قرار گرفته و برگراری در مجموعه‌های سنگی آن پدیدار شده است که برگواره‌ها به طور عمده به موازات سطوح لایه‌بندی گسترش یافته است [۱]. این واحد که در شرق منطقه‌ی مورد مطالعه نیز رخمون دارد، رخساره‌ای شامل تناوبی از ماسه‌سنگ دگرگونه به رنگ خاکستری تیره تا سبز تیره همراه با فیلیت و اسلیت سبز تیره تا سیاه رنگ است. ماسه‌سنگ‌های این مجموعه به طور عمده، کوارتزی یا فلدسپاتی و نازک لایه تا متوسط لایه هستند. کانی‌های تشکیل دهنده‌ی ماسه‌سنگ‌ها نیز غالباً شامل پلاژیوکلاز، کوارتز و بیوتیت است که با سیمان کربناته یا اکسید آهن در کنار هم قرار گرفته‌اند.

### ۲-۲- واحد آتشفشانی بازیک - حدواسط پالئوسن-ائوسن [۱]

این واحد مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری با ترکیب بازیک تا حدواسط است که ابتدا سنگ‌های آتشفشانی مانند بازالت به رنگ سبز تیره، آندزیت بازالت و آندزیت قرار دارد و در بخش‌های بالایی مجموعه، سنگ‌های آذرآواری مانند توف با ترکیب حد واسط به رنگ سبز و برش آتشفشانی نیز بر مجموعه‌ی سنگی فوق افزوده می‌شود. جریان‌های گدازه به نسبت ضخیم هستند. سنگ‌ها دارای خردشدگی زیادی بوده و میزان دگرسانی در آن‌ها بالاست؛ به طوری که بیشتر کانی‌های مافیک به کانی‌های ثانویه دگرسان شده‌اند. بسیاری از فضاهای خالی موجود در سنگ‌ها توسط دواير متحدالمرکز از سیلیس و کربنات به همراه اکسید آهن پر شده‌اند. در منطقه‌ی مورد مطالعه، حجم سنگ‌های با ترکیب حدواسط افزایش یافته و در مقابل میزان سنگ‌های بازیک کمتر می‌باشد و تراکیت و تراکی آندزیت نیز به آن افزوده می‌شود. این واحدها به صورت نواری در شمال منطقه‌ی مورد مطالعه گسترش دارند.

### ۲-۳- واحد آتشفشانی حدواسط و سنگ‌های رسوبی آواری پالئوسن-ائوسن [۱]

واحد فوق شامل سنگ‌های آتشفشانی با ترکیبی به طور عمده حدواسط مانند داسیت، آندزیت و تراکی آندزیت به رنگ خاکستری، همراه با توف و برش آتشفشانی به رنگ قرمز تا سبز با قطعات زاویه دار تا نیمه زاویه دار است (شکل ۸-L). علاوه بر این میان‌لایه‌های کنگلومرا، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک نازک لایه به رنگ کرم نیز به همراه آن‌ها دیده می‌شوند. میزان دگرسانی در سنگ‌های آتشفشانی بالا است و فضاهای خالی موجود در سنگ‌ها نیز به وسیله سیلیس، کربنات و اکسید آهن پر شده‌اند. این واحد از گسترش قابل توجهی در منطقه‌ی مورد مطالعه برخوردار است.

#### ۲-۴- واحد کنگلومرای توده‌ای قرمز - ماسه‌سنگ قرمز ائوسن [۱]

این واحد ابتدا شامل کنگلومرای توده‌ای به رنگ قرمز بوده که سپس به تناوبی از کنگلومرای توده‌ای و ماسه‌سنگ ضخیم لایه به همراه عدسی‌های کوچکی از برش رسوبی به رنگ کلی قرمز تبدیل می‌گردد. قطعات تشکیل دهنده‌ی کنگلومرا شامل سنگ‌آهک، اسلیت و ماسه‌سنگ دگرگونی پالئوزوئیک و سنگ‌های آتشفشانی کرتاسه و پالئوسن-ائوسن است. دانه‌های تشکیل دهنده‌ی کنگلومرا به نسبت گردشده هستند اما دارای جورشدگی بدی می‌باشند. کنگلومرای قاعده‌ی واحد با ناپیوستگی زاویه‌ای، بر روی سنگ‌های آتشفشانی پالئوسن-ائوسن جای گرفته است که بر همین اساس، سن آن ائوسن در نظر گرفته می‌شود. این واحد نیز دارای رخنمون زیادی در منطقه‌ی مورد مطالعه است.

#### ۲-۵- واحد کنگلومرای توده‌ای قهوه‌ای روشن ائوسن [۱]

این واحد شامل کنگلومرای توده‌ای به رنگ قهوه‌ای روشن تا کرم است. قطعات تشکیل دهنده‌ی آن شامل سنگ‌های آتشفشانی، سنگ‌آهک کرتاسه، اسلیت، فیلیت، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک پالئوزوئیک، با گردشدگی به نسبت خوب و سیمانی آهکی و به نسبت سخت می‌باشد. این واحد به گونه‌ای پیوسته بر روی واحد کنگلومرا-ماسه‌سنگ ائوسن جای گرفته است و در بخش مرکزی منطقه‌ی مورد مطالعه، گسترش دارد.

#### ۲-۶- واحد دایک دیوریتی

در منطقه‌ی مورد مطالعه، دایک‌هایی با امتداد تقریباً شمالی-جنوبی، واحدهای سنگی با سن کرتاسه تا ائوسن [۱] را بریده و در داخل آن‌ها تزریق شده‌اند. ترکیب سنگ‌شناسی آن‌ها شامل دیوریت پورفیری و کوارتز دیوریت پورفیری به رنگ تیره می‌باشد. تزریق این دایک‌ها عمدتاً در نیمه‌ی جنوبی منطقه‌ی مورد مطالعه رخ داده است.

### ۳- پتروگرافی واحدهای آتشفشانی

مطالعه‌ی مقاطع میکروسکوپی نمونه‌های سنگی برداشت شده نشان می‌دهد که واحدهای آذرین منطقه، عمدتاً از نوع آتشفشانی و غالباً در طیف سنگ‌های حدواسط قرار گرفته‌اند؛ گرچه در برخی واحدها تمایلاتی به سمت طیف مافیکی نیز دیده می‌شود. واحدهای آتشفشانی منطقه شامل هورنبلند آندزیت، پیروکسن آندزیت، بازالت، هورنبلند بازالت، آندزیت بازالت، تراکی آندزیت و تراکیت می‌باشد. بافت غالب در این نمونه‌ها پورفیری، پورفیری-میکرولیتی، بادامکی (آمیگدالوئیدال)، تراکیتی یا جریان‌ی (شکل ۳-۳-پ) و گلوپورفیری می‌باشد؛ اما بافت فلتی نیز به صورت فرعی مشاهده شده است. در بافت فلتی، زمینه‌ی هولوکریستالین بعضی از سنگ‌های دربردارنده‌ی میکروکریست‌های غالباً فلدسپاتی، به گونه‌ای تنگاتنگ و فشرده درهم پیچیده‌اند که در مقاطع نازک، به صورت فنوکریست‌های پلاژیوکلاز که اطراف آن‌ها به وسیله‌ی میکروکریست‌های پلاژیوکلاز که در جهت فنوکریست پلاژیوکلاز قرار گرفته‌اند احاطه شده، مشاهده می‌شود و حالتی جریان‌ی شکل را ایجاد می‌نماید.

بافت پورفیری در این نوع سنگ‌ها، می‌تواند نشان‌گر پایین بودن سرعت خروج ماگما و توقف ماگما در آشیانه‌ی ماگمایی باشد و در واقع سرد شدن ماگما طی دو مرحله را نشان می‌دهد؛ یک مرحله در نزدیکی سطح زمین و یک مرحله در سطح آن. لذا براساس بافت پورفیری سنگ‌های منطقه‌ی مورد مطالعه، می‌توان دو مرحله‌ی سرد شدن را برای آن‌ها در نظر گرفت: (۱) تبلور فنوکریست‌ها در فشار بالا با سرعت سرد شدن آهسته‌ی ماگما و توقف ماگما در آشیانه‌ی ماگمایی صورت گرفته و فرصت کافی برای رشد آن‌ها فراهم شده است که در این حالت، میزان هسته‌زایی کم و نرخ رشد بلور زیاد می‌باشد و (۲) در حین صعود و خروج گدازه‌ها در فشار کم، میکرولیت‌ها متبلور شده‌اند. به‌طور کلی بزرگ بودن اندازه‌ی کانی‌ها می‌تواند حاصل سرعت پایین هسته‌بندی در کانی نسبت به سرعت بالای رشد در آن‌ها باشد [۹]. در گدازه‌های آندزیتی منطقه، حفراتی به علت خروج گاز در حین خروج ماگما ایجاد شده و پر شدن این حفرات توسط کانی‌های ثانویه مثل کلسیت، کوارتز، زئولیت و سلادونیت، بافت بادامکی (آمیگدالوئیدال<sup>۱</sup>) را ایجاد نموده است. بافت آمیگدالوئیدال در نمونه‌های بازیک منطقه بیشتر دیده می‌شود؛ چراکه به‌طور کلی آندزیت به دلیل داشتن ماگمایی با گران‌روی و غلظت بیشتر، حفرات کمتری نسبت به بازالت دارد و بافت آمیگدالوئیدال شدید را عمدتاً در بازالت‌ها می‌توان مشاهده نمود (شکل ۴-الف).

در نمونه‌های آندزیتی منطقه‌ی مورد مطالعه، پلاژیوکلاز و هورنبلند کانی‌های اصلی تشکیل دهنده هستند. پیروکسن نیز به میزان تا ۵ درصد در برخی از این نمونه‌ها مشاهده شده است که از نوع اوژیت می‌باشد و مقدار آن با مافیکی‌تر شدن طیف سنگ، افزایش می‌یابد. پلاژیوکلازها الیگوکلاز-آندزین-لابرادوریت بوده و در تمامی نمونه‌ها شکل‌دار<sup>۲</sup> تا نیمه شکل‌دار<sup>۳</sup> می‌باشند و آن‌ها را در نمونه‌های حدواسط-مافیک یعنی آندزیت، پیروکسن آندزیت، آندزیت-بازالت و بازالت، می‌توان به سه دسته تقسیم نمود: (۱) پلاژیوکلازهای میکرولیتی<sup>۴</sup> که زمینه‌ی سنگ را تشکیل داده‌اند و ممکن است دگرسان‌شده یا سالم باقی‌مانده باشند. (۲) فنوکریست‌های پلاژیوکلاز که اندازه‌ی بزرگی دارند و دگرسانی اندکی را هم نشان می‌دهند (شکل ۴-ب). (۳) فنوکریست‌های پلاژیوکلاز که دگرسانی زیادی از خود نشان می‌دهند. بلورهای کلینوپیروکسن در نمونه‌ها، از نوع کلسیم‌دار اوژیت است که براساس خصوصیات نوری شاخص مثل رنگ کرمی و فاقد چند رنگی بودن، شناسایی می‌شود و به صورت میکروفنوکریست و فنوکریست‌های نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار مشاهده می‌گردد. در بخش مهمی از نمونه‌ها، تشخیص پیروکسن دشوار است؛ چراکه عمدتاً تنها حالت کشیدگی یا قالب‌های ۸ وجهی بلوری آن‌ها باقی مانده و تبدیل به کربنات و یا کلریت و یا اکسید آهن شده و از بین رفته‌اند.

در نمونه‌های گدازه‌ای کاملاً بازالتی که گسترش کمی در شمال غرب منطقه دارند و دارای بافت پورفیری می‌باشند، فنوکریست اولیوین به میزان کمتر از ۵ درصد مشاهده می‌شود. کانی اولیوین در یک زمینه‌ی میکرولیتی از پلاژیوکلازهای ریزبلور بوده و اکثراً فاقد شکل می‌باشد. شواهد تخریب و تجزیه و شکستگی شدید در سطح این کانی دیده می‌شود و متحمل دگرسانی شده است (شکل ۴-پ). اندازه‌ی فنوکریست‌های اولیوین در این نمونه‌ها غالباً کوچک می‌باشد. آمفیبول‌های از نوع هورنبلند در نمونه‌های بازالتی، عمدتاً دارای شکل کشیده و سوزنی به رنگ قهوه‌ای می‌باشند. این کانی در تعداد قابل توجهی از نمونه‌ها، دارای حاشیه‌ی سوخته است یا به عبارت دقیق‌تر، از حاشیه تبدیل به اکسید آهن و کانی‌های اوپک<sup>۵</sup> شده است. وجود حاشیه‌ی سوخته در این هورنبلندها که جزء کانی‌های آبدار می‌باشند، به‌علت واکنش‌های اگزوترمیک<sup>۶</sup> است که در سطح زمین رخ می‌دهد. با کاهش فشار

<sup>1</sup> Amygdaloidal

<sup>2</sup> Euhedral

<sup>3</sup> Subhedral

<sup>4</sup> microlites of plagioclase

<sup>5</sup> opaque

<sup>6</sup> exothermic reaction

از روی ماگما در اثر نزدیک شدن به سطح زمین و ثابت ماندن حرارت، این کانی ناپایدار گشته و آب موجود در ترکیب آن آزاد می‌شود. این عمل سبب تجزیه و اکسیداسیون حاشیه‌ی بلور می‌گردد و قشری سیاه رنگ (عمدتاً شامل هماتیت) در حواشی بلور به جای می‌گذارد. این پدیده مختص سنگ‌های آتشفشانی بوده که به آن اصطلاحاً آپاسیتی شدن<sup>۷</sup> می‌گویند. آپاسیتی شدن حاکی از بالا بودن فوگاسیته‌ی گاز اکسیژن و فشار بخار آب ضمن تشکیل این کانی‌ها و از دست رفتن آب حین فوران ماگما می‌باشد [۹].

#### ۴- کانی‌شناسی

بنتونیت اساساً مجموعه‌ای از کانی‌های رسی است که در اثر هوازدگی شیمیایی خاکسترهای آتشفشانی و یا سنگ‌های آتشفشانی اسیدی- حدواسط ایجاد شده است [۱۰]. شاید مهم‌ترین تعریف برای بنتونیت به‌عنوان یک کانی صنعتی، تعریفی است که توسط Grim و Guven [۴] ارائه شده است. مطابق این تعریف، بنتونیت رسی است که ذاتاً از کانی‌های اسمکتیت بدون توجه به منشأ آن شکل گرفته است و تشکیل بنتونیت، یک فرآیند فیزیکوشیمیایی است که ممکن است به اشکال مختلفی رخ دهد. گروه اسمکتیت به عنوان سازندگان اصلی بنتونیت‌ها در طبیعت گسترده هستند [۱۱]. اما تعیین یک تعریف برای یک کانی صنعتی که براساس منشأ می‌باشد و محدود به یک سنگ مادر خاص است، کار دشواری به نظر می‌رسد [۱۲]. به طور معمول، ساخت یا فابریک<sup>۸</sup> بنتونیت‌ها به طرز چشمگیری متغیر است که منعکس کننده‌ی شرایط زایش متنوع آن می‌باشد [۱۳]. به طور معمول، ساختمان بلورین کانی‌های رسی متشکل از ورقه‌های در بین هم فرو رفته است [۱۴].

کانی‌های رسی گروه اسمکتیت جزو پرکاربردترین کانی‌ها در صنایع مختلف هستند. معمول‌ترین کاربردهای آن‌ها در ماسه‌ی قالب‌های ریخته‌گری، گل حفاری، سرامیک، گندوله‌سازی آهن و فیلتراسیون<sup>۹</sup> می‌باشد [۱۵].

کانی‌شناسی بنتونیت در این نهشته براساس نتایج حاصل از آنالیز XRD، شامل انواعی از کانی‌های رسی نظیر مونت‌موریونیت، بیدلیت و ایلیت، انواعی از گروه زئولیت‌ها نظیر استیلبیت، موردنیت، کلینوپتیولیت و هولاندیت، برخی کانی‌های سیلیکاته از جمله کوارتز، کریستوبالیت، سانیدین، ارتوکلاز، آلبیت و نیز برخی کانی‌های غیرسیلیکاته نظیر ژپس و مقادیر جزئی هالیت می‌باشد. از آنجایی که تشخیص نوع کانی‌های رسی در مقاطع نازک میکروسکوپ نور عبوری میسر نیست، وجود کانی‌های رسی نظیر مونت‌موریونیت سدیک و کلسیک، بیدلیت و ایلیت به وسیله‌ی نتایج آنالیز XRD تایید می‌شود. بیدلیت  $[(Ca_{0.5}Na)_{0.3}Al_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O]$  به‌عنوان عمده‌ترین فاز کانیاپی در تمام نمونه‌های بنتونیت منطقه‌ی مورد مطالعه می‌باشد و مونت‌موریونیت  $[(Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)_2(Si_4O_{10})(OH)_2 \cdot nH_2O]$  علی‌رغم انتظار معمول، به صورت فاز اصلی اما با فراوانی کمتر، از همراهان بیدلیت است. عمده‌ترین کانی غیر رسی همراه با ماده‌ی معدنی، دو پلی‌مورف<sup>۱۰</sup>  $SiO_2$  یعنی کوارتز و کریستوبالیت هستند. کوارتز به‌طور اولیه و ثانویه، به صورت پرکننده‌ی درز و شکاف‌ها و بادامکی حضور دارد. حضور کریستوبالیت را که پلی‌مورف حرارت بالای  $SiO_2$  است، می‌توان با سنگ مادر آتشفشانی ماده‌ی معدنی مرتبط دانست.

حضور کانی‌های خانواده‌ی زئولیت مانند موردنیت، کلینوپتیولیت، هولاندیت و استیلبیت در فازهای اصلی و فرعی کانی‌شناسی و نیز مشاهده‌ی آن‌ها در زیر مقاطع نازک میکروسکوپی تهیه شده، نشان می‌دهد که همراهی بنتونیت با زئولیت در نهشته‌ی

<sup>7</sup> Opacitization

<sup>8</sup> fabric

<sup>9</sup> filtration

<sup>10</sup> polymorph

شیرمغز گیسور قطعی است. همچنین ژئولیت به صورت پرکننده‌ی حفرات آندزیت ها و خصوصا بازالته‌ها به صورت کانی ثانویه مشاهده گردید.

حضور ژیپس در برخی از نقاط ذخیره که ضمن حفاری چاهک‌های اکتشافی به دست آمد، شایان توجه است. این کانی عمدتاً به صورت ورقه‌های نازک شفاف و بعضاً در قالب رگه‌های کم ضخامت که هردو نشانگر منشا ثانویه برای آن هستند، مشاهده گردید. ژیپس که سولفات کلسیم آبدار ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) است، به دلیل دارا بودن کلسیم و بالا بردن میزان این عنصر در بنتونیت، می‌تواند معضلی در سر راه کیفیت ماده‌ی معدنی باشد؛ چراکه بنتونیت نوع سدیمی به لحاظ صنعتی و اقتصادی با ارزش‌تر است. این معضل می‌تواند در فرآوری ماده‌ی معدنی با روش‌هایی از قبیل شستشو و غربال‌گری مرتفع گردد؛ چرا که ژیپس در آب حل می‌شود و به این ترتیب، کلسیم اضافی ناشی از آن حذف خواهد شد. البته تشکیل ژیپس در برخی از نقاط ذخیره، می‌تواند نکته‌ی مثبتی باشد؛ زیرا درواقع کلسیم اضافی موجود در محیط را به صورت یک فاز کانیایی مجتمع کرده، از پراکنده شدن این عنصر در سرتاسر محیط جلوگیری نموده و لذا فرآوری و حذف آن را از ماده‌ی معدنی تسهیل نموده است. البته باید توجه داشت که میزان  $\text{CaO}$  نشان داده شده در آنالیزهای XRD و مجموع  $\text{CaO} + \text{K}_2\text{O}$ ، می‌تواند ناشی از پلاژیوکلاز کلسیم‌دار کاملاً آلتزه نشده باشد. این کانی در ترکیب شیمیایی خود کلسیم دارد که داخل بنتونیت باقی مانده و میزان  $\text{CaO}$  را بالا برده است.

در مطالعات کانی‌شناسی فلزی، کانی‌سازی پراکنده‌ی منگنز و آهن در قالب اکسیدهای آن‌ها یعنی پیرولوسیت و مگنتیت مشاهده گردید. کانی مگنتیت به صورت پراکنده در واحدهای آتشفشانی منطقه وجود دارد؛ اما بنظر می‌رسد حضور مگنتیت را نمی‌توان به منزله‌ی کانی‌سازی فلزی اقتصادی درنظر گرفت. حضور این کانی نشانگر آن است که ماگما از سری مگنتیت (سری I) می‌باشد. اما مهم‌ترین کانی‌سازی فلزی در منطقه، مربوط به مس است که البته بی ارتباط با بنتونیت و سنگ میزبان آن می‌باشد. واحد آندزیت بازالتی موجود در شمال منطقه‌ی مورد مطالعه، شاهد حضور کانی‌سازی مس به صورت کربناته‌ی آن یعنی مالاکیت می‌باشد که می‌تواند در پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار گیرد.

## ۵- دگرسانی

فرآیند دگرسانی موجب می‌شود کانی‌هایی که در اعماق زمین و در حرارت و فشار بالا تشکیل شده‌اند، در سطح زمین ناپایدار شده و کانی‌های جدیدی را تشکیل دهند. کانی‌های رسی و سیلیسی محصول نهایی این فرآیند هستند. شکل‌گیری کانی‌های رسی از سنگ‌های آتشفشانی می‌تواند در اثر هوازدگی، دیازنز<sup>۱۱</sup> دغنی، دگرگونی مجاورتی، تبلور فاز گازی، فعالیت‌های گرمایی، خروج آب‌های زیرزمینی و ته نشست در دریاچه‌های قلیایی و اعماق دریا ایجاد شود. به طور معمول در فرآیند دگرسانی، ویژگی‌های شیمیایی سنگ والد کنترل‌کننده‌ی اصلی نوع و ترکیب محصولات دگرسانی است. با وجود این، تأثیر شرایط محیطی امری انکارناپذیر است؛ به عنوان مثال شرایط اسیدی منجر به تشکیل کائولینیت به جای اسمکتیت می‌گردد [۱۰].

شدت دگرسانی در واحدهای منطقه، ضعیف تا متوسط ارزیابی می‌شود و دگرسانی‌های غالب به ترتیب پروپلیتیک، کربناتی، آرژیلیک، سیلیسی و ژئولیتی می‌باشد (شکل ۵).

کانی‌های دگرسانی موجود در نمونه‌های سنگی منطقه‌ی مورد مطالعه شامل کربنات (به احتمال فراوان کلسیت)، کلریت، اپیدوت، ژئولیت و اکسیدهای آهن می‌باشد که کربنات‌ها و اپیدوت، از تجزیه‌ی پلاژیوکلازهای حدواسط تا بازیک (الیگوکلاز - آندزین و کمی لابرادوریت) طی فرایند کربناتی شدن (شکل ۶-الف) و اپیدوتی شدن ایجاد شده‌اند. کانی کلریت از تجزیه‌ی

<sup>11</sup> Diagenesis

کانی‌های مافیک موجود (هورنبلند، پیروکسن و اولیوین) و گاه‌ها در اثر دگرسانی پلاژیوکلازها ایجاد شده است (شکل ۶ - ب) [۹]. درواقع محلول‌های ماگمایی یا گرمابی غنی از Fe, Mg و Al در سنگ‌های آذرین در دمای مناسب (بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد)، موجب تشکیل کلریت می‌شوند [۱۶].

در نمونه‌های آندزیتی شدت و میزان دگرسانی کربناتی، پروپلیتیک و سیلیسی گسترده‌تر می‌باشد و دگرسانی ژئولیتی در نمونه‌های بازالتی فراوان‌تر است؛ زیرا در مطالعه‌ی مقاطع نازک چنین به نظر می‌رسد که محلول، کانی ثانویه‌ی ژئولیت را به همراه خود آورده و حفرات را پر نموده است (شکل ۶ - پ). اکسید آهن نیز یا نتیجه‌ی ورود رگچه‌ها به سنگ می‌باشد (رگچه‌های اکسید آهنی یا رگچه‌های کربناته که کانی‌سازی فلزی به‌صورت گوتیت یا هماتیت همراه با این رگچه‌ها است)، یا حاصل دگرسانی پیروکسن است و یا حاصل اپاسیتی شدن کانی‌های گروه آمفیبول می‌باشد. دگرسانی آرژیلیک باعث تشکیل کانی‌های رسی مثل مونتورینیت، ایلیت و بیدلیت گردیده است و رخداد کانی‌سازی بنتونیت، در اثر تخریب و تجزیه و یا دگرسانی واحدهای آذرآواری توفی و نیز واحدهای آتشفشانی پالئوسن-ائوسن که به دلیل فعالیت گسلی شدید در منطقه، شرایط مکانی مناسبی را برای تشکیل این ماده‌ی معدنی فراهم نموده‌اند، بوده است.

محلول‌های ماگمایی، گرمابی یا دگرگونی غنی از سیلیس در شرایط مناسب، سیلیس خود را برجای می‌گذارند. عوامل مهم و موثر در ته نشینی سیلیس کاهش فشار، دما و pH محلول است [۱۶].

#### ۶- پردازش داده‌های ماهواره‌ای

پایه و اساس سنجش از دور، بر اندازه‌گیری بازتابشی پدیده‌ها از راه دور استوار می‌باشد. بدین ترتیب بدون تماس مستقیم با اشیاء روی زمین، می‌توان آن عوارض را بازشناسی نمود. بسیاری از کانسارها از جمله نهشته‌ی بنتونیتی شیرمغز گیسور، به وسیله‌ی سیالاتی به نام محلول‌های گرمابی نهشته شده‌اند که سنگ میزبان را مورد هجوم قرار داده است. در حین پیدایش مواد معدنی، این محلول‌ها با سنگ میزبان به طور شیمیایی واکنش نشان داده و در نتیجه‌ی آن، کانی‌های سنگ میزبان با فاصله‌ای قابل ملاحظه فراسوی محل تمرکز کانسار نیز دگرسان می‌شوند [۱۷]. مانند آنچه در منطقه‌ی مورد مطالعه و نواحی اطراف آن قابل مشاهده است (شکل ۸ و ۹).

سنگ‌های میزبان دگرسان شده، حاوی مجموعه کانی‌های ثانویه‌ی مشخص تحت عنوان کانی‌های دگرسانی می‌باشند که این کانی‌ها جانشین کانی‌های اصلی شده‌اند. با توجه به این‌که دگرسانی گرمابی در نفوذپذیری، تراکم، تخلخل، وزن مخصوص و خصوصاً رنگ و سایر مشخصات فیزیکی و شیمیایی سنگ‌های میزبان تغییراتی به وجود می‌آورد، لذا با استفاده از روش‌های مختلف ژئوفیزیکی مانند روش‌های مقاومت سنجی، لرزه‌ای و مغناطیس سنجی، می‌توان گسترش قائم انواع دگرسانی را پیش‌بینی نمود. استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی، مستلزم صرف هزینه‌ی زیاد و زمان طولانی است؛ لذا در مواردی که این محدوده‌ها تا حد زیادی شناخته شده باشند، برای بررسی‌های دقیق‌تر می‌توانند مورد توجه واقع گردند [۱۷]. در پژوهش حاضر به منظور کاهش هزینه و زمان، از تصاویر ماهواره‌ای برای تشخیص کانی‌های ثانویه‌ی حاصل از دگرسانی در مقیاس منطقه‌ای استفاده شده است.

بارزسازی کانی‌های رسی و کانی‌های خانواده‌ی ژئولیت در تصویر ماهواره‌ای ASTER، پردازش شده با نرم افزار ENVI 4.5 نشان داد که طیف متنوعی از کانی‌های رسی و ژئولیتی در منطقه‌ی مورد مطالعه و نواحی اطراف آن پراکندگی دارند (شکل ۸ و ۹).

به منظور تفکیک کانی‌های نامبرده، از روش نقشه بردار زاویه طیفی (Spectral Angle Mapper) استفاده شده است. این روش نوعی طبقه بندی نظارت شده (Supervised Classification) است که از مقایسه‌ی طیف تصاویر و طیف استاندارد یا کتابخانه‌ی طیفی استفاده می‌کند. کانی‌های هیدروکسیل دار مانند کانی‌های رسی، به دلیل اینکه در پهنه‌های دگرسان شده فراوان هستند، دارای اهمیت می‌باشند [۱۸]. در منطقه‌ی مورد مطالعه، طیف‌های موجود در پیکسل‌های تصویر ASTER با کتابخانه‌ی طیفی دیجیتالی سازمان زمین شناسی ایالات متحده آمریکا (USGS) که در نرم افزار ENVI 4.5 موجود هستند، مورد مقایسه قرار گرفت. در این روش انواع کانی‌های رسی نظیر مونتورینیت، ساپونیت، نانترنیت و هکتوریت به عنوان شاخص دگرسانی آرژلیک و به منظور پی‌جویی ذخایر معدنی بنتونیتی در منطقه استفاده شد. همچنین کانی‌های زئولیتی مانند استیلپیت، کلینوپتیولیت، موردنیت و هولاندیت نیز به جهت تایید حضور آن‌ها در نهشته‌ی بنتونیتی شیرمغز گیسور در نتایج آنالیزهای XRD، مورد پردازش ماهواره‌ای قرار گرفتند. همچنین برای ارزیابی دقت تصاویر ماهواره‌ای در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، داده‌ها ابتدا زمین مرجع و سپس بازتابی مکانی شده‌اند [۱۷]. در این مرحله از پژوهش، مراحل بازسازی و ساختن تصاویر کاذب رنگی انجام گردید و در نهایت با روش طبقه بندی نظارت شده، داده‌ها روی تصویر پیاده شدند.

## ۷- ژئوشیمی

از آنجایی که دگرسانی در منطقه‌ی مورد مطالعه در شدت‌های بالا مشاهده نمی‌شود، نمونه‌های سنگی نیز در کنار نمونه‌های کانی‌سازی مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفتند. نتایج این تجزیه‌ها در جداول ۲ و ۳ نمایش داده شده است. با استفاده از نتایج تجزیه‌ی شیمیایی نمونه‌های سنگی و کانی‌سازی و نیز استفاده از نمودارهای ژئوشیمیایی، تلاش شده است تا تغییرات بین سنگ میزبان و ماده‌ی معدنی و محیط تشکیل کانسار مورد بررسی قرار گیرد.

**نمودار سه‌تایی  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-MgO}$  (AFM):** با پیاده کردن عناصر اصلی در این نمودار، تغییرات ترکیب بنتونیت‌ها را می‌توان مورد بررسی قرار داد [۱۹]. همانطور که در نمودار AFM مشخص است (شکل ۱۰-الف)، تمام نمونه‌های بنتونیتی در قطب  $\text{Al}_2\text{O}_3$  قرار گرفته‌اند. این بدان معناست که در درجه‌ی اول، از شیشه یا شار<sup>۱۲</sup> سیلیسی به وجود آمده‌اند و در درجه‌ی دوم، در طی فرایند دیاژنز کمی  $\text{Fe}^{2+}$  در زئولیت‌های حاصل از بنتونیت‌ها، جانشین  $\text{Mg}^{2+}$  در مکان‌های هشت وجهی شده است.

**نمودار سه‌تایی  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{-CaO-MgO}$ :** با پیاده کردن اکسید کاتیون‌های مختلف در نمودارهای مثلثی، می‌توان روند پاراژنری را در بنتونیت‌ها و زئولیت‌ها بررسی کرد [۱۹]. با پیاده کردن اکسید کاتیون‌های موجود در بنتونیت‌ها و زئولیت‌های منطقه‌ی مورد مطالعه در این نمودار، نتایج زیر به دست آمد:

شیمی بنتونیت‌ها و زئولیت‌ها احتمالاً بازتاب‌کننده‌ی فعالیت‌های شیمیایی یون‌های سیالات منفذی در زمان تشکیل آن‌ها می‌باشد. برای اطلاع از درصد جانشینی کاتیون‌ها نسبت به یکدیگر، می‌توان از نمودار مثلثی  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{-CaO-MgO}$  استفاده نمود [۱۹]. رسم داده‌های مربوط به منطقه‌ی مورد مطالعه روی این نمودار (شکل ۱۰-ب)، نشان داد که کاتیون‌های پتاسیم و سدیم، اصلی‌ترین کاتیون‌ها در اسمکتیت‌ها و زئولیت‌ها بوده و بیشترین تبادل کاتیونی را دارند. با این توصیف، لازم است

<sup>12</sup> Shard

درصد جانشینی این کاتیون‌ها ذکر شود. همان‌طور که در شکل ۱۰-ب مشاهده می‌شود، در بیش از ۵۰ درصد نمونه‌های بنتونیت، کاتیون‌های پتاسیم و سدیم جانشین کلسیم و منیزیم شده‌اند.

**نمودار دوتایی  $(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)-(\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ :** از نمودار  $(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)-(\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  می‌توان برای به دست آوردن فراوانی عناصر و کاتیون‌های مختلف در بنتونیت‌ها استفاده کرد [۱۹]. با رسم داده‌های مختلف مربوط به بنتونیت‌ها در این نمودار (شکل ۱۰-پ) نتایج زیر به دست آمد:

با افزایش مقدار  $(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$  از میزان  $(\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  کاسته می‌شود. درواقع، یک شیب منفی بین آن‌ها برقرار است. بنابر آن‌چه که در این نمودار مشاهده می‌شود، در طول دیاژنز و با افزایش عمق، سیلیسیم، منیزیم و کلسیم از محیط خارج و بر میزان سدیم افزوده شده است که حضور کانی‌های رسی سدیم‌دار چون بیدلیت و مونت‌موریونیت در نتایج آنالیز XRD، موید این موضوع می‌باشد.

برای تعیین نوع سنگ به‌وجود آورنده‌ی این نهشته‌ی بنتونیتی، می‌توان از نمودار (Christidis&Dunham, 1997)  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ ، نمودار  $\text{FeO}+\text{TiO}_2$ ،  $\text{MgO}$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Jensen, 1976) و نمودار AFM (Irvine & Baragar, 1971) استفاده کرد [۱۹].

**نمودار دوتایی  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  (Christidis&Dunham, 1997):** پس از رسم داده‌های مربوط به بنتونیت‌های منطقه در این نمودار (شکل ۱۰-ت)، مشاهده می‌شود که شیب به وجود آمده برای نمونه‌ها مثبت است. در نتیجه، سنگ‌های به وجود آورنده‌ی این نهشته‌ی بنتونیتی عمدتاً دارای ترکیب اسیدی بوده‌اند.

**نمودارهای سه تایی  $\text{FeO}+\text{TiO}_2$ ،  $\text{MgO}$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Jensen, 1976) و AFM (Irvine & Baragar, 1971):** استفاده از این دو نمودار، سری ماگمایی به وجود آورنده‌ی این سنگ‌های آتشفشانی را نشان می‌دهد (شکل‌های ۱۱-الف، ب) [۱۹]. همان‌طور که در شکل‌های ۱۱-الف و ب مشخص است، سنگ‌های به وجود آورنده‌ی نهشته‌ی بنتونیتی مزبور عمدتاً داسیتی است؛ اما آندزیت‌ها و به میزان کمتر بازالت‌ها نیز در تولید آن نقش داشته‌اند و نیز در محدوده‌ی سنگ‌های سری کالک آلکالن قرار دارند. ولی به علت متحرک‌تر بودن پتاسیم نسبت به سدیم و با توجه به این‌که بنتونیت‌ها سدیم را بیشتر از آب دریا جذب می‌کنند، همچنین با توجه به باقی ماندن پتاسیم تا مقادیر ۴/۲۳، ۵/۷۶ و حتی ۷/۱۸ (جدول ۱) در نمونه‌ها، به نظر می‌رسد که سنگ تشکیل دهنده‌ی این نهشته‌ی بنتونیتی دارای پتاسیم بیشتری از این میزان بوده و درواقع ماگمای تشکیل دهنده‌ی این بنتونیت‌ها احتمالاً قلیایی بوده است. حضور کانی‌هایی نظیر سانیدین در نمودارهای آنالیز XRD نیز موید این موضوع می‌باشد (شکل ۷).

**نمودارهای دوتایی  $\text{Zr}/\text{TiO}_2*0.0001$  و  $\text{SiO}_2/\text{Zr}/\text{TiO}_2*0.0001$ :** از این نمودارهای رده‌بندی عمومی سنگ‌ها، می‌توان برای تشخیص نوع سنگ به وجود آورنده‌ی بنتونیت‌ها کمک گرفت [۱۹]. نمودارهای عناصر جزئی که برای تعیین ترکیب ماگمای مولد سنگ آذرین به کار برده می‌شوند، می‌توانند برای تعیین منشأ و ترکیب ماگمای اولیه بنتونیت‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرند. استفاده‌ی انتخابی از عناصر بی‌حرکی همچون  $\text{Zr}$ ،  $\text{Nb}$  و  $\text{Y}$  در این قبیل نمودارها، خطای ناشی از اتلاف عنصری در طول دگرسانی به کانی‌های رسی طی تکوین ذخایر بنتونیتی را به حداقل می‌رساند. لذا با ترسیم یافته‌های وابسته به بنتونیت‌ها و سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری در نمودار  $\text{Zr}/\text{TiO}_2*0.0001$ -Nb/Y (Winchester and Floyd, 1977)، ترکیب اولیه‌ی بنتونیت‌های منطقه مشخص می‌گردد [۲۰].

با رسم داده‌های مربوط به نمونه‌های بنتونیت منطقه‌ی مورد مطالعه در نمودارهای رده‌بندی سنگ‌ها (شکل ۱۱-پ و ت)، این نمونه‌ها عمدتاً در محدوده‌های ریوداسیت، داسیت و تراکی آندزیت قرار گرفته‌اند. ولی چنانچه تمام نمودارهای مختلف در ارتباط با نوع سنگ تولید کننده بازنگری شود، چنین به نظر می‌رسد که در مجموع نوع سنگ به وجود آورنده‌ی این بنتونیت‌ها، عمدتاً اسیدی تا حدواسط (داسیتی تا تراکی آندزیتی) بوده است.

در مورد عناصر کمیاب و نادر خاکی نیز می‌توان بیان داشت که ترکیب سنگ مادر، منشأ اصلی عناصر  $\text{Cd}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Pb}$  و  $\text{Be}$  موجود در داخل بنتونیت مورد مطالعه می‌باشد. البته فرآیندهای بعد از هوازگی در محیط، بر روی غنی‌شدگی و تهی‌شدگی این عناصر تاثیر می‌گذارد. مقدار نیکل را می‌توان با جایگزینی این عنصر با آهن و منیزیم موجود در سنگ مادر توجیه کرد. همچنین منشأ اصلی کادمیوم و نیوبیوم موجود را می‌توان در ارتباط با حضور این عناصر در بیوتیت‌های موجود در سنگ مادر دانست. جذب سطحی کادمیوم به وسیله‌ی رس، اصلی‌ترین فرآیند کنترل کننده‌ی کادمیوم در بنتونیت‌هاست. مقدار کم کبالت در نمونه‌های بنتونیت این نهشته می‌تواند در ارتباط با ترکیب سنگ مادر باشد و ارتباطی به عوامل ژئوشیمیایی محیط تشکیل بنتونیت ندارد. بریلیم نیز می‌تواند از سنگ مادر و مقادیر جزئی نمک طعام موجود در بنتونیت نشأت گرفته باشد [۲۱].

#### ۸- تست‌های صنعتی

نتایج به دست آمده از کاربردهای این ذخیره در تست‌های صنعتی مربوط به صنایع حفاری چاه‌های نفت و گاز، ریخته‌گری و گندوله‌سازی آهن، برای نمونه‌ی منتخب BH1 و نمونه‌ی معرف کل TOTAL در جداول ۳ تا ۸ آمده است و در انتها نظر قطعی در مورد کارایی یا عدم کارایی ذخیره‌ی بنتونیت شیرمغز گیسور در این صنایع ارائه خواهد شد.

طبق نتایج حاصل از تست‌های صنعتی بنتونیت شیرمغز گیسور برای استفاده به عنوان گل حفاری در چاه‌های نفت و گاز (جدول ۳ تا ۷)، نمونه‌ها خواصی مشابه آب (سیال نیوتونی) از خود نشان دادند و فاقد حداقل خواص لازم برای انتقال خرده‌های حاصل از حفاری به سطح زمین می‌باشند. بنتونیت مورد استفاده در صنعت نفت و گاز، بایستی دارای حداقل استاندارد نقطه واروی باشد تا بتواند خرده‌ها را در حین سکون سیال در خود معلق نگه دارد و همین طور بایستی حداقل گرانیوی را داشته باشد تا قادر باشد خرده‌های حفاری را با سرعت مناسبی به سطح زمین انتقال بدهد که در مجموع این خواص، احتیاج به یک سیال غیر نیوتونی دارد. در مجموع مقادیر قرائت شده از نظر این صنعت، در پایین ترین رده قرار دارند و لذا این ذخیره مناسب استفاده به این منظور نخواهند بود. گرچه به عنوان خنک‌کننده‌ی سرمته‌ی حفاری قابل استفاده است.

طبق نتایج حاصل از تست‌های صنعتی بنتونیت شیرمغز گیسور برای استفاده در ریخته‌گری (جدول ۸) و با مقایسه داده‌های حاصله با استاندارد مربوطه، نشان داد که بنتونیت مذکور جهت مصرف در واحدهای ریخته‌گری به عنوان یک بنتونیت متوسط از نظر کیفیت قابل مصرف می‌باشد. از سویی برای گندوله‌سازی کانه‌ی آهن، حالت مناسب ۹۰-۷۰٪ مونتموریونیت، ۴۴ میکرومتر با ۱۰٪ رطوبت و مقادیر حدود ۶۰ درصد سیلیکا، ۸-۱۲ درصد آلومینا و ۲-۴ درصد اکسید سدیم است (جدول ۸) که می‌تواند مقادیر مناسبی در جهت این کاربرد باشد. با در نظر گرفتن این خصوصیات و مقایسه با نتایج حاصل از تست صنعتی صورت گرفته، گندوله‌سازی آهن به عنوان یکی از مناسب ترین کاربردهای بنتونیت شیرمغز گیسور معرفی می‌گردد.

#### برداشت

مهم‌ترین نتایج حاصل از بررسی‌های صورت گرفته در نهشته‌ی بنتونیتی شیرمغز گیسور از قرار زیر هستند:

۱- واحدهای آتشفشانی منطقه‌ی مورد مطالعه، در طیف اسیدی تا حدواسط و قدری مافیکی بوده و همگی به سن دوران سنوزویک و دوره‌های پالئوسن - ائوسن می‌باشند. این واحدها دارای بافت‌های پورفیری، پورفیری - میکرولیتی، بادامکی، تراکیتی یا جریان‌ی و گلومروپورفیری هستند. واحدهای مزبور شامل هورنبلند آندزیت، پیروکسن آندزیت، بازالت، هورنبلند بازالت، آندزیت بازالت، تراکی آندزیت و تراکیت می‌باشند. تشکیل نهشته‌ی بنتونیتی شیرمغز گیسور عمدتاً در اثر دگرسانی سنگ‌های مادر داسیتی - تراکی آندزیتی - آندزیتی به وقوع پیوسته است. شاخص دگرسانی برای این بنتونیت‌ها به دلیل جای‌گیری سدیم، کلسیم و پتاسیم، از حد انتظار پایین‌تر است و دگرسانی‌های شدید در منطقه مشاهده نمی‌شود.

۲- سن کانی‌سازی بنتونیت، جوان‌تر از سنگ‌های مادر خود که به سن پالئوسن - ائوسن هستند، ارزیابی می‌شود و سن ائوسن تا الیگوسن (اواسط تا اواخر دوره‌ی پالئوژن) برای آن بسیار محتمل به نظر می‌رسد.

۳- بررسی‌های کانی‌شناسی نشان می‌دهند که بیدلیت، مونتموریونیت، کوارتز، کریستوبالیت، آلبیت، ارتوکلاز، سانیدین، موردنیت و کلینوپتیلولیت کانی‌های اصلی و ژیپس، ایلیت، آنورتیت و موردنیت، کانی‌های فرعی تشکیل دهنده‌ی نهشته‌ی بنتونیتی شیرمغز گیسور هستند.

۴- از دیدگاه کاربردهای صنعتی، ذخیره‌ی معدنی موردنظر مجموعاً برای گل حفاری چاه‌های نفت و گاز مناسب نمی‌باشد اما برای مصرف در صنایع ریخته‌گری و به ویژه گندوله‌سازی آهن، مناسب ارزیابی می‌شود.

۵- این ذخیره در یک نوار اصلی با روند شمال غربی - جنوب شرقی گسترش دارد و داخل تپه‌های ماهرهای به رنگ خاکستری - سفید که متشکل از رسوبات کواترنری هستند و عمدتاً در زیر قشری از کنگلومرای ائوسن محبوس شده‌اند، جای گرفته است. رفتار عناصر اصلی، فرعی، جزئی و خاکی نادر در این نهشته، تابعی از عواملی چون اختلاف در شدت دگرسانی مواد خاستگاه، دگرسانی فلدسپارها، شاردهای شیشه‌ای و سنگ‌های منشا، حاکم بودن pH اسیدی و درجه‌ی تغییرات آن، سازوکار جذب، تبادلات یونی، تمرکز فیزیکی و تفاوت در میزان پایداری کانی‌ها در مقابل دگرسانی بوده و تغییرات عنصری طی بنتونیتی‌شدن، در یک سیستم باز انجام شده است.

۶- بررسی‌های ژئوشیمیایی نشان می‌دهند که بنتونیت‌ها دارای ترکیب اولیه‌ی داسیتی، ریوداسیتی تا تراکی آندزیتی هستند.

۷- براساس داده‌های عناصر اصلی، فرعی، جزئی و خاکی نادر، پیشنهاد می‌شود که طی فرآیند تبدیل سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری ائوسن به این نهشته‌ی بنتونیتی، رفتار این عناصر در این ذخیره تابعی از عواملی نظیر دگرسانی و هیدرولیز فلدسپارهای سنگ اولیه، هتروژنی پروتولیت، تلفیق ساختاری و قرارگیری در موقعیت‌های بین لایه‌ای کانی‌های رسی بازماندی بوده است.

#### قدردانی:

از همکاری و همراهی‌های بی دریغ آقای مهندس شاهین پورمند، مدیریت محترم آزمایشگاه تجزیه‌کنندگان کانسارهای بلورین آمیست شرق مشهد و آقای مهندس حمید حافظی، مسئول کارگاه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد که در پیشبرد اهداف این پژوهش مساعدت فرمودند و نیز گروه محترم زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد که امکان بازدید و نمونه‌برداری از منطقه‌ی مورد مطالعه و مطالعات میکروسکوپی متعاقب آن را فراهم نمودند، نهایت سپاسگزاری و قدردانی خویش را اعلام می‌نمایم.

منابع:

۱- ظهرا، ا.، حدادان، م.، ۲۰۱۰، برگه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ نوده (شماره‌ی برگه: ۷۸۵۸)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

۲- نخعی، م.، کریم پور، م.، ح.، ابراهیمی، خ.، ۱۳۸۱، ژئوشیمی و کانی‌شناسی بنتونیت‌های خراسان و مطالعه مصرف آن‌ها در صنعت ریخته‌گری (در مناطق فردوس، بیرجند، قاینات و طبس)، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد گرایش زمین‌شناسی اقتصادی، صفحات ۲۴ تا ۴۶.

۳- مهروری، ر.، نقره‌ئیان، م.، مکی زاده، م.، ع.، کوهساری، الف. ح.، جعفری، ر.، ۱۳۸۷، آلتراسیون‌های هیدروترمال (بنتونیت زایی و سیلیس‌زایی) در سنگ‌های ولکانیک و پیروکلاستیک، گردنه‌ی ملا احمد، جنوب غرب نائین، شانزدهمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، صفحات ۱ تا ۶.

[4] Grim R. E., Guven N., "Bentonites, geology, mineralogy, properties and uses", Development in Sedimentology 24: Elsevier Amsterdam. (1978).

۵- آقا نباتی، س. ع.، ۱۳۸۹، زمین‌شناسی ایران، چاپ سوم، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.

۶- گودرزی، م.، محمدی، س. س.، زرین کوب، م. ح.، ۱۳۹۳، سنگ‌شناسی، ژئوشیمی و جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی ترشیری سلم آباد (جنوب شرق سریشه) شرق ایران، مجله‌ی زمین‌شناسی اقتصادی، جلد ۶، شماره‌ی ۲، صفحات ۲۱۷ تا ۲۳۴.

۷- مکی پور، م.، محمدی، س. س.، زرین کوب، م. ح.، ۱۳۹۰، مطالعه‌ی زمین‌شناسی و کانی‌شناسی پهنه‌ی بنتونیتی گلاب (سریشه، خاور ایران)، سومین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۸- فتاحی، ش.، کلاگری، ع. الف.، عابدینی، ع.، باقری، ه.، ۱۳۹۴، کانی‌شناسی و زمین‌شیمی ذخیره‌ی بنتونیت تمینان، جنوب باختر نائین، استان اصفهان، مجله‌ی بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال بیست و سوم، شماره‌ی سوم، صفحات ۳۹۱ تا ۴۰۲.

۹- فلاحی، ح.، زرین کوب، م.، محمدی، س. س.، ۱۳۹۰، زمین‌شناسی، پتروگرافی و دگرسانی واحدهای ولکانیکی شمال آرین‌شهر (شمال بیرجند)، دانشگاه شهید چمران اهواز، سومین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران.

۱۰- ملک محمودی، ف.، خلیلی، م.، ۱۳۹۱، بررسی رفتار عناصر در فرآیند دگرسانی آندزیت-بازالت به بنتونیت در کوه طشتاب خور، شمال شرق استان اصفهان، مجله‌ی زمین‌شناسی اقتصادی، جلد ۴، شماره‌ی ۱، صفحات ۱۰۹ تا ۱۲۱.

[11] Moraes, D.S., Angelica, R.S., Costa, C.E.F., Rocha Filho, G.N., Zamian, J.R., 2010, Mineralogy and chemistry of a new bentonite occurrence in the eastern Amazon region, northern Brazil, Applied Clay Science 48: 475–480.

[12] Allo, W.A., Murray, H.H., 2004, Mineralogy, chemistry and potential applications of a white bentonite in San Juan province, Argentina, Applied Clay Science 25: 237-243.

[13] Mutakyahwa, M.K.D., 2002, Mineralogy and chemistry of bentonite (?) deposits at Minjingu, Lake Manyara, North Tanzania, Journal of African Earth Sciences 34: 213–221.

[14] Bankovic, P., Milutinovic-Nikolic, A., Mojovic, Z., Jovic-Jovicic, N., Perovic, M., Spasojevic, V., Jovanovic, D., 2013, Synthesis and characterization of bentonites rich in beidellite with incorporated Al or Al-Fe oxide pillars, *Microporous and Mesoporous Materials* 165: 247–256.

[15] Modabberi, S., Namayandeh, A., López-Galindo, A., Viseras, C., Setti, M., Ranjbaran, M., 2015, Characterization of Iranian bentonites to be used as pharmaceutical materials, *Applied Clay Science* 116–117: 193–201.

۱۶- کریم پور.م، سعادت.س، ۱۳۸۹، زمین‌شناسی اقتصادی کاربردی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، چاپ چهارم، صفحات ۷۶ تا ۸۵.

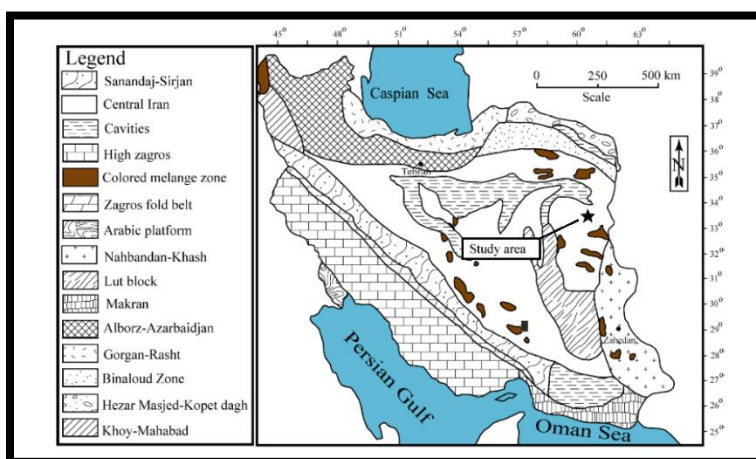
۱۷- پیروان.ج.ر، غیومیان.ج، امینی.ص، لطفی.م، ۱۳۸۲، شناسایی و تفکیک زون‌های آلتراسیون هیدروترمال و سنگ‌های ماگمایی با استفاده از فن و دانش سنجش از دور، مجله‌ی پژوهش و سازندگی، شماره ۶۰، صفحات ۸۰ تا ۸۷.

۱۸- جاویدی مقدم.م، کریم پور.م.ج، ابراهیمی.خ، ملک زاده شفاوردی.الف، حیدریان شهری.م.ج، ۱۳۹۱، بارزسازی زون‌های آلتراسیون با استفاده از روش نقشه‌برداری زاویه‌ی طیفی و بررسی پتانسیل کانه‌زایی در منطقه‌ی چشمه خوری، خراسان جنوبی، چهارمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران.

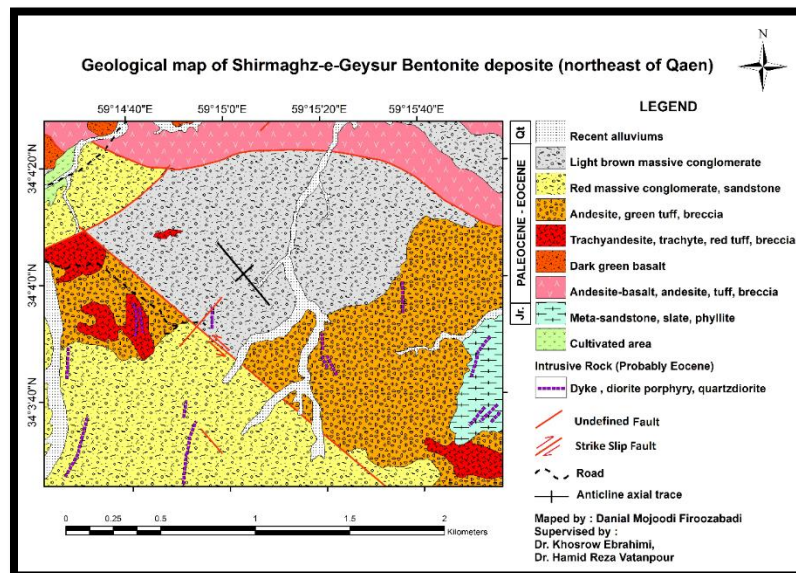
۱۹- مهدیزاده شهری.ج، ربانی.م.ص، بازرگانی گیلانی.ک، ایراجیان.ع.الف، ۱۳۸۵، مطالعه‌ی بنتونیت‌ها و ژئولیت‌های منطقه‌ی معلمان (جنوب دامغان)، با نگاهی به کانسار بنتونیت سوسن‌وار و ژئولیت گندی، مجله‌ی علوم زمین، سال شانزدهم، شماره ۶۱، صفحات ۱۲۴ تا ۱۳۹.

۲۰- سلیمانی متین.ع، عابدینی.ع، علیپور.ص، ۱۳۹۲، ژئوشیمی عناصر اصلی، فرعی، و جزئی ذخیره‌ی بنتونیت ورزقان ترکمان‌چای، شمال غرب میانه، استان آذربایجان شرقی، شمال غرب ایران، اولین همایش زمین‌شیمی کاربردی ایران.

۲۱- خاتمی شال.ه، پاکزاد.ج.ر، انصاری اصل.م، ۱۳۹۱، مطالعه‌ی رفتار عناصر  $\text{Be}$  و  $\text{Pb}$ ،  $\text{Ni}$ ،  $\text{Nb}$ ،  $\text{Co}$ ،  $\text{Cd}$  در کانسار بنتونیت تاق‌دیس آبگرم (شمال شرق اصفهان)، سی و یکمین همایش علوم زمین.



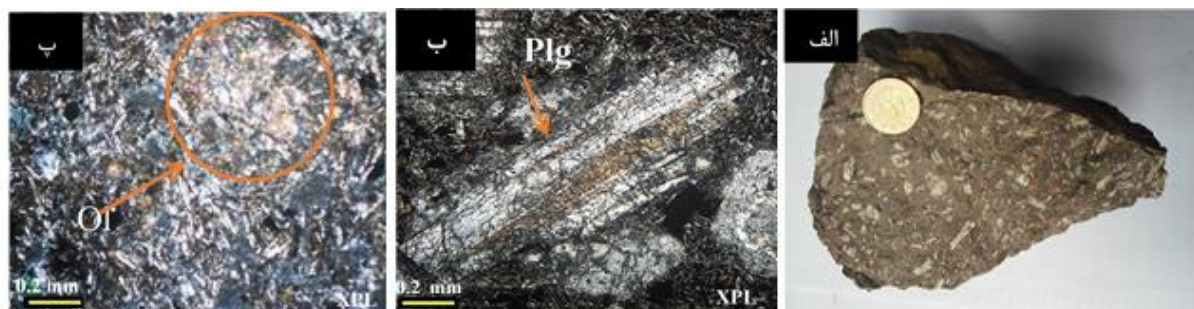
شکل ۱- موقعیت زمین‌ساختی منطقه‌ی مورد مطالعه (نهشته‌ی بنتونیتی شیرمغز گیسور)



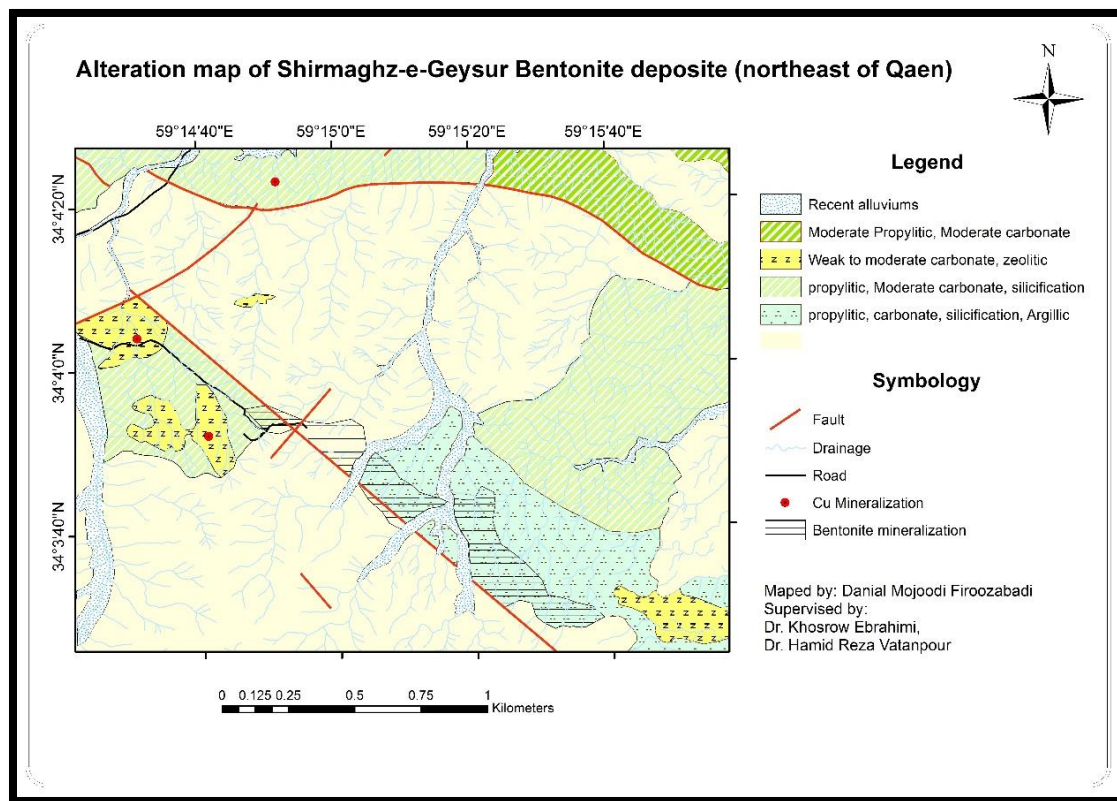
شکل ۲- نقشه‌ی زمین شناسی ۱:۴۰۰۰ نهشته‌ی بنتونیتی شیرمغز گیسور (شمال شرق قائن)



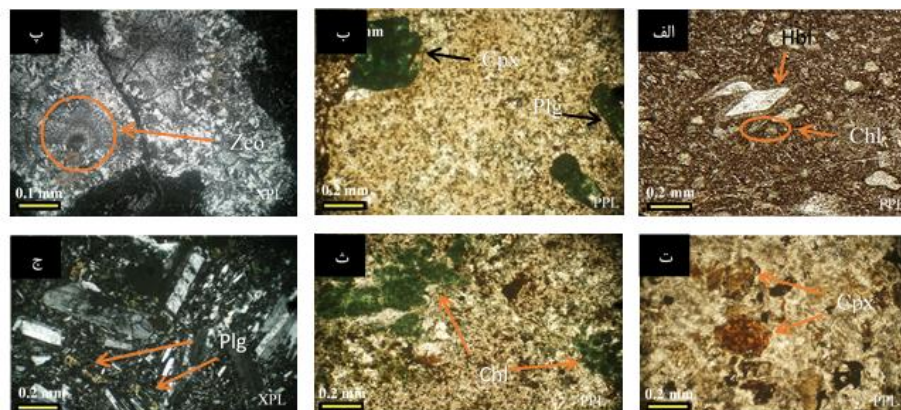
شکل ۳- الف- فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و پیروکسن در پیروکسن دیوریت پورفیری، ب- دایک دیوریت پورفیری تزریق شده در واحد کنگلومرای، پ- بافت جریان‌ی در پیروکسن تراکیت و دگرسانی کربناتی شدن (رنگ قهوه‌ای).



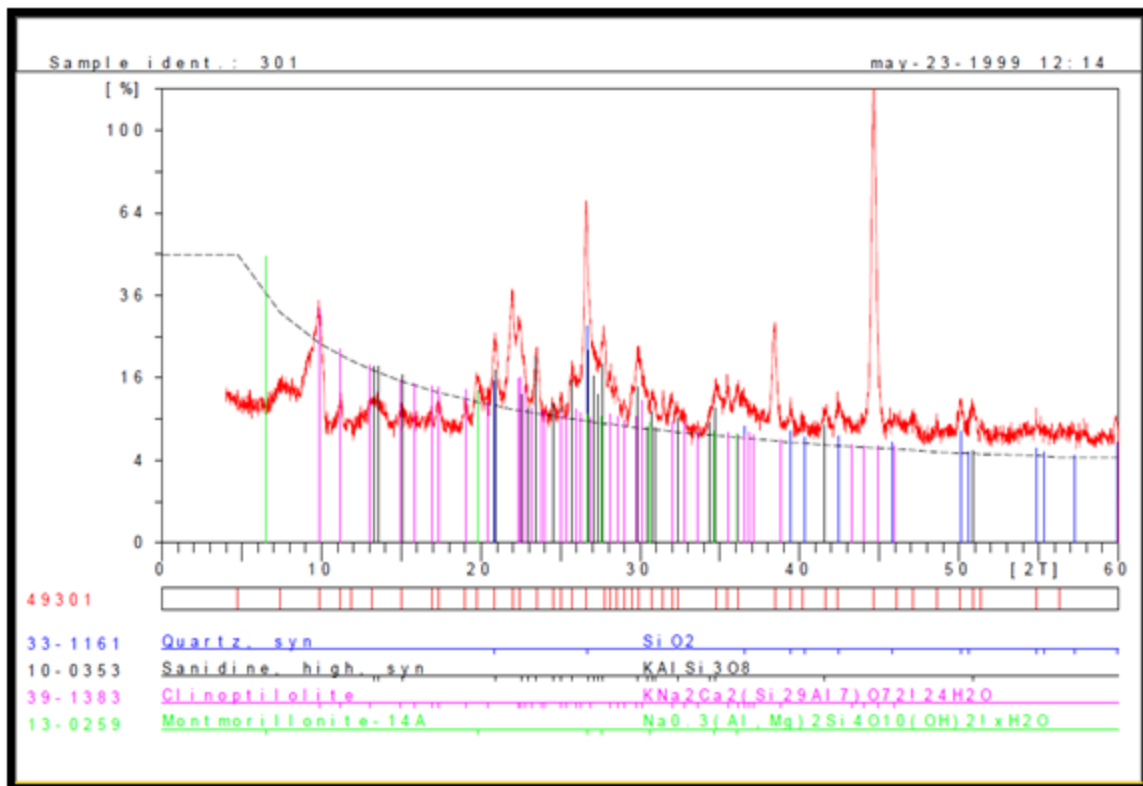
شکل ۴- الف- بافت بادامکی در بازالت، پرشدن حفرات با کانی ثانویه ی زئولیت و سیلیس، ب- مگاکریست های پلاژیوکلاز در زمینه ی میکروولیتی هورنبلند آندزیت، پ- کانی الیون تخریب شده و رخ داد دگرسانی پروپلیتیک در بازالت.



شکل ۵- نقشه‌ی دگرسانی و کانی‌سازی ۱:۱۴۰۰۰ نهشته‌ی بنتونیتی شیرمغز گیسور (شمال شرق قائن).

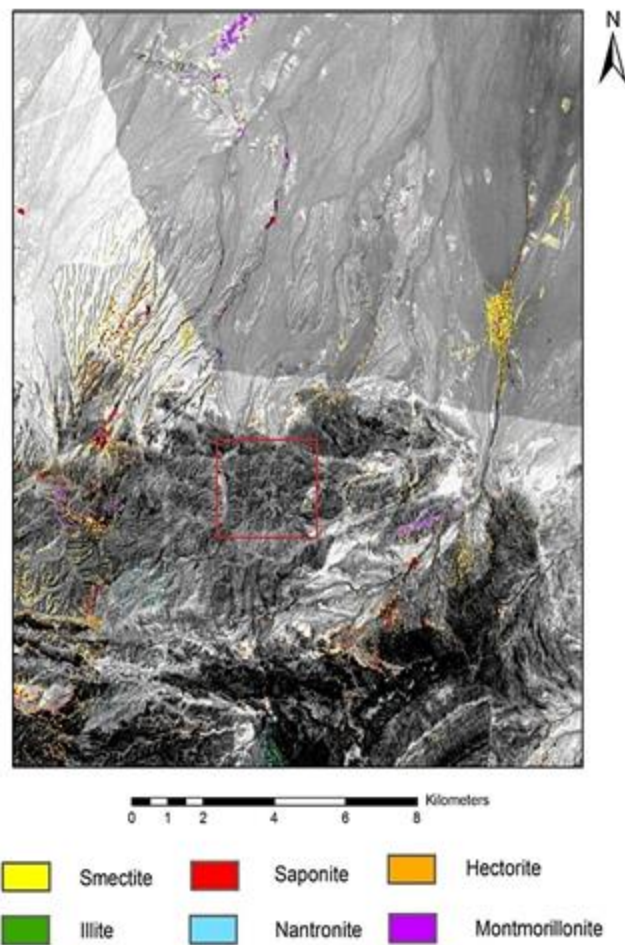


شکل ۶- الف- بلورهای کشیده هورنبلند کربناته شده در هورنبلند بازالت و حضور کلریت در قالب دگرسانی پروپلیتیک، ب- دگرسانی پروپلیتیک، تبدیل پیروکسن و پلاژیوکلاز به کلریت، پ- دگرسانی زئولیتی در مقطع نازک بازالت، ت- دگرسانی کربناتی شدن در بلورهای شش وجهی پیروکسن، ث- دگرسانی پروپلیتیک در قالب کانی کلریت و فراوانی اکسید آهن (رنگ قهوه‌ای)، ج- تبدیل فنوکریست‌های پلاژیوکلاز به کربنات، شاخصی از دگرسانی کربناتی.

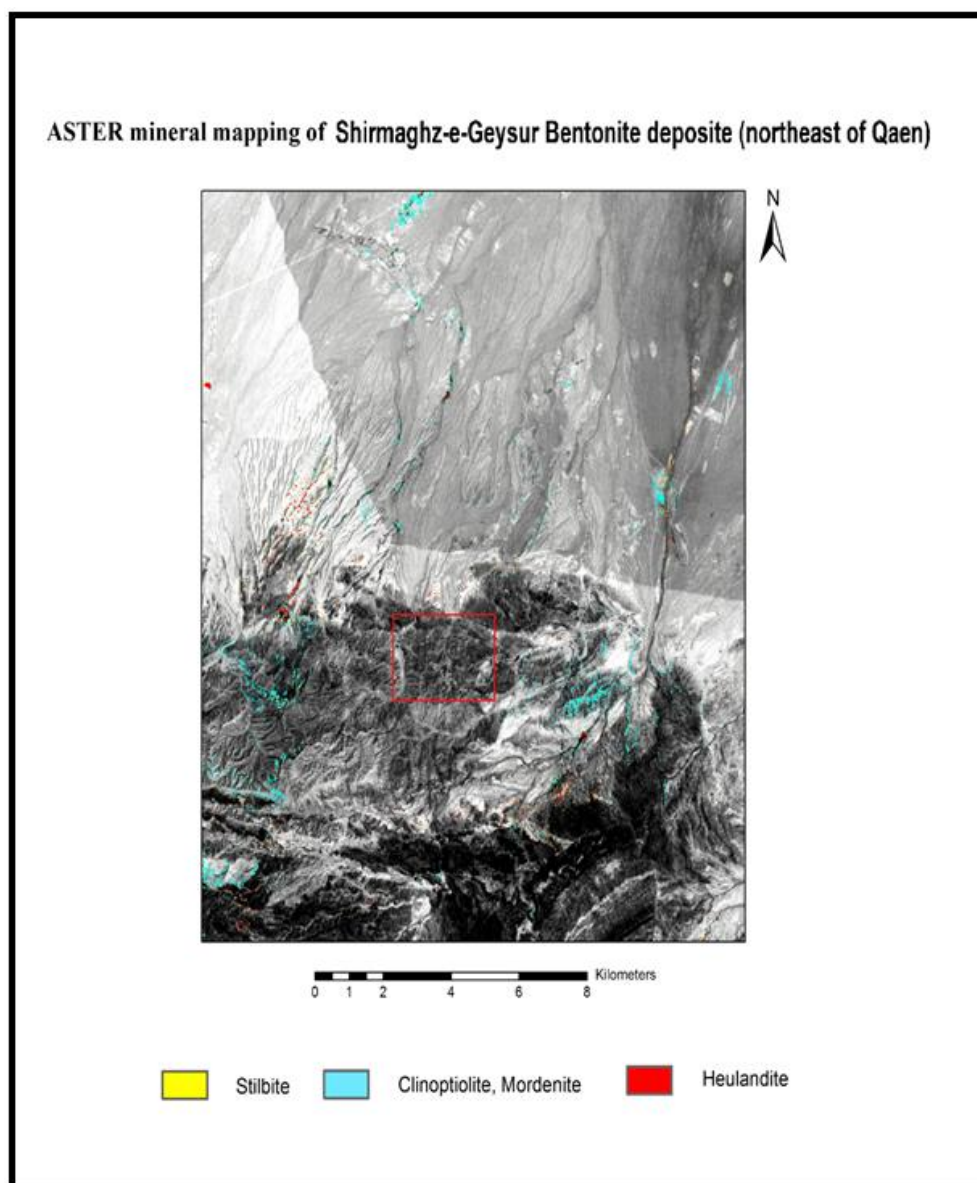


شکل ۷- گراف آنالیز کانی‌شناختی یکی از نمونه‌های بنتونیتی مورد مطالعه به روش XRD

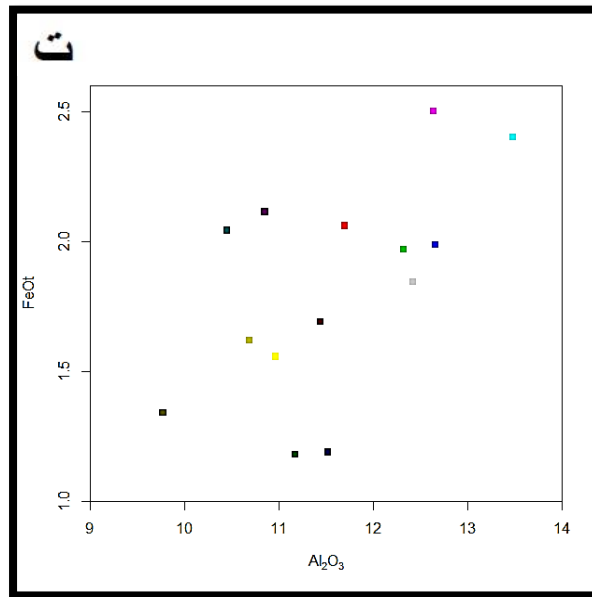
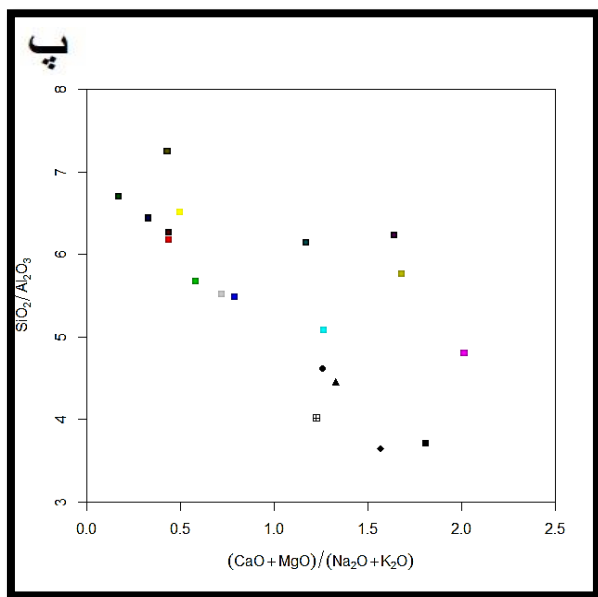
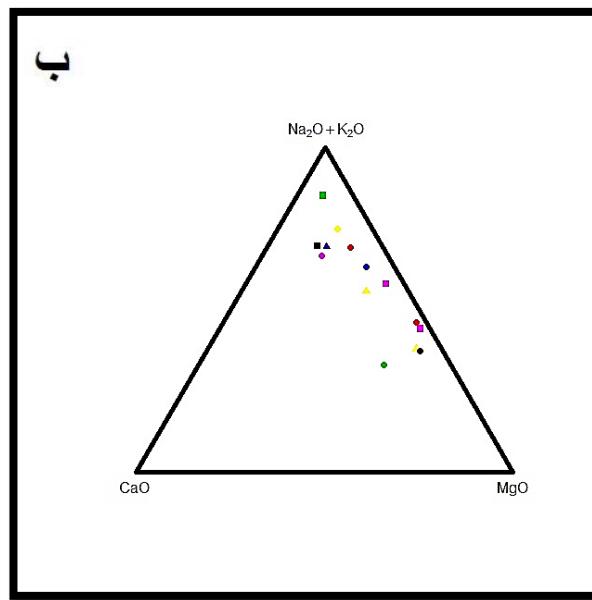
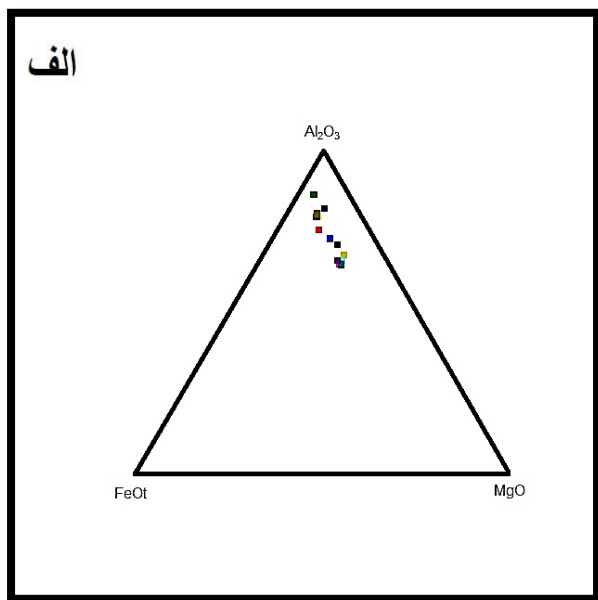
# ASTER mineral mapping of Shirmaghz-e-Geysur Bentonite deposit (northeast of Qaen)



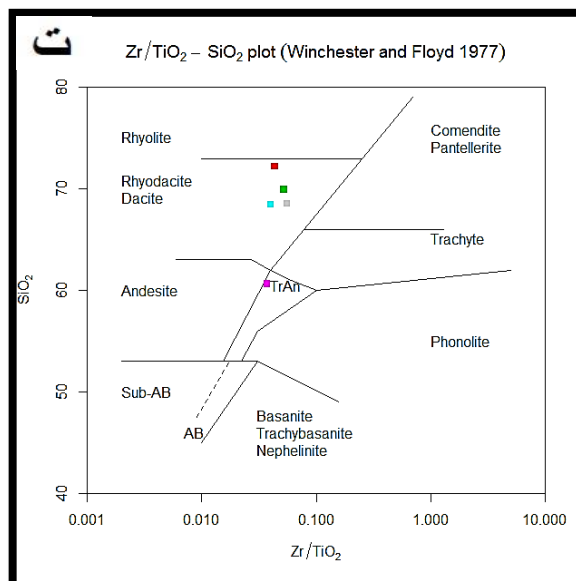
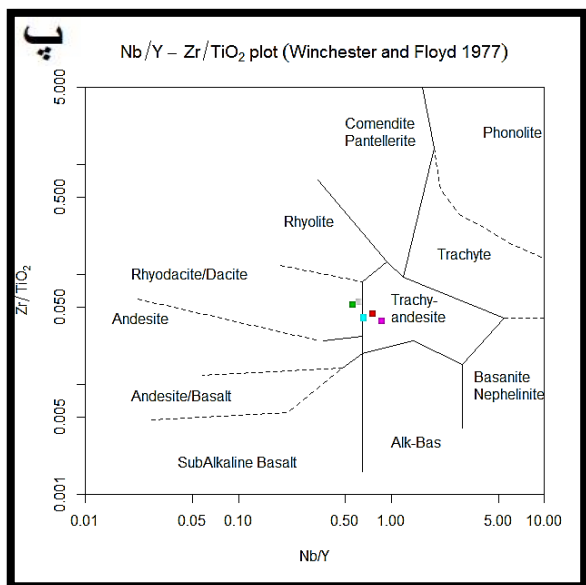
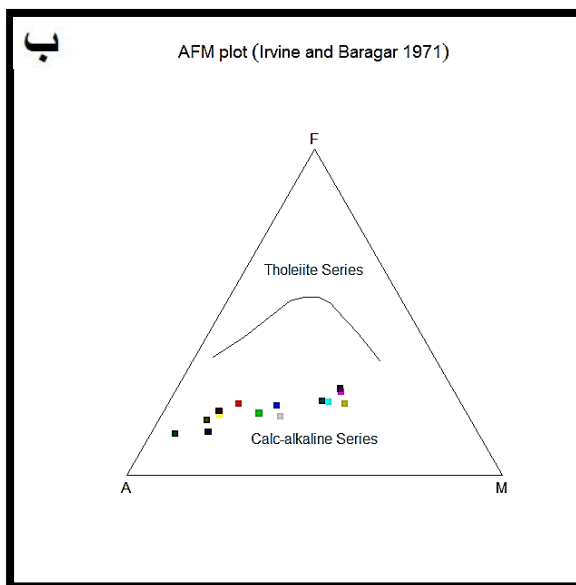
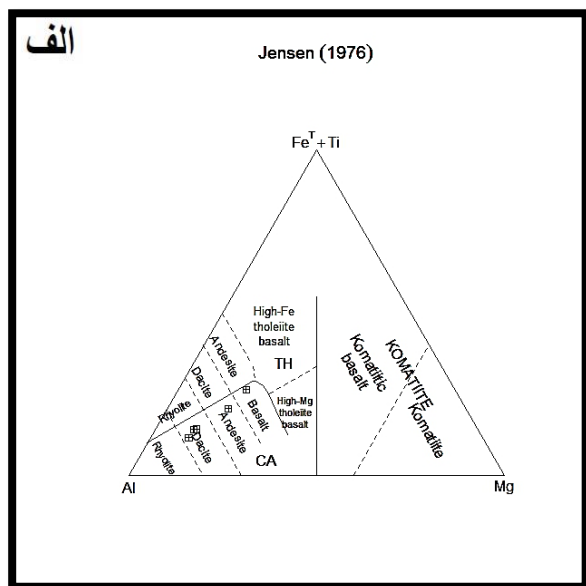
شکل ۸- بارزسازی کانی‌های رسی در تصویر ماهواره‌ای ASTER، پردازش شده با نرم افزار ENVI 4.5؛ چارگوش تقریبی نهشته‌ی بنتونیتی شیرمغز گیسور، با چهارضلعی قرمز رنگ مشخص شده است.



شکل ۹- بارزسازی کانی‌های خانواده‌ی زئولیت در تصویر ماهواره‌ای ASTER، پردازش شده با نرم افزار ENVI 4.5؛ چارگوش تقریبی نهشته‌ی بنتونیتی شیرمغز گیسور، با چهارضلعی قرمز رنگ مشخص شده است.



شکل ۱۰- الف- نمودار سه‌تایی  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-MgO}$  (AFM) [۱۹] و موقعیت نمونه‌های نهشته‌ی بنتونیتی شیرمغز گیسور، ب- نمودار سه‌تایی  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{-CaO-MgO}$  [۱۹]، پ- نمودار دوتایی  $(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)\text{-(CaO+MgO)/(Na}_2\text{O+K}_2\text{O)}$  [۱۹]، ت- نمودار دوتایی  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  (Christidis&Dunham,1997) [۱۹].



شکل ۱۱-الف- نمودار سه تایی (Jensen, 1976)  $\text{FeO}_t + \text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ؛ [۱۹]؛ نمونه‌های سنگ مادر بنتونیت شیرمغز گیسور عمدتا در محدوده‌ی داسیتی قرار گرفته‌اند، ب- نمودار سه تایی (Irvine & Baragar, 1971) AFM؛ [۱۹]؛ نمونه‌های سنگ مادر کانی‌سازی بنتونیت شیرمغز گیسور در موقعیت سری کالک آلکالن قرار گرفته‌اند، پ- نمودار دوتایی  $\text{SiO}_2 - \text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.0001$ ؛ [۱۹]؛ نمونه‌های سنگ مادر کانی‌سازی بنتونیت شیرمغز گیسور در محدوده‌ی ریوداسیت/داسیت تا تراکی آندزیت قرار گرفته‌اند. ت- نمودار دوتایی  $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.0001 - \text{Nb}/\text{Y}$ ؛ [۱۹]؛ نمونه‌های سنگ مادر کانی‌سازی بنتونیت شیرمغز گیسور، عمدتا در موقعیت ریوداسیت/داسیت قرار گرفته‌اند.

**جدول ۱- نتایج آنالیز شیمیایی اکسیدهای اصلی نمونه‌های بنتونیت شیرمغز گیسور به روش XRF (با دستگاه Philips Analytical X-Ray)**

| Sample                           | MB1   | MB2   | MB3   | MB4   | MB5   | MB6   | MB7   | MB8   | MB9   | MB10  | Average |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| SiO <sub>2</sub> %               | ۶۸/۳۲ | ۷۲/۲۰ | ۶۹/۹۱ | ۶۹/۴۲ | ۶۸/۴۲ | ۶۰/۶۲ | ۷۱/۳۶ | ۷۱/۷۱ | ۷۴/۸۶ | ۶۴/۱۸ | ۶۹/۱    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | ۱۲/۴۲ | ۱۱/۷۰ | ۱۲/۳۲ | ۱۲/۶۶ | ۱۳/۴۸ | ۱۲/۶۴ | ۱۰/۹۶ | ۱۱/۴۴ | ۱۱/۱۷ | ۱۰/۴۵ | ۱۱/۹۲   |
| Na <sub>2</sub> O %              | ۳/۴۵  | ۲/۰۶  | ۳/۰۰  | ۱/۹۵  | ۳/۰۹  | ۲/۲۴  | ۱/۲۹  | ۱/۶۸  | ۰/۳۶  | ۲/۹۹  | ۲/۲۱    |
| MgO %                            | ۳/۳۰  | ۱/۷۹  | ۲/۶۹  | ۲/۷۶  | ۴/۵۸  | ۴/۳۵  | ۱/۳۰  | ۱/۲۹  | ۰/۶۲  | ۳/۷۰  | ۲/۶۴    |
| K <sub>2</sub> O %               | ۱/۶۸  | ۳/۵۰  | ۲/۷۴  | ۲/۶۷  | ۰/۶۸  | ۰/۶۹  | ۴/۲۳  | ۳/۹۸  | ۷/۱۸  | ۰/۳۱  | ۲/۷۷    |
| TiO <sub>2</sub> %               | ۰/۳۳  | ۰/۴۰  | ۰/۳۱  | ۰/۳۳  | ۰/۳۷  | ۰/۳۷  | ۰/۳۴  | ۰/۳۲  | ۰/۲۸  | ۰/۲۸  | ۰/۳۳    |
| MnO %                            | ۰/۰۲  | ۰/۰۲  | ۰/۰۲  | ۰/۰۲  | ۰/۰۲  | ۰/۰۲  | ۰/۰۲  | ۰/۰۲  | ۰/۰۲  | ۰/۰۲  | ۰/۰۲    |
| CaO %                            | ۰/۳۹  | ۰/۶۵  | ۰/۶۴  | ۰/۸۹  | ۰/۱۸  | ۱/۵۵  | ۱/۴۳  | ۱/۱۸  | ۰/۶۶  | ۰/۱۶  | ۰/۷۷    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %  | ۰/۰۴  | ۰/۰۵  | ۰/۰۴  | ۰/۰۴  | ۰/۰۵  | ۰/۰۳  | ۰/۰۵  | ۰/۰۵  | ۰/۰۴  | ۰/۰۲  | ۰/۰۴    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % | ۲/۰۵  | ۲/۲۹  | ۲/۱۹  | ۲/۲۱  | ۲/۶۷  | ۲/۷۸  | ۱/۷۳  | ۱/۸۸  | ۱/۳۱  | ۲/۲۷  | ۲/۱۴    |
| So <sub>3</sub> %                | ۰/۱۶  | ۰/۱۲  | ۰/۰۰  | ۰/۰۰  | ۰/۲۶  | ۱/۰۵  | ۰/۰۰  | ۰/۰۰  | ۰/۰۰  | ۰/۰۵  | ۰/۱۶    |
| LOI %                            | ۶/۲۹  | ۵/۰۴  | ۵/۲۵  | ۶/۸۱  | ۶/۰۲  | ۱۳/۵۱ | ۷/۰۸  | ۶/۲۰  | ۳/۴۰  | ۱۴/۲۴ | ۷/۳۸    |
| Total                            | ۹۸/۴۵ | ۹۹/۸۲ | ۹۹/۱۱ | ۹۹/۷۶ | ۹۹/۸۲ | ۹۹/۸۵ | ۹۹/۷۹ | ۹۹/۷۵ | ۹۹/۹  | ۹۸/۶۷ | -       |

**جدول ۲- نتایج آنالیز شیمیایی عناصر فرعی و جزئی نمونه‌های بنتونیت شیرمغز گیسور به روش ICP-MS برحسب ppm**

| Sample | MB1   | MB2   | MB3   | MB5   | MB6   |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| As     | ۲/۹   | ۷/۲   | ۴/۱   | ۵/۶   | ۸/۷   |
| Ba     | ۴۶    | ۸۷    | ۵۳    | ۶۴    | ۱۲۱   |
| Be     | ۳     | ۳     | ۲     | ۲     | ۲     |
| Bi     | ۰/۳۵  | ۰/۳   | ۰/۴   | ۰/۳۶  | ۰/۳۷  |
| Cd     | <۰/۰۲ | ۰/۰۳  | ۰/۰۴  | <۰/۰۲ | ۰/۰۳  |
| Co     | ۵/۷   | ۶/۵   | ۶/۱   | ۵/۸   | ۶/۰   |
| Cr     | ۴     | ۱۰    | ۷     | ۶     | ۱۲    |
| Cu     | ۱۵/۲  | ۱۰/۲  | ۱۶/۴  | ۱۳/۹  | ۱۱/۶  |
| Eu     | ۰/۵   | ۰/۴   | ۰/۷   | ۰/۸   | ۰/۶   |
| La     | ۲۶/۶  | ۳۱/۱  | ۲۹/۱  | ۲۷/۸  | ۳۰/۳  |
| Mo     | ۰/۱۸  | ۰/۱   | ۰/۲۲  | ۰/۳   | ۰/۲۷  |
| Nb     | ۱۴/۸۸ | ۱۶/۱۳ | ۱۵/۴۶ | ۱۵/۱۱ | ۱۶/۵۷ |
| Ni     | ۱۱/۴  | ۹/۸   | ۱۱/۹  | ۱۰/۸  | ۹/۱   |
| Pb     | ۱۱/۰۷ | ۹/۹   | ۱۷/۲  | ۱۳/۱  | ۱۹/۴  |
| Rb     | ۴۷/۶  | ۴۹/۱  | ۴۶/۴  | ۴۵/۸  | ۴۴/۷  |
| S      | ۰/۱۱  | ۰/۲۶  | ۰/۵۱  | ۰/۳۹  | ۰/۶۵  |
| Sb     | ۱/۳۲  | ۱/۱۶  | ۱/۹۳  | ۱/۶۱  | ۲/۱۳  |
| Sc     | ۵/۶   | ۴/۷   | ۶/۱   | ۶/۹   | ۸/۲   |

|    |       |       |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| Sn | ۳/۸   | ۴     | ۳/۹   | ۳/۷   | ۳/۸   |
| U  | ۴     | ۴/۵   | ۳/۳   | ۴     | ۳/۷   |
| V  | ۱۷    | ۲۷    | ۲۲    | ۱۹    | ۲۵    |
| W  | ۱/۴   | ۲     | ۱/۷   | ۱/۳   | ۱/۱   |
| Y  | ۲۴/۱  | ۲۱/۴  | ۲۷/۶  | ۲۲/۹  | ۱۹/۱  |
| Zn | ۳۴/۲  | ۴۳/۶  | ۳۵/۴  | ۳۷/۳  | ۴۱/۲  |
| Zr | ۱۸۲/۸ | ۱۷۳/۹ | ۱۶۱/۸ | ۱۴۷/۳ | ۱۳۸/۶ |
| Th | ۲۲    | ۲۰/۱  | ۱۹/۵  | ۲۳/۸  | ۱۸/۹  |

جدول ۳- بررسی خواص فیزیکی بنتونیت نمونه‌ی BH1 جهت کاربرد در گل حفاری چاه‌های نفت و گاز

| نتیجه آزمون | مقدار در نمونه | مقدار استاندارد          | التزام                                          |
|-------------|----------------|--------------------------|-------------------------------------------------|
| مردود       | ۵              | حداقل ۳۰                 | قرائت گرانیروی سنج در دور ۶۰۰ بر دقیقه          |
| قبول        | ۰/۵            | حداکثر ۳                 | نسبت نقطه واروی (نقطه ییلد) به گرانیروی پلاستیک |
| مردود       | ۶۶             | حداکثر ۱۵                | حجم فیلترات (میلی لیتر)                         |
| مردود       | ۱۰/۶           | حداکثر کسر جرمی ۴/۰ درصد | باقی مانده جامدات قطر بزرگ تر از ۷۵ میکرون      |

جدول ۴- نتایج اندازه گیری جذب آب و اندیس تورم نمونه BH1

| Sample | Swell Index | Water Absorption Next 1 hour | Water Absorption Next 2 hours | Water Absorption Next 4 hours | Water Absorption Next 24 hours |
|--------|-------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
|        |             | %                            | %                             | %                             | %                              |
| BH1    | <8          | 176.81                       | 171.87                        | 184.81                        | 188.65                         |

جدول ۵- نتایج اندازه گیری آزمون های حجم فیلتر (Filterate Volume) و ضخامت کیک گل (Mud Cake Thickness) نمونه BH1

| نمونه | حجم فیلترات (ml) | ضخامت کیک گل (mm) | حجم فیلترات نمونه استاندارد (ml) |
|-------|------------------|-------------------|----------------------------------|
| BH1   | ۶۶               | ۱/۸۵              | حداکثر ۱۵/۰                      |

جدول ۶- نتایج اندازه گیری آزمون های رفتاری سیالات غیر نیوتونی شامل گرانیروی پلاستیک و نقطه واروی نمونه BH1

| نمونه | قرائت در دور ۳۰۰ بر دقیقه (R300)                    | قرائت نمونه استاندارد در دور ۶۰۰ بر دقیقه | قرائت در دور ۶۰۰ بر دقیقه (R600) |                  |
|-------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|------------------|
|       | ۳                                                   | حداقل ۳۰                                  | ۵                                |                  |
|       | نسبت نقطه واروی به گرانیروی پلاستیک نمونه استاندارد | نسبت نقطه واروی به گرانیروی پلاستیک       | نقطه واروی (ییلد)                | گرانیروی پلاستیک |
| BH1   | حداکثر ۳                                            | ۰/۵                                       | ۱                                | ۲                |

جدول ۷- بررسی خواص فیزیکی بنتونیت نمونه‌ی TOTAL جهت کاربرد در گل حفاری چاه‌های نفت و گاز

| نتیجه<br>آزمون | مقدار در نمونه | مقدار استاندارد          | التزام                                          |
|----------------|----------------|--------------------------|-------------------------------------------------|
| مردود          | ۵              | حداقل ۳۰                 | قرائت گرانیروی سنج در دور ۶۰۰ بر دقیقه          |
| قبول           | ۰/۵            | حداکثر ۳                 | نسبت نقطه واروی (نقطه ییلد) به گرانیروی پلاستیک |
| مردود          | ۶۶             | حداکثر ۱۵                | حجم فیلترات (میلی لیتر)                         |
| مردود          | ۸              | حداکثر کسر جرمی ۴/۰ درصد | باقی مانده جامدات قطر بزرگ تر از ۷۵ میکرون      |

جدول ۸- تست صنعتی (آنالیز فیزیکی) جهت تعیین کیفیت بنتونیت شیرمغز گیسور در صنعت ریخته‌گری و گندوله‌سازی آهن

| ردیف | شرح آزمایش                               | نمونه | توضیحات          |
|------|------------------------------------------|-------|------------------|
| ۱    | اندیس تورم ۲ گرمی نمونه ساده             | ۲۶    |                  |
| ۲    | اندیس تورم ۲ گرمی نمونه فرآوری شده       | ۲۷    |                  |
| ۳    | اندیس تورم ۵ گرمی نمونه ساده             | —     |                  |
| ۴    | اندیس تورم ۵ گرمی نمونه فرآوری شده       | —     |                  |
| ۵    | اندیس ژله نمونه ساده پس از ۸ ساعت        | ۱۷    |                  |
| ۶    | اندیس ژله نمونه ساده پس از ۲۴ ساعت       | ۱۸    |                  |
| ۷    | اندیس ژله نمونه فرآوری شده پس از ۸ ساعت  | ۲۰    |                  |
| ۸    | اندیس ژله نمونه فرآوری شده پس از ۲۴ ساعت | ۲۵    |                  |
| ۹    | PH نمونه ساده                            | ۷/۵   |                  |
| ۱۰   | PH نمونه فرآوری شده                      | ۱۰    | افزایش با فرآوری |
| ۱۱   | درصد مونت موریونیت نمونه ساده            | ۷۴    |                  |
| ۱۲   | درصد مونت موریونیت نمونه فرآوری شده      | ۷۳    |                  |