



بررسی کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و رفتار عناصر در فرایند تشکیل بنتونیت‌های منطقه سربیشه (خراسان جنوبی، شرق ایران)

ملیحه نخعی^{*}، سید سعید محمدی^۱، ایرج رسا^۳، سمیه سمیعی^۱

۱- گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

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

۳- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۹۷/۲/۸، نسخه نهایی: ۹۷/۵/۶)

چکیده: فعالیت‌های آتشفسانی اسیدی تا حدوداً سطح ترشیری و عملکرد پهنه‌های گسلی در منطقه سربیشه، شرایط مناسبی را برای تشکیل بنتونیت به ویژه در نهشته‌های آذرآواری فراهم نموده است. پهنه‌های بنتونیتی جنوب‌شرق گندکان، کلاته پدران، گلاب، گلستان، آسفیج، حسن‌کلنگی و کنگان در گستره نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سربیشه هدف این پژوهش بوده‌اند. پردازش تصاویر ماهواره‌ای بیانگر رخداد دگرسانی گسترده رسی باحضور کانی مونتموریلوبونیت است. برداشت‌های صحرابی و بررسی‌های کانی‌شناسی به روش پراش پرتوی X (XRD)، پردازش‌های ماهواره‌ای و تشکیل بنتونیت در این مناطق را تایید نمود. کانی‌های اصلی تشکیل دهنده این بنتونیت‌ها شامل مونتموریلوبونیت، آنورتیت و کریستوپالیت هستند. بر اساس داده‌های موجود، بنتونیت حسن‌کلنگی از نوع سدیم-کلسیم‌دار، بنتونیت آسفیج از نوع کلسیم-سدیم‌دار و بنتونیت گلستان از نوع کلسیمی است. سنگ مادر بنتونیت‌های مورد بررسی شامل گذازه‌های اسیدی تا حدوداً سطح (ریوداسیت- داسیت تا آندزیت) و سنگ‌های آذرآواری (توف-برش) است که دچار دگرسانی متواتر تا شدید شده‌اند. محاسبه تغییرات زمین‌شیمیایی پهنه‌های بنتونیتی بیانگر کاهش سیلیس، سدیم و پتاسیم و افزایش کلسیم است.

واژه‌های کلیدی: بنتونیت؛ سربیشه؛ پردازش ماهواره‌ای؛ تغییرات جرمی.

مقدمه

اندازه کلوئیدی و ساختار کانی‌های اسماکتیت سبب شده است تا این گروه دارای گسترده وسیعی از کاربردها در صنایع مختلف باشد [۴]. این ماده معدنی امروزه در صنایع مختلفی از جمله گندوله‌سازی آهن، گل حفاری، سرامیک، ماسه ریخته‌گری، کاغذسازی، کشاورزی، لاستیک، پلاستیک، مواد نانو، پزشکی (بعنوان جاذب سموم) و مواد آرایشی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵-۷]. از بین انواع مختلف کانی‌های رسی، کلسیم و سدیم مونتموریلوبونیت دارای بیشترین موارد مصرف هستند [۸، ۹]. هرچند که فرایند تشکیل بنتونیت هنوز بخوبی شناخته

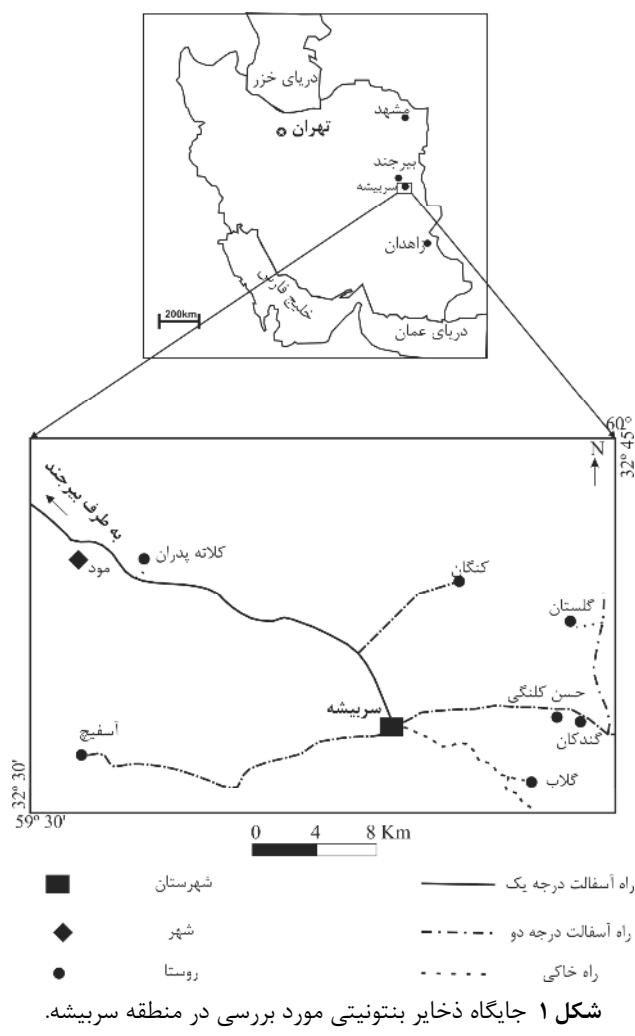
کانی‌های اصلی گروه اسماکتیت شامل کلسیم مونتموریلوبونیت، سدیم مونتموریلوبونیت، ساپونیت، ناترونیت، هکتوریت و بايدلیت هستند [۲]. مونتموریلوبونیت شاخص‌ترین کانی گروه اسماکتیت و تشکیل‌دهنده اصلی بنتونیت است [۲].

کانی‌های اصلی گروه اسماکتیت شامل کلسیم مونتموریلوبونیت، سدیم مونتموریلوبونیت، ساپونیت، ناترونیت، هکتوریت و بايدلیت هستند [۲]. مونتموریلوبونیت شاخص‌ترین کانی گروه اسماکتیت و تشکیل‌دهنده اصلی بنتونیت است [۲].

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۵۶۳۲۳۹۱۲۳۳، نامبر: ۰۵۶-۳۲۲۵۲۰۹۸، پست الکترونیکی: nakhaei@birjandut.ac.ir

یک محیط آبی کم عمق چون تالاب‌ها هستند. در این جا، پس از بررسی زمین‌شناسی، هفت ذخیره بنتونیتی جنوب‌شرقی گندکان، کلاته پدران، گلاب، گلستان، آسفیج، حسن کلنگی و کنگان در گستره نقشه زمین‌شناسی $1:100000$ سربیشه [۱۴]، به عنوان هدف پژوهش انتخاب شدند (شکل ۱). براساس تقسیم‌بندی زمین‌شناسی و ساختاری ایران، برخی از پژوهشگران منطقه سربیشه را بخشی از پهنه لوت [۱۵] و عده‌ای آن را در مرز زمین درز سیستان معرفی نموده‌اند [۱۶، ۱۷]. رویدادهای زمین‌ساختی مختلف در شرق ایران و به ویژه پهنه لوت، باعث رخداد حجم عظیم فعالیت مagma‌ای ترشیری (آتش‌شانی و نفوذی) با ویژگی‌های زمین‌شیمیایی مختلف شده [۱۸، ۱۵] و کانی‌سازی‌های مختلف فلزی و غیرفلزی را به همراه داشته است. در این پژوهش، پس از مطالعات دورسنجی، کانی‌شناسی و زمین‌شیمی، رفتار عناصر اصلی طی تشكیل بنتونیت بر پایه ویژگی‌های سنگ والد و شرایط محیطی بررسی شده است.

نشده است، اما بیشتر پژوهش‌ها در این زمینه بیانگر آن است که تشکیل این ماده معدنی در ارتباط با راسوگذاری خاکستر آتش‌شانی از جنس ریولیت تا آندزیت، در دریاچه‌ها یا نواحی دریایی کم عمق صورت می‌گیرد [۱۰]. برخی از پژوهشگران معتقدند که ذخایر بنتونیت به صورت توده‌های چینه سان (دگرسان شده بر جا) همراه لایه‌های غنی از خاکستر آتش‌شانی و نیز به صورت ذخایر نابرجا و عدسی شکل در بین توالی‌های رسوبی تشکیل می‌شود. در حالت نخست، دگرسانی دوتربیک و ترکیب سنگ‌شناسی نقش اساسی دارد، در صورتیکه در حالت دوم، هوازدگی سبب نهشته شدن عدسی‌های خاکستر آتش‌شانی در دریاچه‌ها یا محیط‌های دلتایی می‌شود [۱۱]. بسیاری از ذخایر مهم بنتونیت ایران در شرق کشور و به‌ویژه در استان خراسان جنوبی واقع شده است. این ذخایر، بیشتر بوسیله سنگ‌های آتش‌شانی اوسن میزبانی شده و بعقیده برخی از پژوهشگران [۱۳، ۱۲] نتیجه فرایندهای درونزدی پس از فوران و ته‌نشینی خاکسترها آتش‌شانی در



دگرسانی

پردازش تصاویر ماهواره‌ای

امروزه پردازش تصاویر ماهواره‌ای و کاربرد آن در اکتشاف موادمعدنی مورد توجه ویژه‌ای قرار دارد. این روش به عنوان روشی سریع و ارزان، جانشین روش‌های نقشه‌برداری سنتی از مناطق دربردارنده کانی‌های رسی شده است [۲۶]. دقیق روش پردازش ماهواره‌ای به حدی است که قدرت تفکیک کانی‌هایی را که در مقاطع میکروسکوپی قابل تشخیص نیستند و تنها با روش پراش پرتو ایکس (XRD) می‌توان آنها را شناسایی کرد، دارد. این امر مربوط به تفاوت‌های جزئی در دامنه طیف جذبی و بازتابی امواج الکترومغناطیسی کانی‌هاست. بررسی‌های دورسنجی در این منطقه به کمک داده‌های ماهواره‌ای استر با شماره Aster1B_64839_615 که در تاریخ ۱۱/۵/۲۰۰۶ تصویربرداری شده‌اند، انجام گرفت. سنجنده آستر شامل ۱۴ نوار است که براساس گستره طول موج به سه دسته تقسیم شده است [۲۷] که عبارتند از: ۱- گستره مرئی و فروسرخ نزدیک (VNIR) شامل سه نوار ۱، ۲ و ۳ با تفکیک مکانی ۱۵ متر، ۲- گستره فروسرخ کوتاه (SWIR) شامل شش نوار (۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹) و دارای تفکیک مکانی ۳۰ متر، ۳- گستره فروسرخ گرمایی (TIR) شامل پنج نوار (۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴) با تفکیک مکانی ۹۰ متر.

در این پژوهش تصاویر ماهواره‌ای، پس از تصحیح هندسی و مکان نگاری و ادغام نوارهای SWIR و VNIR و TIR، به روش نقشه‌برداری زاویه طیفی (SAM) با نرمافزار ENVI 4.4 پردازش شدند. روش تفکیک SAM (Supervised Mapper) نوعی رده‌بندی هدایت شده (Classification) است که از مقایسه طیف تصاویر و طیف استاندارد کتابخانه طیفی استفاده می‌کند [۲۹، ۳۰]. از مزیت‌های این روش شناسایی دقیق نوع و محل کانی‌ها و شدت و گسترش دگرسانی به تفکیک پهنه‌های مختلف است. در منطقه مورد بررسی، طیفهای موجود در پیکسل‌های تصویر آستر با کتابخانه طیفی دیجیتالی سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) موجود در نرمافزار ENVI 4.4 مقایسه شدند. در این روش، کانی مونتموریلونیت به عنوان شاخص پهنه دگرسانی رسی و زیپس بعنوان کانی فرعی موجود در بیشتر پهنه‌های بنتونیتی در نظر گرفته شده است. طیف استاندارد کانی‌های

روش بررسی

برای انجام این پژوهش، تصاویر ماهواره‌ای استر از مناطق مورد بررسی تهیه و پردازش گردید. بر این اساس، مناطق امیدبخش شناسایی و با برداشت‌های صحرایی کنترل شد. برای بررسی-های سنگنگاری و دگرسانی سنگ اولیه، حدود ۳۰ مقطع نازک تهیه و با دقت بررسی گردید. به منظور بررسی ترکیب کانی‌شناسی بنتونیت‌های مورد بررسی، پس از نمونه‌برداری دقیق از پهنه‌های بنتونیتی، تعداد ۱۸ نمونه به روش پراش پرتوی ایکس (XRD) و برای عناصر اصلی و فرعی به روش طیفسنجی فلئورسانس پرتوی ایکس (XRF) در شرکت کانسaran بینالود تهران تجزیه شدند.

بحث و بررسی

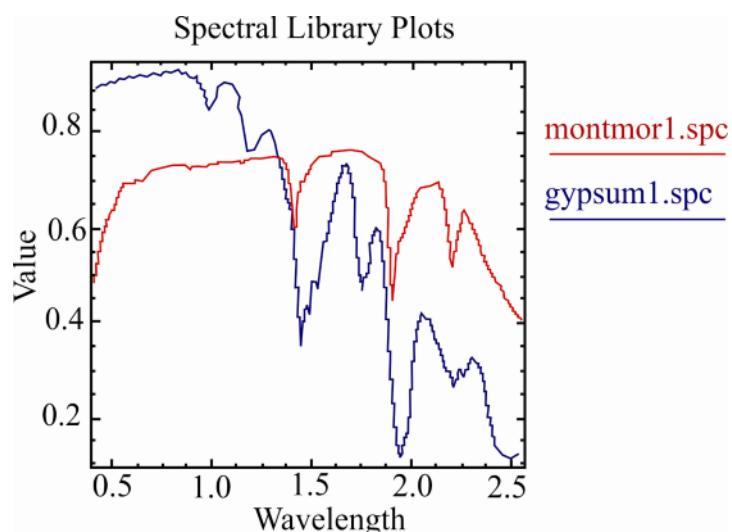
زمین شناسی

براساس نقشه ۱:۱۰۰۰۰ سربیشه [۱۴]، واحدهای سنگی منطقه در سه گروه سنگ‌های آتشفسانی، آذرآواری و رسوبات عهد حاضر تقسیم می‌شوند. نتایج پژوهش‌های مختلف [۱۹-۲۲] نشان داده است که سنگ‌های آتشفسانی منطقه سربیشه به صورت گدازه‌ای و آذرآواری (توف، آکلومرا و برش) با ترکیب حدواتر تا اسیدی شامل آندزیت، تراکی‌داسیت، داسیت و ریولیت (گاهی پرلیتی) رخنمون دارند. توف‌ها از مهم‌ترین واحدهای آذرآواری در این منطقه و از نوع شیشه‌ای، بلورین و شیشه‌ای-بلورین هستند که در اثر دگرسانی به کانی‌های رسی از جمله بنتونیت تبدیل شده‌اند. پهنه‌های بنتونیتی لایه‌ای و عدسی شکل با گستردگی بسیار در منطقه، پتانسیل اقتصادی نسبتاً بالایی دارند. از نظر ساختاری، منطقه سربیشه تحت تاثیر عملکرد پهنه گسلی سربیشه با طول تقریبی ۶۰ کیلومتر با راستای شمال غرب-جنوب شرق و در راستای یکی از سرشاخه‌های گسل نه خاوری قرار دارد که با تداوم به جنوب، به بخش اصلی گسل نهندان متصل می‌گردد [۲۳]. افزون بر این، گسل‌های همت آباد، شوشک، دسته قیچ، زولسک [۲۴]، قلعه سرخ و پورنگ [۲۵] نقش مهمی در خردشدنی و دگرسانی سنگ‌های گدازه‌ای- آذرآواری و تشکیل پهنه‌های دگرسانی رسی، سیلیسی، اکسید آهن و تشکیل بنتونیت داشته است. رنگ بنتونیت‌های مورد بررسی بر اساس نوع سنگ اولیه و فراورده‌های دگرسانی، متغیر است و به رنگ‌های سفید، سبز، قرمز و صورتی دیده می‌شوند.

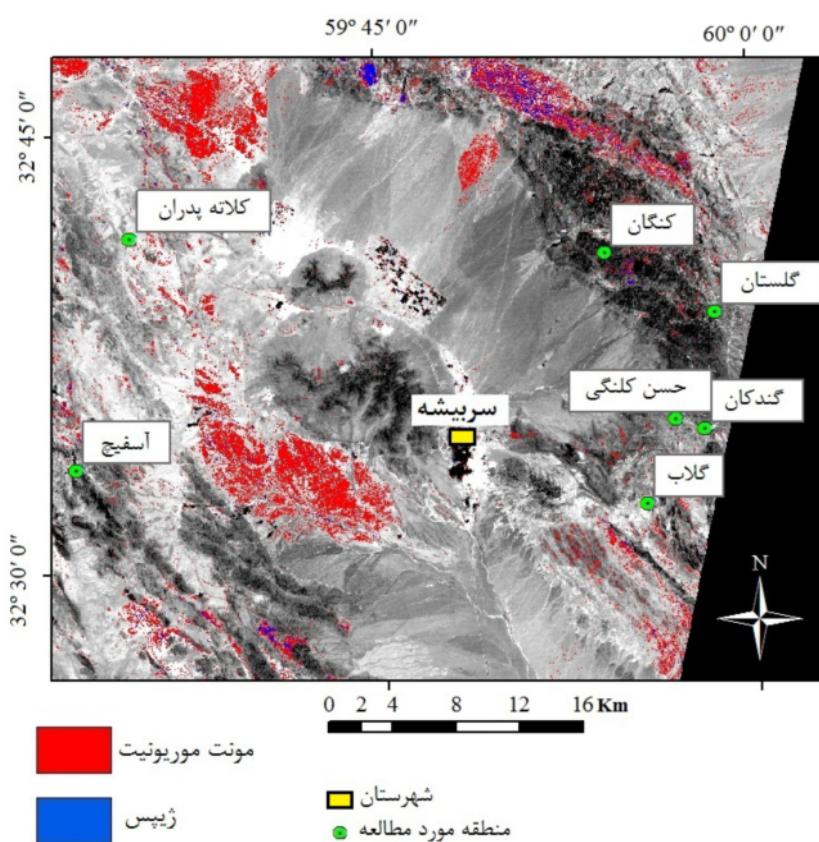
این دگرسانی‌ها را تایید نمود، بطوریکه رخداد فعالیت‌های آتشفسانی اسیدی اوسن-الیگومن در شرق و شمال شرق سربیشه، شرایط مناسبی را برای تشکیل بنتونیت بوجود آورده است.

انتخاب شده از کتابخانه طیفی سازمان زمین‌شناسی آمریکا در شکل ۲ آمده است.

بر اساس نتایج بدست آمده از بررسی‌های دورسنجی، دگرسانی رسی و کانی مونتموریولونیت در مناطق هدف قابل مشاهده است (شکل ۳). نتایج بررسی‌های صحرایی نیز حضور



شکل ۲ طیف استاندارد کانی‌های انتخاب شده از کتابخانه طیفی سازمان زمین‌شناسی آمریکا موجود در نرم افزار ENVI 4.4 (2003)



شکل ۳ پردازش تصاویر آستر به روش SAM برای کانی‌های مونتموریولونیت و ژیپس در مناطق مورد بررسی.

بیشتر نمونه‌ها وجود دارد. نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های بنتونیت از مناطق مورد بررسی (جدول ۲) نشان می‌دهد که در نمونه‌های بنتونیت منطقه جنوب شرق گندکان و گلاب، مقدار CaO بیشتر از Na₂O است اما با وجود کانی آلبیت به عنوان فاز اصلی، تعیین نوع بنتونیت نیاز به نمونه‌برداری‌های بیشتری دارد. در منطقه کنگان از ۳ نمونه برداشت شده جهت XRD، تعداد ۲ نمونه برای تجزیه شیمیایی نیز انتخاب شد که مقدار Na₂O آنها بالاتر از CaO است، ولی با توجه به حضور کانی‌های آنورتیت، سنگ گچ و هالیت در این نمونه‌ها، تعیین نوع بنتونیت امکان پذیر نیست. در بیشتر نمونه‌ها منطقه حسن کلنگی، مقدار Na₂O بیشتر از CaO است که با بهره‌گیری از ترکیب کانی‌شناسی، می‌توان گفت که این بنتونیت از نوع سدیم-کلسیم‌دار است. نمونه‌های آسفیچ و گلستان به ترتیب از نوع کلسیم-سدیم‌دار و کلسیم‌دار هستند.

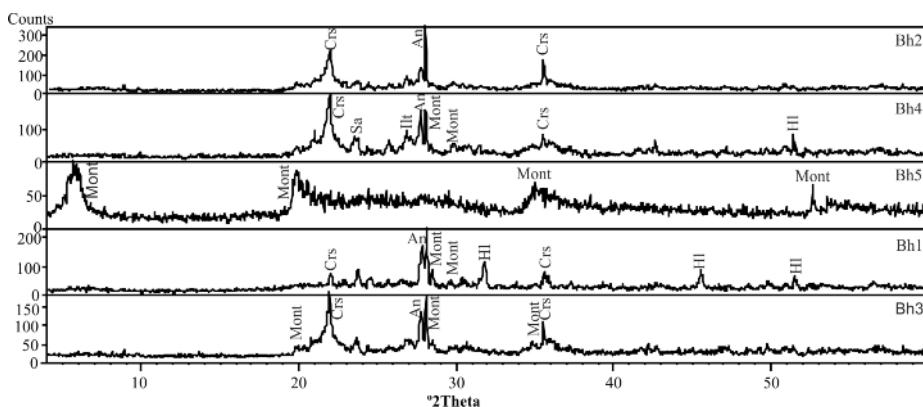
ویژگی‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی

با توجه به اینکه بنتونیت‌ها ترکیبی از رس اسماکتیتی و چند کانی دیگر هستند، برای تشخیص نوع کانی رسی و کانی‌های همراه از روش XRD استفاده شد. بررسی‌های کانی‌شناسی در مناطق هدف نشان می‌دهد که مونتموریولونیت، آنورتیت، کریستوبالیت و کانی‌بی شکل سازنده‌های اصلی هستند که در مقادیر کمتر با ایلیت، هالیت، زیپس، کلسیت و دولومیت همراه هستند. ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌های بنتونیت مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است. بر این اساس مشخص شد که در همه نمونه‌های مورد بررسی، مونتموریولونیت به عنوان کانی اصلی و یا فرعی وجود دارد.

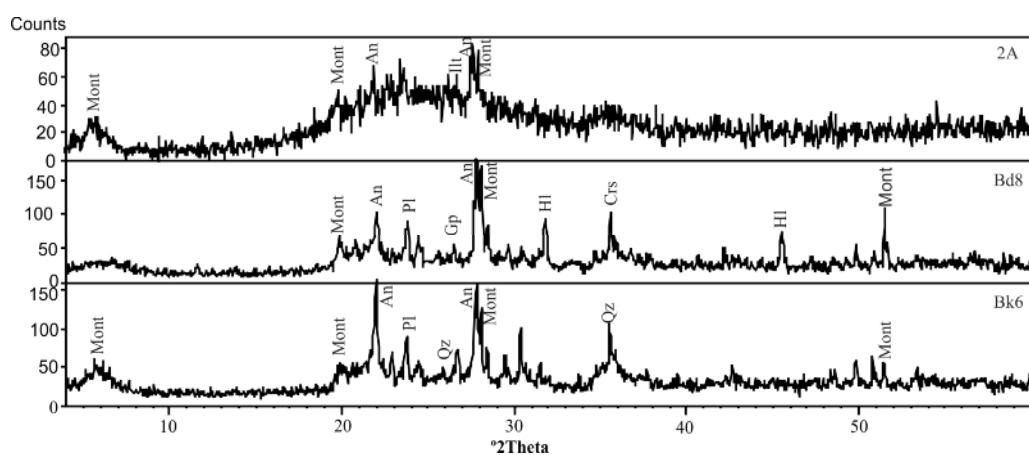
در شکل‌های ۴ و ۵، نمودار پراش پرتوی ایکس نمونه‌های بنتونیت منطقه حسن کلنگی و کنگان آمده است. چنان‌که دیده می‌شود، کانی مونتموریولونیت به عنوان فاز اصلی در

جدول ۱ مشخصات کانی‌شناسی نمونه‌های بنتونیت از مناطق مورد بررسی.

منطقه	کد نمونه	فاز اصلی	فاز فرعی
جنوب شرق گندکان	SEG	مونتموریولونیت-آلیت، کریستوبالیت	کوارتز، مسکوکیت
کلاته پران	GKP	مونتموریولونیت، آلیت، فاز بی شکل، کوارتز	سنگ گچ
گلاب	GB	مونتموریولونیت، آلیت، بی شکل	کوارتز
گلستان	GLS1	کریستوبالیت، مونتموریولونیت، آلیت	هالیت
	GLS2	کریستوبالیت، مونتموریولونیت	هالیت
	GLS3	کریستوبالیت، مونتموریولونیت	هالیت، آلیت
آسفیچ	ASF1	مونتموریولونیت، آلیت	کوارتز
	ASF2	مونتموریولونیت	کوارتز
	ASF3	مونتموریولونیت	کوارتز
حسن کلنگی	HK-GZ	مونتموریولونیت، کریستوبالیت، آلیت	-
	Bh1	مونتموریولونیت، آنورتیت، بی شکل	هالیت، کریستوبالیت
	Bh2	آنورتیت، مونتموریولونیت، کریستوبالیت	بی شکل، کوارتز، ایلیت
	Bh3	آنورتیت، کریستوبالیت	بی شکل، ایلیت، مونتموریولونیت
	Bh4	آنورتیت، کریستوبالیت	آلیت، مونتموریولونیت، سانیدین
	Bh5	مونتموریولونیت	-
کنگان	Bk6	آنورتیت - مونتموریولونیت، کریستوبالیت	کوارتز، بی شکل
	2A	بی شکل، مونتموریولونیت	آنورتیت، ایلیت
	Bd8	آنورتیت - مونتموریولونیت	سنگ گچ، کریستوبالیت، بی شکل، هالیت



شکل ۴ طیف پراش پرتوی X (XRD) مربوط به پنج نمونه از بنتونیت‌های منطقه حسن کلنگی.



شکل ۵ طیف پراش پرتوی X (XRD) مریبوط به سه نمونه از بنتونیت‌های منطقه کنگان.

جدول ۲ نتایج تجزیه عناصر اصلی (wt%) و فرعی (ppm) (بنتونیت‌های مورد بررسی).

جایگاه	جنوب شرق گندکان	کلاتنه پدران	گلستان	گلستان	گلستان	آسفیج	آسفیج	آسفیج
کد نمونه	SEG	GKP	GB	GLS1	GLS2	GLS3	ASF1	ASF2
SiO ₂	74,23	72,03	73,8	72,65	74,42	68,26	65,09	66,07
TiO ₂	0,28	0,22	0,06	0,29	0,15	0,24	0,53	0,53
Al ₂ O ₃	12,01	12,62	12,13	10,78	11,17	11,27	13,25	15,71
Fe ₂ O ₃	2,50	2,50	1,99	2,33	1,65	2,00	7,52	3,71
MnO	0,013	0,05	0,03	0,01	0,02	0,03	0,22	0,01
MgO	1,48	1,19	0,39	2,08	1,53	2,52	1,38	2,52
CaO	1,26	2,00	0,85	0,85	0,92	3,48	2,52	2,72
Na ₂ O	2,16	1,62	1,20	1,94	1,85	0,51	1,73	1,95
K ₂ O	1,07	2,88	3,03	0,50	0,84	0,69	0,85	0,72
P ₂ O ₅	0,044	0,04	0,01	0,47	0,01	0,03	0,03	0,04
افت گرمایی	4,46	4,66	5,73	7,38	6,71	10,43	6,61	5,98
مجموع	99,51	99,81	99,22	99,28	99,23	99,46	99,73	99,80
V(ppm)	254	31	24	31	26	30	80	41
Co	4	5	6	2	2	3	15	7
Ni	3	25	6	10	8	4	63	59
Rb	50	119	144	41	72	56	55	33
Sr	254	246	114	177	150	300	366	381
Nb	7	11	12	13	12	7	3	16
Ba	107	397	144	89	47	14	636	250
Th	16	10	10	21	26	20	15	16
U	2	2	8	9	4	7	2	3
Zr	242	101	63	155	114	138	178	216
Y	16	20	25	20	17	16	15	17
Ce	86	25	3	2	5	14	21	38
Cu	1	1	1	1	1	1	2	18
Zn	65	53	52	36	37	33	110	73
Pb	18	30	19	18	13	20	16	14
Cr	1	1	1	1	1	1	5	8

ادامه جدول ۲

جایگاه	حسن کلنگی	کنگان										
کد نمونه	HK-GZ	Bh1	Bh2	Bh3	Bh4	Bh5	Bh6	2A	Bd8			
SiO ₂ (Wt%)	۷۰,۴	۶۰,۲۱	۶۸,۷۱	۶۸,۲۲	۷۰,۲۷	۵۶,۷۴	۶۴,۹۸	۶۸,۲۵	۵۸,۳۳			
TiO ₂	۰,۲۴	۰,۴۸	۰,۲۶	۰,۲۷	۰,۲۲	۰,۶۱	۰,۵۶	۰,۲۲	۰,۵۵			
Al ₂ O ₃	۱۲,۰۸	۱۵,۲۲	۱۴,۵۶	۱۴,۶۱	۱۳,۲۶	۱۵,۳۳	۱۵,۴۶	۱۴	۱۳,۸۷			
Fe ₂ O ₃	۲,۸۴	۲,۳۲	۲,۶۵	۲,۲۲	۲,۴۲	۴,۷۸	۲,۹۶	۱,۴۳	۲,۳۷			
MnO	۰,۰۱	۰,۰۷	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۶	۰,۰۸	۰,۱۴	۰,۰۳	۰,۰۱			
MgO	۲,۷۸	۰,۹۸	۰,۶۱	۰,۶۲	۰,۵۶	۲,۲۱	۰,۸۱	۰,۶۳	۰,۹۳			
CaO	۱,۵۹	۲,۶۶	۱,۲۱	۱,۲۸	۱,۲۲	۲,۷۱	۳,۸۲	۱,۱۶	۲,۶۲			
Na ₂ O	۱,۴۱	۵,۱۱	۲,۴۱	۲,۸۶	۲,۳۹	۰,۷۵	۱,۶۹	۱,۶۱	۴,۷۴			
K ₂ O	۰,۸۰	۲,۱۹	۲,۷۶	۲,۹۸	۳,۹۸	۰,۵۶	۱,۳۹	۴,۳۸	۱,۱۸			
P ₂ O ₅	۰,۰۴	۰,۱۲	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۰۷	۰,۰۸	۰,۱۳	۰,۰۲	۰,۱۳			
افت گرمایی	۷,۲۳	۸,۵۱	۶,۵۲	۶,۳۸	۵,۳۴	۱۰,۹۲	۷,۹۶	۷,۹۹	۱۲,۴۴			
مجموع	۹۹,۴۲	۹۹,۸۷	۹۹,۷۶	۹۹,۵۳	۹۹,۷۹	۹۹,۷۷	۹۹,۸۰	۹۹,۷۲	۹۹,۱۷			
V(ppm)	۲۸	۵۴	۲۹	۲۴	۳۰	۶۶	۶۷	۲۶	۶۶			
Co	۶	۳	۳	۲	۴	۱۷	۳	۳	۷			
Ni	۳	۴۴	۳۵	۳۳	۴۰	۱۰۱	۵۵	۳۶	۴۸			
Rb	۵۵	۱۳۲	۱۱۳	۱۱۱	۱۳۲	۳۴	۱۰۵	۲۲۷	۱۰۶			
Sr	۳۳۳	۵۰۹	۲۴۱	۲۷۷	۲۳۵	۷۸۷	۴۶۶	۱۸۹	۴۲۶			
Nb	۳	۲	۱۶	۴	۵	۴	۲	۲	۲			
Ba	۹۲	۲۹۴	۲۹۲	۴۸۰	۳۸۷	۳۳۵	۴۸۹	۵۶۹	۴۱۳			
Th	۱۱	۸	۱۶	۷	۶	۲	۱۳	۱۹	۹			
U	۱	۱	۶	۳	۸	۱	۳	۹	۷			
Zr	۲۱۴	۲۴۴	۲۷۷	۲۹۰	۲۸۳	۲۶۶	۲۷۹	۲۲۰	۲۵۲			
Y	۱۷	۵۰	۵۰	۵۱	۵۴	۲۷	۴۷	۷۵	۴۸			
Ce	۳۱	۳۲	۷۲	۵۰	۶۴	۲۶	۵۳	۳۱	۵۴			
Cu	۱	۲۳	۱۹	۲۰	۲۰	۴۹	۳۴	۲۶	۱۹			
Zn	۵۸	۴۸	۷۶	۷۲	۷۱	۶۷	۶۴	۴۶	۶۰			
Pb	۱۹	۲۳	۲۵	۱۹	۲۸	۱۳	۳۶	۳۷	۲۲			
Cr	۱	۱۵	۵	۶	۶۱	۹۹	۹	۱۴۵	۲۵			

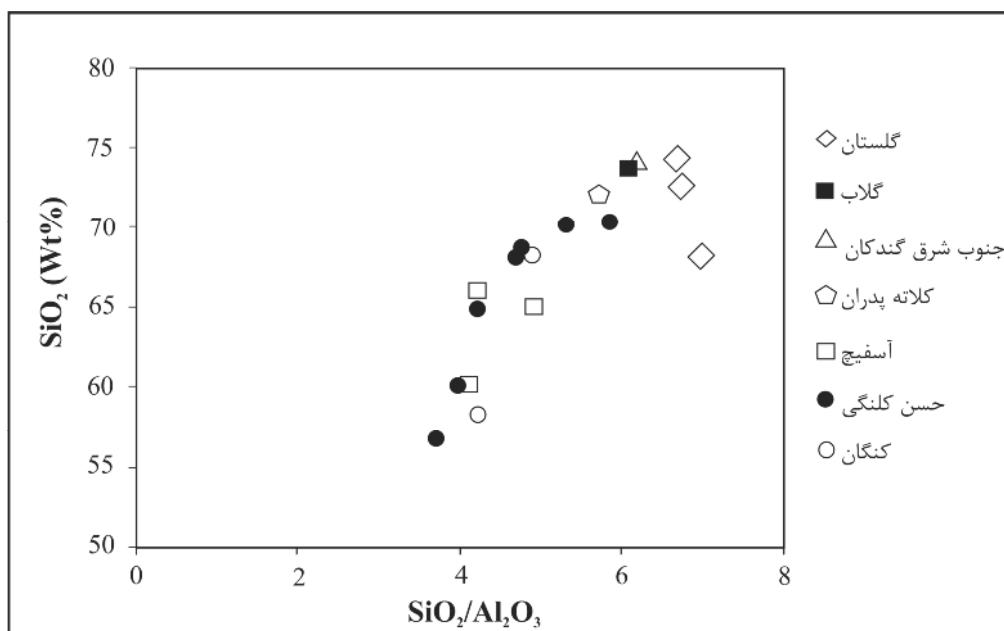
موریلونیت و یا بهبود ویژگی‌های این کانی با حذف ناخالصی‌ها برای کاربردهای مختلف ضروری است. به منظور به دست آوردن ذرات مونتموریلونیت کوچکتر از ۲ میکرون، روش‌هایی مانند الک کردن، پراکنش ذرات بر اساس سرعت تنهشینی، مرکزگریزی و استفاده از امواج فراصوت به کار رفته است [۳۲-۳۴]. توک و همکاران [۳۲] روش‌های تنهشینی، مرکزگریزی و امواج فراصوت را در حذف ناخالصی کوارتز موثر می‌دانند. در شکل ۷ تغییرات مقدار Fe₂O₃ نسبت به SiO₂ [۳۱] در بنتونیت‌های مورد بررسی نشان داده شده است. بیشترین مقدار

مقدار SiO₂ در نمونه‌های بنتونیت از ۷۰,۴ تا ۷۴,۴۲ در تغییر است (جدول ۲). به منظور تعیین مقدار ناخالصی سیلیس (بصورت کوارتز، تریدیمیت و یا کریستوبالیت) در بنتونیت‌های مورد بررسی از نسبت SiO₂/Al₂O₃ و درصد SiO₂/Al₂O₃ استفاده شد [۳۱] (شکل ۶). چنان‌که دیده می‌شود، مقدار سیلیس آزاد در بنتونیت‌های مورد بررسی به طور متوسط ۶۰-۶۵ درصد است. وجود کانی‌های غیررسی در بنتونیت، اثرهای منفی بر کیفیت و کاربردهای احتمالی آن دارد [۳۲]. بنابراین ناخالصی‌های بنتونیت باید تا حد ممکن حذف شوند. افزایش مقدار مونت-

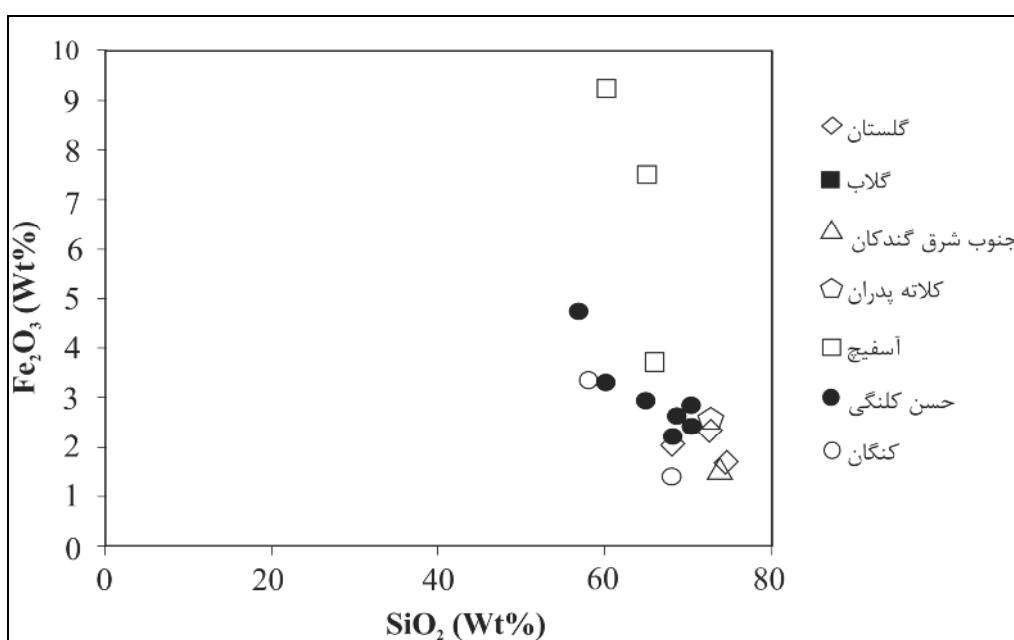
مورد بررسی از نمودار Zr/TiO_2 نسبت به Nb/Y (شکل ۸) [۳۵] استفاده شد. چنان که در این شکل دیده می‌شود، سنگ اولیه بیشتر بنتونیت‌های مورد بررسی دارای ترکیب ریوداپیت-آندزیت و در برخی نمونه‌ها آندزیت و تراکی آندزیت است.

Fe_2O_3 مربوط به بنتونیت‌های منطقه آسفیچ و کمترین آن مربوط به برخی نمونه‌های منطقه حسن کلنگی است. فراوانی آهن در بنتونیت‌ها سبب ایجاد رنگ زرد مایل به سبز شده است.

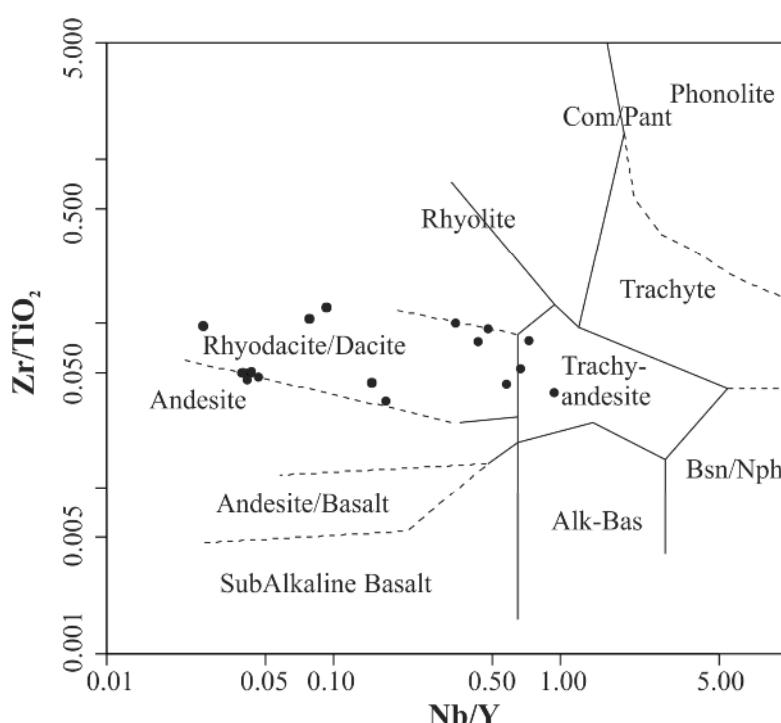
به منظور تعیین ترکیب شیمیایی سنگ مادر بنتونیت‌های



شکل ۶ تغییرات SiO_2/Al_2O_3 نسبت به SiO_2 برای بنتونیت‌های مورد بررسی [۳۱].



شکل ۷ تغییرات Fe_2O_3/SiO_2 نسبت به SiO_2 برای بنتونیت‌های مورد بررسی [۳۱].



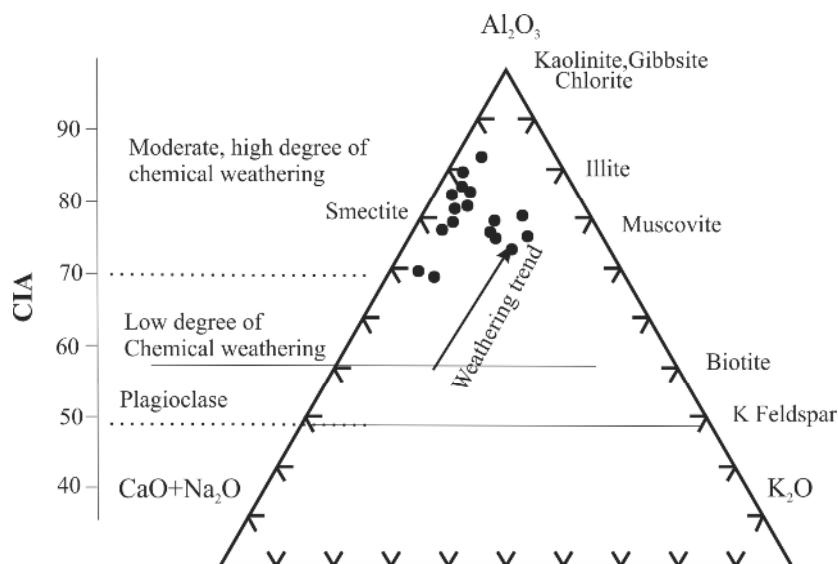
شکل ۸ جایگاه نمونه‌های بنتونیتی مناطق مورد بررسی در نمودار Nb/Y vs Zr/TiO_2 [۳۵].

می‌تواند تا ۱۰۰ درصد افزایش یابد. چنان که در شکل ۹ دیده می‌شود، همه نمونه‌های مناطق کنگان و حسن‌کلنگی در گسترهٔ هوا زدگی شیمیایی شدید تا متوسط قرار گرفته و روند هوا زدگی، تبدیل پلاژیوکلاز به اسمکتیت را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار CIA مربوط به نمونه‌های آسفیچ (۸۳ درصد) بوده و چنان که در جدول ۱ دیده می‌شود، در بیشتر نمونه‌های این منطقه، مونتموریولونیت بعنوان تنها فاز اصلی است.

شاخص شیمیایی دگرسانی
شاخص شیمیایی دگرسانی CIA بر اساس مقدار آلومینیوم نسبت به عناصر قلیایی تعریف شده [۳۷، ۳۶] و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] * 100$$

بیشینه مقدار CIA برای سنگ‌های سالم ۵۰ درصد است که با افزایش شدت دگرسانی و حمل همه عناصر قلیایی، مقدار آن



شکل ۹ جایگاه نمونه‌های بنتونیتی منطقه مورد بررسی در نمودار ACNK [۳۷].

$$\text{E.F.} = \frac{\text{فراوانی } \text{TiO}_2 \text{ در نمونه دگرسان نشده (سنگ‌های آتشفشاری)}}{\text{فراوانی } \text{TiO}_2 \text{ در نمونه دگرسان شده (بنتونیت)}}$$

تعیین ترکیب بازسازی شده^۲ (R.C.)

ترکیب بازسازی شده، جرم خالص یک واحد یا سنگ را نشان می‌دهد که از اجزای متحرک غنی یا تهی شده‌اند. ترکیب بازسازی شده برای هر عنصر از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\text{R.C.} = \frac{\text{فراوانی عنصر یا اکسید مورد نظر در نمونه دگرسان شده}}{\text{فراوانی عنصر یا اکسید مورد نظر در نمونه دگرسان شده}} \times \text{E.F.}$$

تعیین تغییر جرم عناصر^۳ (M.C.)

تغییرات جرم عناصر از محاسبه تفاوت بین ترکیب بازسازی شده و سنگ اولیه به دست می‌آید. مقادیر تغییر جرم عناصر از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\text{M.C.} = \text{R.C.} - \frac{\text{فراوانی عنصر در ترکیب اولیه سنگ (نمونه شاهد)}}{\text{فراوانی عنصر در ترکیب اولیه سنگ (نمونه شاهد)}}$$

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تغییرات جرمی بنتونیت‌های منطقه حسن کلنگی و کنگان را نشان می‌دهد. تهی شدگی K و Si می‌تواند به دگرسانی فلدسپارها و ورود عناصر یاد شده به محلول‌های دگرسان کننده در سامانه واکنشی آب-سنگ مربوط باشد [۴۶]. K₂O تهی شدگی کمی نسبت به سنگ مادر نشان می‌دهد. این امر به دلیل مهاجرت K₂O از سنگ مادر است، اما به دلیل وجود ایلیت به صورت فاز فرعی در نمونه مورد بررسی و عدم حضور فلدسپات پتاسیم، کاهیدگی کم است. به عقیده ملک محمودی و همکاران [۴۷]، فرایند بنتونیت‌زایی می‌تواند از عوامل تأمین سیلیس باشد. اگر سیلیس از خاستگاه تشکیل بنتونیت منتقل شود، نخست بنتونیت بدون چند شکل‌های سیلیس تشکیل می‌شود و سرانجام باقی ماندن سیلیس اضافه در سیستم موجب تشکیل اوپال در کنار بنتونیت‌ها می‌گردد. این امر می‌تواند تهی شدگی شدید SiO₂ را توجیه کند. غنی شدگی CaO ممکن است به دلیل جایگیری آن در جایگاه میان لایه‌ای رس‌ها یا به دلیل وجود کانی آنورتیت باشد. پلازیوکلаз مهم‌ترین کانی در بردارنده Na در سنگ مادر بنتونیت‌های مورد بررسی است. شستشوی این عنصر طی تشکیل بنتونیت، می‌تواند سبب از دست رفتن آن شود [۴۸]. افزایش جرم Mg می‌تواند به دلیل تشکیل کانی‌های گروه اسمکتیت باشد.

محاسبه تغییرات زمین شیمیایی پهنه‌های بنتونیتی

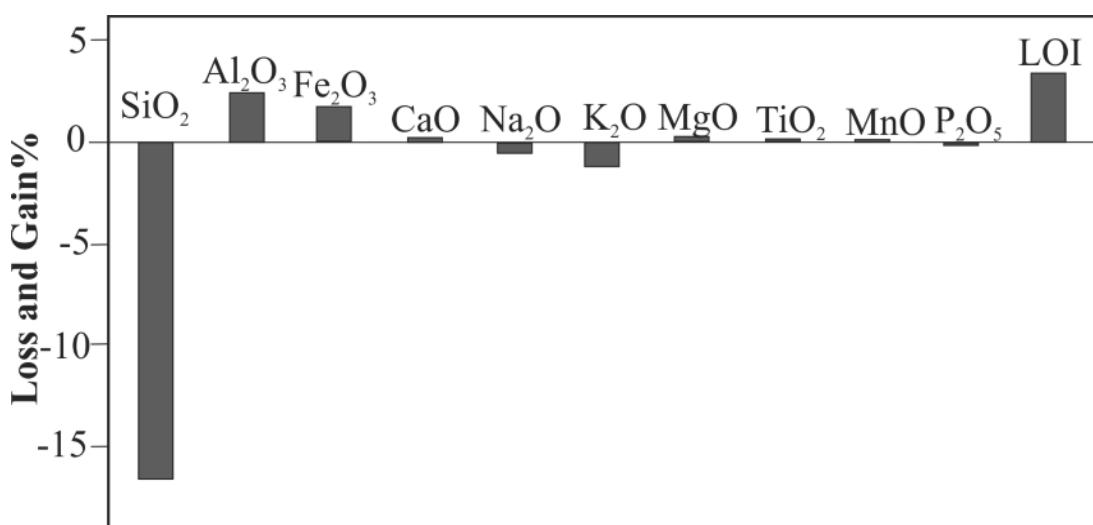
روش‌های مختلفی برای محاسبه کاهش و یا افزایش جرم در سیستم‌های مختلف دگرسانی و هوازدگی ارائه شده است. برای مثال می‌توان به روش ضریب حجم [۳۹-۴۰]، روش ایزوکون [۴۱-۴۲] و روش عنصر نامتحرك [۴۳] اشاره کرد. در این پژوهش، جهت بررسی تغییرات زمین شیمیایی مربوط به فرایند بنتونیتی‌شدن در منطقه سربیشه از روش محاسبات تغییر جرم عناصر [۴۰] استفاده شد. این روش بر پایه تعیین عنصر شاخص بی‌تحرک، فاکتور غنی شدگی، ترکیب بازسازی شده و تغییر جرم عناصر استوار است که در ادامه توضیح داده می‌شوند.

تعیین عنصر شاخص بی‌تحرک: برای محاسبه جرم عناصر، باید عنصری را که مشخصاتی چون بیشترین پایداری شیمیایی طی فرایند هوازدگی، بالا بودن غلظت عنصر به طوری که توسط روش‌های تجزیه‌ای معمول قابل انجام باشد و بسته بودن سیستم برای عنصر مورد نظر را داراست، انتخاب و تغییرات عناصر دیگر را نسبت به این عنصر محاسبه کرد [۴۰]. عناصری مانند Ti, Zr, Nb و Al طی فرایندهای دگرسانی بی‌تحرک هستند [۴۳-۴۵].

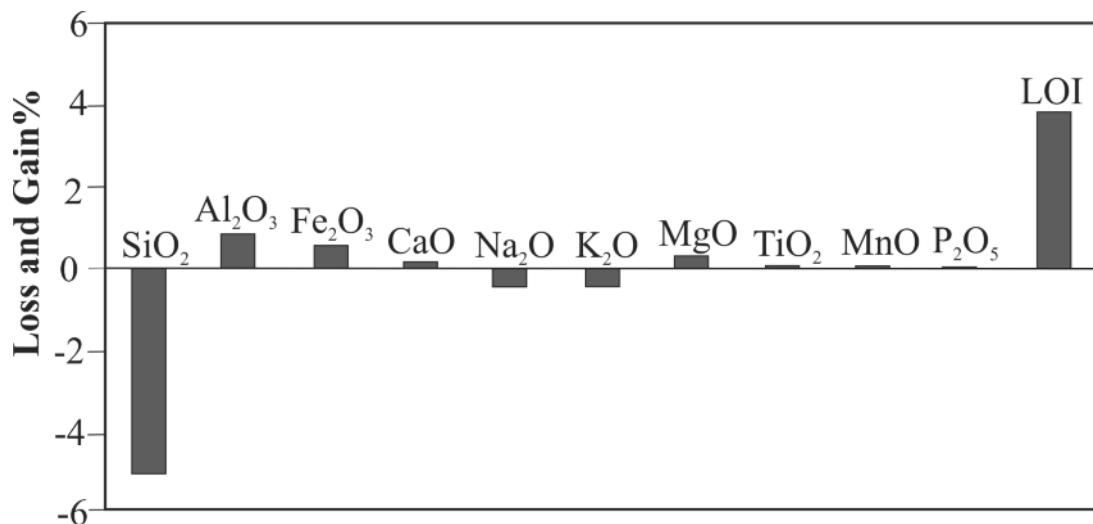
در این پژوهش، سنگ‌های سنگ‌های آتشفشاری اسیدی و حدواتسط که سنگ مادر بنتونیت‌های مورد بررسی هستند، به عنوان مرجع مقایسه در نظر گرفته شدند. در این محاسبات از نتایج تجزیه‌های زمین‌شیمی [۲۰-۲۲] برای مناطق کنگان و حسن کلنگی استفاده شد. بر این اساس، فراوانی عنصر Ti در نمونه‌های بنتونیتی حسن‌کلنگی و کنگان و سنگ‌های آتشفشاری وابسته به آن‌ها به عنوان شاخص عنصر بی‌تحرک طی فرایند بنتونیتی‌شدن به عنوان پایه محاسباتی انتخاب شد. براساس نتایج سنگنگاری مشخص شد که سنگ مادر سایر بنتونیت‌های مورد بررسی نیز ترکیب مشابه مناطق نام برده را دارد. بنابراین، نتایج به دست آمده به سایر مناطق مورد بررسی نیز قابل تعمیم است.

تعیین فاکتور غنی شدگی^۱ (E.F.)

فاکتور غنی شدگی برای هر یک از واحدها بر اساس مقدار TiO₂ در سنگ‌های آتشفشاری و بنتونیت‌های مورد بررسی، از معادله زیر محاسبه شد [۴۰]:



شکل ۱۰ نمودار تغییرات جرم در بنتونیت‌های منطقه حسن کلنگی.



شکل ۱۱ نمودار تغییرات جرم در بنتونیت‌های منطقه کنگان.

برداشت
فعالیت زمین‌ساختی پهنه گسلی سربیشه و سرشاخه‌های آن در واحدهای آتشفسانی اسیدی و حدواسط سبب ایجاد پهنه‌های بنتونیتی در منطقه سربیشه شده است. نتایج به دست آمده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و بررسی‌های کانی‌شناسی به روش XRD نشان می‌دهد که مونتموریلونیت کانی اصلی موجود در این بنتونیت‌ها بوده و کانی‌سازی سنگ گچ بسیار محدود است. فرایند تشکیل بنتونیت در مناطق مورد بررسی، با دگرسانی سنگ‌های اولیه مانند ریوداسیت- داسیت تا آندزیت در ارتباط است. شاخص دگرسانی این بنتونیت‌ها (CIA) متوسط تا شدید (به طور میانگین ۷۵ درصد) است. طی دگرسانی، عناصر اصلی

مراجع

- [1] Murray H.H., "Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview", Applied clay science 17 (2000) 207-221.

- bentonite mine, Sarayan, Iran", Advanced applied geology journal (5) (2012) 69-79.
- [14] Nazari H., Salamati R., "Geological map of Sarbisheh, sheet 7955 (Sarbisseh), scale 1:100,000", Geological Survey of Iran, Tehran (1999).
- [15] Karimpour M. H. Stern C. R., Farmer L., Saadat S., Malekezadeh A. "Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut Block, Eastern Iran", Geopersia 1(1) (2011) 19-36.
- [16] 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.
- [17] Saccani E., Delavari M., Beccaluva L. and Amini S., "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
- [18] Jung D., Keller J., Khorasani R., Marcks C., Baumann A., Horn P., "Petrology of the Tertiary magmatic activity the northern Lut area, East of Iran" Geological Survey of Iran, Tehran, Report 51 (1983) 519.
- [19] Goodarzi M., Mohammadi S.S., Zarinkoub M.H., "Petrography, geochemistry and tectonic setting of Salmabad Tertiary volcanic rocks, southeast of Sarbisheh, eastern Iran", Journal of Economic Geology 6 (2014) 593-621,(in Persian with English abstract).
- [20] Malekian Dstjerdi M., "Petrology of volcanic rocks in Kangan area (northeast of Sarbisheh), Southern Khurasan province with respect to their economic importance" M.Sc thesis University of Birjand, Birjand, Iran (2016) 127.
- [21] Mohammadi S.S., "Geology and Petrology of Tertiary volcanic rocks of Sarbisheh perlite mine area (eastern Iran) and industrial applications" Journal of Economic Geology 4 (2012) 59-76.
- [22] Mohammadi S.S., Bayani R., Nakhaie M., Chung S.L., Zarinkoub M.H. , "Petrigraphy, mineral chemistry, geochemistry and tectonic setting of Tertiary volcanic rocks in Shoushk area (east of Sarbisheh), Southern Khorasan", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 25 (1) (2017) 167-186.
- [2] Murray H.H., "Applied clay mineralogy, Occurrences, Processing and Applications of Kaolins, Bentonites, Palygorskitesepiolite, and Common Clays", Elsevier science 2 (2000) 188.
- [3] Grim R.E., Güven, N., "Bentonites, Geology, Mineralogy, Properties and Uses, Development in Sedimentology", Elsevier 24 (2011) 256.
- [4] Modabberi S., Namayandeh A., Galindo A., Viseras C., Setti M., Ranjbaran M., "Characterization of Iranian bentonites to be used as pharmaceutical materials", Applied Clay Science 116 (2015) 193-201.
- [5] Bazargani-Gilani K., Rabani M.S., "Mineralogy, chemistry and genesis of the Eocene sediments at Aftar region, western Semnan" Iranian journal of crystallography and mineralogy 12 (2004) 188-169.
- [6] Shah L.A., Khattak N., Valenzuela G. S., Manan M., Valenzuela-Díaz F. "Preparation and characterization of purified Na-activated bentonite from Karak (Pakistan) for pharmaceutical use", Clay Minerals 48 (2013) 595-603.
- [7] Nones J., Riella H. G, Trentin A.G., Nones J., "Effects of bentonite on different cell types: A brief review", Applied Clay Science 105 (2015) 225-230.
- [8] Güven N., "Bentonites- clay for molecular engineering", Elements 5(2) (2009) 89-92.
- [9] Abdel-Motelib A., Kader Z.A., Ragab Y.A., Mosalamy M., "Suitability of a Miocene bentonite from North Western Desert of Egypt for pharmaceutical use", Applied Clay Science, 52 (2011) 140-144.
- [10] Meunier A., "Clays "1 edition. Sprinde (2005) 486.
- [11] Palomba M., Padalino G., Marchi M., "Industrial mineral occurrences associated with Cenozoic volcanic rocks of Sardinia (Italy): Geological, mineralogical, geochemical features and genetic implications", Ore Geology Reviews 29 (2006) 118-145.
- [12] Abedini A., Calagari A. A., Akbari M., "Geochemistry and genesis of Mehredjan bentonite deposit, Southeast of Khoor, Isfahan province", Geopersia 1(2011) 47-58.
- [13] Namayandeh A., Modabberi S., Ranjbaran M., "Moneralogy and geochemistry of Chah- Golestan

- [34] Arroyo L.J., Li H., Teppen B.J., Boyd S.A., "A simple method for partial purification of references clays", *Clays and Clay Minerals*, 53(5) (2005) 512-520.
- [35] Winchester J. A., Floyd P.A., "Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile element", *Chemical geology* 20 (1977) 325-343.
- [36] Nesbitt H. W., Young G.M., "Early proterozoic climates and plate motion inferred from major element chemistry of lunitites", *Nature* 299 (1982) 715.
- [37] Fedo C. M., Nesbit P., Young G. M., "Unraveling the effect of K metasomatism in sedimentary rock and paleosoils with implications for paleoweathering conditions and provenance", *Geology* 23 (1995) 363-381.
- [38] Gresens R.L., "Composition –volume relationships of metasomatism", *Chemical Geology* 2 (1967) 47-55.
- [39] Grant J., "The isocone diagram –A simple solution to Gresen's equation for metasomatic alteration", *Economic geology* 81 (1986) 1976-1982.
- [40] Maclean W., "Mass change calculations in altered rock series", *Mineralium Deposita* 25 (1990) 44-49.
- [41] Nesbitt H. W., Wilson R. E., "Recent chemical weathering of basalts", *American Journal of science* 292 (1992) 740-777.
- [42] Brimhall G.H., Chadwick O.A., Lewis C.J., Compston W., Williams I.S., Danti K.J., Dietrich W.E., Power M.E., Hendricks D., Bratt J., "Deformational mass transport and invasive processes in soil evolution", *Science* 255 (1992) 695-702.
- [43] Cail T.L., Cline J.S., "Alteration associated with gold deposition at the Getchell Carlin-type gold deposit, north-central Nevada", *Economic Geology* 96(2001) 1343-1359.
- [44] MacLean W.H., Hoy L.D., "Geochemistry of hydrothermally altered rocks at the Horne mine, Noranda, Quebec", *Economic Geology* 86(1990) 506–528
- [45] Barrett T., MacLean W.H., "Mass changes in hydrothermal alteration zones associated with VMS deposits of the Noranda area", *Exploration and Mining Geology* 3(1994)131–160.
- [46] Fatahi S., Calagari A. A., Abedi A., Bagheri H., "Geochemical aspects of Chahereesh bentonite deposit, northeast of Isfahan, central [23] Karimi Dehkordi M., "Deformation analysis of Sarbisheh fault zone in eastern Iran "Ms.C thesis, University of Birjand, Birjand, Iran (2012) 129.
- [24] Gholami E., "Deformation analysis along major trends of north- northeastern Lut plain", Ph.D. Thesis, Tarbiat modares University, Tehran, Iran (2009) 181.
- [25] Yazdanpanah H., Khatib M.M., Nazari H., Gholami E., "Analysis of Strike- slip kinematics in a shear zone with heterogeneous slip rate: case study lut area, eastern Iran", *Scientific Quaternary Journal* 25 (2015) 279- 290.
- [26] Dlamini N.J., "Detection of expansive soil using remote sensing in Brits North-west province, south Africa", MSc thesis, university of Pretoria (2015) 55.
- [27] Fujisada H., "Design and performance of ASTER instrument, in Fujisada, H., and Sweeting, M.N., eds. Proceedings" SPIE (International Society for Optical Engineering (1995), 2583: 16–25.
- [28] Fujisada H., Iwasaki A., Hara, S., "ASTER stereo system performance. Proceedings of SPIE", the International Society for Optical Engineering 4540 (2001), Toulouse: 39–49.
- [29] Kruse F.A., Lefkoff A.B., Boardman J.W., Heidebrecht K.B., Shapiro A.T., Barloon J.P., Goetz, A.F.H., "The spectral image processing system (SIPS)" (1993).
- [30] ENVI User's Guide., "ENVI User's Guide V. 4.4.", Research Systems (2003), Inc, P.1084.
- [31] Nakhaie M., "Geochemistry and mineralogy of Khorasan bentonites and syudy their application in casting industry", M.Sc Thesis, Ferdowsi uneversity of Mashhad, Mashhad, Iran (2002) 145.
- [32] Thuc C. N. H., Grillet A. C., Reinert L., Ohashi F., Thuc H. H., Duclaux L. "Separation and purification of montmorillonite and polyethylene oxide modified montmorillonite from Vietnamese bentonites", *Applied Clay Science* 49(3) (2010) 229-238.
- [33] Mirhoseini Moosavi P., Astaraei A., Karimi A., Karimi, G.H., "Identification and Purification of Montmorillonite Mineral of Ghaen Mine Bentonite", *Journal of Water and Soil* 28 (2014) 987-997.

[48] Zielinski R.A., "The mobility of uranium and other elements during alteration of rhyolite ash to mintmorillonite: a case study in the troublesome formation. Colorado. U.S.A.", Chemical geology 35 (1982) 185-204.

Iran structural zone", Scientific quaternary journal 24 (2015).

[47] Malek mahmoodi F., Khalili M., Bagheri H., "Geochemistry and origin of bentonite and silica mineralization in Kavir mine from Khur and Biyabanak (Isfahan province)", Scientific quaternary journal 93 (2014) 67-76.