



کانی شناسی و زمین شیمی رس بنتونیتی وابسته به ایگنیمبریت در تشتاب، جنوب خاور خور و بیابانک، استان اصفهان

شیرین فتاحی^{۱*}، علی اصغر کلاگری^۱، علی عابدینی^۲، سید حسن طباطبایی^۳

۱- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، کد پستی ۵۱۶۶۶

۲- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، کد پستی ۵۷۱۵۳

۳- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، کد پستی ۸۴۱۵۶۸

(دریافت مقاله: ۹۵/۹/۲۵، نسخه نهایی: ۹۵/۱۲/۱۷)

چکیده: ذخیره رس بنتونیتی تشتاب در فاصله ۲۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان خور و بیابانک، در استان اصفهان واقع است. این ذخیره نتیجه دگرسانی ایگنیمبریت‌ها به سن ائوسن زیرین است. بررسی‌های کانی‌شناسی نشان می‌دهند که مونت‌موریلونیت، ساپونیت، کوارتز، نانترویت، بیدلایت، میکروکلین، آنورتیت، ایلیت، آلبیت، و کلسیت فازهای کانیایی اصلی در این ذخیره هستند که در مقادیر کمتر با کانی‌هایی نظیر ورمیکولیت، سانیدین، کلریت، اورتوکلاز، اکتینولیت، و دولومیت همراهی می‌شوند. بررسی‌های بیشتر آشکار نمودند که نمونه‌های مورد مطالعه در رده اسمکتیت‌های دوهشت‌وجهی طبقه‌بندی می‌شوند و ترکیب کانی‌شناسی آنها در گستره بیدلایت- مونت‌موریلونیت- نانترویت قرار می‌گیرند. بر اساس بررسی‌های زمین‌شیمیایی، فرایند تبدیل ایگنیمبریت‌ها به رس‌های بنتونیتی با غنی‌شدگی Mg، شستشو- تثبیت Si، Ca، Mn، Ba، Co، Cs، Rb، Ta، U، Zn، Cu، و Ni و تهی‌شدگی K، Fe، Al، Ti، P، Na، Hf، Nb، Sr، Th، V، Zr، Y، و REEs همراه بوده است. با توجه به نتایج بدست آمده، به نظر می‌رسد که توسعه ذخیره رس بنتونیتی در تشتاب در کنترل فرآیندهای زمین‌ساختی بوده است. اختلاف در میزان شدت دگرسانی مواد دستگاه، شیمی محلول- های دگرسان کننده، جذب سطحی، ترکیب در ساختار بلوری، دسترسی به لیگاند‌های کمپلکس‌ساز، و تفاوت در میزان پایداری کانی- های اولیه در برابر دگرسانی شش عامل کلیدی کنترل کننده تحرک، توزیع، و تمرکز عناصر در ذخیره رس بنتونیتی منطقه تشتاب هستند.

واژه‌های کلیدی: کانی‌شناسی؛ رس بنتونیتی؛ ایگنیمبریت؛ تحرک عناصر؛ تشتاب؛ خور و بیابانک.

مقدمه

مواد معدنی در یک فروزمین رخ داده است [۱-۴]. وجود تنوع در ترکیب سنگ‌شناسی سنگ‌های درونگیر همراه با وجود گسل‌های متعدد در این ناحیه از ایران موجب تغییرات زمین‌شیمیایی شدید در محیط تشکیل این ذخایر شده است. با وجود بررسی‌های تفصیلی بر روی ذخایر رسی به ویژه بنتونیت‌ها در نقاط مختلف دنیا [۵، ۶] و به ویژه در ایران

کوه موتنگ یکی از قله‌های مرتفع رشته کوه تشتاب خور، در استان اصفهان است. ذخایر رسی بنتونیتی متعددی از جمله ذخایر مهرجان، تشتاب و سنگاب مارخور در این ناحیه از ایران بر اثر دگرسانی ایگنیمبریت‌ها و سنگ‌های آتشفشانی ائوسن ایجاد شده‌اند. بررسی‌هایی که تاکنون بر روی ذخایر بنتونیتی خور و بیابانک انجام شده است، نشان می‌دهد که توسعه این

شدند. همچنین، ترکیب اکسیدهای اصلی رس‌ها (ذرات کوچکتر از $2\text{ }\mu\text{m}$) در ۳ نقطه اندازه‌گیری و فرمول ساختاری اسمکتیت‌ها بر اساس آن محاسبه شدند. برای بررسی‌های زمین‌شیمیایی سنگ کل، تعداد ۸ نمونه از سنگ‌های موجود (یک نمونه ایگنیمبریت، ۶ نمونه رس بنتونیتی، و یک نمونه سیلیسی شده) از منطقه انتخاب و در آزمایشگاه ACME کشور کانادا تجزیه شدند. در این آزمایشگاه، مقادیر اکسیدهای اصلی و فرعی به روش ICP-ES و مقادیر عناصر جزئی و خاکی نادر به روش ICP-MS (با کد آنالیز 4A4B) تعیین گردیدند. برای تعیین مقادیر عناصر خاکی نادر حدود 0.2 گرم از هر نمونه با متابورات و تتراپورات لیتیم ترکیب و در اسید نیتریک حل شدند. مقدار LOI نمونه‌ها بوسیله اشتعال آنها در 1000°C به مدت یک ساعت اندازه‌گیری شدند. نتایج تجزیه-های شیمیایی نمونه‌ها به همراه حد آشکارسازی عناصر در جدول ۱ ارائه شده است.

بحث و بررسی

زمین‌شناسی

منطقه تشتاب، به مختصات جغرافیایی 20° ، $18'$ ، 55° تا 00° ، $23'$ ، 55° طول شرقی و 00° ، $39'$ ، 33° تا $04''$ ، $40'$ ، 33° عرض شمالی، در فاصله ۲۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان خور و بیابانک، در استان اصفهان واقع است. عملکرد فرآیندهای زمین‌ساختی (گسل‌ها) در این منطقه (گسل‌های درونه، ترکمنی-اردیب، و پشت بادام) [۹]، (شکل ۱ الف)، منجر به تشکیل گرابن خور، ایجاد پهنه‌های برشی و کانی‌سازی‌های متعدد رگه‌ای از جنس سرب، روی، و آهن و انواع دگرسانی‌های گرمابی (سریسیتی شدن، سیلیسی شدن، کلریتی شدن، ژئولیتی شدن، و آرژیلیکی شدن) و در پس آن تشکیل یک ذخیره رس بنتونیتی شده است.

بارزترین واحدهای سنگی منطقه تشتاب به ترتیب قدیم به جدید شامل آهک، شیل کربناته، شیل گلی و رسی سبز مایل به زرد همراه با میان لایه‌هایی از سنگ‌های آهکی و سنگ-جوش‌های سازند میرزا (کرتاسه زیرین)، ایگنیمبریت‌ها همراه با رس بنتونیتی، توف‌ها، توف‌های ماسه‌ای، داسیت‌ها، آندزیت‌ها، سنگ‌جوش‌های توفی (ائوسن زیرین)، آندزیت‌ها، داسیت‌ها، بازالت‌ها، و توف‌ها (ائوسن زیرین)، سنگ‌جوش‌ها و رس‌های ماسه‌ای (پلیوسن)، و رسوبات آبرفتی عهد حاضر (به سن کواترنری) هستند [۱۰] (شکل ۱ ب).

[۸،۷]، تاکنون هیچ مطالعه جامعی پیرامون ذخیره رس بنتونیتی منطقه تشتاب از نظر کانی‌شناسی و زمین‌شیمی عنصری صورت نگرفته است. در این پژوهش سعی شده است که ویژگی‌های کانی‌شناسی، شیمی کانی‌های رسی، و عوامل موثر بر تحرک، توزیع، و غنی‌شدگی عناصر اصلی، فرعی، جزئی، و خاکی نادر در تکامل و توسعه رس بنتونیتی منطقه تشتاب به تفصیل بررسی شود.

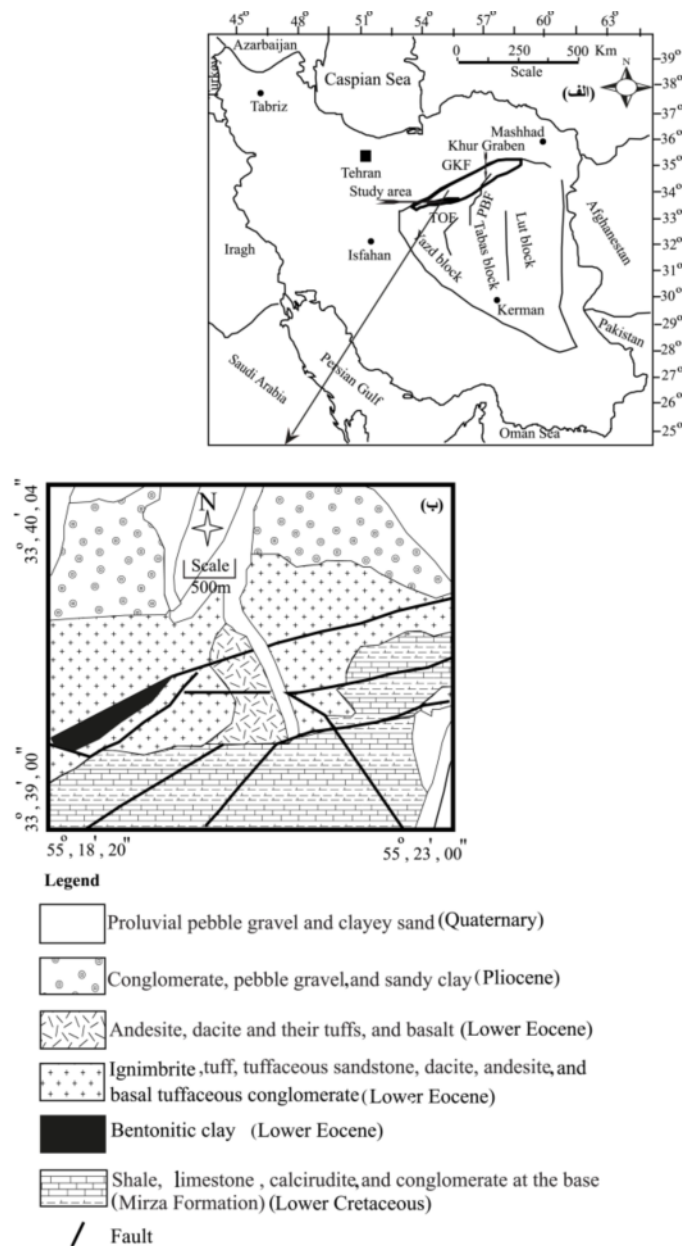
روش پژوهش

در این پژوهش، نخست پیمایش‌هایی جهت شناسایی انواع تشکیلات سنگی و روابط صحرایی در منطقه تشتاب انجام شد. بر این اساس، تعداد ۴۰ نمونه سنگی از ایگنیمبریت‌ها، رس بنتونیتی، و نمونه‌های سیلیسی شده از منطقه برداشت شد. بررسی‌های سنگ‌نگاری بر تعداد ۱۰ نمونه از ایگنیمبریت‌ها با تهیه و بررسی مقاطع نازک با استفاده از میکروسکوپ قطبشی انجام شد. ترکیب کانی‌شناسی ۳ نمونه از رس بنتونیتی با استفاده از دستگاه پراش پرتو X (XRD) (مدل D4) با پرتوی $\text{CuK}\alpha$ ، کرماتورهای گرافیتی، ولتاژ ۴۰ کیلوولت، جریان ۴۰ میلی‌آمپر، سرعت اسکن 2° درجه بر دقیقه و بازه زاویه‌ای 2° الی 70° درجه در آزمایشگاه تجزیه مواد معدنی دانشگاه تهران تعیین شد. برای شناسایی کانی‌های رسی نمونه‌های یاد شده سه تیمار شامل حالت عادی، اشباع از اتیلن گلیکول، و دمای 550°C درجه سانتی گراد انجام شد. در این راستا، ذرات کوچکتر از ۲ میکرون از بقیه ذرات جدا شده و تحت عمل تکان فراصوتی شدید قرار گرفتند تا ذرات رس در محلول از هم جدا شوند. جداسازی ذرات رسی با قرار دادن نمونه‌ی پراکنده شده در ظرفی با عمق بیش از ۱۰ سانتی‌متر عمق به مدت یک شبانه‌روز انجام شد. بر این اساس، مواد باقی مانده در آب اغلب قطری کمتر از ۲ میکرومتر داشتند. برای نمونه‌های رسی مورد نظر، مواد معلق مدام با سانتریفوژ تغلیظ شدند تا جایی که مواد در ته ظرف رسوب کردند. این تغلیظ مجدد در حجم کمتری از آب معلق انجام شد. در نهایت، مواد تغلیظ شده بر روی یک تیغه شیشه‌ای ریخته شد و به تدریج خشک گردید تا رسوب جهت یافته را ایجاد نماید.

بررسی‌های تکمیلی پیرامون کانی‌شناسی رس‌ها توسط SEM-EDS در آزمایشگاه متالوگرافی دانشگاه تهران انجام گرفت. برای این منظور، نمونه‌هایی با ضخامت کمتر از ۱۰ میلی‌متر از نمونه اصلی جدا شده و با روکش طلا پوشش داده

جدول ۱ مقادیر عناصر اصلی، فرعی، جزئی خاکی نادر، و LOI در نمونه‌های مورد بررسی. N.d. = تعیین نشده.

ایگنیمبریت	سیلیسی شده	رس	رس	رس	رس	رس	رس	رس	حدآشکارسازی
I-1	S-1	C-6	C-5	C-4	C-3	C-2	C-1	-	نمونه
۵۶۳۵	۷۲٫۹۶	۴۵٫۳۳	۶۱٫۴۱	۳۶٫۸۶	۶۶٫۵۰	۶۱٫۵۰	۶۱٫۹۷	۰٫۰۱	SiO ₂ (wt%)
۲۰٫۰۵	۸٫۷۸	۱۶٫۵۳	۱۵٫۳۵	۹٫۸۴	۱۳٫۶۴	۱۴٫۹۵	۱۴٫۱۰	۰٫۰۱	Al ₂ O ₃
۵٫۹۵	۱٫۷۲	۵٫۳۴	۱٫۹۹	۲٫۹۱	۱٫۶۵	۱٫۹۵	۱٫۷۵	۰٫۰۱	Fe ₂ O ₃
۶٫۰۷	۴٫۸۹	۸٫۸۴	۲٫۶۱	۱۹٫۲۷	۰٫۳۷	۱٫۷۳	۱٫۶۵	۰٫۰۱	CaO
۳٫۳۰	۰٫۳۵	۰٫۱۹	۱٫۷۶	۰٫۵۵	۲٫۸۴	۲٫۵۲	۲٫۴۱	۰٫۰۱	Na ₂ O
۰٫۶۹	۱٫۲۲	۴٫۵۵	۲٫۳۹	۳٫۴۳	۲٫۱۸	۲٫۳۷	۲٫۰۶	۰٫۰۱	MgO
۳٫۱۴	۱٫۷۷	۰٫۸۴	۰٫۸۳	۱٫۹۴	۰٫۴۳	۰٫۵۸	۰٫۹۰	۰٫۰۱	K ₂ O
۱٫۰۴	۰٫۳۴	۰٫۵۱	۰٫۱۷	۰٫۳۹	۰٫۱۰	۰٫۱۷	۰٫۱۸	۰٫۰۱	TiO ₂
۰٫۰۵	۰٫۰۳	۰٫۰۵	۰٫۰۳	۰٫۱۱	n.d.	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۱	MnO
۰٫۴۰	۰٫۰۵	۰٫۱۸	۰٫۰۹	۰٫۱۰	۰٫۰۷	۰٫۰۹	۰٫۱۲	۰٫۰۱	P ₂ O ₅
۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	n.d.	۰٫۰۰۷	n.d.	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۱	Cr ₂ O ₃
۲٫۶۰	۷٫۹۰	۱۷٫۸۰	۱۳٫۰۰	۲۴٫۴۰	۱۲٫۱۰	۱۴٫۰۰	۱۴٫۶۰	-	L.O.I
۹۹٫۶۴	۹۹٫۹۶	۹۹٫۸۳	۹۹٫۶۶	۹۹٫۸۵	۹۹٫۹۱	۹۹٫۸۷	۹۹٫۷۴	-	Sum
۲٫۲۰	۱٫۲۰	۰٫۹۰	۳٫۳۰	۲٫۸۰	۳٫۳۰	۳٫۰۰	۳٫۹۰	۰٫۱	U (ppm)
۸٫۹۰	۵٫۰۰	۴٫۸۰	۵٫۸۰	۶٫۱۰	۵٫۴۰	۲٫۲۰	۵٫۹۰	۰٫۲	Th
۷۶۴٫۰۰	۱۱۱٫۰۰	۴۶۲٫۰۰	۱۴۴۹٫۰۰	۱۴۶٫۰۰	۲۰۶٫۰۰	۴۹۶٫۰۰	۱۳۲۰٫۰۰	۱	Ba
۳٫۶۰	۱٫۹۰	۲٫۶۰	۲٫۵۰	۳٫۲۰	۲٫۰۰	۲٫۲۰	۲٫۷۰	۰٫۱	Hf
۵٫۶۰	۲٫۵۰	۶٫۸۰	۴٫۳۰	۱۰٫۱۰	۱٫۷۰	۲٫۲۰	۲٫۹۰	۰٫۲	Co
۲۲٫۰۰	۱۸٫۰۰	۳۳٫۰۰	۴۸٫۰۰	۵۱٫۰۰	۱۲٫۰۰	۷۲٫۰۰	۲۸٫۰۰	۱	Zn
۱۰٫۷۰	۵٫۱۰	۵٫۹۰	۸٫۰۰	۵٫۹۰	۸٫۹۰	۷٫۹۰	۸٫۹۰	۰٫۱	Nb
۵٫۱۰	۴۴٫۴۰	۹٫۲۰	۴٫۶۰	۱۵٫۶۰	۴٫۷۰	۴٫۶۰	۵٫۸۰	۰٫۱	Cs
۸۳٫۵۰	۱۲۱٫۰۰	۴۷٫۸۰	۳۶٫۲۰	۹۰٫۱۰	۲۱٫۱۰	۳۰٫۹۰	۴۰٫۳۰	۰٫۱	Rb
۱۴۵٫۰۰	۵۹٫۰۰	۸۸٫۰۰	۲۷٫۰۰	۷۸٫۰۰	۱۸٫۰۰	۳۵٫۰۰	۳۶٫۰۰	۸	V
۲۸٫۳۰	۸٫۰۰	۱۱٫۴۰	۱۸٫۱۰	۹٫۹۰	۸٫۶۰	۱۴٫۶۰	۱۸٫۰۰	۰٫۱	Y
۴۷٫۴۰	۱۲٫۲۰	۱۵٫۵۰	۳۰٫۰۰	۹٫۶۰	۹٫۶۰	۲۱٫۱۰	۱۴٫۴۰	۰٫۱	Pb
۱۵۲٫۹۰	۶۷٫۷۰	۸۳٫۲۰	۷۵٫۱۰	۷۶٫۱۰	۵۷٫۵۰	۶۸٫۷۰	۶۹٫۹۰	۰٫۱	Zr
۴٫۵۰	۵٫۷۰	۱۳٫۴۰	۲۲٫۴۰	۲۲٫۱۰	۳٫۵۰	۴٫۸۰	۶٫۵۰	۱۰	Ni
۱۸۷۹٫۶۰	۹۵٫۲۰	۳۳۰٫۸۰	۱۲۱۱٫۱۰	۴۲۶٫۱۰	۳۸۶٫۱۰	۱۹۲٫۱۰	۸۷۷٫۳۰	۰٫۵	Sr
۰٫۴۰	۰٫۳۰	۰٫۴۰	۰٫۷۰	۰٫۳۰	۰٫۹۰	۰٫۹۰	۰٫۹۰	۰٫۱	Ta
۱۰٫۴۰	۶۵٫۶۰	۳۱٫۶۰	۱۳٫۹۰	۱۸٫۳۰	۴٫۶۰	۱۶٫۲۰	۲۰٫۹۰	۰٫۱	Cu
۲۲٫۸۰	۱۰٫۷۰	۱۷٫۳۰	۱۳٫۲۰	۱۶٫۰۰	۹٫۴۰	۱۳٫۰۰	۱۲٫۸۰	۰٫۱	La (ppm)
۴۷٫۰۰	۲۰٫۲۰	۳۸٫۵۰	۲۶٫۶۰	۳۱٫۱۰	۱۸٫۸۰	۲۵٫۴۰	۲۷٫۶۰	۰٫۱	Ce
۶٫۳۲	۲٫۳۵	۴٫۰۶	۳٫۲۳	۳٫۶۴	۲٫۲۶	۳٫۲۰	۳٫۳۰	۰٫۰۲	Pr
۲۶٫۶۰	۹٫۳۰	۱۴٫۷۰	۱۱٫۴۰	۱۳٫۲۰	۹٫۳۰	۱۳٫۰۰	۱۱٫۰۰	۰٫۳	Nd
۵٫۴۴	۱٫۴۴	۳٫۱۹	۲٫۴۱	۲٫۴۹	۱٫۶۴	۲٫۱۶	۲٫۸۶	۰٫۰۵	Sm
۱٫۴۸	۰٫۳۰	۰٫۷۴	۰٫۵۱	۰٫۴۹	۰٫۳۲	۰٫۴۸	۰٫۶۶	۰٫۰۲	Eu
۵٫۰۷	۱٫۰۵	۲٫۶۲	۲٫۸۰	۲٫۰۸	۱٫۳۷	۱٫۹۹	۲٫۶۸	۰٫۰۵	Gd
۰٫۸۹	۰٫۲۲	۰٫۳۹	۰٫۴۶	۰٫۳۶	۰٫۲۶	۰٫۴۱	۰٫۵۳	۰٫۰۱	Tb
۴٫۵۵	۱٫۲۲	۲٫۶۳	۳٫۰۷	۲٫۰۴	۱٫۴۷	۲٫۵۰	۲٫۹۵	۰٫۰۵	Dy
۱٫۰۳	۰٫۲۹	۰٫۴۱	۰٫۶۰	۰٫۴۶	۰٫۳۶	۰٫۵۲	۰٫۶۷	۰٫۰۲	Ho
۲٫۹۹	۰٫۹۲	۱٫۱۹	۱٫۷۴	۱٫۲۶	۰٫۷۷	۱٫۵۶	۱٫۹۹	۰٫۰۳	Er
۰٫۴۴	۰٫۱۶	۰٫۱۸	۰٫۲۸	۰٫۲۰	۰٫۱۵	۰٫۲۴	۰٫۳۰	۰٫۰۱	Tm
۲٫۶۷	۱٫۱۵	۱٫۰۸	۱٫۵۵	۱٫۴۰	۱٫۰۱	۱٫۲۸	۱٫۷۹	۰٫۰۵	Yb
۰٫۴۳	۰٫۱۷	۰٫۱۴	۰٫۲۶	۰٫۲۴	۰٫۱۴	۰٫۲۱	۰٫۲۴	۰٫۰۱	Lu



شکل ۱ الف) نقشه ایران برگرفته از مرجع [۹] با اندکی تغییرات که بر اساس آن منطقه تشتاب در پهنه ایران مرکزی قرار دارد. ب) نقشه زمین شناسی منطقه مورد بررسی برگرفته از مرجع [۱۰] با اندکی تغییرات.

سست تا کمی سخت از ویژگی‌های بارز زمین‌شناسی منطقه تشتاب هستند. با توجه به شواهد صحرایی، رس‌های بنتونیتی این منطقه متحمل فشارهای زمین‌ساختی شدیدی شده و برخی به طور موضعی دچار چین‌خوردگی شده‌اند. برخی از سنگ‌های بستر آذرین این ذخیره به دلیل نفوذ محلول‌های گرمایی به درون درز و شکاف‌ها، دچار دگرسانی پلیتیک شده و به کانیهای گروه کلریت، اپیدوت و آلبیت تبدیل شده‌اند و به رنگ سبز درآمده‌اند. حضور بقایایی از ایگنیمبریت‌ها در قاعده

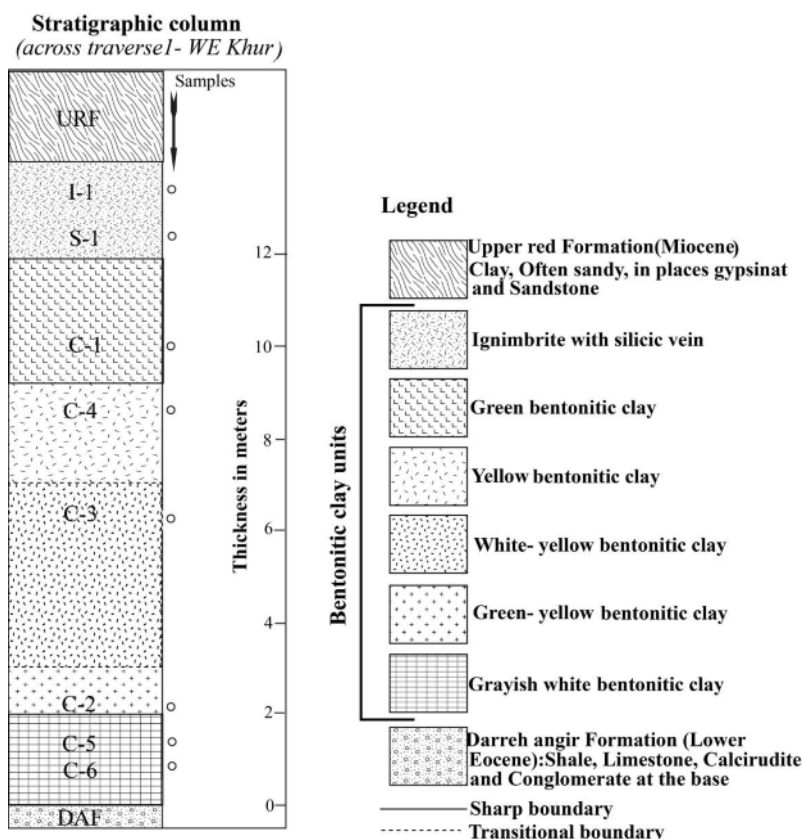
بررسی‌های زمین‌شناسی نشان می‌دهند که یک نیم‌رخ عمود بر امتداد ذخیره رس بنتونیتی (با ضخامت تقریبی ۱۴ متر) از سطح به عمق شامل ایگنمبریت‌های حاوی رگه‌های سیلیسی و رس‌های بنتونیتی به رنگ‌های سبز، زرد، سفید-زرد، سبز-زرد، و سفید مایل به خاکستری است (شکل ۲). تغییرات ساختار از مطابق تا توده‌ای، جابه‌جایی لایه‌ها و عدسی‌های رس بنتونیتی در نتیجه نیروهای زمین‌ساختی، تغییرات لمس از خاکی و صابونی تا زبر، تغییرات سختی از

(شکل ۳ب). کلسدونی به صورت پرکننده فضاهای خالی در ایگنیمبریت‌ها دیده می‌شود (شکل ۳ب). همچنین، شیشه‌های آتشفشانی به صورت جهت یافته (با فراوانی کمتر نسبت به کانی‌هایی نظیر کوارتز، پلاژیوکلاز، زئولیت، و کلسدونی) در مقاطع مشاهده می‌شوند که خود توسط کلسیت و کانی‌های رسی جانشین شده‌اند (شکل ۳پ). خرده‌سنگ‌ها با فراوانی کمتر نسبت به درشت بلورها و زمینه شیشه‌ای به ترتیب فراوانی از کانی‌های پلاژیوکلاز، کوارتز، و شیشه تشکیل شده‌اند (شکل ۳ت). بلورهای کوارتز و پلاژیوکلازها در بخش کافتی حالت جهت یافته و کشیده دارند. زمینه خرده‌سنگ‌ها از ریزبلورهای سوزنی پلاژیوکلاز و شیشه آتشفشانی تشکیل شده است که به طور قابل ملاحظه‌ای توسط کلسیت و رس‌ها جانشین شده‌اند (شکل ۳ت). در بیشتر موارد، بلورهای پلاژیوکلاز از مرکز توسط کلسیت جانشین شده‌اند (شکل ۳ث). پامیس‌ها نیز با حفره‌های کروی خود، در برخی از مقاطع قابل تشخیص هستند (شکل ۳ج).

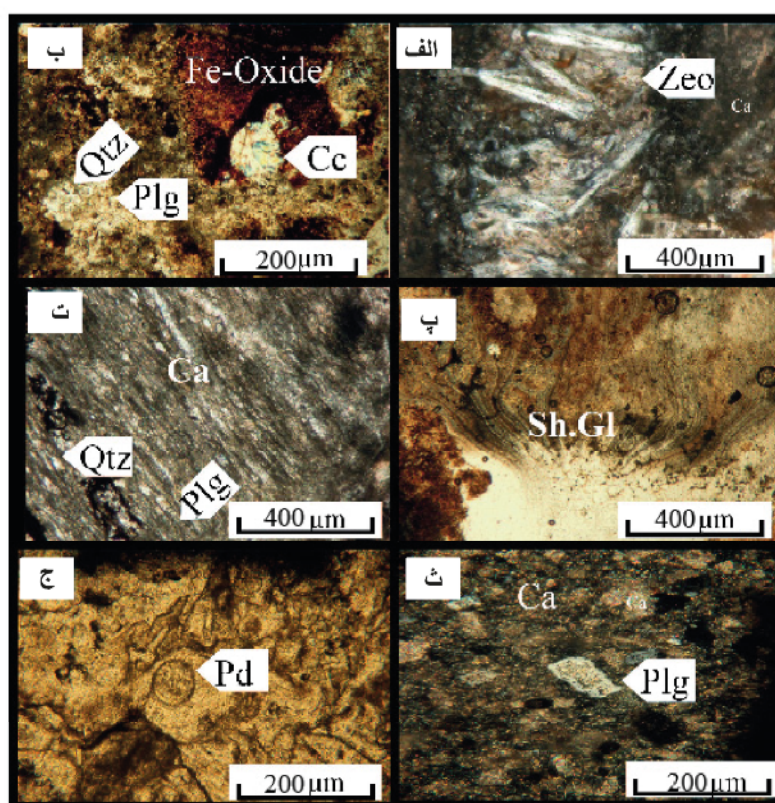
عدسی‌های رس بنتونیتی و وجود مرزهای کاملاً تدریجی بین رس‌های بنتونیتی و ایگنیمبریت‌ها نشان می‌دهد که این ذخیره نتیجه دگرسانی این سنگ‌ها است. افزون بر این، آثار پرشدگی در درز، شکاف، و حفره‌های موجود در سنگ‌های آتشفشانی و ایگنیمبریت‌ها توسط آگات، ژئود، ژاسپروئید، و کلسیت‌های ریزبلور تا درشت‌بلور خودشکل به خوبی قابل مشاهده است.

مطالعات کانی‌شناسی

بررسی‌های میکروسکوپیکی نشان می‌دهند که ایگنیمبریت‌ها شامل درشت بلورهایی از پلاژیوکلاز، کوارتز، زئولیت، و کلسدونی (به ترتیب فراوانی)، خرده‌سنگ‌های آتشفشانی جهت یافته با ترکیب آندزیتی و شیشه‌های آتشفشانی همراه با خرده‌های پامیس هستند (شکل‌های ۳ الف تا ج). در بیشتر مقاطع مورد بررسی، زئولیت‌ها به صورت پرکننده فضاهای خالی و به صورت رشد از کناره به مرکز در حفره‌ها قابل مشاهده است (شکل ۳ الف). کوارتز در مقاطع، به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار و با خاموشی موجی دیده می‌شود. پلاژیوکلاز، به صورت قطعه‌های سالم و شکسته در متن سنگ پراکنده است



شکل ۲ ستون چینه‌شناسی نیمرخ مورد بررسی در ذخیره رس بنتونیتی تشتاب که روی آن محل نمونه‌های برداشت شده جهت انجام بررسی‌های زمین‌شیمیایی با دایره‌های توخالی نشان داده شده‌اند.



شکل ۳ الف) رشد زئولیت‌ها در فضاهای خالی موجود در ایگنمبریت‌ها از سمت دیواره به سمت مرکز حفره (XPL)، ب) پلاژیوکلاز شکل‌دار به صورت فنوکریست، کوارتز نیمه شکل‌دار و کلسدونی در زمینه‌ای از شیشه آتشفشانی که خود توسط کلسیت و کانی‌های رسی جانشین شده است (XPL)، پ) حضور شیشه‌های آتشفشانی جهت یافته درون ایگنمبریت‌ها (XPL)، ت) حضور خرده‌سنگ‌های آتشفشانی با حالت جهت یافته درون ایگنمبریت‌ها که متشکل از پلاژیوکلاز، کوارتز، به صورت درشت‌بلور و ریزدرشت بلور به همراه شیشه آتشفشانی در زمینه ریزبلورهای سوزنی-ها به همراه شیشه آتشفشانی موجود در زمینه به طور گسترده توسط کلسیت و کانی‌های رسی جانشین شده‌اند (XPL)، ث) جانشینی کلسیت به جای پلاژیوکلاز (XPL)، و ج) پامیس با ساخت حفره‌ای که در بخش‌های شیشه‌ای به شدت توسط کانی‌های رسی جانشین شده است (XPL). علائم اختصاری بکار رفته عبارتند از: Zeo = زئولیت، Plg = پلاژیوکلاز، Qtz = کوارتز، Ca = کلسیت، Cc = کالسدونی، Sh.Gl = شیشه‌های آتشفشانی. علائم اختصاری کانی‌ها از مرجع برگرفته [۱۱] شده‌اند.

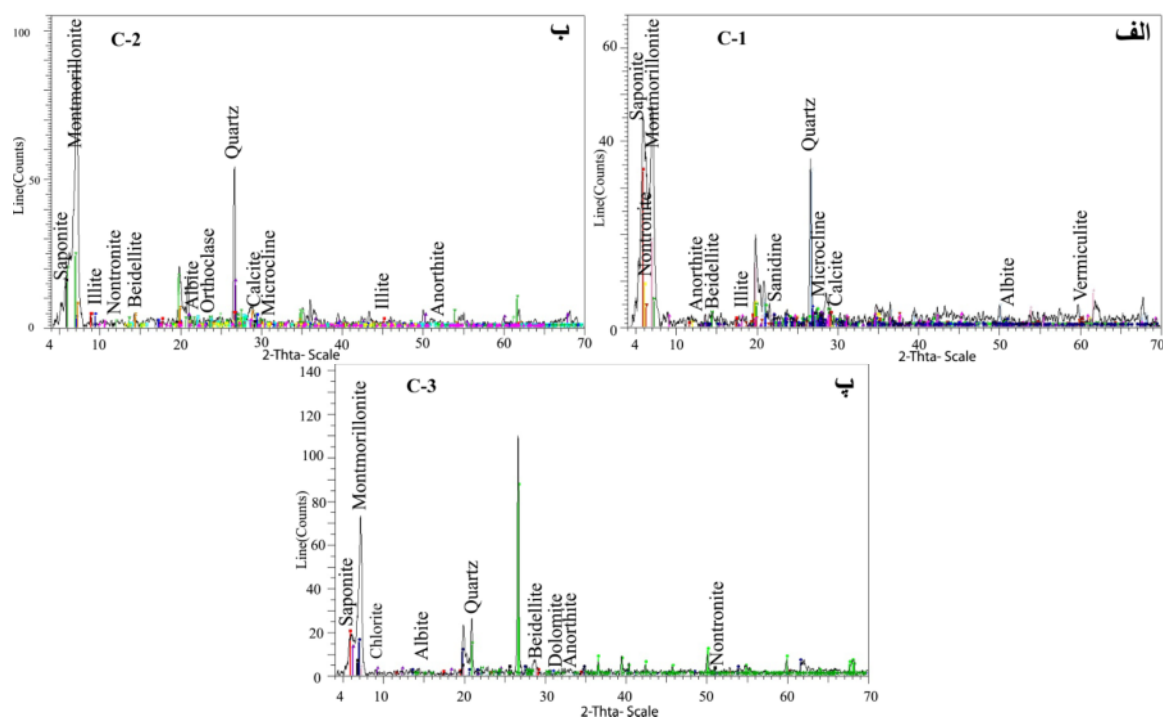
یک نقطه از کلریت‌ها و یک نقطه از زئولیت‌ها صورت گرفته است (شکل‌های ۵ الف، ب، و پ). در این بررسی، فرمول ساختاری اسمکتیت‌ها بر اساس ۱۱ اکسیژن [۱۲] محاسبه گردید (شکل ۵ الف). بر اساس این محاسبات، مقدار سدیم در ساختار کانی‌های رسی بیش از مقدار کلسیم آنها است و از این نظر، رس‌های بنتونیتی منطقه تشتاب را می‌توان در شمار رس‌های نوع وایومینگ قرار داد [۱۲]. بر اساس نتایج بدست آمده، میانگین ترکیب شیمیایی اسمکتیت‌ها به صورت $(\text{Ca}_{0.07}\text{Na}_{0.263}\text{K}_{0.034})(\text{Al}_{1.582}\text{Fe}_{0.190}\text{Mg}_{0.228})\text{Si}_{3.856}\text{Al}_{0.144}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ محاسبه شد. استفاده از نمودار Mg نسبت به $(\text{Al}^{3+} + \text{Fe}^{3+})$ [۱۳] که بر اساس نسبت کاتیون‌های هشت‌وجهی تنظیم شده و برای تفکیک کاتیون‌های

بررسی‌های پراش پرتو X (XRD) نشان می‌دهند که در ذخیره رس بنتونیتی تشتاب، کانی‌های مونت‌موریلونیت، ساپونیت، کوارتز، نانترنیت، بیدلیت، میکروکلین، آنورتیت، ایلیت، آل‌بیت، و کلسیت به صورت فازهای کانیاپی اصلی حضور دارند. کانی‌هایی نظیر ورمیکولیت، سانیدین، کلریت، اورتوکلاز، اکتینولیت، و دولومیت در مقادیر فرعی فازهای کانیاپی اصلی را همراهی می‌کنند (شکل‌های ۴ الف، ب، و پ).

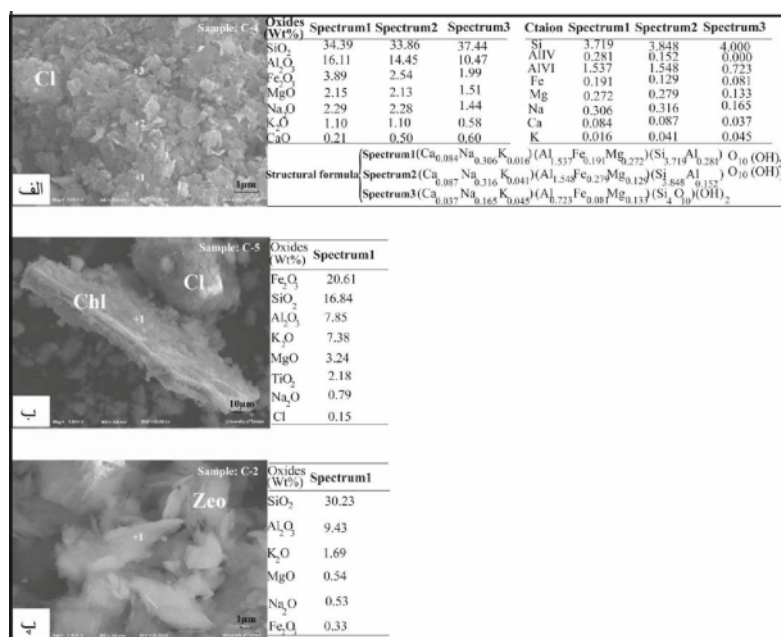
بررسی‌های کانی‌شناسی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی دلالت بر حضور ساخت لایه‌ای در رس‌ها (شکل ۵ الف)، وجود کلریت‌های تیغه‌ای (شکل ۵ ب)، و بلورهای زئولیت (شکل ۵ پ) در نمونه‌های مورد بررسی دارد. همچنین، بررسی SEM-EDS در ۳ نقطه متوالی در یک نمونه رس بنتونیتی، در

در محدوده بیدلیت- مونت‌موریلونیت- نانترونیت قرار می‌گیرند. استفاده از نمودار سه متغیره $Al_{14}Al-MgAl-FeAl$ [۱۴] نشان می‌دهد که ذخیره رس بنتونیتی منطقه تشتاب ترکیبی در حد بیدلیت دارد (شکل ۷).

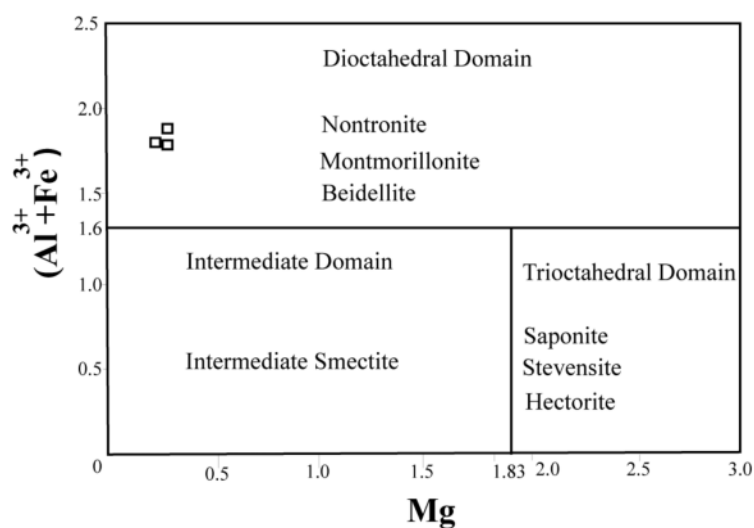
دو هشت‌وجهی از سه هشت‌وجهی استفاده می‌شود، نشان می‌دهد که نمونه‌های رس بنتونیتی تشتاب ترکیبی در حد اسمکتیت‌های دو هشت‌وجهی دارند و می‌توانند در شمار اسمکتیت‌های قابل انبساط قرار گیرند (شکل ۶). این نمودار آشکار می‌کند که ترکیب کانی‌شناسی رس‌های منطقه تشتاب



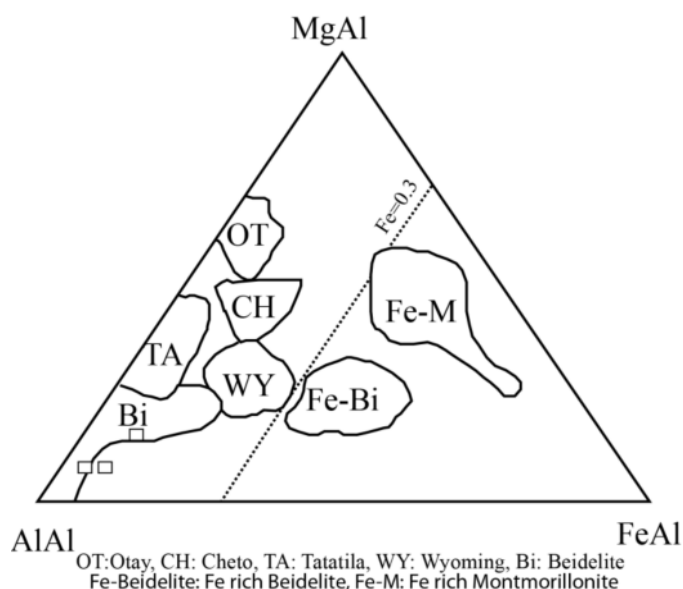
شکل ۴ گراف‌های پراش پرتو X (XRD) در الف) نمونه C-1، ب) نمونه C-2 و پ) نمونه C-3.



شکل ۵ آنالیزهای SEM-EDS از رس‌ها. الف) ترکیب برخی از اکسیدهای اصلی در سه نقطه از اسمکتیت‌ها، ب) ترکیب برخی از اکسیدهای اصلی در یک نقطه از کلریت‌ها و ث) ترکیب برخی از اکسیدهای اصلی در یک نقطه از زئولیت‌های تشتاب.



شکل ۶ نمودار تفکیک کانی‌های دوهشت وجهی و سه‌هشت وجهی خانواده اسمکتیت [۱۳] که بر اساس آن نمونه‌های مورد بررسی در محدوده اسمکتیت‌های سه‌هشت وجهی قرار می‌گیرند.



شکل ۷ موقعیت نمونه‌های رسی منطقه تشاب در نمودار سه متغیره [۱۴] جهت تفکیک انواع رس‌ها بر اساس کاتیون‌های هشت وجهی.

ترکیب اولیه تجمعات رسی

نمودارهای عناصر جزئی که برای تعیین ترکیب ماگمای مولد سنگ آذرین به کار می‌برند، می‌توانند برای تعیین خاستگاه و ترکیب سنگ‌های اولیه رس‌های بنتونیتی مورد استفاده قرار گیرند [۱۵]. استفاده انتخابی از عناصر کم‌حرکی چون Nb, Zr, Y, و Ti در این قبیل نمودارها، خطای ناشی از اتلاف عنصری در طی دگرسانی سنگ‌های اولیه و تبدیل آنها به ذخایر بنتونیتی را به کمترین مقدار می‌رساند. با ترسیم یافته‌های وابسته به نمونه‌های رس بنتونیتی و ایگنیمبریت‌ها در

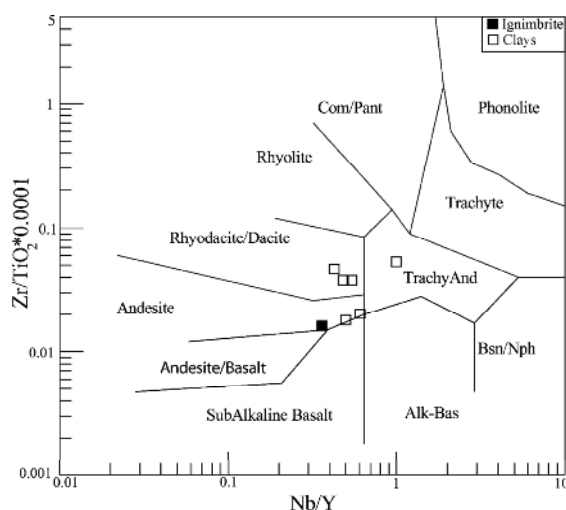
نمودار دو متغیره Zr/Ti-Nb/Y [۱۶] (شکل ۸) چنین مشخص می‌شود که نمونه ایگنیمبریتی ترکیبی در حد آندزیت و رس‌های بنتونیتی ترکیبی در حد آندزیت، تراکی آندزیت، ریوداسیت، و داسیت دارند.

عوامل کنترل کننده رفتار عناصر در طی فرآیند تبدیل ایگنیمبریت به رس بنتونیتی

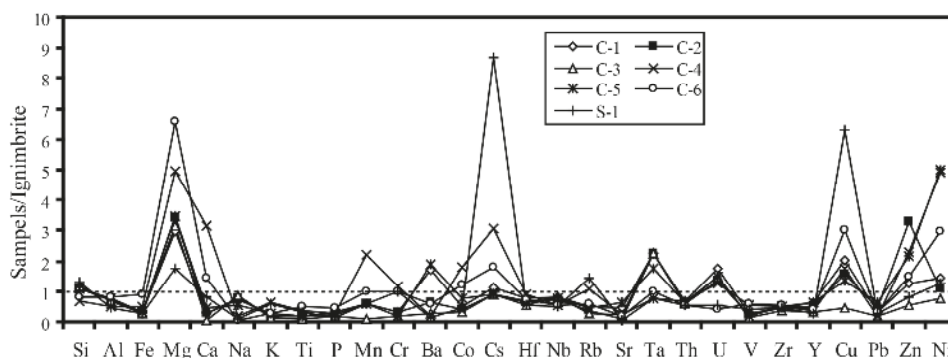
در این پژوهش، با توجه به بازه نسبتاً شدید تغییرات عناصر کم‌حرکی نظیر Al, Ti, Zr, Nb, و Hf (جدول ۱)، استفاده از روش‌های محاسبات تغییرات جرم برای تعیین عوامل کنترل

Mg، شستشو- تثبیت عناصری نظیر Si، Ca، Mn، Cr، Ba، Co، Cs، Rb، Ta، U، Zn، Cu، و Ni و تهی شدگی عناصری چون Al، Fe، K، Ti، P، Na، Hf، Nb، Sr، Th، V، Zr، و Y همراه بوده است (شکل ۹ و ۱۰).

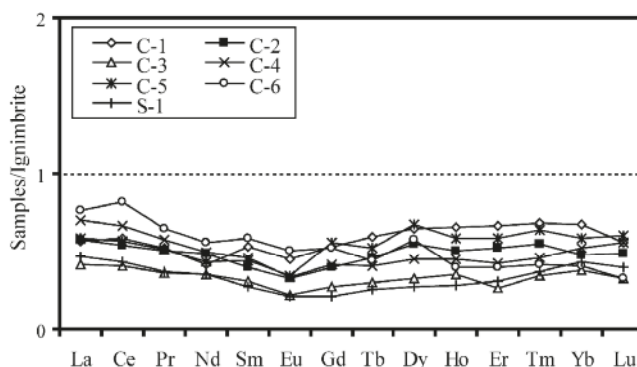
توزیع و تحرک عناصر در رس‌های بنتونیتی امکان‌پذیر نیست. بدین منظور، در این پژوهش از نسبت مقدار تمرکز عناصر در رس بنتونیتی نسبت به سنگ مولد ایگنیمبریتی استفاده شد. بر اساس نتایج بدست آمده، فرآیند دگرسانی (تبدیل) ایگنیمبریت به رس بنتونیتی در منطقه تشتاب با غنی‌شدگی



شکل ۸. موقعیت ایگنیمبریت و نمونه‌های رس بنتونیتی تشتاب در نمودارهای دو متغیره Nb/Y-Zr/TiO₂ [۱۶].



شکل ۹. نمودار عنکبوتی عناصر اصلی، فرعی، و جزئی به‌هنگار شده به ایگنیمبریت در نمونه‌های رس بنتونیتی و نمونه سیلیسی شده.



شکل ۱۰. نمودار عنکبوتی عناصر نادر خاکی به‌هنگار شده به ایگنیمبریت در نمونه‌های رس بنتونیتی و نمونه سیلیسی شده.

عناصر غنی شده: Mg تنها عنصر غنی شده در فرآیند تبدیل ایگنیمبریت ها به رس های بنتونیتی در منطقه تشتاب است. غنی شدگی این عنصر می تواند به تثبیت آن توسط کانی اسمکتیت مربوط باشد [۱۷].

عناصر تهی شده: خروج عناصری نظیر Al, Ti, Hf, و Nb, یک فرآیند غیرعادی در تکامل و توسعه رس های بنتونیتی محسوب می شود. این عناصر به طور معمول در فرآیندهای دگرسانی به صورت بی تحرک یا کم تحرک عمل می کنند [۱۸]. به نظر می رسد که عواملی نظیر pH پایین سیالات مسؤول دگرسانی، نسبت های بالای آب به سنگ، فراوانی لیگندهای کمپلکس ساز (CO_3^{2-} , F^- , Cl^- , PO_4^{3-} و SO_4^{2-}) در سیالات گرمایی، و سیستم زهکشی مناسب نقش بسیار مهمی در شستشوی عناصر نامبرده در طی توسعه رس های بنتونیتی ایفا نموده اند [۱۹]. خروج V نیز می تواند به نوبه خود دلیلی بر پایین بودن pH سیالات مسؤول دگرسانی باشد، چرا که این عنصر در pH اسیدی تحرک بالایی دارد [۲۰]. نتایج بررسی های زمین شیمیایی نشان داده است که دگرسانی های گرمایی بالا سبب تحرک عناصر با قدرت میدان بالا می شوند و شرایط لازم برای خروج عناصری نظیر Zr و Y از سیستم دگرسانی را فراهم می کنند. دگرسانی های گرمای پایین نیز باعث غنی شدگی عناصر یاد شده می شوند [۲۱]. با توجه به شستشوی این دو عنصر در طی فرآیند تبدیل ایگنیمبریت به رس بنتونیتی در منطقه تشتاب، می توان ادعا نمود که دمای بالای سیالات عامل دگرسانی یکی از عوامل اصلی کنترل کننده توزیع این دو عنصر در ذخیره مورد بررسی بوده است. تهی شدگی عناصری نظیر K و Sr نشان دگرسانی فلدسپارهای ایگنیمبریت ها و آزاد شدن بخشی عناصر نام برده به درون محلول های دگرسان کننده است. شستشوی Na نیز می تواند به دگرسانی شیشه های آتشفشانی و کانی های پلاژیوکلاز مربوط باشد. تهی شدگی P استدلال محکمی بر تخریب کانی های آپاتیت توسط سیالات دگرسان کننده است [۲۲].

بررسی های انجام شده نشان می دهد که pH های پایین و بالا به ترتیب سبب تهی شدگی و غنی شدگی REE ها طی توسعه و تکامل سیستم های دگرسانی می شوند [۲۳]. با توجه به تهی شدگی REE ها می توان ادعا نمود که pH مهمترین عامل کنترل کننده توزیع لانتانیدها در طی توسعه ذخیره مورد بررسی بوده است. با وجود شباهت بسیار زیاد بین روند تهی-

شدگی لانتانیدها در نمونه های رس بنتونیتی و نمونه سیلیسی به نظر می رسد که پهنه سیلیسی موجود در بالای ذخیره در اثر شستشوی سیلیس حاصل از دگرسانی فلدسپارها و ترسیب آن در بالای سیستم ایجاد شده است (شکل ۹). در کل، به نظر می رسد که تغییرات شدید در میزان شستشو و غنی شدگی عناصر به ویژه عناصر اصلی و فرعی طی توسعه و تکامل ذخیره می تواند به اختلاف در میزان شدت دگرسانی مواد خاستگاه و تفاوت در میزان پایداری کانی های اولیه در برابر دگرسانی مربوط باشد.

عناصر تهی شده - غنی شده: تهی شدگی Si در برخی از نمونه های رس بنتونیتی نشان دهنده دگرسانی و تخریب فلدسپارها و در پی آن آزاد شدن سیلیس به درون محلول های مسؤول دگرسانی، و غنی شدگی آن در برخی از نمونه ها دلیلی بر حضور ریزرگچه های سیلیسی در نمونه های مورد بررسی است. تهی شدگی Ca در برخی از نمونه ها به علت حلالیت بالای آن در محیط های دگرسانی و غنی شدگی آن ممکن است به دلیل قرارگیری آن در موقعیت های بین لایه ای رس ها و یا به واسطه تشکیل کانی کلسیت و دولومیت رخ داده باشد [۲۴]. تهی شدگی Mn از سیستم به شکسته شدن کانی های فرومنیزین مربوط است. غنی شدگی Mn می تواند به واسطه حضور این عنصر در موقعیت های بین لایه ای در شبکه کانی مونت موریلونیت و یا جایگزینی آن به جای یون های Ca^{2+} حل شده صورت گرفته باشد [۱۷]. وجود دو روند کاهشی و افزایشی برای U طی تکوین و توسعه ذخیره اشاره ضمنی به تغییر مقدار پتانسیل اکسایش - کاهش محیط نهشت دارد. بررسی های انجام شده نشان داده است که توزیع عناصری نظیر Cr, Co, و Ni در محیط های دگرسانی با تغییرات pH محیط در ارتباط است. تمرکز این عناصر در سیستم های دگرسانی با افزایش pH روند فزونی به خود می گیرد [۲۵]. با توجه به روندهای کاهشی - افزایشی عناصر نامبرده که تغییرات و نوسانات pH محیط تشکیل ذخیره تشتاب ممکن به نظر می رسد. خروج عناصری نظیر Ba, Cs, و Rb در برخی از نمونه های مورد بررسی نشان دهنده دگرسانی فلدسپارها توسط سیالات دگرسان کننده و غنی شدگی آنها به فرآیندهای جذب سطحی توسط کانی های رسی وابسته است. تهی شدگی و غنی شدگی Ta به ترتیب نشان دهنده pH پایین محلول های مسؤول دگرسانی و جذب سطحی این عنصر توسط کانی های

قدردانی

نگارندگان از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه تبریز برخوردار بوده‌اند، لذا شایسته است نهایت سپاس و قدردانی خود را ابراز دارند. نگارندگان همچنین از نظرات و پیشنهادات ارزنده و سازنده داوران محترم مجله سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

[1] Calagari A. A., Abedini A., Fatahi S., "Mineralogical and geochemical of the Sangab bentonite deposit, Isfahan province, Iran", Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen 277 (2015) 125-139.

[۲] ملک محمودی ف.، خلیلی م.، مکی زاده م.، "مطالعات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی دگرسانی گرمایی و کانی‌زایی در کوه تشتاب خور (شمال شرق استان اصفهان)"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، (۱۳۸۹) ص ۱۰۸.

[۳] نظری م.، "کانی‌شناسی و ژئز آگات‌ها و ژئودهای شرق خور و رابطه آنها با تشکیل بنتونیت‌ها"، دومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، (۱۳۷۴) ص ۴۸۷-۴۸۵.

[۴] نوروزی ج.، اسدی ه. و طباطبایی م.، "بررسی آلتراسیون های سنگ های آذرین منطقه خور و بیابانک در ارتباط با پتانسیل یابی معدن بنتونیت با استفاده از داده های ماهواره ای ETM+ و پی جویی صحرایی"، پایان نامه کارشناسی، (۱۳۸۶) ص ۶۳.

[5] Hints R., Kirsimäe K., Somelar P., Kallaste T., Kiipli T., "Multiphase Silurian bentonites in the Baltic Palaeobasin", Sedimentary Geology 209 (2008) 69-79.

[6] Savage D., Walker C., Arthur R., Rochelled C., Odae C., Takase H., "Alteration of bentonite by hyperalkaline: A review of the role of secondary minerals", Physics and Chemistry of the Earth 32 (2007) 287-297.

[۷] مهروری ر.، نقره ثیان م.، مکی زاده م.، پورنقشبند ع.، "بررسی کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی کانسار بنتونیت مهرآباد (شرق اصفهان)"، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال نوزدهم، شماره ۱ (۱۳۹۰) ص ۳-۱۴.

[۸] فتاحی ش.، کلاگری ع. ا.، عابدینی ع.، باقری ه.، "کانی‌شناسی و زمین‌شیمی ذخیره بنتونیت تمینان، جنوب باختر نایین، استان اصفهان"، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال بیست و سوم، شماره ۳ (۱۳۹۴) ص ۳۹۱-۴۰۲.

رسی است. تهی‌شدگی Cu و Zn به ترتیب اشاره ضمنی به دگرسانی فلدسپارها و کانی‌های فرومنیزین طی توسعه و تکامل ذخیره دارد. غنی‌شدگی این دو عنصر نیز در برخی از نمونه‌ها می‌تواند دلیلی بر ترکیب این دو عنصر در ساختار بلوری کانی‌های رسی باشد [۲۶].

برداشت

مهمترین نتایج حاصل از بررسی کانی‌شناسی و زمین‌شیمی ذخیره رس بنتونیتی تشتاب (جنوب شرقی خور و بیابانک) عبارتند از:

۱- رس‌های بنتونیتی منطقه تشتاب از فازهای کانیایی اصلی مونت‌موریلونیت، ساپونیت، کوارتز، نانترونیت، بیدلیت، میکروکلین، آنورتیت، ایلیت، آلبیت، و کلسیت تشکیل شده‌اند که با کانی‌هایی نظیر ورمیکولیت، سانیدین، کلریت، اورتوکلاز، اکتینولیت، و دولومیت در مقادیر کمتر همراهی می‌شوند.

۲- نمونه‌های رس بنتونیتی تشتاب ترکیبی در حد اسمکتیت-های دو هشت‌وجهی داشته و می‌تواند در رده اسمکتیت‌های قابل انبساط قرار گیرند.

۳- نتایج شیمی کانی نشان می‌دهد که رس‌های بنتونیتی منطقه تشتاب از نظر کانی‌شناسی ترکیبی در حد بیدلیت-مونت‌موریلونیت-نانترونیت دارند.

۴- عواملی نظیر pH پایین سیالات مسؤل دگرسانی، نسبت-های بالای آب به سنگ، فراوانی یون‌های کمپلکس ساز در سیالات گرمایی، و سیستم زهکشی مناسب نقش مهم و ارزنده-ای در شستشوی عناصر کم‌تحرکی نظیر Al, Ti, Hf, و Nb در فرایند تبدیل ایگنیمبریت‌ها به ذخیره بنتونیتی ایفا نموده‌اند.

۵- توزیع، تحرک و غنی‌شدگی عناصر اصلی، فرعی، جزئی، و خاکی نادر طی توسعه رس‌های بنتونیتی منطقه تشتاب تابعی از دمای بالای محلول‌های گرمایی، اختلاف در میزان شدت دگرسانی مواد خاستگاه، تفاوت در میزان پایداری کانی‌های اولیه در برابر دگرسانی، و تغییرات pH و Eh محیط دگرسانی است.

۶- ترکیب در ساختار بلوری بیشترین نقش را در تمرکز و غنی‌شدگی Cu و Zn در ذخیره داشته است.

۷- غنی‌شدگی Mn در رس‌های بنتونیتی به واسطه حضور این عنصر در موقعیت‌های بین لایه‌ای در شبکه کانی‌های مونت-موریلونیت و یا جایگزینی آن به جای یون‌های Ca^{2+} حل شده صورت گرفته است.

- [19] Fulignati P., Gioncada A., Sbrana A., "Rare-earth element (REE) behaviour in the alteration facies of the active magmatic-hydrothermal system of Volcano (Aeolian Islands, Italy)", *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 88 (1999) 325-342.
- [20] Kadir S., Akbulut A., "Mineralogy, geochemistry and genesis of the Taşoluk kaolinite deposits in pre-Early Cambrian metamorphites and Neogene volcanites of Afyonkarahisar, Turkey", *Clay Minerals* 44 (2011) 89-112.
- [21] Salvi, S., Williams-Jones, A. E., "The role of hydrothermal processes in concentrating high-field strength elements in the strange Lake peralkaline complex, northeastern Canada", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60 (1996) 1917-1932.
- [22] Zeilinski R. A., "The mobility of uranium and other elements during alteration of rhyolite ash to montmorillonite: a case study in the Troublesome formation, Colorado, U.S.A", *Chemical Geology* 35 (1982) 185-204.
- [23] Patino L. C., Velbel M. A., Price J. R., Wade, J. A., "Trace element mobility during spheroidal weathering of basalts and andesites in Hawaii and Guatemala", *Chemical Geology* 202 (2003) 343-364.
- [24] Christidis G. E., "Comparative study of the mobility of major and trace elements during alteration of an andesite and a rhyolite to bentonite in the islands of Milos and Kimolos, Aegean, Greece", *Clays and Clay Minerals* 46 (1988) 379-399.
- [25] Arslan M., Kadir S., Abdioglu E., Kolayli H., "Origin and formation of kaolin minerals in saprolite of Tertiary alkaline volcanic rocks, Eastern Pontides, NE Turkey", *Clay Minerals* 41 (2006) 597-617.
- [26] Vogt K., Kostner H.M., "Zur Mineralogie, Kristallchemie und Geochemie einiger Montmorillonite aus Bentoniten", *Clay Minerals* 13 (1978) 25-43.
- [9] Ghasemi A., Talbot C. J., "A new tectonic scenario for the Sanandaj- Sirjan zone (Iran)", *Journal of Asian Earth Sciences* 26 (2006) 683-693.
- [10] Technoexport Company., "Geology of the Khur. Geological Survey of Iran", 1:100000 Series (1984) Sheet 70058.
- [11] Kretz R., "Symbols for rock-forming minerals", *American Mineralogists* 68 (1983) 277-279.
- [12] Christidis G.E., "Validity of the structural formula method for layer charge determination of smectite: Are-evaluation of published data", *Applied Clay Science* 42 (2008) 1-7.
- [13] Weaver C. E., Pollard L. D., "The Chemistry of Clay Minerals. Elsevier", Amsterdam, (1973) 213p.
- [14] Guven N., "Smectite in hydrous Phyllosilicates: Reviews in mineralogy", *Mineralogical Society of America* 19 (1988) 497-559.
- [15] Spears D.A., Kanaris-Sotirios R., Riley N., Krause P., "Namurian bentonites in the Pennine basin, UK-origin and magmatic affinities", *Sedimentology* 46 (1999) 385-401.
- [16] Winchester J. A., Floyd P. A., "Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements", *Chemical Geology* 20 (1977) 325-343.
- [17] Muchangos A. C., "The mobility of rare-earth and other elements in process of alteration of rhyolitic rocks to bentonite (Lebombo Volcanic Mountainous Chain, Mozambique)", *Journal of Geochemical Exploration* 88 (2006) 300-303.
- [18] Jiang N., Sun S., Chu X., Mizuta T., Ishiyama D., "Mobilization and enrichment of high-field strength elements during late- and post-magmatic processes in the Shuiquangou syenitic complex, Northern China", *Chemical Geology* 200 (2003) 117-128.