

کانی‌شناسی، زمین شیمی، خاستگاه و فرآیندهای دگرسانی بنتونیت و سنگ‌های میزبان آن در

منطقه جنت‌آباد (جنوب‌شرق سریشه، شرق ایران)

ملیحه نخعی^{۱*}، سید سعید محمدی^۲

۱- گروه مهندسی معدن، دانشکده معدن، عمران و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳- گروه پژوهشی علوم زمین، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

nakhaei@birjandut.ac.ir

تاریخ تنظیم: ۱۴۰۵/۴/۱۰

چکیده

در منطقه جنت‌آباد، بنتونیت‌ها حاصل دگرسانی توف‌ها و گدازه‌های حاد واسط تا اسیدی (آندزیت، تراکی‌آندزیت، داسیت) با ماهیت کالک‌آلکان هستند. نتایج XRD نشان می‌دهد مونت موریلونیت کانی غالب است و همراه با کریستوبالیت، آنورتیت، میکروکلین و مقادیر کمی کائولینیت، کوارتز و کلینوپتیلولیت حضور دارد. تیمار حرارتی و اتیلن‌گلیکول، مونت موریلونیت بودن اسمکتیت را تأیید می‌کند. تصاویر SEM تجمع ذرات ریز اسمکتیت را نشان می‌دهد. داده‌های EDS ترکیب سیلیکاته-آلومینوسیلیکاته با عناصر فرعی Fe، K، Na و Ca را مشخص می‌کند. نتایج XRF و ICP-MS نشان می‌دهد گدازه‌ها و بنتونیت‌ها در محدوده ریوداسیتی-داسیتی و تراکی‌آندزیتی با سری کالک‌آلکان مرتبط با پهنه فروانش قرار داشته و الگوی REE منشأ مشترک ماگمایی را تأیید می‌کند. موازنه جرم نیز غنی‌شدگی SiO_2 و کاهش قلیایی‌ها را نشان می‌دهد که با دگرسانی هیدروترمال و تشکیل مونت موریلونیت سازگار است. گسل‌های سریشه-نه‌بندان و قلعه‌سرخ به‌عنوان کنترل‌های ساختاری، نقش مهمی در هدایت محلول‌های هیدروترمال و تشکیل بنتونیت‌ها داشته‌اند.

کلمات کلیدی: بنتونیت- مونت موریلونیت- کالک‌آلکان- دگرسانی هیدروترمال- حاشیه فعال قاره‌ای

Mineralogy, geochemistry, origin, and alteration processes of bentonites and their host rocks in the Jannatabad area (Southeast of Sarbisheh, east Iran)

Malihe Nakhaei^{1*}, Seyyed Saeid Mohammadi²

1-Department of mining engineering, Faculty of mining, civil, chemistry, Birjand university of technology, Birjand, Iran

2-Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran

Abstract

In the Jannatabad area, bentonites formed as a result of the alteration of intermediate to acidic tuffs and lavas (andesite, trachyandesite, dacite) belonging to a calc-alkaline series. XRD results show that montmorillonite is the dominant mineral, accompanied by cristobalite, anorthite, microcline, and minor amounts of kaolinite, quartz, and clinoptilolite. Thermal and ethylene glycol treatments confirm the montmorillonitic nature of smectite. SEM images show aggregates of fine smectite particles. EDS data indicate a silicate–aluminosilicate composition with minor Fe, K, Na, and Ca elements. XRF and ICP-MS results show that the lavas and bentonites fall within the rhyodacite–dacite and trachyandesite range of a subduction-related calc-alkaline series, and the REE patterns suggest a common magmatic affinity.

Mass balance also shows SiO_2 enrichment and depletion of alkalis, consistent with hydrothermal alteration and montmorillonite formation. The Sarbisheh–Nehbandan and Qaleh–Sorkh faults, as structural controls, have played an important role in guiding hydrothermal fluids and the formation of bentonites.

Keywords

Bentonite, Montmorillonite, Calc-alkaline volcanics, Hydrothermal alteration, Active continental margin

مقدمه

بنتونیت یک ماده رسی طبیعی است که عمدتاً از کانی مونت موریلونیت با ساختار لایه‌ای ۲:۱ تشکیل شده و شامل دو لایه تتراهدرال سیلیسی و یک لایه اکتاهدري آلومینیومی است. وجود بار منفی در شبکه بلوری و حضور کاتیون‌های قابل تبادل در فضای بین‌لایه‌ای، عامل اصلی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فرد این کانی محسوب می‌شود [۱-۷]. مونت موریلونیت با فرمول $(\text{Na}, \text{Ca})_{0.33}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ در محیط‌های مختلف کانی‌سازی، دچار تغییرات ترکیبی می‌شود و بنتونیت حاصل، به دلیل ساختار متخلخل، سطح ویژه بالا، ظرفیت زیاد تبادل یونی، نفوذپذیری کم و خاصیت تورم‌پذیری، کاربرد گسترده‌ای در حوزه‌های مهندسی، شیمی، محیط‌زیست و علم مواد دارد [۳]. فعالیت‌های آتشفشانی سنوزوئیک باعث رخدادهای متعدد بنتونیت در نقاط مختلف ایران مانند پهنه‌های سمنان-ترو، البرز-آذربایجان، تفرش-تکاب، زاگرس، ایران مرکزی و شرق ایران شده است. بسیاری از ذخایر مهم بنتونیت ایران در شرق کشور و به‌ویژه در استان خراسان جنوبی واقع شده است. این ذخایر عمدتاً در ارتباط با سنگ‌های آتشفشانی ائوسن هستند. منطقه مورد مطالعه در ۲۵ کیلومتری جنوب شرق سربیشه و در جنوب غرب روستای جنت آباد در استان خراسان جنوبی در بخش جنوب شرقی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سربیشه [۸] واقع بوده و دارای موقعیت جغرافیایی $29^{\circ} 56' 42''$ تا $29^{\circ} 59' 00''$ طول شرقی و $59^{\circ} 30' 05''$ تا $59^{\circ} 33' 25''$ عرض شمالی است. براساس تقسیم‌بندی زمین‌شناسی و ساختمانی ایران، برخی از محققین منطقه سربیشه را بخشی از بلوک لوت [۹] و عده‌ای آن را در حدفاصل زمین درز سیستان و لوت معرفی نموده‌اند [۱۰، ۱۱]. رویدادهای زمین‌ساختی مختلف در شرق ایران و به‌ویژه بلوک لوت، باعث رخداد حجم عظیم

ماگماتیسیم ترشیری (آتشفشانی و نفوذی) با ویژگی‌های ژئوشیمیایی مختلف شده [۹،۱۲] و کانی‌سازی‌های مختلف فلزی و غیرفلزی را به همراه داشته است. گسل فعال نه‌بندان که مرز ساختاری پهنه لوت و زون سیستان را مشخص می‌کند، باعث دگرریختی‌های شدید در سنگ‌های اطراف خود شده است. این سامانه گسلی دارای امتداد کلی شمالی-جنوبی بوده و عمدتاً با حرکت امتدادلغز راست‌بر شناخته می‌شود. همچنین شاخه‌های فرعی فراوانی، به‌ویژه در بخش‌های انتهایی شمالی و جنوبی آن، توسعه یافته‌اند [۱۳]. فعالیتهای آتشفشانی اسیدی تاحدواسط ترشیری و عملکرد پهنه‌های گسلی در منطقه سربیشه، شرایط مناسبی را برای تشکیل بنتونیت به ویژه در نهشته‌های آذرآواری فراهم نموده است. در منطقه جنت آباد، سنگ‌های آتشفشانی- آذرآواری ترشیری رخنمون داشته و دگرسانی آنها باعث تشکیل بنتونیت شده است. هدف این مطالعه، بررسی دقیق ویژگی‌های سنگ‌شناسی، کانی شناسی و ترکیب زمین‌شیمیایی بنتونیت و سنگ‌های میزبان آن در منطقه جنت‌آباد (جنوب‌شرق سربیشه) است.

زمین شناسی

منطقه مورد مطالعه در بخش جنوب‌شرقی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سربیشه [۸]، قرار گرفته و واحدهای سنگی موجود به سه گروه اصلی شامل سنگ‌های رسوبی، سنگ‌های آتشفشانی- آذرآواری و رسوبات عهد حاضر تقسیم می‌شوند (شکل ۱). مطالعات پیشین نشان می‌دهد که سنگ‌های آتشفشانی منطقه سربیشه به‌صورت گدازه‌ای و آذرآواری (توف، آگلومرا و برش) با ترکیب حدواسط تا اسیدی شامل آندزیت، تراکی‌داسیت، داسیت و ریولیت (گاه با بافت پرلیتی) رخنمون دارند [۱۴-۱۷].

قدیمی‌ترین واحدهای موجود در محدوده مطالعاتی، سنگ‌های رسوبی شیل و ماسه‌سنگ کرتاسه (K_2^{sch}) هستند که رخنمون آنها عمدتاً در بخش جنوب‌غربی منطقه مشاهده می‌شود [۸] (شکل ۱). این واحدها دچار دگرگونی در حد رخساره شیست سبز (اسلیت-فیلیت) تا رخساره‌هایی با دگرگونی بالاتر شده‌اند و وجود چین‌خوردگی‌های شدید، سطوح شکستگی و درزه‌های فراوان به همراه رگچه‌هایی از کلسیت و سیلیس از ویژگی‌های بارز آنها به شمار می‌رود. بعلاوه، واحدهای متعلق به آمیزه افیولیتی (کرتاسه فوقانی) با ترکیب پریدوتیتی و روند کلی شمال‌غرب-جنوب‌شرق در مجاورت واحدهای رسوبی و گدازه‌های آندزیتی رخنمون دارند که شواهد دگرگونی ضعیف شامل تورق و تشکیل کانی‌های گروه سرپانتین را نشان می‌دهند [۸] (شکل ۱ و شکل ۲ الف و ب).

رخساره‌های پالئوزن (پالئوسن-ئوسن) در بخش شرقی محدوده شامل تناوبی از ژئیس، مارن‌های قهوه‌ای روشن و ماسه‌سنگ‌های متوسط‌لایه (E^m) هستند که به سمت غرب به واحدهایی متشکل از مارن، رس سنگ‌آهکی و ماسه‌سنگ‌های قرمز تا سبز همراه با لایه‌هایی از ژئیس و کنگلومرا (Eo^{sm}) تبدیل می‌شوند. ماسه‌سنگ و کنگلومرای قرمز تا ارغوانی متعلق به ئوسن-الیگوسن (Eo^{cob})

نیز در بخش جنوبی محدوده و حوالی روستای قلعه سرخ مشاهده می‌شود. (شکل ۱)

بر پایه داده‌های صحرایی، تکاپوی آتشفشانی منطقه از ائوسن پایانی آغاز شده است. پس از فعالیت‌های آتشفشانی ائوسن میانی و پایانی که عمدتاً ترکیب حدواسط و آندزیتی دارند، در زمان ائوسن پایانی-الیگوسن رخساره‌هایی متناوب از توف، برش، آگلومرا، آندزیت و داسیت در منطقه گسترش یافته است. در بخش‌های مرکزی و غربی محدوده، واحدهای آذرآواری متشکل از توف (EO^I) رخنمون دارند که در بخش‌های بالایی دارای ترکیب اسیدی هستند. واحد توفی در بخش مرکزی عمدتاً به صورت توف بلورین با رنگ صورتی کمرنگ و ساخت لایه‌ای مشاهده می‌شود.

واحد آتشفشانی EO^{ap} شامل گدازه‌های آندزیتی با رنگ خاکستری تیره تا روشن است که به صورت گنبدهایی با ساخت توده‌ای و گاه ستونی، بر روی واحدهای آذرآواری توفی که در بسیاری از بخش‌ها دچار دگرسانی آرژیلیک و بنتونیتی، شده‌اند، قرار گرفته است. رخنمون داسیت و آندزیت بر روی توف‌های بنتونیتی‌شده و توسعه پهنه‌های بنتونیتی در زیر این واحدها به وضوح قابل مشاهده است (شکل ۲ پ و ت). در این پهنه‌ها، به منظور بررسی و ارزیابی اقتصادی، ترانسه‌هایی در قالب عملیات طرح اکتشاف بنتونیت در واحدهای توفی بنتونیتی احداث شده است (شکل ۲ ث و ج). نهشته‌های آبرفتی کواترنری Qt_1 و Qt_2 نیز به صورت نهشته‌های کلاستیک سخت‌نشده در بخش‌هایی از محدوده مطالعاتی گسترش دارند.

از دیدگاه ساختاری، منطقه سربیشه به شدت تحت تأثیر عملکرد پهنه گسلی سربیشه و سرشاخه‌های آن قرار دارد. این پهنه گسلی با طول تقریبی ۶۰ کیلومتر در امتداد یکی از سرشاخه‌های گسل نه خاوری قرار گرفته و با ادامه به سمت جنوب به بخش اصلی گسل نه‌بندان متصل می‌شود می‌شود [۱۸]. گسل‌های متعددی از جمله زولسک، پورنگ، باغستان، نوزاد، همت‌آباد، شوشک و دسته‌قیچ در این پهنه گسلی توسعه یافته‌اند [۱۹] که نقش اساسی در خردشدگی واحدهای سنگی، افزایش نفوذپذیری و تسهیل عبور محلول‌های هیدروترمال ایفا کرده‌اند. گسل امتدادلغز پورنگ یکی از مهم‌ترین گسل‌های پهنه گسلی سربیشه است که در فاصله ۳۱ کیلومتری شرق شهرستان سربیشه قرار دارد. این گسل با روند کلی شمالی-جنوبی، طول تقریبی ۵۱ کیلومتر و سازوکار راستگرد با مؤلفه معکوس، مرز مشخصی میان دشت سربیشه و ارتفاعات مجاور ایجاد کرده است. بررسی تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد که این گسل از چند قطعه گسلی مجزا شامل فورگ، جاجنگ، گلستان، دوغ، قلعه سرخ و چشمه زنگی تشکیل شده و در بخش‌هایی رسوبات کواترنری را نیز قطع می‌کند. منطقه مورد مطالعه (روستای جنت‌آباد) در مجاورت قطعه گسلی قلعه سرخ قرار دارد.

پردازش داده‌های سنجش از دور نشان‌دهنده تمرکز کانی مونت موریونیت به عنوان کانی اصلی بنتونیت‌ها در مجاورت گسل‌ها، به ویژه در بخش جنوب غربی روستای جنت‌آباد و در امتداد گسل قلعه سرخ است (شکل ۳). هم‌پوشانی پهنه‌های مونت موریلونیتی با گسل‌های اصلی و فرعی بیانگر نقش کنترل‌کننده ساختارهای تکتونیکی در توسعه دگرسانی آرژیلیک و تشکیل ذخایر بنتونیت در منطقه سربیشه است.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی ترکیب کانی‌شناسی بنتونیت‌های مورد مطالعه، پس از نمونه‌برداری از پهنه‌های بنتونیتی، تعداد ۲ نمونه به منظور مطالعات کانی‌شناسی، به روش پراش اشعه ایکس (XRD) در شرکت کانساران بینالود تهران مورد تجزیه قرار گرفت. پس از انجام مطالعات کانی‌شناسی نمونه‌های مورد مطالعه، به منظور مطالعات تکمیلی، این نمونه‌ها تحت شرایط مختلف مانند نمونه نرمال، اشباع شده از حلال اتیلن گلیکول و حرارت داده شده تا ۵۳۰ درجه سانتی گراد مورد تجزیه کانی‌شناسی مجدد (کانی‌های رسی) قرار گرفتند. پس از مطالعات کانی‌شناسی XRD، به منظور شناخت دقیق‌تر نوع کانی‌های رسی و مورفولوژی آنها، در یک نمونه بنتونیتی، مطالعات تصویربرداری الکترونی روبشی (SEM) و طیف سنجی پراش انرژی (EDS) در شرکت پرتو رایان رستاک (تهران) انجام شد. قبل از فرآیند تصویرگیری و آنالیز، در مرحله اول برای نمونه‌های بالک، رساناسازی توسط چسب نواری رسانای آلومینیوم و برای نمونه‌های پودری، توسط چسب دو طرفه استاندارد Agar ساخت کشور انگلیس انجام شد. در مرحله بعد، رساناسازی سطحی نمونه‌ها به روش PVD در دستگاه COXEM ساخت کشور کره جنوبی صورت گرفته و سپس، تصویرگیری از نمونه‌های آماده سازی شده، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل FEI ESEM QUANTA 200 ساخت کشور آمریکا در بزرگنمایی‌های مختلف انجام شد. آنالیز عنصری فازهای مختلف مشاهده شده در تصاویر، توسط آشکار ساز EDAX/EDS Silicon Drift 2017 ساخت کشور آمریکا صورت گرفت. به منظور مطالعات ژئوشیمیایی، ۷ عدد از نمونه‌های سنگی دارای دگرسانی کمتر و ۳ نمونه از بنتونیت‌های منطقه، برای آنالیز شیمیایی انتخاب و در شرکت زراژما به روش XRF (برای عناصر اصلی) و ICP-MS (برای عناصر کمیاب و نادر خاکی) مورد آنالیز قرار گرفتند. نتایج حاصل از آنالیزهای شیمیایی به منظور بررسی‌های ژئوشیمیایی، تغییرات جرمی عناصر و تعیین جایگاه تکتونیکی واحدهای مورد مطالعه، با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف تعبیر و تفسیر شد.

سنگ نگاری

براساس مطالعات سنگ‌نگاری، گدازه‌های منطقه جنت آباد شامل داسیت، آندزیت، تراکی آندزیت، پیروکسن آندزیت و به مقدار کم ریولیت هستند. با توجه به فراوانی سنگهای داسیتی و آندزیتی در مجاورت بنتونیت، در این بخش به بررسی خصوصیات این سنگها پرداخته شده است.

داسیت: این سنگ در صحرا به رنگ خاکستری روشن وجود دارد. بافت رایج در داسیت، پورفیری با زمینه شیشه ای (شکل ۴- الف تا پ) می باشد. فنوکریست‌های معمول در این واحد شامل پلاژیوکلاز (شکل ۴- الف و پ)، کوارتز گرد شده (شکل ۴- ب)، بیوتیت (شکل ۴- پ) و آمفیبول (کلریتی شده) هستند. پلاژیوکلازها از نوع آلبیت تا الیگوکلاز حدود ۳۵ تا ۴۵ درصد حجم سنگ را تشکیل می‌دهد. بیوتیت گاهی با حاشیه اکسید شده و چند رنگی قهوه ای مایل به قرمز، حدود ۵ درصد حجم سنگ را به خود اختصاص داده است. هورنبلند به صورت نیمه‌شکل‌دار به مقدار کم یافت شده و عمدتاً به صورت کلریتی شده مشاهده می‌شود.

آندزیت: گدازه‌های آندزیتی (پیروکسن‌آندزیت، آندزیت و تراکی‌آندزیت) به رنگ خاکستری تیره و روشن دیده می‌شود. بافت‌های غالب در آندزیت شامل پورفیری با خمیره میکروولیتی شیشه‌ای (شکل ۴- ت و ث) و گلوپورفیری (شکل ۴- ث) هستند. کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌های آندزیتی عمدتاً شامل پلاژیوکلاز، پیروکسن و در برخی نمونه‌ها آمفیبول است. پلاژیوکلاز فراوانترین کانی موجود در آندزیت‌ها می‌باشد. اندازه این کانی از ۰/۱ تا ۷ میلی‌متر متغیر و به صورت بی‌شکل تا نیمه شکل‌دار بوده (شکل ۴- ت و ج) و بر مبنای زاویه خاموشی، آندزین تا الیگوکلاز است. کلینوپیروکسن بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار (شکل ۴- ت) گاهی دارای حاشیه خلیجی بوده و ۱۰ تا ۱۵ درصد حجم سنگ را به خود اختصاص داده است. هورنبلند به مقدار کم وجود دارد. در زمینه میکروولیتی برخی نمونه‌ها، مقادیری سانیدین وجود دارد که سبب تمایل ترکیب سنگ به تراکی‌آندزیت شده است.

کانی‌شناسی

برای تشخیص نوع کانی رسی و کانی‌های همراه بنتونیت جنت آباد از روش آنالیز XRD استفاده شده است. بررسی‌های کانی‌شناسی در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که مونت موریلونیت، کریستوبالیت، آنورتیت و میکروکلین سازنده‌های اصلی می‌باشند که در مقادیر کمتر با کائولینیت و کوارتز همراه هستند. ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌های بنتونیت مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) مربوط به نمونه‌های M-023-J-1 و M-023-J-2 در شکل ۵ ارائه شده است. هر دو نمونه دارای ترکیب کانی‌شناسی مشابهی هستند که فازهای غالب آن شامل مونت موریلونیت، کوارتز و فلدسپارها می‌باشد. بازتاب اصلی مونت موریلونیت در زاویه‌ی پایین (حدود ۶ تا ۸ درجه) مشاهده می‌شود که بیانگر حضور ساختار رسی نوع ۲:۱ است [۲].

[۲۱]. پیک‌های کریستوبالیت در حدود ۲۱ و ۳۶ درجه و پیک تیز کوارتز در زاویه‌ی ۲۶/۶ درجه دیده می‌شوند که نشان‌دهنده‌ی مقدار قابل توجهی سیلیس است [۲۲]. بازتاب‌های مربوط به آنورتیت و میکروکلین در محدوده‌ی ۲۵ تا ۳۰ درجه مشاهده می‌شوند و نشان‌دهنده‌ی وجود اجزای فلدسپاتی هستند [۲۳]. همچنین پیک‌های ضعیف کائولینیت و کلینوپتیلولیت بیانگر وجود مقادیر اندکی از کانی‌های رسی نوع ۱:۱ و زئولیتی می‌باشند [۲۴]. در مقایسه با نمونه‌ی M-023-J-1، شدت پیک‌های کوارتز و میکروکلین در

نمونه‌ی M-023-J-2 بیشتر است، در حالی که شدت بازتاب مونت موریلونیت اندکی کمتر است. این تغییرات بیانگر تفاوت در نسبت فازهای سیلیکاته به فازهای رسی است که احتمالاً نتیجه ترکیب کانی‌شناسی اولیه یا شرایط محلی حاکم بر تشکیل آنها می باشد.

نتایج آنالیز نمونه‌ها پس از انجام مراحل آماده سازی تجزیه کانی شناسی ویژه رسها تحت شرایط مختلف مانند نمونه نرمال، اشباع شده از حلال اتیلن گلیکول و حرارت داده شده تا ۵۳۰ درجه سانتی گراد در شکل ۶ ارائه شده است. در هر دو نمونه، بازتاب پایه در زاویه‌ای پایین‌تر از ۶ درجه (۲ تنای کمتر از ۶ درجه) در حالت خشک مشاهده می‌شود که بیانگر حضور کانی رسی از نوع ۲:۱ مانند مونت موریلونیت است [۲، ۲۱]. پس از تیمار با اتیلن گلیکول، این بازتاب به زاویه‌های پایین‌تر منتقل می‌شود که متناظر با افزایش فاصله‌ی بین‌لایه‌ای تا حدود ۱۷ آنگستروم بوده و رفتار تورمی ویژه‌ی رس‌های مونت موریلونیتی را تأیید می‌کند [۲۳]. در اثر حرارت‌دهی در دمای ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد، شدت بازتاب پایه به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته یا تقریباً از بین می‌رود که نشان‌دهنده‌ی فروپاشی ساختار بین‌لایه‌ای و دهیدروکسیلاسیون لایه‌های هشت‌وجهی است [۲۲]. این نتایج بیانگر آن است که مونت موریلونیت فاز غالب در هر دو نمونه بوده و نمونه‌ها رفتار اسمکتیتی معمول را در برابر تیمار گلیکولی و حرارتی از خود نشان می‌دهند. در مجموع، داده‌های XRD نشان می‌دهد که بنتونیت‌های جنت‌آباد از نوع اسمکتیتی با غلبه مونت موریلونیت و حضور فازهای سیلیسی و فلدسپاری، همراه مقدار اندک کانی‌های زئولیتی و رسی نوع ۱:۱ هستند. نکته حائز اهمیت در بنتونیت جنت آباد وجود کانی کلینوپتیلولیت از دسته کانیهای زئولیتی میباشد. زئولیت‌ها در کانسارهای بنتونیت عمدتاً از دگرسانی شیشه‌های آتشفشانی در طی فرایندهای دیاژنز یا دگرسانی گرمابی در دماهای پایین تا متوسط (معمولاً کمتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) تشکیل می‌شوند [۲۶، ۲۵]. شرایط ژئوشیمیایی حاکم شامل محیط قلیایی با pH حدود ۸ تا ۹، فعالیت بالای سیلیس، و حضور کاتیون‌های سدیم، پتاسیم و کلسیم در سیالات است که نقش کلیدی در تبلور زئولیت‌ها دارند [۲۷، ۲۸]. کلینوپتیلولیت و مordenit به عنوان فراوان‌ترین زئولیت‌ها همراه با اسمکتیت در این محیط‌ها یافت می‌شوند، در حالی که آنالسیم و هولاندیت در شرایط خاص‌تر (مانند دماهای بالاتر یا شوری بیشتر) ظاهر می‌شوند [۲۵، ۲۷]. این فرایندها معمولاً در محیط‌های دریایی کم‌عمق، دریاچه‌های شور-قلیایی، یا نواحی تحت تأثیر جریان‌های گرمابی مرتبط با فعالیت‌های آتشفشانی رخ می‌دهند [۲۶]. زئولیت‌های موجود در بنتونیت ظرفیت تبادل کاتیونی بالایی داشته و در تصفیه آب، کشاورزی و کاتالیست‌ها کاربرد گسترده‌ای دارند [۲۷].

مطالعات میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف سنجی پراش انرژی (EDS)

حضور کانی‌های رسی مختلف مانند مونت موریلونیت، ایلیت و کائولینیت تأثیر مستقیمی بر خواص فیزیکی، ژئوشیمیایی و صنعتی بنتونیت دارد [۲۹]. از آنجا که ابعاد این کانی‌ها معمولاً کمتر از ۲ میکرون است، مطالعه دقیق آن‌ها با میکروسکوپ نوری امکان‌پذیر نیست و استفاده از روش‌های ریزساختاری نظیر SEM و آنالیزهای ریزشیمیایی مانند EDS ضروری است [۳۰]، بطوریکه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با استفاده از باریکه الکترونی و ثبت الکترون‌های ثانویه و برگشتی، اطلاعات دقیقی از مورفولوژی، بافت و ریزساختار نمونه ارائه می‌دهد [۳۰]. در سال‌های اخیر SEM به یکی از مهم‌ترین ابزارهای مطالعه رس‌ها و به ویژه بنتونیت تبدیل شده است [۳۱-۳۳]. تصاویر میکروسکپ الکترونی روبشی تهیه شده از نمونه‌های بنتونیت جنت آباد بیانگر حضور گسترده اسمکتیت (به‌ویژه مونت موریلونیت) است که به صورت ذرات بسیار ریز دارای بافت دانه ای و تجمعی با ذرات نامنظم و ناهمگن وجود داشته (شکل ۷-الف) و بیانگر تجمع ذرات ریزدانه و احتمال وقوع فرآیندهای دگرسانی، خردشدگی یا رسوب‌گذاری ثانویه می‌باشد. لکه‌های روشن و زاویه‌دار موجود در تصویر نشان‌دهنده ذرات آواری کوارتز یا فلدسپار هستند. به دلیل اینکه مطالعات طیف سنجی پراکنش انرژی (EDS) نیز به شناخت نوع کانی‌های موجود در بنتونیت کمک می‌نماید، علاوه بر تصویربرداری الکترونی، مطالعات طیف سنجی پراکنش انرژی متصل به SEM به منظور تعیین ترکیب عنصری نمونه بنتونیت انجام شد. نتایج حاصل (شکل ۷-ب) نشان می‌دهد که عنصر Si با مقدار ۷۵/۰۶ درصد وزنی، فراوان‌ترین عنصر موجود در نمونه است که بیانگر غالب بودن فازهای سیلیکاته در ترکیب کانی‌شناسی نمونه می‌باشد. شدت بالای پیک Si در طیف EDS نیز این موضوع را تأیید می‌کند. عنصر Al با مقدار ۱۳/۸۵ درصد وزنی دومین عنصر فراوان نمونه است که حضور آن همراه با Si نشان‌دهنده وجود فازهای آلومینوسیلیکاته در نمونه می‌باشد. این ترکیب می‌تواند بیانگر حضور کانی‌های رسی، فلدسپارها یا سایر فازهای آلومینوسیلیکاتی باشد. مقدار نسبتاً قابل توجه Fe برابر ۷/۰۶ درصد وزنی احتمال حضور فازهای آهن‌دار را نشان می‌دهد. آهن می‌تواند به صورت اکسیدهای آهن یا به عنوان جانشینی در شبکه بلوری کانی‌های سیلیکاته حضور داشته باشد. وجود Fe در نمونه همچنین می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر فرآیندهای دگرسانی یا تمرکز ثانویه عناصر باشد. عناصر K (۲/۹۷ درصد وزنی)، Na (۰/۸ درصد وزنی) و Ca (۰/۲۳ درصد وزنی) به صورت جزئی در نمونه شناسایی شدند. حضور این عناصر معمولاً به وجود فازهای فلدسپاری، ایلیت یا سایر فازهای غنی از عناصر قلیایی و قلیایی خاکی نسبت داده می‌شود. مقدار بسیار پایین Mg (۰/۰۳ درصد وزنی) نشان می‌دهد که فازهای منیزیم‌دار سهم ناچیزی در ترکیب نمونه دارند. به طور کلی، نتایج EDS بیانگر غالب بودن ترکیب سیلیکاته-آلومینوسیلیکاته در نمونه بوده و حضور مقادیر جزئی عناصر آهن، پتاسیم، سدیم و کلسیم نشان‌دهنده پیچیدگی کانی‌شناسی و احتمال تأثیر فرآیندهای دگرسانی بر ترکیب نهایی نمونه است. همبستگی بین داده‌های SEM و EDS نشان می‌دهد که نمونه مورد مطالعه عمدتاً از یک زمینه غنی از سیلیس همراه با فازهای فرعی آلومینوسیلیکاته و آهن‌دار تشکیل شده است.

زمین شیمی

نتایج آنالیز ژئوشیمیایی عناصر اصلی و کمیاب بنتونیتها و گدازه های منطقه جنت آباد در جدول ۲ آورده شده است. برای نام گذاری نمونه ها از نمودار Nb/Y در برابر Zr/TiO_2 [۳۴] استفاده شد که بر اساس آن، سنگهای آتشفشانی در محدوده ریوداسیت- داسیت و تراکی آندزیت و بنتونیتهاى مورد مطالعه در قلمرو آندزیت- تراکی آندزیت و ریولیت قرار گرفته است (شکل ۸- الف. بر اساس نمودار AFM [۳۵] تمام نمونه های مورد مطالعه در محدوده کالک آلکان قرار می گیرند (شکل ۸- ب).

الگوی عناصر نادر خاکی بهنجار شده با کندریت [۳۶] و عناصر کمیاب بهنجار شده با گوشته اولیه [۳۷] در نمونه های منطقه جنت آباد (به ترتیب شکل های ۹- الف و ۹- ب) نشانگر الگوی تقریباً یکنواخت عناصر نادر خاکی (REE)، غنی شدگی LREE نسبت به HREE، آنومالی منفی Eu و غنی شدگی LILE، آنومالی منفی Nb، Ti، P و Sr است. آنومالی منفی Eu می تواند ناشی از تفریق پلاژیوکلاز در طی تبلور بخشی ماگما و یا باقیماندن پلاژیوکلاز در فاز باقیمانده منبع باشد [۳۸-۳۹]. یکنواختی روند پراکندگی REE در گدازه های حدواسط-اسیدی و نمونه های بنتونیتی، حاکی از منشأ مشترک آنهاست [۳۹-۴۰]. مجموع عناصر خاکی نادر در گدازه های منطقه بین ۱۱۰/۱۶ تا ۱۳۶/۱۳ ppm متغیر است و الگوی مشابه مجموعه های کالک آلکان نشان می دهد [۴۱]. مقادیر نسبت بالای $(La/Yb)_N$ (۱۰/۷۰-۱۳/۴۰) و $(Ce/Yb)_N$ (۶/۸-۳۶/۲۲) همراه با طرح نسبتاً تخت HREE با نسبت $(Tb/Yb)_N$ برابر ۱/۱۶-۱/۴۶، تکامل ماگمایی و تفریق پیشرونده HREE را نشان می دهد. مقادیر نسبتاً پایین Yb_N در نمونه های مورد مطالعه، بیانگر حضور گارنت باقیمانده در خاستگاه ماگماست [۴۱]. مجموعه این ویژگی ها با جایگاه تکتونیکی حاشیه فعال قاره ای و ماگماتیسم کالک آلکان مرتبط با فرورانس سازگاری دارد [۴۲].

آنومالی منفی Ti و Nb به همراه غنی شدگی LILE (به استثنای Ba) در گدازه های اسیدی و حدواسط از خصوصیات گدازه های کالک آلکان وابسته به فرورانس است [۳۸، ۴۳، ۴۴]. آنومالی منفی Ba در فازهای اسیدی می تواند بیانگر تفریق فلدسپارها و یا نقش پوسته قاره ای بالایی در فرایندهای ماگمایی باشد [۴۵]. در مجموع، ترکیب داده های REE و عناصر کمیاب نشان می دهد که سنگ های میزبان بنتونیت جنت آباد از ماگمایی با ماهیت کالک آلکان و در یک محیط تکتونیکی وابسته به فرورانس منشأ گرفته اند و سپس تحت تأثیر فرایندهای دگرسانی هیدروترمال و هوازدگی، به بنتونیت تبدیل شده اند. غلبه مونت موریلونیت در بنتونیت های جنت آباد، در کنار فقدان فازهای دگرسانی دما بالاتر نظیر اپلیت و کلریت، نشان می دهد که فرآیند بنتونیتی شدن احتمالاً در یک سامانه هیدروترمال کم دما رخ داده است. آنومالی منفی قویتر Eu در بنتونیت ها نسبت به سنگ های آتشفشانی مادر نشان می دهد که رفتار این عنصر تحت تأثیر شرایط فیزیکی شیمیایی محیط دگرسانی قرار داشته است. مطالعات نشان داده است که در طی تبدیل ریولیت به بنتونیت، برخی عناصر خاکی نادر از جمله Eu تحرک قابل توجهی از خود نشان می دهند [۴۰]. در شرایطی که سیالات

گرمایی دارای pH اسیدی و پتانسیل اکسایش-کاهش مناسب باشند، Eu^{2+} به Eu^{3+} اکسید شده و به دلیل تشکیل کمپلکس‌های محلول، از سیستم خارج می‌شود [۴۶-۴۷]. همچنین، تخریب فلدسپات‌ها بعنوان حامل اصلی Eu در سنگ مادر طی تشکیل بنتونیت و عدم تمایل کانی‌های رسی جانشین شده برای جذب مجدد Eu، نقش مهمی در کاهش غلظت این عنصر در محصول نهایی دگرسانی دارد [۴۸]. کاهش مقدار فسفر در بنتونیت‌های منطقه جنت‌آباد در مقایسه با سنگ‌های آتشفشانی مادر، به‌خوبی بیانگر نقش فرآیندهای دگرسانی در کنترل رفتار این عنصر است. فسفر که در سنگ مادر عمدتاً در کانی‌هایی مانند آپاتیت حضور دارد، در طی تشکیل بنتونیت و برهم‌کنش سنگ با سیالات، به‌راحتی از فاز جامد جدا [۴۹] و از سیستم خارج شده و در نتیجه، بنتونیت‌های جنت‌آباد به‌طور نسبی از نظر P_2O_5 فقیرتر از سنگ‌های میزبان خود هستند. مطالعات ژئوشیمی نشان داده‌اند که بر خلاف تصور مبنی بر نامتحرک بودن تیتان در محیط‌های سطحی و رسوبی، در طی دیاژنز و دگرسانی خاکسترهای آتشفشانی به بنتونیت، Ti می‌تواند از کانی‌های اولیه خود آزاد شده، که این فرآیند منجر به کاهش نسبی محتوای Ti در بنتونیت نسبت به سنگ مادر می‌گردد [۵۰]. برای ارزیابی کمی تغییرات ژئوشیمیایی در فرآیند بنتونیتی‌شدن، از روش موازنه جرم [۵۱] با نرمال‌سازی نسبت به عنصر بی‌تحرک نیوبیوم (Nb) استفاده شد. نیوبیوم به‌عنوان یکی از عناصر با مقاومت بالا (HFSE) در برابر جابه‌جایی در دگرسانی هیدروترمال انتخاب گردید [۵۲]. الگوی موازنه جرم حاکی از غنی‌شدگی قابل توجه SiO_2 و LOI در بنتونیت‌های مورد مطالعه است، در حالی که اکثر اکسیدهای اصلی کاهش یافته‌اند (شکل ۱۰). افزایش SiO_2 عمدتاً نتیجه خروج گسترده کاتیون‌های متحرک Na_2O ، K_2O ، CaO و MgO و حفظ نسبی سیلیس در سیستم است، به طوری که درصد وزنی SiO_2 به‌طور ظاهری افزایش می‌یابد. افزایش قابل توجه SiO_2 با حضور کریستوبالیت و کوارتز در نتایج XRD نیز سازگار است [۵۳]. افزایش LOI نیز نشان‌دهنده حضور آب ساختاری در شبکه اسمکتیت و فازهای فرار است. اگرچه آلومینیوم و آهن در بسیاری از سامانه‌های دگرسانی به‌عنوان عناصر نسبتاً کم‌تحرک شناخته می‌شوند، اما شواهد متعددی نشان می‌دهد که در شرایط هیدروترمال با نسبت بالای آب به سنگ و pH اسیدی تا نزدیک به خنثی، بخشی از این عناصر می‌تواند از سیستم خارج شود [۵۴]. کاهش Al_2O_3 در بنتونیت‌های جنت‌آباد احتمالاً ناشی از انحلال پلاژیوکلازها و شیشه‌های آتشفشانی و انتقال بخشی از آلومینیوم توسط سیالات دگرسان‌کننده است، در حالی که بخشی دیگر در ساختار مونت موریلونیت تثبیت شده است. همچنین کاهش Fe_2O_3 را می‌توان به تجزیه کانی‌های فرومنیزین اولیه نظیر بیوتیت، آمفیبول و پیروکسن و جابه‌جایی آهن در سیالات هیدروترمال نسبت داد. بنابراین، الگوی مشاهده‌شده بیانگر آن است که بنتونیتی‌شدن توف‌های آتشفشانی جنت‌آباد تحت تأثیر یک سامانه هیدروترمال کم‌دما تا دمای متوسط رخ داده و با خروج محدود آلومینیوم و آهن، شستشوی قابل توجه عناصر قلیایی و قلیایی خاکی و تمرکز نسبی سیلیس همراه بوده است [۵۱، ۵۴]. همچنین مقادیر شاخص CIW (Chemical Index of Weathering) محاسبه‌شده بر اساس داده‌های XRF برای

بنتونیت‌ها و سنگ‌های آتشفشانی جنت‌آباد، در بازه‌ای حدود ۶۰ تا ۸۰ قرار می‌گیرد و نشان‌دهنده هوازدگی شیمیایی نسبتاً شدید در بنتونیت‌ها نسبت به سنگ‌های مادر است. این افزایش CIW با حذف ترجیحی Ca و Na از پلاژیوکلازها و تمرکز نسبی Al در فازهای رسی ثانویه قابل تفسیر است؛ روندی که با تعریف شاخص CIW توسط [۵۵] مطابقت دارد. نمونه‌های با CIW نزدیک به ۸۰ بیانگر شستشوی گسترده عناصر قلیایی و قلیایی‌خاکی و تبدیل پیشرفته فلدسپارها به مونت موریلونیت و دیگر فازهای رسی غنی از آلومینیوم هستند، در حالی که مقادیر پایین‌تر (نزدیک ۶۰) نشان‌دهنده دگرسانی متوسط و حفظ نسبی بخشی از کانی‌های اولیه در برخی بخش‌های توالی آتشفشانی-آذرآواری است. این الگو با مدل تکاملی هوازدگی شیمیایی در نمودار A-CN-K [۵۶]، که در آن در مراحل پیشرفته هوازدگی Ca و Na به سرعت از سیستم خارج شده و Al در ساختار کانی‌های رسی پایدار متمرکز می‌شود، همخوانی دارد (شکل ۱۱).

محیط تکتونیکی و منشأ

به دلیل اینکه که آرایش با مواد پوسته‌ای باعث افزایش میزان Rb و از طرفی کاهش Nb می‌شود، با استفاده از نسبت Rb/Y در مقابل Nb/Rb، می‌توان غنی‌شدگی به وسیله سیالات در زون فرورانیش یا آلودگی پوسته‌ای و همچنین غنی‌شدگی درون صفحات را تعیین نمود. بنابراین، جهت بررسی رخداد غنی‌شدگی در منشأ نمونه‌ها، از نمودار Nb/Rb در برابر Rb/Y [۵۷] استفاده گردید. در این نمودار، گدازه‌های اسیدی و حدواسط شواهد غنی‌شدگی در منطقه فرورانیش و یا آلودگی پوسته‌ای را نشان می‌دهند (شکل ۱۲-الف).

سنگهای مورد مطالعه در نمودار Yb در مقابل Th/Ta [۵۸] در قلمرو مربوط به حاشیه‌های قاره‌ای فعال قرار می‌گیرند (شکل ۱۲-ب).

از آن جایی که در گوشته لیتوسفری Nb نسبت به La تهی‌شده می‌باشد، بنابراین نسبت پایین Nb/La نشان‌دهنده ماگمایی با منشأ گوشته لیتوسفری و نسبت بالای آن بیانگر منشأ گوشته استنوسفری می‌باشد [۵۹]. بر این اساس، به منظور تعیین منشأ نمونه‌ها، از نمودار La/Yb در برابر Nb/La [۶۰-۵۹] که محدوده گوشته لیتوسفری و استنوسفری را از یکدیگر متمایز می‌کند، استفاده گردید. طبق این نمودار، منشأ سنگ‌های اسیدی و حدواسط از گوشته لیتوسفری تعیین گردید (شکل ۱۲-پ). در نمودار Ba/Nb در برابر Th/Nb [۶۱]، نقش رسوبات ذوب شده طی فرورانیش، در فرآیند متاسوماتیسم بررسی گردید. بر این اساس، نمونه‌ها در راستای روند مربوط به متاسوماتیسم وابسته به رسوبات ذوب شده، قرار گرفته‌اند (شکل ۱۲-ت).

نسبت Sr/Y عمدتاً بوسیله فراوانی نسبی گارنت، آمفیبول و پلاژیوکلاز در باقیمانده کنترل می‌شود؛ بطوریکه میزان بالای گارنت و مقادیر پایین آمفیبول و پلاژیوکلاز در باقیمانده سبب ایجاد نسبت Sr/Y بالا در مذاب می‌گردد [۶۲]. سنگ‌های مورد مطالعه دارای

نسبت Str/Y نسبتاً بالا (میانگین $16/33$) بوده که بیانگر حضور گارنت در باقیمانده است. بنا بر این، گدازه‌های منطقه جنت آباد احتمالاً از ذوب بخشی گوه گوشته‌ای که خود در اثر تماس با سیالات مشتق شده از پوسته اقیانوسی فرورونده، از عناصر کمیاب غنی شده، منشاء گرفته است.

نتیجه گیری

در منطقه جنت‌آباد، بنتونیت‌ها در نتیجه دگرسانی گسترده توف‌ها و گدازه‌های آتشفشانی حدواسط تا اسیدی با ماهیت کالک‌آلکالن و وابسته به پهنه فرورانش در حاشیه فعال قاره‌ای تشکیل شده‌اند. سنگ‌های میزبان عمدتاً شامل آندزیت، تراکی‌آندزیت، داسیت و ریولیت هستند که به صورت گدازه و نهشته‌های آذرآواری رخنمون داشته و دگرسانی آرژیلیک و بنتونیتی در آن‌ها به‌طور گسترده گسترش یافته است. نتایج کانی‌شناسی XRD نشان می‌دهد که مونتموریلونیت فاز رسی غالب در بنتونیت‌های جنت‌آباد است و همراه با کریستوبالیت، آنورتیت و میکروکلین، به‌همراه مقادیر کم کائولینیت، کوارتز و کلینوپتیلولیت زئولیتی حضور دارد. رفتار مونتموریلونیتی نمونه‌ها در تیمار با اتیلن‌گلیکول و حرارت، غلبه اسمکتیت و عدم شناسایی فازهای دمای بالاتر نظیر ایلیت و کلریت، در محدوده تشخیص XRD، با تشکیل بنتونیت‌ها در یک سامانه دگرسانی گرمابی کم‌دما سازگار است. داده‌های ژئوشیمیایی عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی، قرارگیری سنگ‌های میزبان و بنتونیت‌ها را در محدوده ریوداسیت-داسیت و تراکی‌آندزیت از سری کالک‌آلکالن نشان می‌دهد و الگوهای بهنجار شده REE با غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE، آنومالی منفی Nb، Ti و Eu و شباهت الگوی بنتونیت و سنگ‌های مادر، حاکی از منشأ ماگمایی مشترک در یک محیط فرورانشی و نقش گوه گوشته‌ای متاسوماتی شده است. موازنه جرم نرمال شده نسبت به Nb، افزایش SiO_2 و LOI و کاهش نسبی MgO ، CaO ، K_2O ، Na_2O را نشان می‌دهد که با دگرسانی هیدروترمال-هوازدگی خاکسترهای آتشفشانی و تشکیل مونت‌موریلونیت و سیلیس بی‌شکل همخوان است. مقادیر نسبتاً بالای شاخص CIW در بنتونیت‌ها نسبت به سنگ‌های مادر نیز بیانگر هوازدگی شیمیایی شدیدتر و شستشوی گسترده عناصر متحرک در طی فرآیند بنتونیتی‌شدن است. در نهایت، هم‌پوشانی پهنه‌های مونتموریلونیتی با گسل‌های اصلی و فرعی، به‌ویژه شاخه قلعه‌سرخ از سامانه گسلی سربیشه-نهبدان، نقش کنترل‌کننده ساختارهای تکتونیکی در تمرکز دگرسانی آرژیلیک و تشکیل ذخایر بنتونیت جنت‌آباد را برجسته می‌سازد.

مراجع

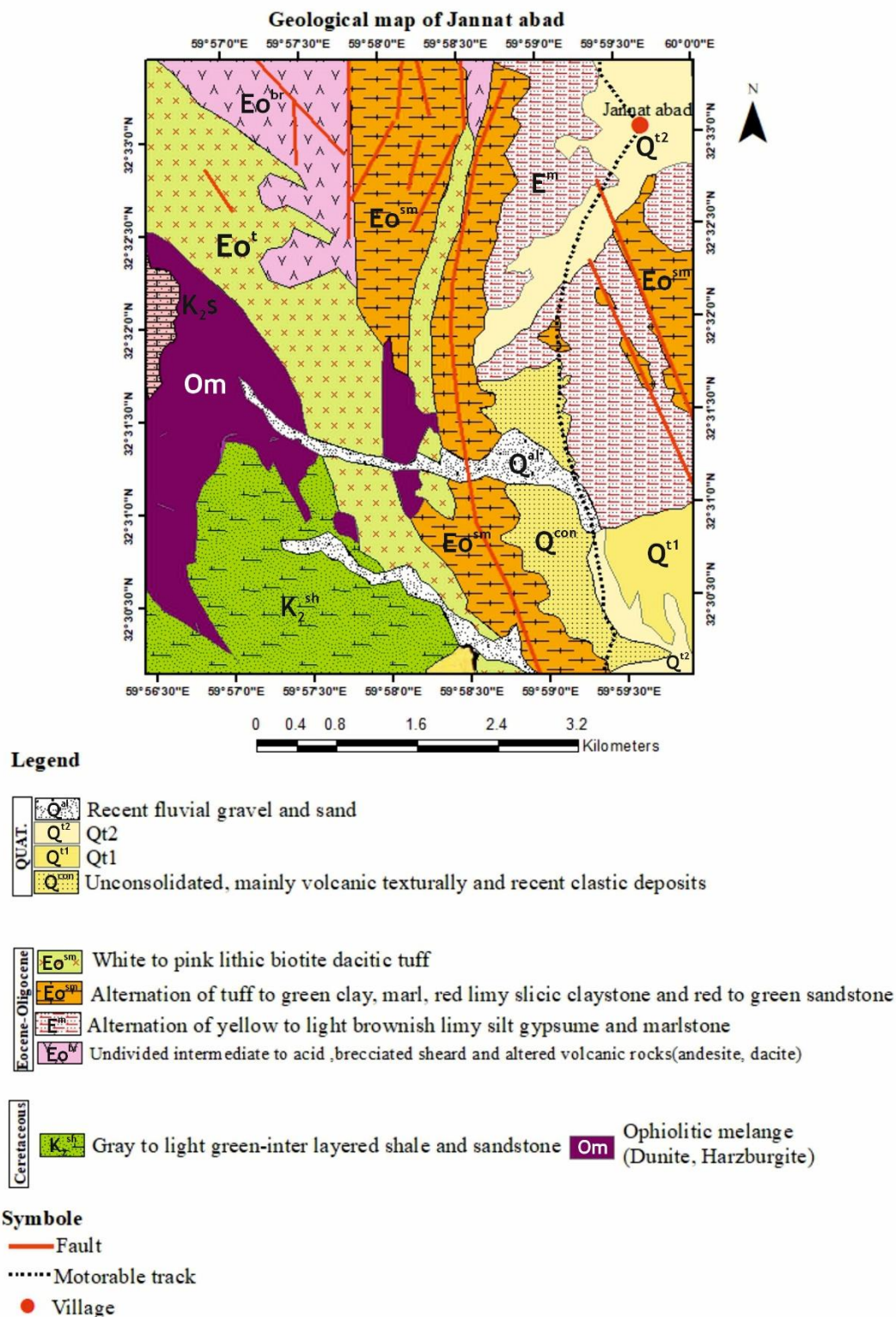
- [1] Grim R.E., "Clay Mineralogy", 2nd ed., McGraw-Hill, New York (1968) 596 p.
- [2] Moore D.M. and Reynolds R.C. Jr., "X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals", 2nd ed., Oxford University Press, Oxford (1997) 400 p.
- [3] Ashouri Mehranjani Z., Hayati-Ashtiani M., and Rezaei M., "Isotherm and selectivity studies of Ni(II) removal using natural and acid-activated nanobentonites", Water Science and Technology 84 (2021) 2394-2405. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.435>

- [4] Borah D., Nath H., and Saikia H., "Modification of bentonite clay & its applications: a review", *Reviews in Inorganic Chemistry* 42 (2021) 265-282.
- [5] Zhang T., Wang W., Zhao Y., Bai H., Wen T., Kang S., Song G., Song S., and Komarneni S., "Removal of heavy metals and dyes by clay-based adsorbents: from natural clays to 1D and 2D nano-composites", *Chemical Engineering Journal* 420 (2021) 127574. (DOI: 10.1016/j.cej.2020.127574)
- [6] Bai H., Zhao Y., Zhang X., Wang W., Zhang T., Liu C., Yi H., and Song S., "Correlation of exfoliation performance with interlayer cations of montmorillonite in the preparation of two-dimensional nanosheets", *Journal of the American Ceramic Society* 102 (2019) 3908-3922. <https://doi.org/10.1111/jace.16285>
- [7] Zhang B., Zhu W., Hou R., Yue Y., Feng J., Ishag A., Wang X., Qin Y., and Sun Y., "Recent advances of application of bentonite-based composites in the environmental remediation", *Journal of Environmental Management* 362 (2024) 121341. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121341>
- [8] Nazari H. and Salamati R., "Geological map of Sarbisheh, scale 1:100,000", Geological Survey of Iran, Tehran (1999).
- [9] Karimpour M.H., Stern C.R., Farmer L., Saadat S., and Malekezadeh Shafaroudi A., "Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut Block, Eastern Iran", *Geopersia* 1 (2011) 19-36. <https://doi.org/10.22059/jgeo.2011.22162>
- [10] Camp V.E. and Griffis R.J., "Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran", *Lithos* 15 (1982) 221-239. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(82\)90014-7](https://doi.org/10.1016/0024-4937(82)90014-7)
- [11] Saccani E., "Petrological and geochemical constraints on the origin of the Nehbandan ophiolitic complex (eastern Iran): Implication for the evolution of the Sistan Ocean", *Lithos* 117 (2010) 209-228. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.02.016>
- [12] Jung D., Keller J., Khorasani R., Marcks C., Baumann A., and Horn P., "Petrology of the Tertiary magmatic activity in the northern Lut area, East of Iran", in Ministry of Mines and Metals, Geological Survey of Iran, Geodynamic Project (Geotraverse) in Iran, Report No. 51, Tehran, Iran (1983) p. 285-336.
- [13] Khatib M.M., "Geometry of strike-slip fault terminations (with special emphasis on faults of eastern Iran)", Ph.D. Dissertation, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (1998) in persian.
- [14] Mohammadi S.S., "Geology and petrology of Tertiary volcanic rocks of Sarbisheh perlite deposit area (eastern Iran), with emphasis on industrial applications", *Journal of Economic Geology*, 4(1) (2012) 59-76. <https://doi.org/10.22067/econg.v4i1.13393> (in persian).
- [15] Mohammadi S.S., Biayani R., Nakhaei M., Chung S.-L., Zarrinkoub M.H., "Petrography, mineral chemistry, geochemistry and tectonic setting of Tertiary volcanic rocks of Shoushk area (east of Sarbisheh), South Khorasan, Iran", *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 25(1) (2017) 167-186 (in persian).
- [16] Malekian Dastjerdi M., Mohammadi S.S., Nakhaei M., Zarrinkoub M.H., "Geochemistry and tectonomagmatic setting of Tertiary volcanic rocks of the Kangan area, northeast of Sarbisheh, South Khorasan, Iran", *Journal of Economic Geology*, 8(2) (2017) 553-568 (in persian)
- [17] Maki-Pour M., "Geology, alteration and petrology of igneous rocks of Golab area (Sarbisheh, eastern Iran)", M.Sc. Thesis, University of Birjand, Birjand, Iran (2012) (in persian).
- [18] Karimi Dehkhordi M., "Deformation analysis along the Sarbisheh fault zone in eastern Iran", M.Sc. Thesis, University of Birjand, Birjand, Iran (2012), 129 p (in persian)
- [19] Khosravi S., "Geometric-kinematic analysis of the Zolesk fault in northern Sarbisheh", M.Sc. Thesis, University of Birjand, Birjand, Iran (2016), 99 p (in persian)
- [20] Whitney D.L. and Evans B.W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", *American Mineralogist* 95 (2010) 185-187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- [21] Brindley G.W. and Brown G., "Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-ray Identification", Mineralogical Society, London (1980) 495 p.
- [22] Christidis G.E., "Physical and chemical properties of bentonite: A review", *Applied Clay Science* 74 (2013) 11-18. (DOI: 10.1016/j.clay.2012.11.002)

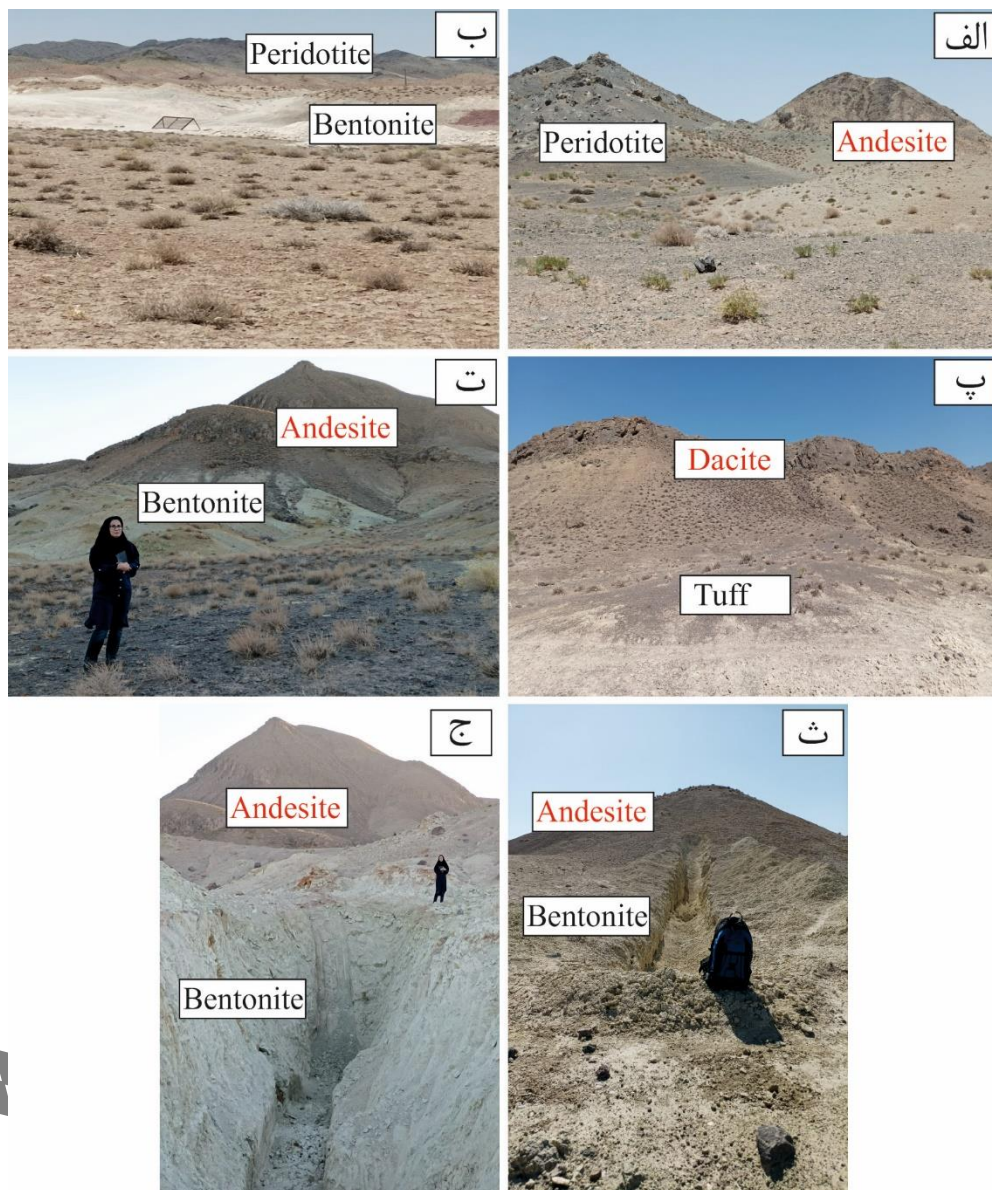
- [23]Środoń J., "Identification and quantitative analysis of clay minerals", *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 63 (2006) 765-794. (DOI: 10.2138/rmg.2006.63.23)
- [24]Derkowski A., Szczerba M., and Kłosowski G., "Thermal analysis and thermal reactions of smectites: A review of methodology, mechanisms, and kinetics ", *Clays and Clay Minerals* 70(6) (2022) 946-972. <https://doi.org/10.1007/s42860-023-00222-y>
- [25]Christidis G., "Formation and growth of smectites in bentonites: A case study from Kimolos Island, Aegean, Greece", *Clays and Clay Minerals*, 49(3)(2001)204-215 .
- [26]Christidis G. and Marcopoulos T., "Origin of the bentonite deposits of Eastern Milos, Aegean, Greece: Geological, mineralogical and geochemical evidence", *Clays and Clay Minerals*, 43(1) (1995)63-77.
- [27] Koutsopoulou E., Christidis G.E., Marantos I., "Mineralogy, geochemistry and physical properties of bentonites from the Western Thrace Region and the islands of Samos and Chios, East Aegean, Greece", *Clay Minerals*, 51(4) (2016) 563-588.
- [28] Cicerali D., Arslan M., Yazar E.A., Yücel C., Temizel İ., Park S., Schroeder P.A., " Mineralogy, chemistry, and genesis of zeolitization in Eocene tuffs from the Bayburt area (NE Turkey): Constraints on alteration processes of acidic pyroclastic deposits", *Journal of African Earth Sciences*,162(2020) 103690. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103690>.
- [29]Murray H.H., "Applied clay mineralogy: Occurrences, processing and application of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite, and common clays", Elsevier, Amsterdam (2007) 180 p.
- [30] Goldstein J.I., Newbury D.E., Michael J.R., Ritchie N.W.M., Scott J.H.J., Joy D.C., "*Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*", 4th ed. Springer, New York, (2018) 550 pp. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>
- [31]Salduondo J., Comerio M., Cravero F., and Etcheverry R., "Mineralogical and geochemical analysis of sodium bentonites in continental settings: The Uspallata Group (Triassic) of the Cuyana Basin, Mendoza province, Argentina", *Journal of South American Earth Sciences* 102 (2020) 102548. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102548>
- [32]Kadir S., Külah T., Erkoyun H., Uyanık N.O., Eren M., and Elliott W.C., "Mineralogy, geochemistry, and genesis of bentonites in Upper Cretaceous pyroclastics of the Bereketli member of the Reşadiye Formation, Reşadiye (Tokat), Turkey", *Applied Clay Science* 204 (2021) 106024. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106024>
- [33]Ali A., Zhang N., and Santos R.M., "Mineral characterization using scanning electron microscopy (SEM): A review of the fundamentals, advancements, and research directions", *Applied Sciences* 13 (2023) 12600. (DOI: 10.3390/app132212600)
- [34]Winchester J.A. and Floyd P.A., "Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements", *Chemical Geology* 20 (1977) 325-343. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2)
- [35]Irvine T.N. and Baragar W.R.A., "A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks", *Canadian Journal of Earth Sciences* 8 (1971) 523-548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
- [36]Boynnton W.V., "Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies." In *Developments in geochemistry*, Elsevier , 2(1984) 63-114.
- [37]Sun S.S. and McDonough W.F., "Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes", in Saunders A.D. and Norry M.J. (eds.), *Magmatism in the Ocean Basins: Geological Society, London, Special Publications* 42 (1989) 313-345. (DOI: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19)
- [38]Wilson M., "Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach", Unwin Hyman, London (1989) 466 p.
- [39]Rollinson H.R., "Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation", Longman Scientific & Technical, Harlow (1993) 352 p.

- [40] Christidis G.E., "Comparative study of the mobility of major and trace elements during alteration of an andesite to a bentonite in the islands of Milos and Kimolos, Aegean, Greece", *Clays and Clay Minerals*, 46 (1998) 379-399.
- [41] Machado A., Lima E.F., Chemale F. Jr., Morata D., Oteiza O., Almeida D.P.M., Figueiredo A.M.G., Alexandre F.M., and Urrutia J.L., "Geochemistry constraints of Mesozoic-Cenozoic calc-alkaline magmatism in the South Shetland Arc, Antarctica", *Journal of South American Earth Sciences* 18 (2005) 407-425.
- [42] Pearce J.A., "Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins", in Hawkesworth C.J. and Norry M.J. (eds.), *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*, Shiva Publications, Nantwich (1983) p. 230-249.
- [43] Xie G.Q., Mao J.W., Li R.L., and Bierlein F.P., "Geochemistry and Nd-Sr isotopic studies of Late Mesozoic granitoids in the southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt, Eastern China: Petrogenesis and tectonic setting", *Lithos* 104 (2008) 216-230. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.12.008>
- [44] Kuscü G.G. and Geneli F., "Review of post-collisional volcanism in the Central Anatolian Volcanic Province (Turkey), with special reference to the Tepekoy Volcanic Complex", *International Journal of Earth Sciences* 99 (2010) 593-621. (DOI: 10.1007/s00531-008-0402-4)
- [45] Arsalan M. and Aslan Z., "Mineralogy, petrography and whole-rock geochemistry of the Tertiary granitic intrusions in the Eastern Pontides, Turkey", *Journal of Asian Earth Sciences* 27 (2006) 177-193. (DOI: 10.1016/j.jseaes.2005.03.002)
- [46] Bau M., "Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium", *Chemical Geology*, 93 (1991) 219-230. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(91\)90115-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(91)90115-8)
- [47] Michard A., "Rare earth element systematics in hydrothermal fluids", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53 (1989) 745-750. (DOI: 10.1016/0016-7037(89)90017-3)
- [48] Christidis G.E. and Huff W.D., "Geological aspects and genesis of bentonites", *Elements*, 5 (2009) 93-98. <https://doi.org/10.2113/gselements.5.2.93>
- [49] Tsukamoto Y. and Kakegawa T., "Phosphate behavior during submarine hydrothermal alteration of ca. 3.455 Ga basaltic seafloor rocks from Pilbara, Western Australia", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, (2025).
- [50] Song Q., Hong H., Konhäuser K.O., and Algeo T.J., "Titanium mobility and formation of anatase/pseudobrookite during diagenesis of deep marine K-bentonites", *Geochimica et Cosmochimica Acta* (2025). (DOI: 10.1016/j.gca.2025.10.040)
- [51] Grant S.M., "The application of mass balance calculations to metasomatic alteration", *Journal of Metamorphic Geology* 4 (1986) 245-262. (DOI: 10.1111/j.1525-1314.1986.tb00352.x)
- [52] Jiang S.Y., Wang R.C., Xu X.S., Zhao K.D., "Mobility of high field strength elements (HFSE) in magmatic-, metamorphic-, and submarine-hydrothermal systems", *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 17-18 (2005) 1020-1029.
- [53] Grim R.E., Güven N., "Bentonites: geology, mineralogy, properties and uses", Elsevier, (2011).
- [54] Meunier A., "Clays", Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, (2005).
- [55] Harnois L., "The CIW index: A new chemical index of weathering", *Sedimentary Geology* 55 (1988) 319-322. (DOI: 10.1016/0037-0738(88)90137-6)
- [56] Nesbitt H.W. and Young G.M., "Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites", *Nature* 299 (1982) 715-717. (DOI: 10.1038/299715a0)
- [57] Temel A., Gündoğdu M.N., Gourgaud A., "Petrological and geochemical characteristics of Cenozoic high-K calc-alkaline volcanism in Konya, Central Anatolia, Turkey", *Journal of volcanology and geothermal research*, 85(1-4) (1998) 327-54.
- [58] Schandl E.S. and Gorton M.P., "Application of high field strength elements to discriminate tectonic setting in VMS environment", *Economic Geology*, 97 (2002) 629-642, (DOI: 10.2113/gsecongeo.97.3.629).

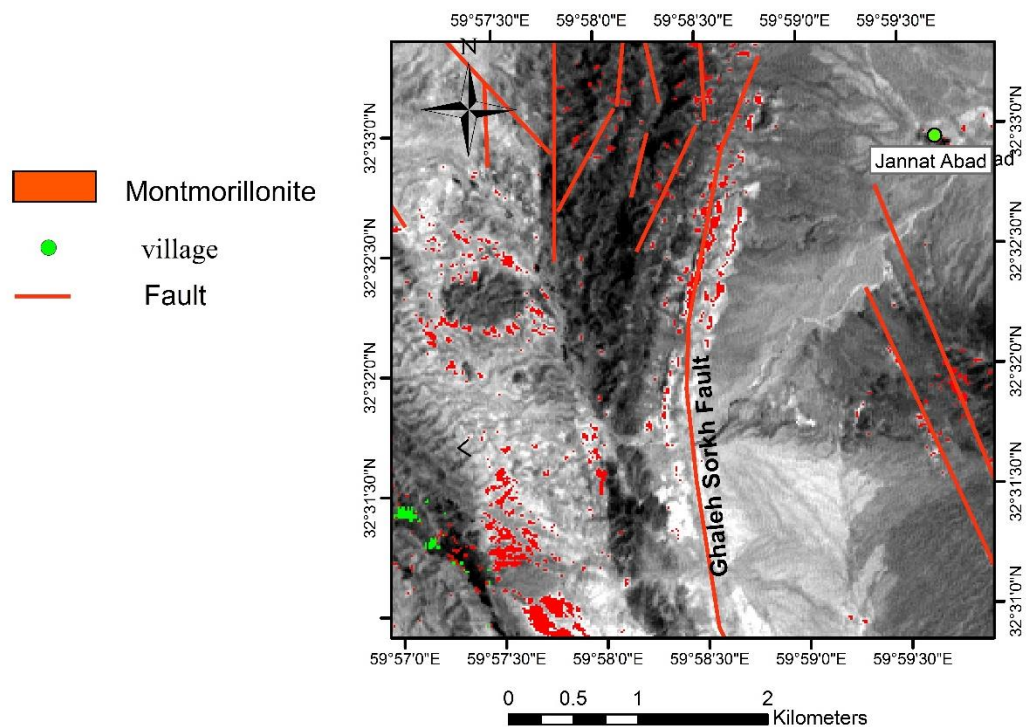
- [59]Smith E.I., Sánchez A., Walker J.D., and Wang K., "Geochemistry of mafic magmas in the Hurricane Volcanic field, Utah: implications for small- and large-scale chemical variability of the lithospheric mantle", *Journal of Geology* 107 (1999) 433-448. (<https://doi.org/10.1086/314355>)
- [60]Moharami F., Azadi I., Mirmohamadi M., Mehdipour Ghazi J., and Rahgoshay M., "Petrological and geodynamical constraints of Chaldoran basaltic rocks, NW Iran: Evidence from geochemical characteristics", *Iranian Journal of Earth Sciences* 6 (2014) 31-43.
- [61]Ersoy E.Y., Helvaci C., and Palmer M.R., "Mantle source characteristics and melting models for the early-middle Miocene mafic volcanism in western Anatolia: implications for enrichment processes of mantle lithosphere and origin of K-rich volcanism in post-collisional settings", *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 198 (2010) 112-128. (<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.08.014>)
- [62]Geng H., Sun M., Yuan C., Xiao W.J., Xian W.S., Zhao G.C., Zhang L.F., Wong K., and Wu F.Y., "Geochemical, Sr-Nd and zircon U-Pb-Hf isotopic studies of Late Carboniferous magmatism in the West Junggar, Xinjiang: implications for ridge subduction", *Chemical Geology* 266 (2009) 364-389 (<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.07.001>).



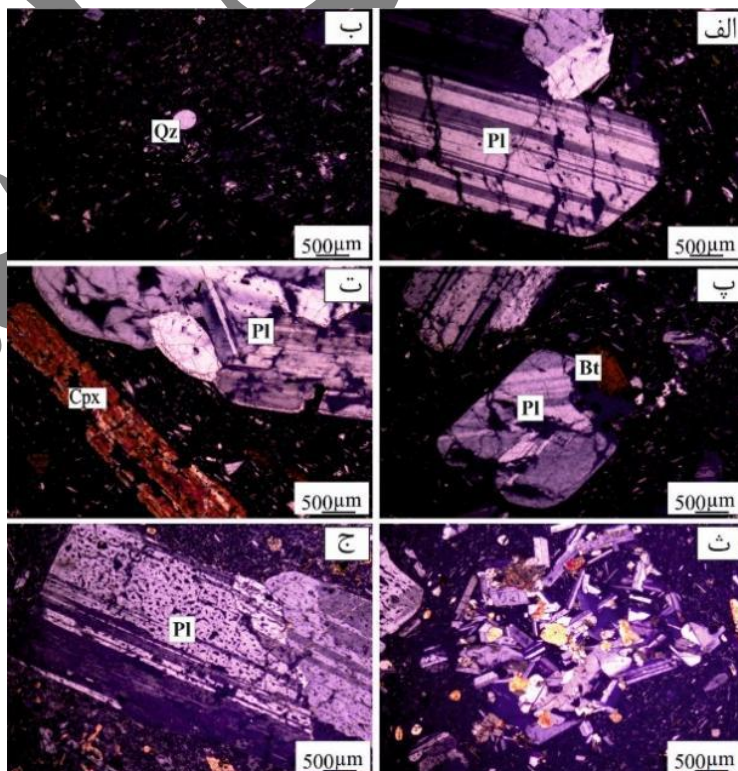
شکل ۱. نقشه زمین شناسی جنت آباد بر اساس نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ سریشه [۸].



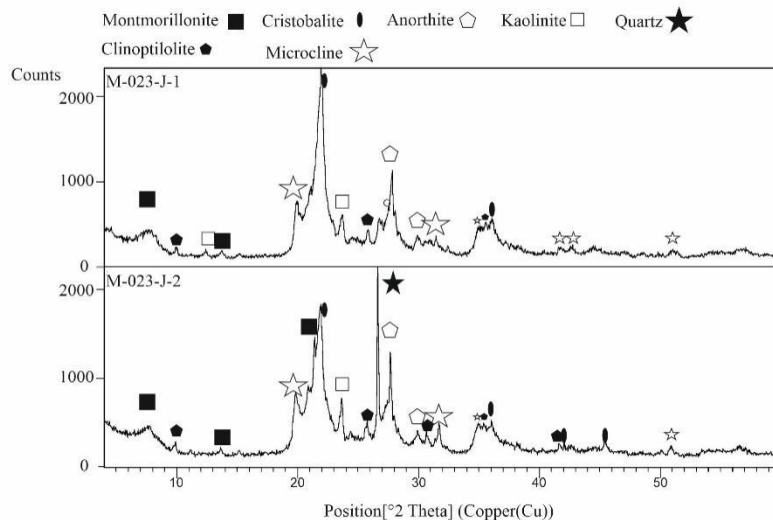
شکل ۲. خصوصیات صحرایی سنگهای مورد مطالعه؛ الف و ب) حضور واحدهای آمیزه افیولیتی در منطقه؛ پ و ت) رخنمون داسیت و اندزیت بر روی توف های بنتونیتی شده؛ ث و ج) ترانشه های احداث شده برای اکتشاف بنتونیت.



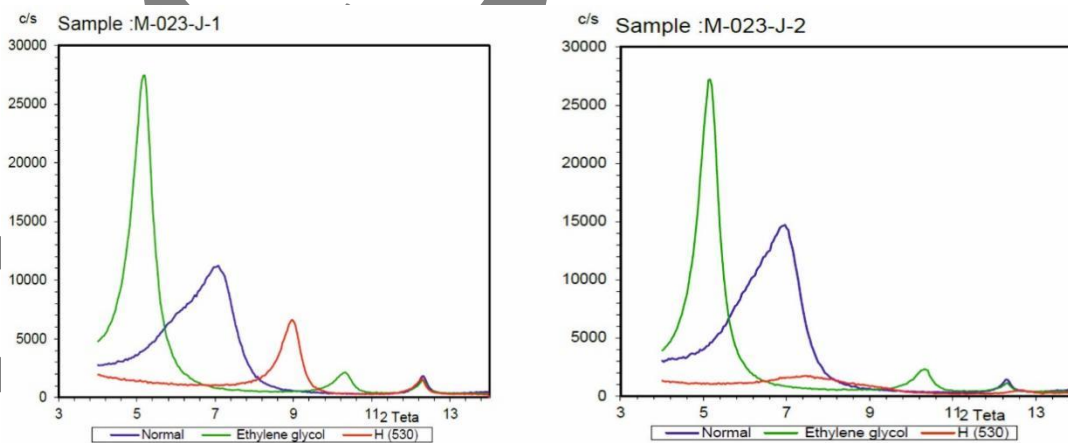
شکل ۳- پردازش تصاویر آستر به روش SAM برای کانی مونت موریونیت در منطقه مورد مطالعه



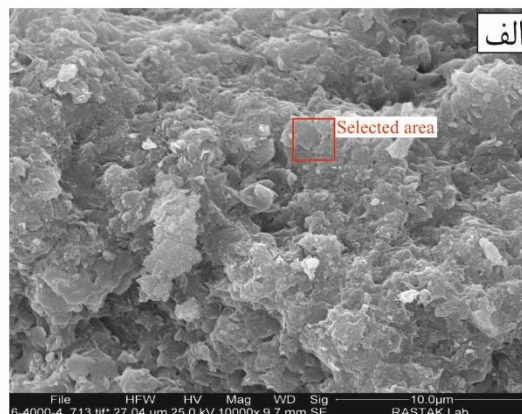
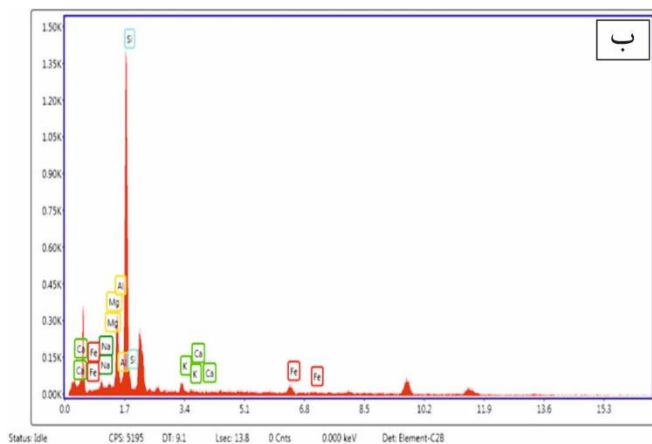
شکل ۴- خصوصیات میکروسکپی سنگ‌های گدازه‌ای مورد مطالعه: الف تا پ) بافت پورفیری با زمینه میکرولیتی شیشه‌ای در داسیت‌ها و حضور فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، بیوتیت و کوارتز؛ ت) حضور فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و پیروکسن در آندزیت؛ ث) بافت گلوپورفیری در آندزیت؛ ج) بافت غربالی در پلاژیوکلازهای موجود در آندزیت. (نور در تمامی شکل‌ها XPL است). علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از [۲۰].



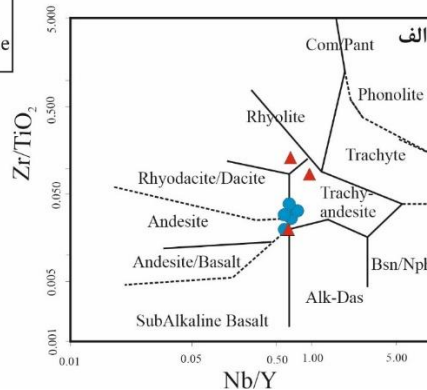
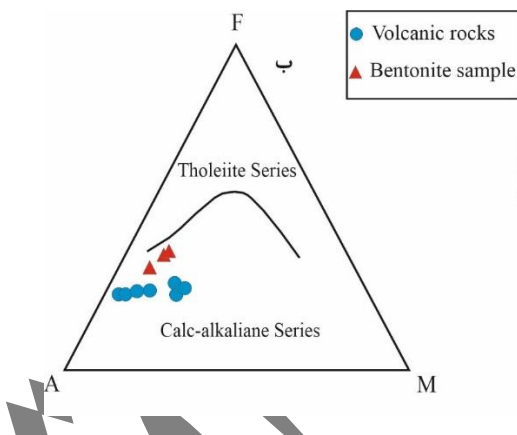
شکل ۵- نمودار دیفرانسیلی پرتو مجهول (XRD) مربوط به بنتونیت‌های منطقه مورد مطالعه.



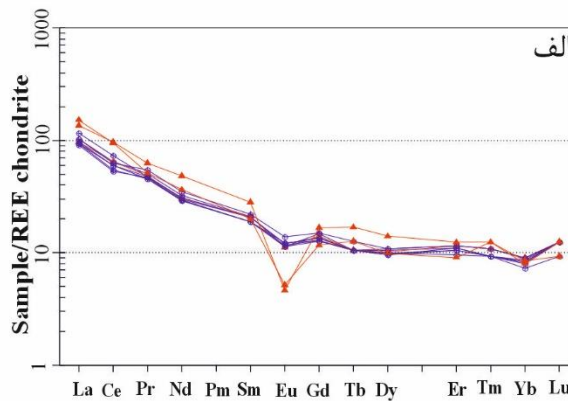
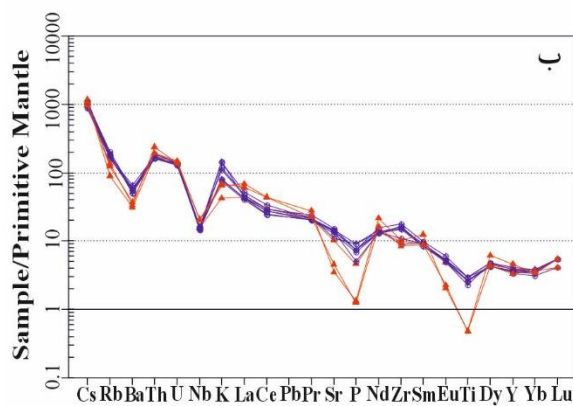
شکل ۶- نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس نمونه‌های بنتونیت جنت آباد در حالت نرمال، اشباع شده از حلال اتیلن گلیکول و حرارت داده



شکل ۷- تصویر میکروسکپ الکترونی و نمودار طیف سنجی پراکنش انرژی در نمونه بنتونیت جنت آباد

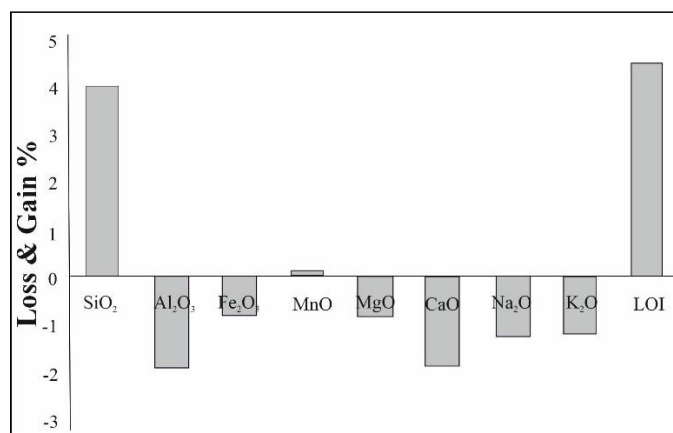


شکل ۸- الف) نمودار Nb/Y در برابر [۳۴] Zr/TiO₂، ب) نمودار سه تایی (Na₂O+ K₂O)- MgO- FeO [۳۵] جهت تعیین سری ماگمایی

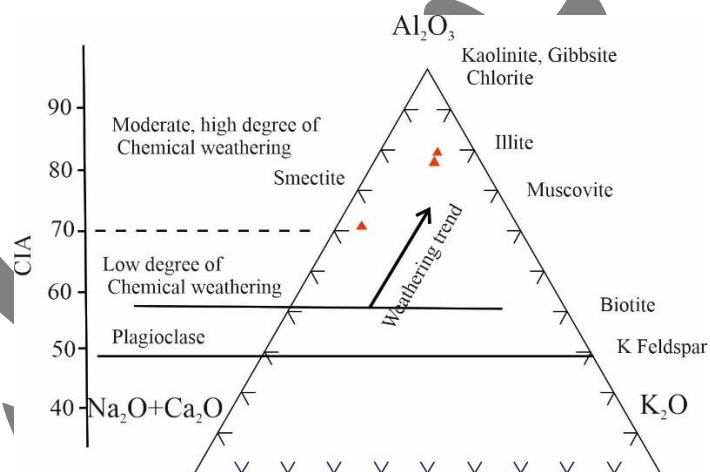


شکل ۹. الف : نمودار عناصر نادر خاکی بهنجار شده با کندریت [۳۶] و ب: نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب بهنجار شده با گوشته اولیه [۳۷] برای

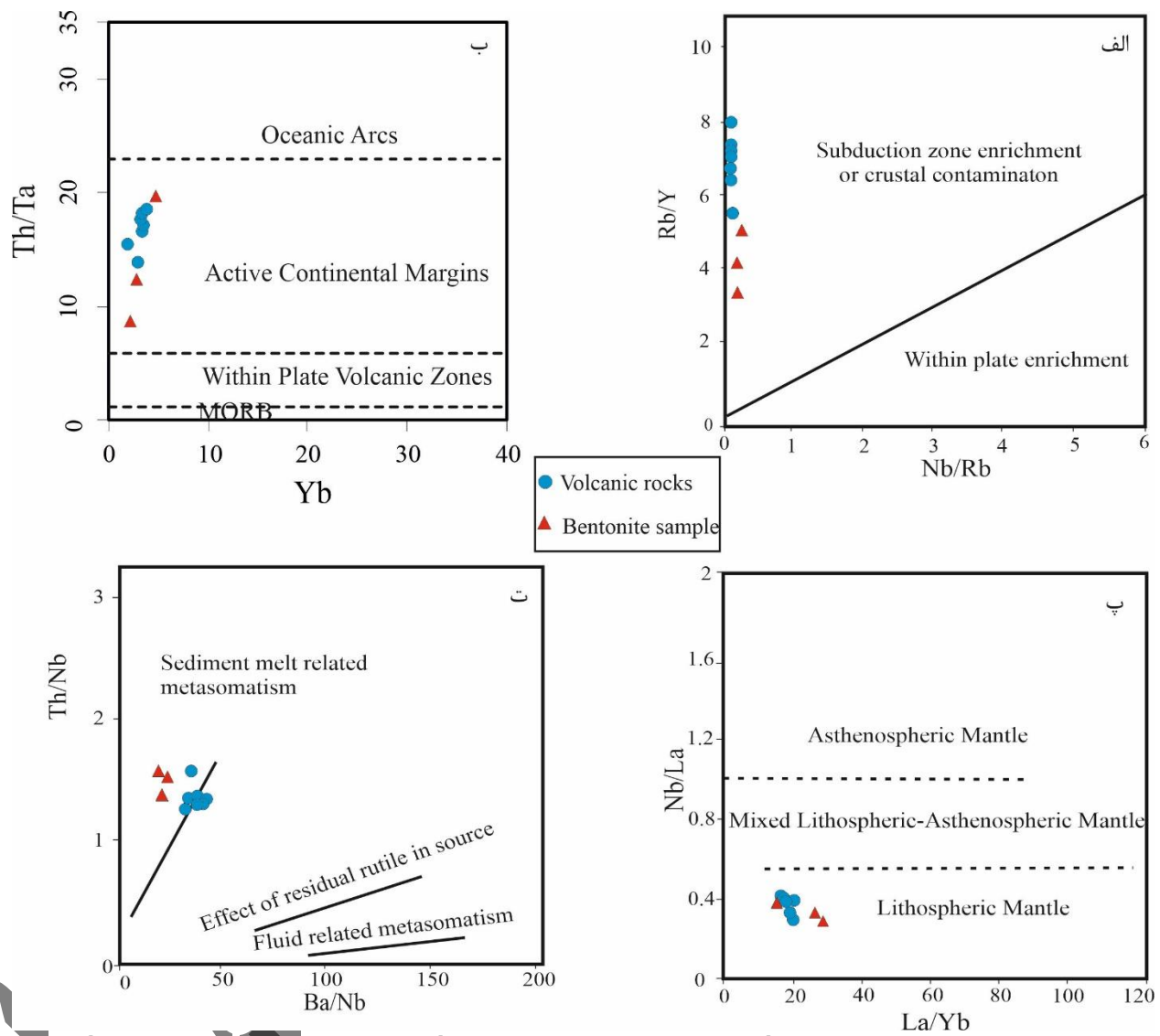
گدازه‌های حدواسط و اسیدی جنت آباد



شکل ۱۰. نمودار تغییرات جرم در بنتونیت های منطقه جنت آباد



شکل ۱۱. جایگاه نمونه های بنتونیتی منطقه جنت آباد در نمودار (ACNK) [۵۶]



شکل ۱۲. الف) نمودار Rb/Y در مقابل Nb/Rb [۵۷]، ب) نمودار Yb در مقابل Th/Ta [۵۸]، پ) نمودار La/Yb در برابر Nb/La [۵۹]، ت) نمودار Ba/Nb در برابر Th/Nb [۶۱].